

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Цветкова Владимира Борисовича на диссертационную работу Яковлева Алексея Ивановича «Влияние параметра оптической анизотропии на особенности термонаведенных эффектов в кубических кристаллах с учетом циркулярного двулучепреломления», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика (Диссертационный совет Д 002.069.02 при Институте прикладной физики РАН)

### 1. Актуальность работы

В последние годы все большее применение в промышленности и научных исследованиях получают лазеры, обладающие высокой средней и/или пиковой мощностью лазерного излучения с сохранением его высокого качества, которое определяется фазовыми и поляризационными искажениями. Большой интерес представляют исследования, посвященные физическим процессам и эффектам, возникающим при распространении лазерного излучения в оптических кристаллах и стеклах. Поэтому диссертационная работа Яковлева А.И., посвященная теоретическому расчету термонаведенных эффектов, и поиску методов их минимизации, а также экспериментальному исследованию оптических, магнитооптических и термооптических свойств для создания пассивной проходной оптики, активных элементов (АЭ) и магнитооптических элементов (МОЭ), является актуальной.

### 2. Научная новизна результатов определяется тем, что в ней:

- Получены и проанализированы аналитические выражения для тепловой линзы, учитывающие ее «поляризационный астигматизм», вызванный фотоупругим эффектом в упруго – изотропных кубических кристаллах, с

произвольной ориентацией кристаллографических осей в приближении слабого линейного двулучепреломления  $\delta_l$  при наличии произвольного циркулярного двулучепреломления  $\delta_c$ .

- В общем случае рассмотрена и решена задача о минимизации астигматизма тепловой линзы в кристаллическом ОЭ в произвольной ориентации кристаллографических осей или стеклянном оптическом элементе. Проведен аналитический и численный анализ, по результатам которого определены условия на параметр оптической анизотропии  $\xi$ , при которых возможно минимизировать или устранить астигматизм тепловой линзы в проходящем линейно – поляризованном излучении.
- Впервые предложен и верифицирован метод по созданию температурных градиентов в ОЭ при помощи внешнего нагревателя, использующийся при измерениях параметра оптической анизотропии  $\xi$ . Определены зависимости  $\xi$  от длины волны, температуры и концентрации активного иона в материалах (0 – 4.17) ат. %Yb и 10 ат. %Tb):CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, SrF<sub>2</sub>. Показано, что в данных материалах возможно полностью устранить либо «поляризационный астигматизм» тепловой линзы, либо термонаведенную деполяризацию излучения.
- Предложен способ измерения параметра оптической анизотропии  $\xi$  по измерению термонаведенных искажений тепловой линзы.
- Исследованы оптические, магнитооптические и термооптические свойства магнитооптических керамик (Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TAG, REE:TAG (REE = Ce, Pr, Ho) и теллуридных стекол различного состава. Измеренные свойства показывают перспективность использования (Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамика, в частности) в качестве магнитооптических элементов изоляторов Фарадея, вместо широко используемых на данный момент кристаллов и керамики TGG.

**3. Научная и практическая значимость диссертации определяется** необходимостью создания эффективных теоретических и экспериментальных методов определения влияния термонаведенных эффектов, возникающих из-за поглощения проходящего лазерного излучения на характеристики проходных оптических элементов (ОЭ), МОЭ изоляторов Фарадея и АЭ лазерных генераторов и усилителей.

#### **4. Общая характеристика работы**

Диссертационная работа структурно разделена на введение, три главы, заключение, список работ автора и список библиографических источников. Текст диссертации включает 125 страниц машинописного текста, 52 рисунка, 9 таблиц и список из 185 наименований цитируемой литературы.

**Во введении** приведен краткий обзор научных исследований по тематике диссертации, описаны полученные на настоящий момент результаты и обоснована актуальность темы диссертации, направленной на теоретическое описание термонаведенных фазовых искажений излучения в кристаллических и стеклянных ОЭ, и исследование возможности минимизации астигматизма тепловой линзы, возникающего при прохождении линейно поляризованного излучения через ОЭ, а также экспериментальное исследование оптических, термооптических и магнитооптических свойств кристаллических, стеклянных и керамических материалов, необходимых для создания перспективных оптических устройств лазерных систем. Автором сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость. Приведены структура диссертации, формы апробации и практическая применимость результатов диссертационной работы.

**В первой главе** теоретически исследуются фазовые искажения, возникающие в оптических элементах вследствие поглощения проходящего

лазерного излучения, в частности для аксиально – симметричной геометрии ОЭ и источников тепловыделения, а также в случае произвольной ориентации кристаллографических осей и величины циркулярного двулучепреломления. Сформулированы условия существования ориентации кристаллографических осей [P] в кубических кристаллах, при которой астигматизм тепловой линзы отсутствует. Аналитически и численно найдены ориентации кристаллографических осей, соответствующие ориентации [P]. Экспериментально верифицирован предложенный в настоящей работе метод определения параметра оптической анизотропии по измерению астигматизма тепловой линзы.

**Во второй главе** приведены результаты исследования зависимостей параметра оптической анизотропии  $\xi$  кубических кристаллов  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  и  $\text{SrF}_2$  от длины волны излучения в спектральном диапазоне 532 – 1070 нм, при изменении температуры в диапазоне 80 – 300 К и концентрации допанта в 10 ат.% Tb:CaF<sub>2</sub>, ((0 – 4.17) ат. % Yb):CaF<sub>2</sub> по измерению термонаведенной деполяризации излучения. В данной главе сделаны выводы о возможности использования рассматриваемых кристаллов в выделенных ориентациях кристаллографических осей [C] (при которой термонаведенная деполяризация излучения исчезает) и [P] (при которой астигматизм тепловой линзы отсутствует). С использованием измеренных значений параметра оптической анизотропии, были вычислены направления ориентации осей [C] и [P] в исследованных материалах, определяющие направления кристаллографических осей, в которых отсутствует термонаведенная деполяризация излучения и астигматизм тепловой линзы, соответственно.

**В третьей главе** представлены результаты исследования термооптических и магнитооптических свойств оптических материалов, а также возможностей применения их в устройствах, использующих эффект Фарадея. Обсуждаются вопросы, связанные с методами изготовления оптических

материалов и условий эксперимента, которые необходимо учитывать при измерениях постоянной Верде. Представлены результаты исследования магнитооптических и термооптических свойств керамик TAG, нелегированной и легированной ионами Се и Рг, и ионами Но, а также анализ литературных данных. Проведенные эксперименты позволили уточнить значения постоянной Верде керамик TAG и сделать выводы относительно влияния спекающих добавок и редкоземельных активаторов на их термооптические свойства. Также представлены данные по исследованию оптических и магнитооптических свойств керамик на основе оксидов редкоземельных металлов, а именно  $Dy^{3+}$  и  $Er^{3+}$ . Построены теоретические модели, позволяющие описать поведение постоянной Верде от длины волны, температуры и концентрации редкоземельных элементов.

**В заключении** представлен список основных результатов работы.

Таким образом, можно выделить следующие наиболее значимые результаты работы:

1. Для аксиально симметричных оптических элементов для любого аксиально – симметричного распределения плотности мощности тепловыделения, построена теоретическая модель, описывающая фазовые искажения излучения в ОЭ сделанных из кубического кристалла в произвольной ориентации кристаллографических осей или стекла, как в отсутствие так и при наличии циркулярного двулучепреломления  $\delta_c$ . Показано, что существуют оптимальные ориентации кристаллографических осей, при которых астигматизм тепловой линзы минимален. Направления этих ориентаций определяются параметром оптической анизотропии  $\xi$  используемого материала и величиной циркулярного двулучепреломления  $\delta_c$ , а величина астигматизма прямо пропорциональна мощности тепловыделения.

2. Показано, что в материалах с параметром оптической анизотропии  $\xi \leq 0.04$  путем выбора ориентации кристаллографических осей можно

полностью устранить астигматизм тепловой линзы при произвольной величине циркулярного двулучепреломления  $\delta_c$ . В общем случае имеется бесконечное число ориентаций [P], при которых астигматизм тепловой линзы отсутствует. Найдена аналитическая связь между углами Эйлера ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Phi$ ), определяющими ориентации [P].

3. Кристаллы фторидов Tb:CaF<sub>2</sub>, Yb<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, SrF<sub>2</sub> обладают отрицательным параметром оптической анизотропии. Следовательно, в них существуют ориентации кристаллографических осей [C] и [P], при которых не возникает термонаведенная деполяризация и астигматизм тепловой линзы, соответственно. Определены направления ориентаций кристаллографических осей [C] и [P] этих материалов.

4. Величина постоянной Верде керамики на основе оксида диспрозия при охлаждении до температуры 80 К возрастает примерно в 3.5 раза.

5. Теллуритное стекло составов 75TeO<sub>2</sub>-25ZnO;  
77.1TeO<sub>2</sub>-12.5ZnO-10.4Na<sub>2</sub>O; 74TeO<sub>2</sub>-12ZnO-4La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10Na<sub>2</sub>O;  
73TeO<sub>2</sub>-13ZnO-4La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10Na<sub>2</sub>O является диамагнетиком и может быть использовано в фарадеевских устройствах, работающих в диапазоне 0.38 – 4 мкм. Получена эмпирическая зависимость постоянной Верде теллуритных стекол в спектральном диапазоне 405 – 1561 нм.

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

Достоверность результатов работы основана на анализе автором выполненных ранее научно-исследовательских работ по предмету исследования и верификации полученных расчетных соотношений в ходе экспериментального исследования.

Диссертационная работа представляет целостное исследование. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации А.И. Яковлева, являются обоснованными. Достоверность выводов и рекомендаций обсуждается автором в тексте диссертации, основана на анализе автором

выполненных ранее научно-исследовательских работ по предмету исследования и подтверждается сравнением полученных А.И. Яковлевым в ходе выполнения работы экспериментальных данных и результатов математического моделирования с известными из литературы теоретическими и экспериментальными результатами. Новизна научных положений, сформулированных автором, не вызывает сомнений.

#### **6. Публикации, отражающие основное содержание диссертации**

Основные результаты диссертации изложены в 9 публикациях в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций. В публикациях достаточно полно отражены главные результаты диссертации. Результаты работы были также представлены на международных и российских конференциях.

#### **7. Автореферат**

Автореферат полностью соответствует диссертации и опубликованным по ней работам.

#### **8. Замечания по работе**

Представленная работа выполнена на высоком научном уровне. Вместе с тем, по диссертационной работе можно сделать следующие замечания.

1. Слишком подробный анализ расчетов компонент тензора диэлектрической непроницаемости, выполненных ранее в других работах (Глава 1). Соискатель должен пояснить необходимость такого повтора вместо ссылок и приведения только нужных формул.
2. Ссылки на теоретический вид зависимости постоянной Верде от температуры и длины волны приводятся не на исходные работы, в которых эти выражения были получены, а на более поздние работы.

3. Аппроксимация постоянной Верде формулой (3.2) является весьма приближительной, как следует, например, из работы A. D. BUCKINGAM and P. J. STEPHENS, Ann. Rev. Phys. Chem. 17, 399 (1966). Поэтому следовало бы провести анализ применимости этой формулы в конкретном случае материалов, исследованных автором.

4. При анализе точности определения угла вращения плоскости поляризации, в проводимых в работе экспериментах по измерению постоянной Верде (стр.86), следует учитывать не только точность угловых подвижек, но и точность определения интенсивности проходящего света.

5. На странице 37 определяется, что зависимость  $\theta F(T, \lambda, r)$  от длины волны излучения  $\lambda$  и температуры  $T$ , возникает из-за зависимости от них постоянной Верде. На самом деле эта зависимость возникает из-за спектральной и температурной зависимости показателя преломления материала для право- и левополяризованных электромагнитных волн. Постоянная Верде является эмпирическим коэффициентом.

6. В тексте работы временами используется технический жаргон. Например, термины «бифокуссинг» или «шпатовый клин» понятны, но не являются общепринятыми терминами.

### 9. Заключение

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Яковлева Алексея Ивановича 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,

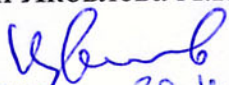


что диссертационная работа Яковлева А.И. на тему «**Влияние параметра оптической анизотропии на особенности термонаведенных эффектов в кубических кристаллах с учетом циркулярного двулучепреломления**» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и отвечает критериям, установленным в разделе II Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01 октября 2018 г. № 1168), а её автор, Яковлев Алексей Иванович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
заместитель директора Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Федерального  
исследовательского центра Институт  
общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
(ИОФ РАН)

Владимир  
Борисович  
Цветков

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных,  
связанных с защитой диссертации Яковлева А.И.

  
20.11.2020

В.Б. Цветков

Подпись В.Б. Цветкова заверяю:

Заместитель директора ИОФ РАН

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+274

e-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

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

Должность: заместитель директора ИОФ РАН



20.11.2020

Д.Г. Кочиев