

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ НАУЧНО-
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРОМ
ОПТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ В ЭЛЕМЕНТАХ ЛАЗЕРОВ**

Аспирант: Яковлев Алексей Иванович

Научный руководитель:

Кандидат физико – математических наук,

с.н.с. отд. 350

Снетков Илья Львович

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки

01.04.21 Лазерная физика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород, 2020

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия наблюдается существенный рост средней и пиковой мощности лазерного излучения с сохранением его высокого качества, которое определяется фазовыми и поляризационными искажениями. Это позволяет использовать лазерные источники как инструмент для решения различных научных и прикладных задач. В научных приложениях лазеры используются, например, в детекторах гравитационных волн проекта LVK – Collaboration [1,2], в проекте по созданию источников управляемого термоядерного синтеза HIPER [3], в проектах по изучению поведения вещества в экстремальных условиях ELI Beamlines [4], HiLASE [5], DIPOLE [6], PEnELOPE [7], в задачах генерации нестандартных поляризаций лазерного излучения, в частности тангенциальной и радиальной поляризации [8,9]. Для прикладных задач лазеры используются, в медицине, спектроскопии, в литографии, а также в сварке, обработке и резке металлов [10].

Возможность увеличения мощности с сохранением высокого качества лазерного излучения связана, во-первых, с созданием новых конфигураций оптических схем и геометрий активных элементов (АЭ). Во-вторых, наблюдается прогресс, связанный с производством кристаллических, керамических и стеклянных материалов, в том числе и новых составов, имеющих высокое оптическое качество. Это позволяет использовать ОЭ для работы с пучками различных апертур в качестве проходных оптических элементов (оптических окон, линз, клиньев), магнитооптических элементов (МОЭ), АЭ, волокон. В-третьих, последние исследования методов минимизации и компенсации термонаведенных эффектов, связанных с поглощением лазерного излучения в ОЭ и определение ответственных за них материальных констант оптических сред, позволили создавать оптические узлы для лазерных систем с малыми потерями в качестве излучения [11–13].

Тепловые эффекты, возникающие в оптических элементах из-за поглощения проходящего излучения, начиная с создания первых лазеров [14], так и по настоящий день являются одними из основных ограничивающих факторов увеличения мощности лазеров и сохранения высокого качества излучения в оптических системах. Очевидно, что наибольшее тепловыделение наблюдается в АЭ и связано с дефектом кванта накачки и в магнитооптических элементах (МОЭ) изоляторов Фарадея (ИФ), из-за относительно высокого коэффициента линейного поглощения ($\alpha \approx 10^{-3} - 10^{-1} \text{ см}^{-1}$) и необходимости их использования с относительно большой длиной. В стеклах и кристаллах для изготовления проходной оптики (например, линзы, оптические окна,

поляризаторы, клинья) коэффициент линейного поглощения лежит в пределах ($\alpha \approx 10^{-3} - 10^{-1} \text{ см}^{-1}$). Поглощение и дефект кванта полностью определяются материалом и приводят к нагреву ОЭ, поэтому актуально исследовать термонаведенные эффекты в ОЭ возможные пути их минимизации.

Тепловыделение в ОЭ влияет на величину зависящих от температуры материальных констант среды, вследствие увеличения температуры в объеме его, например, на постоянную Верде [15]. Также влечет появление градиента температуры и температурных напряжений и деформаций, которые, в случае превышения предела прочности материала, приводят к механическому разрушению ОЭ. Возникающие напряжения и деформации приводят: к изменению длины оптического элемента (dL / dT), к возникновению деформации концов ОЭ и к изменению показателя преломления из-за температуры (dn / dT), а следовательно, к возникновению тепловой линзы, а также, из-за зависимости показателя преломления от напряжений (фотоупругого эффекта), к возникновению термонаведенного двулучепреломления. Таким образом, даже в случае изотропных сред, таких как кубический кристалл или стекло, направления ортогональных между собой собственных поляризаций начинают зависеть от поперечных координат в сечении ОЭ, следовательно, материал становится анизотропным. Это выражается в возникновении фазовых и поляризационных искажений излучения после прохождения ОЭ, наиболее существенные из которых астигматизм тепловой линзы [16] и термонаведенная деполяризация [17]. Данные эффекты приводят к ухудшению качества прошедшего излучения, в частности, к астигматизму тепловой линзы (бифокуссингу) [16,18], к размытию фокального пятна, к потере мощности в поляризованном падающем излучении. В АЭ – к расстройке оптического резонатора, в случае магнитооптических элементах изоляторов Фарадея (ИФ) – к снижению степени изоляции устройства [19]. На практике эти эффекты стали одними из первых наблюдаться в стеклах и АЭ Nd:YAG¹ лазерах в 1970х годах.

Термонаведенная деполяризация может быть охарактеризована через величину интегральной деполяризации как отношение мощности в деполяризованной компоненте поля после прохождения ОЭ к суммарной падающей мощности излучения. В случае МОЭ интегральная деполяризация является ключевой характеристикой и определяет степень изоляции ИФ. Общие выражения для термонаведенной деполяризации в произвольной ориентации кристаллографических осей в кубических кристаллах, учитывающие циркулярное двулучепреломления (случая, актуального для МОЭ) были получены в работах [19,20]. Обобщение

¹ Nd:YAG (Nd:Y₃Al₅O₁₂)

выражений для термонаведенной деполяризации излучения в керамических ОЭ было произведено в работе [21].

Анализ зависимости термонаведенной деполяризации в кубических кристаллах от ориентации кристаллографических осей показал, что существует выделенная ориентация осей, называемая [С] в которой деполяризация отсутствует [22,23]. Направления ее осей определяется материальной константой – параметром оптической анизотропии ζ [22,23]. В работе [23] показано, что ориентация осей [С] существует при отрицательных значениях ζ . Существование нулевой деполяризации впервые экспериментально было обнаружено в оптических окнах из кубических кристаллов BaF_2 , CaF_2 , SrF_2 , $GaAs$ [24,25]. Параметр оптической анизотропии ζ определяется комбинацией пьзооптических π_{ij} или фотоупругих p_{ij} и коэффициентов упругой жесткости c_{ij} кристалла [26]. Известно, что коэффициенты, π_{ij} , p_{ij} и c_{ij} в кристаллах CaF_2 , BaF_2 и SrF_2 зависят от длины волны излучения [27–32]. Температурные зависимости коэффициентов, определяющих ζ освещены в работах: [33–37]. Исследования зависимости параметра оптической анизотропии ζ от температуры проведены в кристаллах, например в работе [38]. В некоторых материалах, величина коэффициентов π_{ij} , p_{ij} и c_{ij} , и следовательно, ζ зависит от концентрации допанта [39], следовательно, влияет на значение ζ .

Зависимость параметра оптической анизотропии ζ от длины волны излучения, температуры, концентрации и типа активного иона приводит к изменению направлений, соответствующим кристаллографическим осям [С]. Определение параметра оптической анизотропии ζ кристаллов актуально в связи с тем, что позволяет еще на стадии их роста задать необходимую ориентацию кристаллографических осей и, в дальнейшем, минимизировать тепловые эффекты.

Исследование тепловой линзы, обусловленной фотоупругим эффектом, начались сразу после создания лазеров в 60 – 70х годах. Основным параметром, характеризующим тепловую линзу, является среднее арифметическое фазовых набегов между двумя ортогональными линейными собственными поляризациями. Оно не зависит от состояния поляризации излучения на входе в ОЭ, но, в общем случае, зависит от поперечных координат и неоднородна по поперечному сечению ОЭ. Анализ тепловой линзы в кристаллических ОЭ в основных ориентациях кристаллографических осей [001], [111], керамических ОЭ и стекла был выполнен в работах [40,41]. В данных работах было показано, что в этих ориентациях осей кристаллов и в стеклах астигматизм тепловой линзы, определяемый средним набегом фазы, отсутствует.

При вычислении компонент электромагнитного поля на выходе из ОЭ и его фазовых искажений возникает слагаемое, характеризующее «поляризационный астигматизм» тепловой линзы, зависящий от типа поляризации излучения на входе в ОЭ. Данное слагаемое вносит

дополнительный вклад в среднее значение набега фазы. Впервые «поляризационный астигматизм» тепловой линзы был исследован в АЭ Nd:YAG в ориентации кристаллографических осей [111] в 1970 году [16]. В этих работах теоретически и экспериментально было продемонстрировано, что фокусное расстояние для излучения с радиальной и тангенциальной направлениям поляризаций различна, что проявляется в бифокусинге прошедшего излучения. В ориентации кристаллографических осей [111] этот эффект может быть использован для генерации радиальной или тангенциальной поляризации излучения [8]. Например, этот эффект важен при резке металлов из-за зависимости качества обработки от состояния поляризации излучения [42].

Анализ астигматизма тепловой линзы в АЭ в случае ориентации кристаллографических осей [001] был проведен в работе [43], где было показано, что его величина зависит от угла поворота кристалла вокруг своей оси и может быть меньше, чем в ориентации кристаллографических осей [111]. Было показано экспериментально, что наличие бифокусинга может приводить к ухудшению качества лазерного излучения, в частности, к увеличению параметра M^2 и уменьшению числа Штреля [44–46]. Несмотря на то, что задача исследования фазовых искажений излучения в кристаллах сформулирована достаточно давно, рассмотрение возможности минимизировать астигматизм тепловой линзы путем выбора оптимальной ориентации кристаллографических осей кубического кристалла, в том числе, в присутствии циркулярного двулучепреломления, не было произведено к моменту написания диссертации.

Термонаведенная деполяризация и тепловая линза зависят от свойств материала, и может быть уменьшена за счет подбора ОЭ в определенной ориентации кристаллографических осей (в случае кристаллических материалов), за счет выбора материала с оптимальными оптическими характеристиками P , Q , магнитооптической добротностью μ , коэффициентами dL/dT , dn/dT , параметром оптической анизотропии ζ или за счет охлаждения ОЭ до криогенных температур, например, жидким азотом. Криогенное охлаждение ОЭ позволяет снизить величину термонаведенных эффектов, а также в случае парамагнитных магнитооптических материалов, приводит к росту постоянной Верде, что используется при создании криогенных ИФ. Следовательно, исследование зависимостей материальных констант различных сред от длины волны, температуры, типа и состава ОЭ и создание численных моделей, описывающих термонаведенные эффекты, является необходимым условием для моделирования тепловых эффектов создания оптических узлов лазерных систем.

Тепловыделение в МОЭ приводит к увеличению его средней температуры, тепловому расширению и возникновению в нем градиента температуры, что выражается в неоднородном в поперечном сечении изменении постоянной Верде, в связи с ее зависимостью от температуры. Это

приводит к тому, что величина циркулярного двулучепреломления также начинает зависеть от поперечных координат, коэффициента теплового расширения и температурной зависимости постоянной Верде [47]. Следовательно, угол поворота плоскости поляризации излучения становится неоднородным в сечении МОЭ, что выражается в возникновении термонаведенных эффектов. Тепловыделение в магнитооптических элементах могут быть уменьшены путем выбора материала с более высоким значением V , за счет уменьшения длины МОЭ и, следовательно, поглощенной мощности, либо уменьшением поглощения, путем изготовления более чистых материалов. Таким образом, определение зависимостей постоянной Верде от температуры, от длины волны излучения, а также от материала, из которого сделан кристаллический, стеклянный или керамический магнитооптический элемент и создание моделей, аналитически описывающих ее поведение в различных средах является актуальной задачей.

Для классификации материала, с точки зрения эффективности использования в качестве МОЭ, применяется параметр – магнитооптическая добротность μ . В большинстве работ она определяется в виде отношения постоянной Верде материала V , к величине линейного поглощения α [48], однако, данное определение не содержит информацию о тепловых эффектах. Модификация выражения для магнитооптической добротности μ была предложена в работе [49], где в качестве входящих в нее параметров используется постоянная Верде материала, поглощение, термооптическая постоянная среды Q , коэффициент теплопроводности κ . Такой выбор магнитооптической добротности позволяет учесть не только поглощение и эффективность поворота поляризации, но и информацию о термооптических свойствах материала. В связи с этим, исследование набора материальных констант, таких как параметр оптической анизотропии, поглощение, постоянная Верде необходимо для создания фарадеевских устройств с малыми потерями в качестве и мощности излучения.

Таким образом, вышеуказанные замечания показывают актуальность теоретического расчета термонаведенных эффектов, а также экспериментального исследования оптических, магнитооптических и термооптических свойств материалов и поиск методов их минимизации для создания пассивной проходной оптики, АЭ и МОЭ.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью настоящей диссертационной работы является теоретическое описание термонаведенных фазовых искажений излучения в кристаллических и стеклянных ОЭ, в присутствии циркулярного двулучепреломления 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. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

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 симметрий в произвольной ориентации кристаллографических осей или стекла, как в отсутствии, так и в присутствии циркулярного двулучепреломления δ_c .
2. Теоретически и численно решена задача о минимизации астигматизма тепловой линзы в стеклянном или кубическом монокристаллическом ОЭ в произвольной ориентации кристаллографических осей, поставленная, но не рассмотренная в общем случае с 1970 года.
3. Экспериментально исследованы зависимости параметра оптической анизотропии ζ кубических кристаллов от длины волны излучения, от температуры, а также, от типа допанта и его концентрации в материалах (0 – 4.17) ат. % Yb и 10 ат. % Tb):CaF₂, BaF₂, SrF₂, используемых для изготовления пассивных ОЭ, АЭ и МОЭ.
4. Экспериментально исследованы оптические, термооптические и магнитооптические свойства в зависимости от температуры, от длины волны излучения, а также от типа допанта и его концентрации в перспективных керамиках и стеклах. Исследованы зависимости термооптических и магнитооптических свойств керамиках REE:TAG от их состава. Экспериментально исследованы зависимости, описывающие: поведение постоянной Верде в керамике на основе оксида диспрозия Dy₂O₃ от концентрации диспрозия, длины волны излучения в диапазоне (405 – 1064) нм и температуры в диапазоне (80 – 300)°К; поведение постоянной Верде в керамике на основе оксида эрбия Er₂O₃ в диапазоне длин волн (405 – 1100) нм; поведение постоянной Верде в теллуридном стекле различных составов диапазоне длин волн (400 – 1561) нм и температуры (80 – 300)°К.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в пунктах:

- 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 δ_l при наличии произвольного циркулярного двулучепреломления δ_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 ζ , 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 ζ . Определены зависимости ζ от длины волны, температуры и концентрации активного иона в материалах (0 – 4.17) ат. % Yb и 10 ат. % Tb):CaF₂, BaF₂, SrF₂. Показано, что в данных материалах возможно полностью устранить либо поляризационный астигматизм тепловой линзы, либо термонаведенную деполяризацию излучения.
- Предложен способ измерения модуля параметра оптической анизотропии ζ по измерению термонаведенных искажений тепловой линзы.
- Исследованы оптические, магнитооптические и термооптические свойства магнитооптических керамик (Er₂O₃, Dy₂O₃, TAG, REE:TAG (REE = Ce, Pr, Ho) и теллуридных стекол различного состава. Измеренные свойства показывают перспективность использования (Dy₂O₃ керамика, в частности) в качестве магнитооптических элементов изоляторов Фарадея, вместо широко используемых на данный момент кристаллов и керамики TGG.

Научная и практическая значимость работы

Рост средней и пиковой мощности лазерного излучения связан с развитием лазерных технологий и будет продолжаться и дальше. Ключевым фактором, ограничивающим максимальную среднюю мощность излучения, являются термонаведенные эффекты, возникающие из-за поглощения проходящего лазерного излучения в проходных ОЭ, МОЭ изоляторов Фарадея и АЭ лазерных генераторов и усилителей.

Полученные в настоящей работе результаты будут полезны при создании оптических элементов лазерных систем, в частности, АЭ лазеров и МОЭ изоляторов Фарадея. Используя полученные результаты, возможен выбор оптимальной ориентации кристаллографических осей ОЭ, при которых астигматизм тепловой линзы будет минимален, или отсутствовать (для определенных материалов).

В рамках работы, экспериментально исследованы зависимости параметра оптической анизотропии ξ от внешних параметров, таких как длина волны излучения, температура и концентрация допанта в широко используемых материалах для создания ОЭ. Измеренные зависимости необходимы для моделирования термонаведенных эффектов. Также, полученная информация о параметре оптической анизотропии ξ позволяет на стадии роста кристаллических ОЭ задать ориентацию кристаллографических осей, в которой возможно полностью устранить термонаведенную деполяризацию излучения или астигматизм тепловой линзы.

Экспериментально исследованы оптические, термооптические свойства и магнитооптические свойства перспективных керамических материалов для ИФ. Исследовано влияние типа и концентрации редкоземельных допантов в керамике REE:TAG на ее термооптические свойства. Получены аппроксимации описывающие поведение постоянной Верде в керамике: на основе оксида Эрбия Er_2O_3 от длины волны (405 – 1100) нм с учетом полос поглощения; керамики на основе оксида диспрозия Dy_2O_3 от температуры в диапазоне (80 – 300)°К и длины волны в диапазоне (405 – 1064) нм. А также стекол на основе TeO_2 в диапазоне (405 – 1561) нм и от температуры в диапазоне (80 – 300)°К. Полученные результаты актуальны при создании компактных ИФ с малыми потерями, а также компактных ИФ в новых спектральных диапазонах, соответствующих полосам прозрачности исследованных материалов. В частности, для тулиевых (Tm^{3+}) и гольмиевых (Ho^{3+}) лазеров, оперирующих в спектральном диапазоне 2 μm , необходимых для работы с пучками с большим диаметром (единицы см), что к настоящему моменту технологически невозможно.

Положения выносимые на защиту

1. Существуют оптимальные ориентации кристаллографических осей кубических кристаллов, в которых астигматизм тепловой линзы минимален. Направления этих ориентаций определяются параметром оптической анизотропии ξ материала и величиной циркулярного двулучепреломления δ_c .

2. Ориентация кристаллографических осей [P], в которой астигматизм тепловой линзы отсутствует, существует только в материалах с параметром оптической анизотропии $\zeta \leq 0.04$ при произвольной величине циркулярного двулучепреломления δ_c . В общем случае имеется бесконечное число ориентаций эквивалентных [P], при $\zeta = 0.04$ их множество вырождается в три и при $\zeta = -0.5$ – в одну.
3. Выбором ориентации кристаллографических осей одновременно устранить термонаведенную деполяризацию излучения и астигматизм тепловой линзы в оптическом элементе невозможно. Существует частный случай ориентации кристаллографических осей [P], совпадающей с ориентацией [C], для значений параметра оптической анизотропии $\zeta < 0$, отличающийся только углом поворота оптического элемента вокруг своей оси, величина которого определяется параметром оптической анизотропии ζ и величиной циркулярного двулучепреломления δ_c .
4. В кристаллах CaF_2 , BaF_2 , SrF_2 параметр оптической анизотропии не зависит от длины волны излучения в диапазоне $(0.3 - 3) \mu\text{м}$, вдали от краев поглощения и концентрации допанта диапазоне $((0 - 4.17) \text{ ат. \%}) \text{ Yb}^{3+}$ в кристалле CaF_2 . Направления осей, соответствующие ориентациям [C] и [P] в кристаллах CaF_2 , BaF_2 , SrF_2 не проявляют зависимости от длины волны $(0.3 - 3) \mu\text{м}$ и концентрации Yb^{3+} в диапазоне $((0 - 4.17) \text{ ат. \%})$ в кристалле CaF_2 .
5. Постоянная Верде керамики на основе оксида диспрозия в ее полосах прозрачности больше в 2.2 раза, чем ее величина в кристалле TGG и линейно зависит от концентрации диспрозия. При охлаждении от 295°K до температур жидкого азота (80°K) постоянная Верде растет в 3.46 раза.

Достоверность полученных результатов

Основные положения диссертации опубликованы в ведущих зарубежных журналах, докладывались на региональных, всероссийских и международных конференциях, обсуждались на семинарах в ИПФ РАН. Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается их соответствием предварительным теоретическим оценкам и зависимостям, полученным в более ранних работах, а также сторонними источникам данных.

Апробация результатов и публикации

Основные результаты работы докладывались на следующих региональных, всероссийских и международных конференциях автором

Лично:

1. Международный симпозиум “Topical problems of nonlinear wave physics”, (NWP – 2014), 2014, Нижний Новгород, Россия.
2. Международные конференции: “Frontiers in Optics 2015”, (FIO 2015), San Jose, CA, USA; “Frontiers in Optics 2016”, (FIO 2016), Rochester, NY, USA.
3. Международная конференция: “Optics + Photonics”, San Diego, CA, USA.
4. XVII научная школа “Нелинейные волны – 2016”, Нижний Новгород, Россия.
5. Региональные конференции “Двадцатая научная конференция по радиофизике, посвященная 110 – летию со дня рождения Г.С. Горелика”, Нижний Новгород, Россия; “Двадцать первая научная конференция по радиофизике”, Нижний Новгород, Россия.
6. Международный симпозиум “20th International Symposium on Non-Oxide and New Optical Glasses”, (ISNOG 2016), Нижний Новгород, Россия.
7. Международная конференция (ICONO – LAT 2016), Minsk, Belarus.
8. Международные конференции: “Optics + Optoelectronics 2017”, Czech Republic, Prague; “Optics + Optoelectronics 2019”, Czech Republic, Prague.
9. Международная конференция: “Optics + Photonics 2017”, San Diego, CA, USA.
10. Международные конференции: LIGO – VIRGO meeting September 2019, September 2 – 6, 2019, Poland, Warsaw

В соавторстве:

1. Шестнадцатая Международная конференция “LASER OPTICS 2014“, 2014, Санкт – Петербург, Россия.
2. Международный симпозиум “Topical problems of nonlinear wave physics”, (NWP – 2017), 22 – 28 Июля 2017, Москва – Санкт Петербург, Россия.
3. Четырнадцатый международный симпозиум по лазерной керамике “14th Laser Ceramics Symposium”, 26 – 30 Ноября 2018, Okazaki, Japan.

Часть представленных результатов докладывалась на XVIII конкурсе молодых ученых и семинарах отдела 350 в ИПФ РАН.

По теме диссертации опубликовано 11 статей в международных реферируемых журналах [A1–A10], индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus; 13 материалов, включающих в себя статьи в сборниках трудов конференций и тезисы докладов [B1–B13]. Индекс Хирша (*h – index*) автора на момент написания диссертации – 4 (Scopus, Web of Science).

Личный вклад автора

Научным руководителем были поставлены задачи и определены основные направления исследования. Основные результаты диссертационной работы были получены либо автором лично, либо при его непосредственном участии совместно с И. Л. Снетковым.

В основу теоретических исследований автора легли работы Е. А. Хазанова по расчету термонаведенных искажений излучения в оптических элементах при наличии в них циркулярного двулучепреломления, основанные на методе матриц Джонса. Автором была построена теоретическая модель, позволяющая рассчитывать фазовые искажения излучения в кубических кристаллах в произвольной ориентации кристаллографических осей и стекле, в присутствии циркулярного двулучепреломления. Анализ полученных выражений и их интерпретация были проведены автором лично. В основу экспериментальных исследований автора легли работы И. Л. Снеткова, А. В. Старобора, Е. А. Миронова, О. В. Палашова. Эксперимент и интерпретация результатов по измерению параметра оптической анизотропии от длины волны были проведены совместно с И.Л. Снетковым. Сборка и настройка оптических схем, а также измерение экспериментальных зависимостей параметра оптической анизотропии от температуры и концентрации допанта, а также измерения термонаведенной деполяризации, максимальной температуры, постоянной Верде в керамиках и стеклах проводилось автором лично. Полученные экспериментальные результаты были обработаны и интерпретированы непосредственно автором и обсуждались с И. Л. Снетковым, О. В. Палашовым и Е. А. Хазановым.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, 3 Глав, Заключения, Списка работ автора, Списка литературы. Общий объем диссертации составляет 120 страниц, включая 46 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 185 источников.

Краткое содержание диссертации

Во *Введении* представлен обзор литературы, обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется её цель, указывается научная новизна, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В *первой Главе* работы теоретически исследуются фазовые искажения, возникающие в ОЭ вследствие поглощения проходящего лазерного излучения.

В *пункте 1.1.* для аксиально – симметричной геометрии ОЭ и источников тепловыделения, получены аналитические выражения для компонент тензора диэлектрической непроницаемости

для ОЭ, изготовленного из кубического кристалла в произвольной ориентации кристаллографических осей в приближении упругой изотропии. Расчет компонент тензора диэлектрической непроницаемости был выполнен через компоненты тензора напряжений. В данном пункте показана разница в описании фотоупругого эффекта, возникающая при вычислении тензора диэлектрической непроницаемости через напряжения и деформации. Приведены выражения, позволяющие осуществить однозначный переход между указанными методами расчета.

В *пункте 1.2.*, используя формализм матриц Джонса и полученных компонент тензора диэлектрической непроницаемости, представлена методика расчета набега фазы тепловой линзы, учитывающей поляризационный астигматизм, возникающей в излучении при прохождении через термонагруженный ОЭ. В общем случае получено аналитическое выражение для набега фазы тепловой линзы, возникающей при прохождении пассивных ОЭ, АЭ и МОЭ с произвольной величиной циркулярного двулучепреломления. Полученное выражение упрощено на случай слабого линейного двулучепреломления и записано в виде, позволяющем разделить значение набега фазы на не зависящую и зависящую от полярного угла части, последняя из которых определяет астигматизм.

В *пункте 1.2.1.* рассмотрены частные случаи набега фазы тепловой линзы для основных ориентаций кубического кристалла, а именно [111] и [001], и стекла. Теоретически показано наличие астигматизма тепловой линзы в рассмотренных случаях, что не предсказывают выражения для средней фазы между собственными линейными поляризациями. Аналитически показано, что независимая от полярного угла часть фазы тепловой линзы в рассмотренных случаях совпадает со средней фазой между собственными линейными поляризациями. Продемонстрировано, что невозможно одновременно устранить астигматизм тепловой линзы, соответствующий средней фазе между собственными линейными поляризациями и соответствующий фазе, учитывающей поляризационный астигматизм.

В *пункте 1.3.* численно и аналитически рассмотрены выражения для астигматизма тепловой линзы в случае произвольной ориентации кристаллографических осей и величины циркулярного двулучепреломления.

В *пункте 1.3.1.* приведены условия на параметр оптической анизотропии и выражения для ориентации кристаллографических осей $[C]$, в которой термонаведенная деполяризация излучения исчезает. Приведенные выражения необходимы для дальнейшего исследования и сравнения направлений выделенных ориентаций кристаллографических осей. В *пункте 1.3.2.* показано, что ориентация кристаллографических осей, соответствующая минимуму астигматизма тепловой

линзы, определяется параметром оптической анизотропии ζ , величиной циркулярного двулучепреломления δ_c . Численно найдены ориентации кристаллографических осей, в которых астигматизм тепловой линзы принимает свое минимальное значение. Аналитически показано, что, измеряя введенную в настоящей работе «амплитуду астигматизма», можно измерить модуль параметра оптической анизотропии кристалла в ориентации кристаллографических осей [001]. Сформулированы условия существования ориентации кристаллографических осей [P] в которой астигматизм тепловой линзы отсутствует. Аналитически и численно найдены ориентации кристаллографических осей, соответствующие ориентации [P]. Показано, что в одном оптическом элементе невозможно устранить астигматизм тепловой линзы и термонаведенную деполяризацию излучения одновременно.

В *пункте 1.4.* рассчитывается фокус тепловой линзы. Из общих полученных выражений смоделировано возникновение бифокуссинга излучения после прохождения АЭ из материала Nd:YAG в ориентации кристаллографических осей [111] с параметрами материала и излучения взятыми из работы [52]. Показано полное соответствие полученных в настоящей работе и результатов экспериментальных и теоретических данных с работой [52].

Вторая Глава посвящена исследованию зависимостей параметра оптической анизотропии ζ кубических кристаллов CaF₂, BaF₂ и SrF₂ от длины волны излучения в диапазоне (532 – 1070) нм, температуры в диапазоне (80°–°300)°К и концентрации допанта в 10 ат.% Tb:CaF₂, ((0 – 4.17) ат. % Yb):CaF₂. В данной главе сделаны выводы о возможности использования рассматриваемых кристаллов в выделенных ориентациях кристаллографических осей [C] и [P]. Используя измеренные значения параметра оптической анизотропии, были вычислены направления ориентации осей [C] и [P] в исследованных материалах, которые определяют направления кристаллографических осей, в которых отсутствует термонаведенная деполяризация излучения и астигматизм тепловой линзы, соответственно.

Пункт 2.1. посвящен описанию метода измерения параметра оптической анизотропии ζ по измерению термонаведенной деполяризации излучения в кубических кристаллах в ориентации кристаллографических осей [001], предложенного в работе [65].

В *пункте 2.2.* исследуется зависимость параметра оптической анизотропии кристаллов ζ CaF₂, BaF₂ и SrF₂ от длины волны излучения (на длинах волн 532, 632.8, 1070 нм). Произведен анализ и сравнение измеренных значений параметра оптической анизотропии ζ с соответствующими его значениями, вычисленными из литературных источников по представленным в них значениям пьезооптическим, фотоупругим и упругим коэффициентам. Полученные результаты и анализ литературы показывают, что в полосе прозрачности исследованных материалов параметр

оптической анизотропии слабо зависит от длины волны излучения. Измеренные значения параметра оптической анизотропии были использованы для расчета направления кристаллографических осей, соответствующих ориентациям [С] и [Р].

В *пункте 2.3.* производится исследование температурной зависимости параметра оптической анизотропии в диапазоне (80 – 300)°К. Для ее измерения, в исследованных кристаллах исследуется температурная зависимость термонаведенной деполяризации. Результаты показывают зависимость параметра оптической анизотропии исследованных кристаллов от температуры, что влечет изменение в направлениях ориентаций кристаллографических осей [С] и [Р].

В *пункте 2.4.* производится исследование зависимости параметра оптической анизотропии кристалла от концентрации допанта в АЭ (Yb ((0 – 4.17) ат. %):CaF₂) и МОЭ 10 ат.% Tb:CaF₂. Для измерения термонаведенной деполяризации излучения был предложен и верифицирован универсальный метод создания температурных градиентов в ОЭ при помощи внешнего нагревателя, что отличает его от оригинального, описанного в работе [65]. Показано, что существенное увеличение концентрации и типа допанта может приводить к изменению параметра оптической анизотропии кристалла и, следовательно, к изменению направлений кристаллографических осей, соответствующих ориентациям кристаллографических осей [С] и [Р].

Третья Глава посвящена исследованию материалов их термооптических и магнитооптических свойств, а также возможностей применения их в устройствах, использующих эффект Фарадея.

В *пункте 3.1.* обсуждаются вопросы, связанные с методами изготовления оптических материалов и условий эксперимента, которые необходимо учитывать при измерения постоянной Верде.

В *пункте 3.2.* производится исследование магнитооптических и термооптических свойств керамик TAG: керамика TAG и допированная ионами Се и Рг с концентрациями (0.5, 1, 1.5, 2) ат.% и 0.5 ат.% Но:TAG, а также анализ литературных данных. Проведенные эксперименты позволили уточнить значения постоянной Верде керамик TAG и сделать выводы относительно влияния спекающих добавок и редкоземельных допантов на их термооптические свойства.

В *пункте 3.2.1.* проведен анализ зависимости постоянной Верде исследуемой керамики на основе TAG и концентрациями добавленных в них редкоземельных металлов, относительно широко используемых кристаллов TGG. Построена модель, описывающая зависимость постоянной Верде от длины волны в диапазоне (405 – 1064) нм. В *Пункте 3.2.2.* рассматривается влияние типа допанта и его концентрации на величину термонаведенной деполяризации, магнитооптической

добротности и максимальной детектируемой температуры МОЭ при прохождении излучения на длине волны 1070 нм.

Пункт 3.3. посвящен 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 *пункте 3.3.1* определен спектр пропускания керамик на основе оксида диспрозия. На основе измеренных значений постоянной Верде керамик получена аппроксимация, описывающая величину постоянной Верде от концентрации диспрозия в диапазоне температур $(80 - 300)^\circ K$ и длин волн $(400 - 1064)$ нм. Отдельно было измерено значение постоянной Верде на длине волны 1939 нм. Полученные аппроксимации позволили определить относительное увеличение постоянной Верде V , при охлаждении до температур жидкого азота. В *пункте 3.3.2* произведено исследование спектральной зависимости постоянной Верде керамик на основе оксида эрбия двумя методами: с помощью пробных источников излучения и методом «поляризационный шаг». Использование совместно данных методов позволило обнаружить корреляцию между шириной полосы поглощения материала и характерным масштабом изменения постоянной Верде. На основании измерений постоянной Верде была предложена аппроксимация экспериментальных данных для диапазона длин волн $(400 - 1100)$ нм с учетом как основных полос поглощения материала в УФ – области, так и большинства линий поглощения в исследуемом спектральном диапазоне.

Пункт 3.4. посвящен исследованию магнитооптических свойств теллуритных стекол различного состава. В пункте исследуется зависимость постоянной Верде от длины волны в диапазоне $(405 - 1561)$ нм и температуры в диапазоне $(80 - 300)^\circ K$. По результатам эксперимента излучения и обсуждены перспективы использования теллуритных стекол в качестве МОЭ в устройствах, работающих на основе эффекта Фарадея.

В *Заключении* обсуждаются результаты работы.

Основные результаты работы

Перечислим основные положения и результаты работы. В настоящей диссертационной работе аналитически и численно рассмотрена задача о нахождении фазовых искажений излучения, при его прохождении через ОЭ сделанный из кубического кристалла или стекла, вызванных его частичным поглощением. Экспериментально определены материальные константы различных

сред, в именно параметр оптической анизотропии, постоянная Верде, необходимые для минимизации тепловых эффектов, таких как термонаведенная деполяризация излучения и астигматизм тепловой линзы, возникающих в ОЭ. Перечислим основные 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 отсутствии так и в присутствии циркулярного двулучепреломления δ_c . Показано, что существуют оптимальные ориентации кристаллографических осей, при которых астигматизм тепловой линзы минимален. Направления этих ориентаций определяются параметром оптической анизотропии ζ используемого материала и величиной циркулярного двулучепреломления δ_c , а величина астигматизма прямо пропорциональна мощности тепловыделения. Величина фокуса тепловой линзы обратно пропорциональна мощности тепловыделения.
2. Введена ориентация кристаллографических осей [P] и показано, что в материалах с $\zeta \leq 0.04$ выбором этой ориентации можно полностью устранить астигматизм тепловой линзы при произвольной величине циркулярного двулучепреломления δ_c . В общем случае имеется бесконечное число ориентаций [P], при которых астигматизм тепловой линзы отсутствует. Найдена аналитическая связь между углами Эйлера (α, β, Φ), определяющими ориентации [P].
3. При возникновении циркулярного двулучепреломления углы Эйлера (α, β, Φ) определяющие ориентацию [P] изменяются в зависимости от величины δ_c . Однако, существуют выделенная ориентация [P], совпадающая с ориентацией [C] в которой углы (α, β) не зависят от величины циркулярного двулучепреломления δ_c . При этом третий угол Эйлера Φ , отвечающий за поворот кристалла вокруг своей оси, остается зависящим от циркулярного двулучепреломления δ_c .
4. Материалы 10 ат. % Tb:CaF₂, Yb³⁺((0 – 4.17) ат. %):CaF₂, BaF₂, SrF₂ обладают отрицательным параметром оптической анизотропии. Следовательно, в них существуют ориентации кристаллографических осей [C] и [P] в которых не возникает термонаведенная деполяризация и астигматизм тепловой линзы, соответственно.
5. Определены направления ориентаций кристаллографических осей [C] и [P] материалов 10 ат. % Tb:CaF₂, Yb³⁺((0 – 4.17) ат. %):CaF₂, BaF₂, SrF₂.

6. Значение постоянной Верде керамики TAG, допированной редкоземельными элементами Ce и Pr с концентрациями (0, 0.5, 1, 1.5, 2) ат. % и 0.5 ат. % Ho:TAG больше, чем TGG на ~37% в исследуемом диапазоне длин волн (405 – 1064) нм. Значение постоянной Верде не зависит от концентрации и вида допанта в исследуемых керамических образцах, с учетом экспериментальной погрешности. Эффект увеличения постоянной Верде при внесении в керамический материал редкоземельных ионов в малой концентрации отсутствует. Добавление в состав керамики TAG редкоземельных ионов приводит к увеличению поглощения и как следствие усилению тепловых эффектов.
7. Величина постоянной Верде линейно – пропорциональна концентрации диспрозия. Согласно результатам экспериментов, при охлаждении постоянная Верде возрастает в ~ 3.46 раза.
8. Исследования спектра пропускания и спектральной зависимости постоянной Верде показывают корреляцию между положением полос поглощения материала и существенным изменением величины постоянной Верде. $V_{Er_ceramics}/V_{TGG} \sim 0.56$ в полосах прозрачности керамики на основе оксида Эрбия.
9. Теллуритное стекло составов $75TeO_2-25ZnO$; $77.1TeO_2-12.5ZnO-10.4Na_2O$; $74TeO_2-12ZnO-4La_2O_3-10Na_2O$; $73TeO_2-13ZnO-4La_2O_3-10Na_2O$ является диамагнетиком и может быть использовано в фарадеевских устройствах, работающих в диапазоне (0.38 – 4) мкм. Получена аппроксимация постоянной Верде теллуритных стекол в диапазоне (405 – 1561) нм.

Использование полученных в работе зависимостей материальных констант, а именно, параметра оптической анизотропии ζ и постоянной Верде от длины волны излучения, температуры и материала, позволяет моделировать тепловые эффекты, такие как астигматизм тепловой линзы и термонаведенная деполяризация. Это открывает перспективы для создания устройств с минимальными потерями как в качестве, так и в мощности прошедшего излучения.

Список работ автора

Статьи:

- [A1] Snetkov I. L., Yakovlev A. I., Palashov O. V. // CaF₂, BaF₂ and SrF₂ crystals' optical anisotropy parameters / Laser Physics Letters. – 2015. – Т. – 12. № 9. – С. 095001.
- [A2] Snetkov I. L., Yakovlev A. I., Palashov O. V. // Temperature dependence of optical anisotropy parameter of CaF₂, BaF₂ and SrF₂ materials / Optical Materials. – 2017. –Т 69. – С. 291–294.

- [A3] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Dorofeev, V. V., Motorin S. E. // Magneto-optical properties of high-purity zinc-tellurite glasses / *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2018. – T. – 480 – C. 90–94.
- [A4] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Palashov O. V. // The dependence of optical anisotropy parameter on dopant concentration in Yb:CaF₂ and Tb:CaF₂ crystals / *Optical Materials*. – 2018. –T 77. – C. 127–131.
- [A5] Snetkov I. L., Yakovlev A. I., Permin D. A., Balabanov S. S., Palashov O. V. // Magneto-optical Faraday effect in dysprosium oxide (Dy₂O₃) based ceramics obtained by vacuum sintering / *Optics Letters*. – 2018. –T 43, № 16. – C. 4041–4044.
- [A6] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Permin D. A., Balabanov S. S., Palashov O. V. // Faraday rotation in cryogenically cooled dysprosium based (Dy₂O₃) ceramics / *Scripta Materialia*. – 2019. –T 161. – C. 32–35.
- [A7] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Palashov O. V. // Temperature dependence of the dysprosium oxide (Dy₂O₃) based ceramics' Verdet constant / *Proc. SPIE 11033, High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology IV, 110330X* (26 April 2019)
- [A8] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Palashov O. V., Dai J., Li X., Li J. // Magneto-Optical and Thermo-Optical Properties of Ce, Pr, and Ho Doped TAG Ceramics / *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2019. –T. 55, № 5. – C. 7000108 – 1–8.
- [A9] Yakovlev A. I., Balabanov S. S., Permin D. A., Ivanov M., Snetkov I. L. // Faraday rotation in Er₂O₃ based ceramics / *Optical Materials*. – 2020. –T 101. – C. 109750.
- [A10] Yakovlev A. I., Snetkov I. L. // Thermal lens astigmatism caused by the photoelastic effect in cubic crystals of m3m, 432, and 43m symmetries / *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2020. –T 56, № 4. – C. 6100108 – 1 – 8.

Материалы конференций:

- [B1] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Palashov O. V. (2014). “Measurements of optical anisotropy parameters of BaF₂ and SrF₂ crystals». *Proceedings, International Symposium «Topical problems of nonlinear wave physics»*, NWP - 2014, Section: NWP-2, 17-23 July, 2014, p. 139-140, Russia, N. Novgorod.
- [B2] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Palashov O. V (2015). (Conference Paper). “Measurements of optical anisotropy parameters of CaF₂ BaF₂ and SrF₂ crystals”, *Proceedings of Frontiers in Optics 2015, Frontiers in Optics 2015, FIO 2015*; San Jose; United States; 18 October 2015 through 22 October 2015.

- [B3] Яковлев А. И. (2016) “Экспериментальное исследование зависимости параметра оптической анизотропии кристаллов CaF_2 , BaF_2 и SrF_2 от длины волны и температуры». XVII научная школа “Нелинейные волны – 2016”, 27 февраля – 4 марта 2016 года, Тезисы докладов, стр. 165, Нижний Новгород.
- [B4] Яковлев А. И., Снетков И. Л., Палашов О. В. (2016) “Определение зависимости параметра оптической анизотропии кристаллов CaF_2 , BaF_2 и SrF_2 от температуры”, Двадцатая научная конференция по радиофизике, посвященная 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика, Тезисы докладов, стр. 160, Нижний Новгород.
- [B5] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Dorofeev V. V., Motorin S. E., Palashov O. V. (2016). “Study of magneto-optic properties of high-purity tellurium dioxide based glasses”, Proceedings, International Symposium “20th International Symposium on Non-Oxide and New Optical Glasses”, ISNOG 2016, 21-26 August, 2016, p. 123, Russia, N. Novgorod.
- [B6] Snetkov I. L., D. Zhou, A.I. Yakovlev, I.B. Mukhin, I.I. Kuznetsov, O.V. Palashov, and K.I. Ueda (2017). «200 W Continuous wave disk-laser on Yb:LuAG ceramics». Proceedings, International Symposium «Topical problems of nonlinear wave physics», NWP - 2017, Section: NWP-2, 17-23 July, 2014, p. 88-89, Russia, Moscow.
- [B7] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Palashov O. V. (2016). “Wavelength and temperature dependences of the optical anisotropy parameter of CaF_2 , BaF_2 and SrF_2 crystals” ICONO – LAT 2016, 25-30 September, Belarus, Minsk.
- [B8] A. Yakovlev, I. Snetkov, and O. Palashov, (2016) “Measurements of the Temperature Dependence of the Optical Anisotropy Parameter of CaF_2 , BaF_2 and SrF_2 Crystals”, Frontiers in Optics 2016, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper JTh2A.87.
- [B9] Alexey Yakovlev, Ilya Snetkov, Oleg Palashov Optics + Optoelectronics 2017, Conference “High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology”, Czech Republic, Prague, 23-27 April 2017., Institute of Applied Physics of RAS (Russian Federation) “Measurements of the optical anisotropy parameter in Yb: CaF_2 crystals”, paper 10238-28, Thursday 27 April 2017.
- [B10] Alexey Yakovlev, Ilya Snetkov, Oleg Palashov, Optics + Photonics 2017, Conference “Optical Modeling and Performance Predictions IX”, USA, San Diego, CA, 6-10 August 2017. Institute of Applied Physics of RAS (Russian Federation) “Measurements of the optical anisotropy parameter of Tb: CaF_2 crystal”, paper 10374-16, Monday 7 August 2017.

- [B11] Yakovlev, A., Snetkov, I., Permin, D., Balabanov, S., & Palashov, O. “Faraday rotation in Dy:Y₂O₃ ceramics: temperature and wavelength dependences”, The 22th annual conference on radiophysics, p. 332, Nizhny Novgorod.
- [B12] Alexey Yakovlev, Ilya Snetkov, Oleg Palashov, “Temperature dependence of the dysprosium oxide (Dy₂O₃) based ceramics' Verdet constant.”, Optics + Optoelectronics 2019, High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology IV, 110330X, Czech Republic, Prague (26 April 2019).
- [B13] Yakovlev A. I., Snetkov I. L., Starobor A. V., Palashov O. V., Khazanov E. A, “Prospective materials for Faraday isolators”, LIGO–VIRGO meeting September 2019, September 2 – 6, 2019, Poland, Warsaw.

Список литературы

- [1] <https://www.ligo.caltech.edu>
- [2] <http://www.virgo-gw.eu>
- [3] Jacquemot S., Amiranoff F., Baton S.D., et al. Studying ignition schemes on European laser facilities // *Nucl Fusion*. – 2011. – Т. 51, № 9.– С. 094025.
- [4] Rus B., Batysta F., Čáp J., et al. Outline of the ELI-Beamlines facility // *Proc. SPIE*. – 2011. – Т. – 8080.– С. 808010.
- [5] Divoky M., Smrz M., Chyla M., et al. Overview of the HiLASE project: High average power pulsed DPSSL systems for research and industry // *High Power Laser Sci Eng*. – 2014
- [6] Phillips P., Banerjee S., Smith J., et al. Highly efficient frequency conversion using 100J, 10 Hz DiPOLE DPSSL technology (Conference Presentation) // In: *Proc.SPIE*. Vol 11033. ; 2019.
- [7] Siebold M., Loeser M., Roeser F., et al. Current status of the PEnELOPE project DRACO – Ti: Sa 150 TW laser // 7th international HEC-DPSSL workshop. – 2012
- [8] Moshe I., Jackel S., Lumer Y., Meir A., Feldman R., Shimony Y. Use of polycrystalline Nd:YAG rods to achieve pure radially or azimuthally polarized beams from high-average-power lasers // *Opt Lett*. – 2010. – Т. 35, № 15.– С. 2511-2513.
- [9] Tünnermann H., Puncken O., Weßels P., Frede M., Neumann J., Kracht D. Linearly polarized single-mode Nd:YAG oscillators using [100]- and [110]-cut crystals // *Opt Express*. – 2011. – Т. 19, № 14.– С. 12992-12999.
- [10] Schad S.-S., Gottwald T., Kuhn V., et al. Recent development of disk lasers at TRUMPF // *Proc.SPIE*. – 2016, – Т. 9726. –С. 972615.
- [11] Mironov E.A., Zheleznov D.S., Starobor A. V, et al. Large-aperture Faraday isolator based on a terbium gallium garnet crystal // *Opt Lett*. – 2015. – Т. 40, № 12.– С. 2794-2797.
- [12] Starobor A. V, Snetkov I.L., Palashov O. V TSAG-based Faraday isolator with depolarization compensation using a counterrotation scheme // *Opt Lett*. – 2018. – Т. 43, № 15.– С. 3774-3777.
- [13] Snetkov I.L., Dorofeev V. V., Palashov O. V. Effect of full compensation of thermally induced depolarization in two nonidentical laser elements // *Opt Lett*. – 2016. – Т. 41, № 10.– С. 2374-2377.
- [14] Maiman T.H. Stimulated optical radiation in Ruby // *Nature*. – 1960. – Т. 187– С. 493-494.
- [15] Barnes N.P., Petway L.B. Variation of the Verdet constant with temperature of terbium gallium garnet // *J Opt Soc Am B*. – 1992. – Т. 9, № 10.– С. 1912-1915.
- [16] Koechner W. Thermal Lensing in a Nd:YAG Laser Rod // *Appl Opt*. – 1970. – Т. 9, № 11.– С.

2548-2553.

- [17] Soms L.N., Tarasov A.A., Shashkin V. V Problem of depolarization of linearly polarized light by a YAG: Nd ³⁺ laser-active element under thermally induced birefringence conditions // Sov J Quantum Electron. – 1980. – T. 10, № 3.– C. 350-351.
- [18] Foster J.D., Osterink L.M. Thermal Effects in a Nd:YAG Laser // J Appl Phys. – 1970. – T. 41, № 9.– C. 3656-3663.
- [19] Khazanov E., Andreev N., Palashov O., et al. Effect of terbium gallium garnet crystal orientation on the isolation ratio of a Faraday isolator at high average power // Appl Opt. – 2002. – T. 41, № 3.– C. 483.
- [20] Snetkov I.L. Features of Thermally Induced Depolarization in Magneto-Active Media With Negative Optical Anisotropy Parameter // IEEE J Quantum Electron. – 2018. – T. 54, № 2.– C. 1-8.
- [21] Khazanov E.A. Thermally induced birefringence in Nd:YAG ceramics // Opt Lett. – 2002. – T. 27, № 9.– C. 716-718.
- [22] Joiner R.E., Marburger J., Steier W.H. Elimination of stress-induced birefringence effects in single-crystal high-power laser windows // Appl Phys Lett. – 1977. – T. 30, № 9.– C. 485.
- [23] Vyatkin A.G., Khazanov E.A. Thermally induced depolarization in sesquioxide class m3 single crystals // J Opt Soc Am B. – 2011. – T. 28, № 4.– C. 805.
- [24] Joiner R.E., Marburger J.H., Steier W.H. Critical Orientations for eliminating stress-induced depolarization in crystalline windows and rods // 1977– C. 89-95.
- [25] Klein C.A. Optical distortion coefficient of <111>-oriented CaF₂ windows at chemical laser wavelengths // Appl Phys Lett. – 1979. – T. 35, № 1.– C. 52.
- [26] Nye J.F. *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices* Oxford: Oxford University Press. 1985.
- [27] Burnett J H, Gupta R and Griesmann U 2002 Absolute refractive indices and thermal coefficients of CaF₂, SrF₂, BaF₂, and LiF near 157 nm // Appl. Opt. – 2002. – T. 41, №13.– C. 2508 - 13.
- [28] Feldman A., Horowitz D., Waxler R., Dodge M. *Optical Materials Characterization Final Technical Report February 1, 1978 - September 30, 1978*; 1978.
- [29] Levine Z., Burnett J., Shirley E. Photoelastic and elastic properties of the fluorite structure materials, LiF, and Si // Phys Rev B. – 2003. – T. 68, № 15.– C. 155120.
- [30] Bendow B., Gianino P.D., Tsay Y.F., Mitra S.S. Pressure and stress dependence of the refractive index of transparent crystals // Appl Opt. – 1974. – T. 13, № 10.– C. 2382-2396.
- [31] Feldman A., Waxier R.M., Bureau N. Strain-Induced Splitting and Oscillator-Strength Anisotropy of the Infrared Transverse-Optic Phonon in Calcium Fluoride, Strontium Fluoride, and Barium

- Fluoride // *Phys Rev Lett.* – 1980. – Т. 45, № 2.– С. 126-129.
- [32] Veerabhadra R.K., Narasimhamurty T.S. Photoelastic constants of CaF and BaF₂ // *J Phys Chem Solids.* – 1969. – Т. 31– С. 876-878.
- [33] Krishna Rao K. V, Krishna Murty V.G. Variation with Temperature of the Photoelastic Constants of Sodium Chloride // *Nature.* – 1961. – Т. 190, № 4774.– С. 429-430.
- [34] Krishna Rao K. V., Krishna Murty V.G. Temperature dependence of the photoelastic behaviour of crystals-Part I // *Proc Indian Acad Sci - Sect A.* – 1966
- [35] Paul S.H., Arthur L.R. Pressure Dependence of the Elastic Constants and an Experimental Equation of State for CaF₂ // *Phys Rev.* – 1967. – Т. 161, № 3.– С. 864.
- [36] Gerlich D. Elastic Constants of Barium Fluoride Between 4.2 and 300 oK // *Phys Rev.* – 1964. – Т. 135, № 5A.– С. A1331-A1333.
- [37] Gerlich D. Elastic Constants of Strontium Fluoride Between 4.2 and 300 oK // *Phys Rev.* – 1964. – Т. 136, № 5A.– С. A1331-A1333.
- [38] Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А., Вяткин А.Г., Перевезенцев Е.А. Лазерные и тепловые характеристики кристалла Yb: YAG в диапазоне температур 80 – 300 К // *Квантовая электроника.* – 2011. – Т. 11– С. 1045-1050.
- [39] Andrushchak A.S., Mytsyk B.G., Laba H.P., et al. Complete sets of elastic constants and photoelastic coefficients of pure and MgO-doped lithium niobate crystals at room temperature // *J Appl Phys.* – 2009. – Т. 106, № 7.– С. 073510.
- [40] Snetkov I.L., Mukhin I.B., Palashov O. V, Khazanov E.A. Properties of a thermal lens in laser ceramics // *Quantum Electron.* – 2007. – Т. 37, № 7.– С. 633-638.
- [41] Vyatkin A.G. Thermally Induced Beam Distortions in Sesquioxide Laser Ceramics of m3 Crystal Class—Part I // *IEEE J Quantum Electron.* – 2014. – Т. 50, № 12.– С. 1061-1071.
- [42] Niziev V.G., Nesterov A. V Influence of beam polarization on laser cutting efficiency // *J Phys D Appl Phys.* – 1999. – Т. 32, № 13.– С. 1455-1461.
- [43] Koechner W., Rice D.K. Birefringence of YAG:Nd laser rods as a function of growth direction // *J Opt Soc Am.* – 1971. – Т. 61, № 6.– С. 758-766.
- [44] Machavariani G., Lumer Y., Moshe I., Meir A., Jackel S., Davidson N. Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes // *Appl Opt.* – 2007. – Т. 46, № 16.– С. 3304-3310.
- [45] Moshe I., Jackel S. Influence of birefringence-induced bifocusing on optical beams // *J Opt Soc Am B.* – 2005. – Т. 22, № 6.– С. 1228-1235.
- [46] Lumer Y., Moshe I., Horovitz Z., Jackel S., Machavariani G., Meir A. Thermally induced

birefringence in nonsymmetrically pumped laser rods and its implications for attainment of good beam quality in high-power, radially polarized lasers // *Appl Opt.* – 2008. – T. 47, № 21.– C. 3886-3891.

- [47] Khazanov E. Faraday Isolators for High Average Power Lasers // *Adv. Solid. State. Lasers. Dev. Appl.* Ed. Mikhail Grishin. –Intech 2010. – C. 45-72.
- [48] Robinson C.C. The Faraday Rotation of Diamagnetic Glasses from 0.334 μm to 1.9 μm // *Appl Opt.* – 1964. – T. 3, № 10.– C. 1163–1166.
- [49] Khazanov E.A., Kulagin O. V, Yoshida S., Tanner D.B., Reitze D.H. Investigation of self-induced depolarization of laser radiation in terbium gallium garnet // *IEEE J Quantum Electron.* – 1999. – T. 35, № 8.– C. 1116-1122.
- [50] Snetkov I., Vyatkin A., Palashov O., Khazanov E. Drastic reduction of thermally induced depolarization in CaF_2 crystals with [111] orientation // *Opt Express.* – 2012. – T. 20, № 12.– C. 13357-13367.