

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

доктора физико-математических наук Цветкова Владимира Борисовича  
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**

Термонаведенные эффекты в активных и пассивных оптических элементах лазерных систем являются одними из главных факторов, ограничивающих среднюю мощность генерации. Тепловые эффекты зависят как от физических характеристик оптических материалов, так и от направления распространения света в кристаллическом материале относительно кристаллографических осей, в том числе и в кристаллах, являющихся оптически изотропными при отсутствии неоднородного распределения температуры по материалу.

Влияние тепловых эффектов в оптических материалах на работу лазерной системы может быть значительно ослаблено как правильным подбором материала, включая кристаллографическую ориентацию, так и применением специально подобранных сочетаний различных материалов.

Хотя поиск новых материалов и теоретические подходы к вопросам возникновения и возможных методов уменьшения влияния термооптических эффектов рассматриваются на протяжении ряда лет, для целого ряда вопросов решения найдено не было, поэтому актуальность темы исследований Снеткова И.Л не вызывает сомнения.

### **Научная новизна результатов работы определяется тем, что в ней:**

- Определена 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].

- Точно решена задача об оптимальной ориентации монокристаллического элемента из произвольного магнитооптического материала с  $\xi < 0$ , в которой минимизируется значение термонаведенной деполяризации. Проведен анализ влияния величины циркулярного двулучепреломления на положение оптимальной ориентации и на величину термонаведенной деполяризации.
- Точно решена задача об оптимальной ориентации монокристаллического элемента из произвольного материала в которой минимизируется астигматизм фазовых искажений как при наличии циркулярного двулучепреломления, так и при его отсутствии. Проведен анализ аналитических выражений для фазовых искажений излучения, возникающих при прохождении термонагруженного монокристаллического оптического элемента с произвольным направлением кристаллографических осей и произвольной величиной циркулярного двулучепреломления.
- Предложен и реализован способ определения параметра  $\xi$  и знака термооптической характеристики  $Q$  по измерению астигматизма фазовых искажений в монокристаллическом элементе.
- Предложены схемы изолятора Фарадея с ослаблением и компенсацией термонаведенного двулучепреломления при использовании магнитооптических элементов из монокристаллического материала с  $\xi < 0$ , вырезанных в критической ориентации [С].
- Предложена схема полной компенсации термонаведенной деполяризации в системе двух оптических элементов, изготовленных из разных материалов.
- Исследованы магнитооптические и термооптические свойства ряда новых перспективных стеклянных, монокристаллических и керамических материалов. Исследованы свойства первых образцов полуторнооскидной керамики ряда редкоземельных элементов ( $Tb_2O_3$ ,  $Dy_2O_3$ ,  $Ho_2O_3$ ,  $Er_2O_3$ ,  $Yb_2O_3$ ) и керамики TAG.

**Практическая значимость диссертации определяется** как необходимостью создания эффективных твердотельных лазеров и усилителей для лазеров с высокой средней и пиковой мощностью излучения, так и

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, и обоснована актуальность темы диссертации. Автором сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, методология и методы исследования, а также научная и практическая значимость проведенных исследований. Приведены сведения о публикациях и апробации работы на семинарах и конференциях, о личном вкладе автора и достоверности полученных результатов.

**В первой главе** приведен подробное описание тепловых эффектов в оптических элементах с учетом кристаллической симметрии и произвольным направлением света относительно кристаллографических осей. Получены необходимые аналитические формулы для описания термонаведенной деполяризации и тепловой линзы в ОЭ из монокристаллического материала с кубической симметрией  $432, \bar{4}3m$  и  $m\bar{3}m$ .

**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. Проведен анализ зависимости термонаведенной деполяризации от ориентации кристаллографических осей в материалах с отрицательным параметром пьзооптической анизотропии. Аналитически точно решена задача об поиске оптимальной ориентации, минимизирующей поляризационные искажения и астигматизм фазовых искажений в кристаллическом оптическом элементе с циркулярным двулучепреломлением. Рассмотрены особенности термонаведенной деполяризации в материалах с большой абсолютной величиной параметра пьзооптической анизотропии  $\xi$ , а также с малым значением термооптической

характеристики  $Q$  или  $Q_{eff}$ . Получены аналитические выражения и объяснено увеличение термонаведенной деполяризации при внесении материала в магнитное поле и возникновении в нем циркулярного двулучепреломления.

**В третьей главе** представлены результаты исследования особенности компенсации тепловых эффектов, связанных с материальными параметрами. Предложена схема изолятора Фарадея с компенсацией термонаведенной деполяризации, вызванной термонаведенным линейным двулучепреломлением, методом противовращения. Получены аналитические формулы для термонаведенной деполяризации в случае использования данной схемы изолятора Фарадея. Предложена и проанализирована схема изолятора Фарадея с компенсацией термонаведенной деполяризации, вызванной термонаведенным линейным двулучепреломлением, при использовании монокристаллических МОЭ 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 отсутствие циркулярного двулучепреломления при использовании двух ОЭ из отличающихся материалов.

**В четвертой главе** описаны результаты экспериментального исследования свойств материалов для применения их в устройствах, работающих на основе эффекта Фарадея. Проведен анализ критериев выбора магнитооптического материала для изоляторов Фарадея в зависимости от параметров лазерного излучения. Описаны преимущества и недостатки разных видов магнитооптических материалов. Выделены основные материальные параметры важные для реализации изоляторов Фарадея, обеспечивающего высокую степень изоляции при высокой средней мощности лазерного излучения. Исследованы оптические и магнитооптические свойства керамик полупрозрачных оксидов редкоземельных элементов ( $Tb_2O_3$ ,  $Dy_2O_3$ ,  $Ho_2O_3$ ,  $Er_2O_3$ ,  $Yb_2O_3$ ,). Определены области применимости, преимущества и недостатки исследуемых полупрозрачных оксидов, и их перспективность использования в качестве материалов для изоляторов Фарадея, работающих в лазерном излучении с высокой средней мощностью в различных спектральных диапазонах. Исследованы оптические, магнитооптические и термооптические свойства керамики TAG. Измерены зависимости спектра пропускания от длины волны, постоянной Верде от длины волны и

термонаведенной деполяризации от мощности лазерного излучения. 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 теллуридных и халькогенидных стекол разных составов. Показано, что стекло состава  $\text{Ge}_{10}\text{Sb}_6\text{As}_{22}\text{S}_{62}$  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. Показано, что легирование может улучшить спекаемость керамического материала и повысить температуру полиморфных переходов (при их наличии), однако, может существенно снизить коэффициент теплопроводности, увеличить коэффициент поглощения и при исследованных концентрациях практически не влияет на величину постоянной Верде.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

#### **Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность результатов работы основана на анализе автором выполненных ранее научно-исследовательских работ по предмету исследования, повторяемостью получаемых экспериментальных данных и сравнением полученных результатов с расчетными соотношениями.

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.

### **Замечания по работе**

Представленная работа выполнена на высоком научном уровне. Очень хорошо смотрится подробный аналитический обзор литературы с большой глубиной по времени и чрезвычайно подробное изложение теоретического описания тепловых эффектов в кристаллах. Вместе с тем, по диссертационной работе можно сделать следующие замечания.

1. Не совсем удачные определения, например «дефект кванта» (разница между энергиями кванта накачки и генерации, стр.14), «самонаведенные» тепловые эффекты.
2. Описание научной новизны перегружено подробностями и смешано с практической новизной.
3. Очень полезное, но недостаточно обоснованное представление данных на рисунке 38 – почему спектры пропускания приводятся именно по уровню 90% от теоретического.

### **Заключение.**

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Снеткова Ильи Львовича «**Особенности тепловых эффектов в новых оптических материалах**», является законченным исследованием, выводы основаны на большом и достоверном экспериментальном материале и подтверждаются математическими расчетами, выполненными с использованием адекватных моделей и исходных данных. 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 на соискание ученой

степени доктора физико-математических наук и отвечает требованиям, установленным Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.19 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, установленным в разделе II Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16 октября 2024 г., №1382), 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, главный научный сотрудник, и.о. руководителя НЦЛМТ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)  
Специальность 01.04.21  
119991, Москва, ул. Вавилова, 38  
Телефон +7 (499) 503-8777+390  
e-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

Владимир  
Борисович  
Цветков

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ  
СЕКРЕТАРЯ ИОФ РАН  
ГЛУШКОВ В.В.

*Глушкова В.В.*

## Сведения об оппоненте

Цветков Владимир Борисович,

доктор физико-математических наук

Специальность 01.04.21

Адрес: 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Телефон +7 (499) 503-8777+390

e-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

Место работы: Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Должность: главный научный сотрудник, и.о. руководителя НЦЛМТ ИОФ РАН

### Приложение.

Публикации по специальности диссертации, опубликованные в последнее время  
(библиографическая ссылка с указанием: названия статьи, названия журнала, в котором  
была опубликована статья, года публикации, DOI)

1. Zverev, A., Kamynin, V., Korobko, D., Filatova, S., Tsvetkov, V., Galagan, B., Sverchkov, S., Denker, B., Vel'miskin, V., Gladush, Y., Krasnikov, D., Nasibulin, A., & Belkin, M. Er/Yb-doped fiber laser with a repetition rate of ultrashort pulses of 484 MHz. // Optics Express, 2025 T. 33(11), C. 23334. DOI: 10.1364/oe.561404
2. Ovcharenko, B., Kamynin, V., Bagdasarov, V., Dolmatov, T., Trikshev, A., Ponarina, M., Tsvetkov, V., & Garnov, S. 1 joule arbitrary pulse shape hybrid laser source. // Applied Optics, 2025. T. 64(4), C. 757. DOI: 10.1364/ao.544196
3. Shirmankin, A. V., Kamynin, V. A., Trikshev, A. I., Rybaltovsky, A. A., Vasiliev, S. A., Lipatov, D. S., Yashkov, M. V., & Tsvetkov, V. B. CW and Pulsed Generation of Short Cavity Yb-Doped Phosphosilicate Fiber Laser. // Journal of Lightwave Technology, 2025. T. 43(3), C. 1358 DOI: 10.1109/jlt.2024.3474208
4. Fale, A. E., Fedoseev, A. I., Kamynin, V. A., Filatova, S. A., Nanii, O. E., Smirnov, A. P., & Tsvetkov, V. B. Optical Method of Laser Radiation Modulation Using a Resonance Transition from an Excited State. Journal of Lightwave Technology, 2025. T. 43(6), C. 2835. DOI: 10.1109/jlt.2024.3504276
5. Zhmykhov, V., Guryev, D., Tsvetkov, V. S., Pyrkov, Y., Shvedchenko, A., Dobretsova, E., Kuznetsov, S., Nikova, M., Tarala, V., & Tsvetkov, V. B. Yb:YSAG ceramics: An attractive thin-disk laser material alternative to a single crystal? // Ceramics International. 2024. T. 50(23), C. 50358. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.09.381
6. Lapin, V. A., Kravtsov, A. A., Suprunchuk, V. E., Tarala, L. V., Medyanik, E. V., Malyavin, F. F., Kuznetsov, S. V., Guryev, D. A., Zhmykov, V. Yu., & Tsvetkov, V. B. Influence of MgO and CaO sintering additives on thermophysical, luminescent and optical properties of LuAG: Yb<sup>3+</sup> laser ceramics. // Optical Materials, 2024. T. 157, C. 116353. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.116353
7. Zverev, A., Kamynin, V., Tsvetkov, V., Denker, B., Sverchkov, S., Vel'miskin, V., Gladush, Y., Krasnikov, D., & Nasibulin, A. Er-Yb all-fiber laser with a repetition rate for ultrashort pulses of 300 MHz. // Optical Fiber Technology, 2024. T. 88, C. 104007. DOI: 10.1016/j.yofte.2024.104007

8. Filatova, S.A et al. Dumbbell-Shaped Ho-Doped Fiber Laser Mode-Locked by Polymer-Free Single-Walled Carbon Nanotubes Saturable Absorber. // Nanomaterials. 2023. Т. 13, № 10. С. 1581. DOI: 10.3390/nano13101581
9. Guryev, D. A., Nikolaev, D. A., & Tsvetkov, V. B. (2023). Two-Mode Disk Laser with Subgigahertz Difference Frequency Based on a Degenerate Cavity. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2023. Т. 50(S2), С. 148 DOI: 10.3103/s1068335623140087
10. Filatova, S.A et al. Investigation of Absorption Dynamics from the Excited State  $^5I_7$  of Holmium Ions in Optical Silica-Based Fibers. // Journal of Lightwave Technology. 2023. DOI: 10.1109/JLT.2023.3278534
11. Bufetova, G. et al. Extra-High Pressure in the Core of Silica-Based Optical Fiber Preforms during the Manufacturing Process. // Photonics 2023, Т.10, № 3 С. 335 DOI: 10.3390/photonics10030335

Официальный оппонент



Владимир  
Борисович  
Цветков

ПОДПИСЬ

*Уветова В.В.*

ЗАВЕРЯЮ



СЕКРЕТАРЯ ИОФ РАН

*Глушкова В.В.*  
ГЛУШКОВА В.В.