

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук, профессора Рябочкиной Полины Анатольевны на диссертационную работу Снеткова Ильи Львовича «Особенности тепловых эффектов в новых оптических материалах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика» (Диссертационный совет 24.1.238.01. при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН»)

Актуальность работы

Твердотельные лазеры высокой средней мощности широко используются в современных технологических процессах. Для обеспечения необходимых технических характеристик возникает необходимость функционального совершенствования данных лазерных систем. Одним из главных ограничивающих факторов дальнейшего роста средней мощности излучения лазерных систем при сохранении качества лазерного пучка являются тепловые эффекты в оптических элементах мощных лазеров. В соответствии с этим поиск методов их уменьшения и компенсации является крайне актуальной задачей. Тепловые эффекты зависят от физических характеристик оптических материалов, а в случае оптических элементов, вырезанных из кристаллов, также зависят от ориентации кристаллографических осей. Подбирая соответствующим образом оптические материалы, с учетом ориентации кристаллографических осей, можно ослабить тепловые эффекты, и тем самым уменьшить искажения характеристик лазерного излучения, связанных с тепловыми эффектами.

В соответствии с этим, поиск новых материалов, измерение их термооптических характеристик и развитие теоретических подходов к вопросам возникновения и способам уменьшения влияния тепловых эффектов являются актуальной задачей лазерной физики.

Научная новизна результатов работы определяется тем, что в ней:

- 1) Продемонстрирована связь между термонаведенными поляризационными искажениями в единичном элементе из одного монокристаллического материала и в системе двух элементов из другого монокристаллического материала в случае их кубической симметрии и ориентации кристаллографических осей [001].

- 2) Решена задача об оптимальной ориентации магнитооптического элемента изолятора Фарадея из монокристаллического материала с $\xi < 0$, в которой минимизируется значение термонаведенной деполяризации.
- 3) Аналитически проведен анализ астигматичной части термонаведенных фазовых искажений излучения при прохождении оптического элемента из монокристаллического материала и решена задача об оптимальной ориентации, в которой астигматизм фазовых искажений минимизируется.
- 4) Предложен способ определения параметра ξ и знака термооптической характеристики Q по измерению астигматизма фазовых искажений в монокристаллическом элементе с ориентацией $[001]$.
- 5) Предложены ряд новых оптических схем изоляторов Фарадея с компенсацией термонаведенных поляризационных искажений, позволяющих по сравнению с ранее известными схемами увеличить степень изоляции приборов при работе с высокой средней мощностью. Сформулирован критерий выбора оптической схемы изолятора Фарадея с компенсацией термонаведенной деполяризации для конкретного магнитооптического материала.
- 6) Получены аналитические выражения, описывающие изменение характера зависимости термонаведенной деполяризации от лазерной мощности при возникновении фарадеевского вращения в монокристаллическом элементе с большим (или близким к нулю) по абсолютной величине параметром пьзооптической анизотропии.
- 7) Исследованы магнитооптические и термооптические свойства ряда новых перспективных стеклянных, монокристаллических и керамических материалов. Исследованы свойства первых образцов керамики полторных оксидов ряда редкоземельных элементов (Tb_2O_3 , Dy_2O_3 , Ho_2O_3 , Er_2O_3 , Yb_2O_3), керамики TAG, монокристаллов кремния и $Zn_4V_6O_{13}$.

Практическая значимость диссертации определяется необходимостью создания оптических элементов и узлов лазерных систем, в меньшей степени подверженных тепловым эффектам, что позволит поднять эффективность твердотельных лазеров с высокой средней и пиковой мощностью излучения, а также разработкой методов создания изоляторов Фарадея для мощных лазеров и специальных условий применения.

Анализ содержания диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего и работы автора, и списка физических величин и сокращений, используемых в настоящей

работе. Общий объем диссертации составляет 276 страницы, включая 77 рисунков, 9 таблиц и список литературы, содержащий 456 наименования.

Во введении приведен подробный обзор научных исследований по тематике диссертации, описаны полученные на настоящий момент результаты, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены защищаемые положения. Описаны структура, объем и краткое содержание диссертационной работы, приведены сведения о достоверности полученных результатов. Приведены сведения о публикациях, апробации работы и о личном вкладе автора.

В первой главе приведено подробное теоретическое описание тепловых эффектов в системе оптических элементов, разделенных вращателями поляризации с учетом произвольного направления кристаллографических осей, произвольного материала и произвольной величины фарадеевского вращения в каждом из элементов. Получены необходимые аналитические формулы для описания термонаведенных поляризационных и фазовых искажений в монокристаллическом оптическом элементе с кубической симметрией 432 , $\bar{4}3m$ и $m\bar{3}m$. Проведен анализ и найдена связь поляризационных термонаведенных искажений в одиночном элементе и в системе оптических элементов, разделенных кварцевым вращателем. Показано, что из любого кубического монокристалла с ориентацией $[001]$ можно изготовить композитный элемент состоящий из двух ОЭ и кварцевого вращателя, расположенного между ними, который в приближении слабого двулучепреломления будет вносить термонаведенные поляризационные искажения в проходящее излучение полностью искажениям, идентичные вносимым одиночным ОЭ из любого другого наперед заданного кубического монокристалла в ориентации $[001]$.

Во второй главе приведено описание особенностей термонаведенных эффектов в одиночном оптическом элементе, связанных с параметрами используемого материала, и использованию этих особенностей для ослабления возникающих тепловых эффектов. Получено решение задач о поиске оптимальной ориентации монокристаллического элемента для минимизации поляризационных и фазовых искажений в материалах с отрицательным параметром пьезооптической анизотропии при наличии фарадеевского вращения. Найдены углы Эйлера, определяющие оптимальные ориентации и показано, что эти углы для минимизации поляризационных (ориентация $[C]$) и для минимизации фазовых (ориентация $[P]$) искажений различны. Рассмотрены особенности термонаведенной деполяризации в материалах с большой и близкой к нулю по абсолютной величине параметра пьезооптической анизотропии ξ , а также с малым

значением термооптической характеристики Q (или Q_{eff}) и малым коэффициентом линейного расширения.

В третьей главе представлены результаты исследования особенности компенсации тепловых эффектов, связанных с материальными параметрами. Предложена, исследована и экспериментально реализована схема изолятора Фарадея с компенсацией термонаведенной деполяризации, вызванной термонаведенным линейным двулучепреломлением, методом противовращения. Предложена и проанализирована схема изолятора Фарадея с компенсацией термонаведенной деполяризации при использовании монокристаллических элементов с отрицательным параметром пьезооптической анизотропии, вырезанных в ориентации [С]. Предложена и исследована схема ИФ с компенсацией деполяризации, вызванной неоднородным фарадеевским вращением из-за градиента температуры и температурной зависимости постоянной Верде. Предложен и верифицирован метод компенсации термонаведенной деполяризации в отсутствии циркулярного двулучепреломления при использовании двух ОЭ из отличающихся материалов.

В четвертой главе описаны результаты экспериментального исследования свойств новых магнитооптических материалов для применения их в изоляторах Фарадея. Проведен анализ критериев выбора магнитооптического материала для изоляторов Фарадея в зависимости от параметров лазерного излучения. Выделены основные материальные характеристики сред важные для реализации изоляторов Фарадея, обеспечивающего высокую степень изоляции при высокой средней мощности лазерного излучения. Исследованы оптические и магнитооптические свойства ряда керамик полторных оксидов редкоземельных элементов (Tb_2O_3 , Dy_2O_3 , Ho_2O_3 , Er_2O_3 , Yb_2O_3 ,) и определены области их применимости. Исследованы оптические, магнитооптические и термооптические свойства керамики TAG. Исследованы магнитооптические и термооптические свойства высокочистого монокристаллического кремния. Показано, что использование высокочистого монокристаллического кремния в качестве магнитооптического материала для изоляторов Фарадея и криогенных изоляторов Фарадея, работающих в условиях мощного лазерного излучения в диапазоне 2 мкм, в том числе в детекторах гравитационных волн нового поколения, имеет очень высокий потенциал. Исследованы магнитооптические свойства высокочистых теллуритных и халькогенидных стекол разных составов. Показано, что стекло состава $Ge_{10}Sb_6As_{22}S_{62}$ обладает малым поглощением, достаточно высоким значением постоянной Верде в области 2 мкм, относительно малым

значением термооптической характеристики Q . Исследована возможность увеличить значение постоянной Верде парамагнитного керамического материала путем его легирования редкоземельными элементами.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов экспериментальных исследований обосновывается использованием типовых и отработанных методик измерений исследований, соответствующих решаемым задачам, использованием стандартных средств измерения, корректной обработкой результатов измерений, повторяемостью получаемых экспериментальных данных и сравнением полученных результатов с расчетными соотношениями. Теоретические исследования проводятся с использованием признанных в мире рабочих моделей, адекватно описывающих протекающие процессы. Особенно важно то, что для всех полученных результатов расчетов дается физическая интерпретация.

Диссертационная работа представляет целостное исследование. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации И.Л. Снеткова, являются обоснованными. Достоверность научных положений, выводов и практических результатов, полученных в диссертационной работе, обсуждается автором в тексте диссертации, основана на анализе автором выполненных ранее научно-исследовательских работ по предмету исследования и подтверждается сравнением полученных И.Л. Снетковым в ходе выполнения работы экспериментальных данных и результатов математического моделирования с известными из литературы теоретическими и экспериментальными результатами.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации

Основные результаты диссертации изложены в 30 публикациях в высокорейтинговых научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий и рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, а также в тексте 26 тезисов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций. В публикациях достаточно полно отражены главные результаты диссертации.

Личный вклад автора четко сформулирован. Автор внес решающий вклад в определение и постановку всех задач диссертационной работы, выбор методов исследования и способов измерения, проведение экспериментальных и численных исследований, анализ и интерпретацию полученных результатов. Ряд результатов, вошедших в диссертацию,

опубликованы без соавторов, в половине публикаций Снетков И.Л. является первым автором.

Аннотация достаточно полно передает смысл диссертации, а его содержание в целом соответствует содержанию диссертации.

Замечания по работе:

1. В диссертационной работе встречается следующая фраза: «неоднородная фазовая пластинка, у которой направления собственных поляризаций и набег фазы неоднородно зависят от координат в поперечном сечении». Данная фраза представляется некорректной, так как поляризация и набег фазы-это характеристики оптического излучения, прошедшего через фазовую пластинку, а не самой пластинки.

2. Приведенная на стр. 79 формулировка автора об отсутствии «ответов на вопросы о влиянии величины циркулярного двулучепреломления на направление оптимальной ориентации, на сколько возможно уменьшить деполяризацию выбором оптимальной ориентации и насколько при этом улучшаться характеристики изолятора Фарадея при высокой мощности» представляется также не корректной. По-видимому, автор работы ведет речь о выявлении зависимости величины циркулярного двулучепреломления от выбора направления оптимальной ориентации и зависимости характеристик изолятора Фарадея от выбора направления оптимальной ориентации при высокой мощности лазерного излучения.

3. На стр. 87 автор оценивает коэффициент пропорциональности между нормированной мощностью тепловыделения и мощностью лазерного излучения для кристаллов TSAG; NTF KTF, которые составляют: TSAG $P_{laser}/p=109$ кВт; NTF $P_{laser}/p=37$ Вт; KTF $P_{laser}/p=7.2$ кВт. Как объяснить разницу более чем в 2 порядка соответствующих отношений для кристаллов NTF и KTF?

4. Для верификации термонаведенных фазовых искажений автор выбрал кристаллы TGG, CaF₂ с ориентацией кристаллографических осей [001] и магнитооптическое стекло марки МОС. Их размеры составили: TGG ($R_0 = 10$ мм, $L = 9.3$ мм), CaF₂ ($R_0 = 6$ мм, $L = 7$ мм), магнитооптическое стекло марки МОС – 103 ($R_0 = 8$ мм, $L = 45$ мм). Чем обусловлен выбор размеров данных образцов? Влияет ли размер образца на результат эксперимента?

5. Для верификации результатов расчетов и сравнительной оценки характеристик термонаведенных искажений лазерного излучения автор проводил эксперименты с использованием различных материалов (кристаллы TSAG; NTF, KTF, МОС – 103), которые характеризовались различным

оптическим качеством (неоднородности, включения, микро/макро напряжения и др.) и вносили вклад в деполяризацию лазерного излучения. Однако, автором диссертационной работы не указывается какой именно вклад «холодная деполяризация» имеет для каждого из исследованных им материалов.

6. Что означает подпись к рисунку 44, стр.182 «Спектры пропускания в линии»?

7. Каким образом в результате визуального наблюдения в керамике $Y_2O_3:Dy$ авторы обнаружили включения второй кристаллической фазы, предположительно орторомбического перовскита $DyLaO_3$?

8. В тексте очень много некорректных выражений и словосочетаний, например, «лазерная мощность» (стр. 52,124), «ориентации вырезки кристалла» (стр. 104), «разделив МОЭ на две части и свернув их в разные стороны» (стр. 126) и т.д., а также грамматических ошибок и стилистических неточностей.

Заключение.

Указанные замечания никак не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, новизну и оригинальность обсуждаемых в ней результатов.

Диссертационная работа Снеткова Ильи Львовича «**Особенности тепловых эффектов в новых оптических материалах**», является законченным исследованием. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, хорошо обоснованы, обладают научной новизной и представляют как научную, так и практическую ценность. Сочетание научной новизны, достоверности результатов и практической значимости позволяет заключить, что диссертационная работа Снеткова Ильи Львовича является законченной научно-квалифицированной работой, которую можно квалифицировать как научное достижение высокого уровня, соответствует паспорту специальности 1.3.19 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам) и полностью отвечает требованиям, установленным Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации, установленным в разделе II Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (с изменениями на 16 октября 2024 года), а ее автор И.Л. Снетков заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации Снеткова И.Л.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
(физика конденсированного состояния),
профессор, заведующий кафедрой
фотоники, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет
им. Н. П. Огарёва
430005, Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68
Телефон +7 (8342) 29-07-95
e-mail: ryabochkina@freemail.mrsu.ru



Рябочкина
Полина
Анатольевна



Сведения об оппоненте

Рябочкина Полина Анатольевна,

доктор физико-математических наук, профессор

Специальность «Физика конденсированного состояния»

Адрес: 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68

Телефон +7 (8342) 29-07-95

e-mail: ryabochkina@freemail.mrsu.ru

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва

Должность: заведующий кафедрой фотоники

Приложение.

Публикации по специальности диссертации, опубликованные в последнее время:

1. S.A. Artemov, A.N. Belyaev, O.S. Bushukina, S.A. Khrushchalina, S.V. Kostin, A.A. Lyapin, P.A. Ryabochkina, A.D. Taratynova. Morphological changes of veins and perivenous tissues during endovenous laser coagulation using 2- μ m laser radiation and various types of optical fibers. *Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders*. V. 10 (3) (2022). P. 749-757. <https://doi.org/10.1016/j.jvsv.2021.08.018>.
2. L.B. Zhou, J.Y. Zou, W.X. Zheng, T. Zhang, B. Xu, X.D. Xu, A.A. Lyapin, J. Xu. More than 2.3 W diode-pumped quasi-continuous-wave Pr,Mg:SrAl₁₂O₁₉ bulk laser and the first demonstration of Co:ZnSe-based passively Q-switched deep red laser at 724 nm. *Optics and Laser Technology*. V. 145 (2022) P. 107471. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107471>
3. Wanxin Zheng, Jingyu Zou, Dong Wang, Bin Xu, Andrey Lyapin, Polina Ryabochkina, Xudong Cui, Vadim Semashko, Stella Korableva. Exploring the potential of Pr³⁺:LiY_{0.3}Lu_{0.7}F₄ mixed crystal for diode-pumped watt-level continuous-wave lasers in the visible region. *Optics and Laser Technology*. V. 151 (2022) P. 108023. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108023>.
4. M.A. Borik, A.S. Chislov, G.M. Korableva, A.V. Kulebyakin, I.E. Kuritsyna, N.A. Larina, E.E. Lo-monova, F.O. Milovich, V.A. Myzina, P.A. Ryabochkina, N.Yu. Tabachkova. Structure and transport characteristics of single crystals of zirconia stabilized by scandia and co-doped with terbium oxide. *Solid State Ionics*. V. 375 (2022) P. 115836. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2021.115836>.
5. S.A. Artemov, A.N. Belyaev, O.S. Bushukina, V.I. Davydkin, S.A. Khrushchalina, S.V. Kostin, P.A. Ryabochkina, A.D. Taratynova. Transformational features of the vein wall during a long-term period of endovenous laser ablation using 1910 nm laser radiation. Results of in-vivo experiments // *International Angiology* – 2023. – 42. DOI: 10.23736/S0392-9590.23.05013-7.
6. P.A. Ryabochkina, V.V. Balashov, T.V. Volkova, A.A. Lyapin, N.V. Sidorova, I.A. Yurlov, S.A. Khrushchalina. Nonradiative energy transfer between Yb³⁺ and Tm³⁺ ions in Y₂O₃:Tm, Yb ceramics / // *Journal of Luminescence* – 2023. – 253. DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.119485.
7. M.V. Chernov, S.V. Gushchin, A.M. Kuzmin, S.V. Kuznetsov, A.A. Lyapin, V. Yu Proydakova, P.A. Ryabochkina, V.V. Voronov, P.P. Fedorov. Infrared to visible up-conversion luminescence of SrF₂:Ho particles upon excitation of the 5I₇ level of Ho³⁺ ions // *Journal of Luminescence* – 2023. – V. 261. – P. 119942. DOI: 10.1016/j.jlumin.2023.119942.
8. P.A. Ryabochkina, S.A. Khrushchalina, S.V. Golodukhina, A.D. Taratynova, I.A. Yurlov, A.V. Ego-rysheva. Up-conversion luminescence and broadband white-light emission in La_{1-x}Er_xGa_{0.5}Sb_{1.5}O₆, Bi_{1-x}Er_xGeSbO₆ // *Journal of Luminescence* – 2023. – V. 255. – P.119569. DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.1195696 (Q1).
9. A.V. Egorysheva, P.A. Ryabochkina, E.F. Popova, S.A. Khrushchalina, I.A. Yurlov, S.V. Golodukhina. *Optical Materials* 152 (2024) 115425. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115425>.
10. Yuquan Zhao, Mengyuan Xiong, Ye Han, Dong Wang, Bin Xu, Andrey Lyapin, Polina Ryabochkina, Alexey Nizamutdinov, Stella Korableva, Vadim Semashko. Watt-Level Single-Frequency Pr:LiY_{0.3}Lu_{0.7}F₄ Mixed Crystal Laser in Red Spectral Region. *IEEE*

Официальный оппонент



Рябочкина
Полина
Анатольевна

