

9 авторефер

На правах рукописи



ЖЕЛЕЗНОВ Дмитрий Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАТЕЛЕЙ ФАРАДЕЯ
С КРИОГЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ
ДЛЯ ЛАЗЕРОВ ВЫСОКОЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

01.04.21 — лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



005019977

Нижний Новгород — 2012

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН
(г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
О.В. Палашов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
В.Е. Яшин

кандидат физико-математических наук,
О.Л. Антипов

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт физики микроструктур РАН
(ИФМ РАН)

Защита состоится "12" марта 2012 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан "9" февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Ю.В. Чугунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предмет исследования и актуальность темы

Поляризационные вентиля или изоляторы Фарадея (ИФ) — оптические устройства, впервые описанные в научной литературе в начале 60-х годов прошлого века вскоре после изобретения лазера [1—3], и в настоящее время являются одними из ключевых элементов лазерных схем. При этом интерес к созданию более совершенных изоляторов Фарадея, возникший сразу после их появления [3—9], сохранился и по сей день [10—13]. За это время создан широчайший спектр оптических изоляторов, и сейчас подавляющее большинство лазерных схем, оперирующих со сколько-нибудь высокой мощностью, имеют в своем составе изоляторы Фарадея.

Но в связи с постоянным увеличением средней мощности как импульсно-периодических, так и непрерывных лазеров все более актуальной представляется проблема усовершенствования изоляторов Фарадея адекватно росту мощности лазерного излучения по причине термонаведенных эффектов, возникающих в них из-за поглощения. Дело в том, что из-за относительно большого поглощения в МОЭ вращателей Фарадея (ВФ) ($\sim 10^{-3} \text{ см}^{-1}$) [14—17] — ключевых элементах изоляторов — излучение в них подвергается сильному тепловому самовоздействию. Вызванное поглощением неоднородное по поперечному сечению распределение температуры приводит к неоднородному распределению угла поворота плоскости поляризации, обусловленному зависимостью постоянной Верде от температуры, к появлению, наряду с циркулярным, линейного двулучепреломления (фотоупругий эффект) [18, 19] и к искажению волнового фронта проходящего через вращатель Фарадея оптического излучения (тепловая линза) [20].

Температурная зависимость постоянной Верде и фотоупругий эффект изменяют поляризацию излучения, в результате чего степень изоляции ВФ уменьшается. В [21] было теоретически предсказано, что при больших средних мощностях излучения степень изоляции определяется именно фотоупругим эффектом, впоследствии в работах [19, 22] этот факт получил экспериментальное подтверждение. Аберрации, вызванные тепловой линзой, не приводят к поляризационным искажениям лазерного излучения, но влияют на модовый состав проходящего через ВФ оптического излучения. Существуют задачи (например, детектирование гравитационных волн при помощи лазерных интерферометров [23, 24]), где потери мощности в основной поперечной моде не должны превышать 1—2%. Компенсации термолинзы во ВФ посвящен ряд работ, к которым относятся [12, 14, 25].

Как упоминалось, степень изоляции, важнейшая характеристика изолятора Фарадея, большей частью определяется поляризационными искажениями — величиной деполяризации, вносимой магнитооптическим элементом в проходящее излучение. «Холодная» деполяризация, возникающая в

МОЭ из-за неоднородности и неидеальности оптического элемента (свилли, неоднородность кристаллической решетки и т. д.), и деполяризация, связанная с поперечной неоднородностью магнитного поля [5, 6], как правило, малы ($\sim 10^{-5}$ — 10^{-4}). Деполяризация излучения, обусловленная поглощением в оптических элементах и называемая «горячей» или термонаведенной целиком и полностью зависит от мощности оптического излучения. В лазерных системах с высокой средней мощностью излучения именно термонаведенная деполяризация, значительно превышая «холодную», определяет степень изоляции.

Существуют несколько подходов к проблеме уменьшения термонаведенной деполяризации излучения в магнитооптических элементах ВФ. В основе одного из них лежит идея вычитания фазового набега при помощи замены одного фарадеевского элемента, поворачивающего плоскость поляризации проходящего излучения на 45° , двумя 22.5° -ными фарадеевскими элементами, между которыми находится взаимный оптический элемент [12, 19, 22, 26]. При этом искажения, возникшие при прохождении через первый элемент, частично компенсируются при прохождении через второй. Созданные на основе таких схем ИФ и зеркала Фарадея (ЗФ) обеспечивают надежную развязку при мощности проходящего излучения киловаттного уровня. В последние несколько лет предложен и апробирован еще один способ компенсации [27], при котором компенсирующий оптический элемент находится вне магнитного поля. Препимущества данного подхода заключаются в большей свободе выбора оптической среды для поляризующего элемента: среда, вообще говоря, может быть и не магнитоактивной. Кроме того, применением такого метода компенсации термонаведенной деполяризации можно увеличить степень изоляции вращателей Фарадея, уже работающих по схеме с «традиционной» [19] компенсацией, либо без компенсации. Другой подход к подавлению термонаведенных эффектов заключается в разбиении магнитооптического элемента на несколько тонких дисков, охлаждаемых через оптическую поверхность [28, 29]. Такая геометрия приводит к существенному уменьшению поперечного градиента температуры в дисках. Теоретические оценки показывают, что переход от стержневой геометрии к дисковой позволит создать вращатели Фарадея, работающие при мощности до 10 кВт [28].

Еще одним способом создания вращателей Фарадея для лазерного излучения с высокой средней мощностью является уменьшение тепловыделения непосредственно в магнитооптических элементах. Уменьшение тепловыделения может быть достигнуто либо за счет укорочения МОЭ, либо за счет уменьшения поглощения в нем. В свою очередь, укорочение магнитооптического элемента может быть обеспечено увеличением постоянной Верде парамагнитного МОЭ при охлаждении [3, 10], или увеличением магнитного поля. Существует целый ряд способов увеличения напряженности магнитного поля, среди них — применение в магнитных систе-

мах магнитопроводов [17] и постоянных магнитов с неортогональной намагниченностью [30], охлаждение постоянных магнитов [4а], использование в качестве МС сверхпроводящих соленоидов [3а], создающих в несколько раз более сильные магнитные поля.

Охлаждение изоляторов Фарадея было предложено еще в 1967 г. [3] и было мотивировано отсутствием магнитооптических элементов хорошего оптического качества, обеспечивающих степень изоляции более 20 Дб. Благодаря развитию технологий получения чистых МОЭ и высокоэнергетических ферромагнитных сплавов, имеющих большую коэрцитивную силу и остаточную намагниченность, этот подход на долгое время был забыт. Сегодня охлаждение жидким азотом широко используется в мощном лазеростроении (для улучшения термооптических свойств [31], увеличения коэффициента усиления активных элементов [29, 32] и т. д.). На этом фоне очень привлекательно выглядит возможность существенного укорочения МОЭ (и следовательно, значительного уменьшения выделения тепла в нем) за счет как увеличения при охлаждении как постоянной Верде парамагнитных магнитооптических элементов [10, 33, 34], так и роста поля постоянных магнитов [35, 3а]. Отметим, что охлаждение МОЭ также приводит к улучшению термооптических характеристик [1а, 6а, 7а] и к уменьшению «холодной» деполяризации [1а]. Устройство, в котором вращатель Фарадея подвергается охлаждению до азотных температур, получило название криогенный изолятор Фарадея (КИФ) [5а]. В настоящее время ведется работа по конструированию магнитной системы для КИФ, создающей поле $\sim 2,5$ Тл [11], что позволит укоротить МОЭ и поднять планку рабочей мощности.

Цель работы.

Цель настоящей диссертационной работы заключается в разработке вращателей Фарадея с криогенным охлаждением для лазеров со средней мощностью мультикиловаттного уровня. Для изучения преимуществ криогенного охлаждения и достижения цели работы были решены следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование температурных зависимостей термонаведенной деполяризации, постоянной Верде, оптической силы тепловой линзы, параметра оптической анизотропии термооптических констант P и Q для распространяемых магнитоактивных сред в диапазоне температур 300—80 К.
2. Экспериментальное исследование температурных зависимостей напряженности магнитного поля самарий-кобальтового (Sm-Co) и неодим-железо-борного (Nd-Fe-B) ферромагнитных сплавов в диапазоне температур 300—80 К.
3. Разработка вращателей Фарадея со сверхпроводящими соленоидами в качестве магнитной системы.

4. Разработка вращателя Фарадея, в котором магнитооптический элемент и магнитная система охлаждаются до температуры кипения жидкого азота — криогенного изолятора Фарадея, обеспечивающего надежную степень изоляции лазерного излучения мульткиловаттного уровня.
5. Изучение возможности снижения термонаведенных эффектов, возникающих в магнитооптическом элементе за счет обеспечения теплоотвода через оптическую поверхность.

Научная новизна диссертационной работы обусловлена полученными в ней оригинальными результатами, а именно:

1. В диапазоне 300—80 К впервые измерены зависимости от температуры термооптических характеристик тербий-галлиевого граната (TGG), гадолиний-галлиевого граната (GGG), алюмо-иттриевого граната (YAG) и напряженности поля магнитных систем, состоящих из наиболее распространенных в производстве вращателей Фарадея Nd-Fe-B и Sm-Co ферромагнитных сплавов.
2. При температуре 80 К впервые измерены компоненты деполяризации, обусловленные поперечной неоднородностью магнитного поля (γ_H) и зависимостью постоянной Верде МОЭ от температуры (γ_V). Экспериментальные результаты подтверждены проведенными аналитическими оценками.
3. Разработаны и созданы вращателя Фарадея со сверхпроводящими соленоидами в качестве магнитных систем, способные обеспечить стабильную степень изоляции лазерного излучения субкиловаттного уровня мощности.
4. В разработанном и созданном криогенном изоляторе Фарадея на магнитооптическом элементе стержневой геометрии впервые продемонстрирована стабильная степень изоляции лазерного излучения мощностью до 1500 Вт.
5. Разработан и создан криогенный изолятор Фарадея на дисковом магнитооптическом элементе, в котором дополнительное снижение термонаведенных эффектов обеспечивается организацией теплоотвода с оптической поверхности МОЭ. Вращатель обеспечивает стабильную степень изоляции лазерного излучения мощностью до 1400 Вт и способен обеспечить стабильную степень изоляции излучения мульткиловаттного уровня мощности.

Практическая ценность диссертации:

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке и создании вращателей Фарадея, обеспечивающих стабильную степень изоляции лазерного излучения мощностью до 50 кВт. Кроме того, результаты диссертационной работы могут быть использованы при созда-

нии других криогенных элементов лазерных схем: криогенных дисковых лазеров [36], криогенных ячеек Поккельса [37], а также при реализации других способов охлаждения (элементы Пельтье, фреон-R508).

На основе результатов диссертационной работы было разработано методическое пособие по использованию оптической автоматизированной криогенной системы, вошедшее в отчет по программе «СТАРТ-2009» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Результаты работы легли в основу Патента РФ на изобретение № 2342688 «Оптический вентиль для лазеров большой мощности», а также были удостоены двух дипломов победителей конкурса на право получения гранта правительства Нижегородской области в сфере науки и техники в 2007 году. В 2011 году работа получила поощрительную премию на XIII конкурсе молодых ученых, а также получила поддержку в рамках программы «У.М.Н.И.К. – 2011».

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. При охлаждении до 80 К парамагнитного кристалла TGG в нем уменьшаются термооптические постоянные P и Q , параметр оптической анизотропии ξ . В результате этого уменьшаются оптическая сила тепловой линзы и термонаведенная деполяризация, что в совокупности с увеличением постоянной Верде дает возможность увеличения максимальной мощности вращателя Фарадея с кристаллом TGG в 10 раз по сравнению с комнатной температурой.
2. При охлаждении до 80 К парамагнитного кристалла GGG в нем уменьшается параметр оптической анизотропии ξ , термооптическая постоянная Q и увеличивается коэффициент теплопроводности. В результате этого уменьшается термонаведенная деполяризация, что в совокупности с увеличением постоянной Верде дает возможность увеличения максимальной мощности вращателя Фарадея с кристаллом GGG в 12 раз по сравнению с комнатной температурой.
3. При охлаждении до 80 К напряженность магнитного поля магнитной системы из Nd-Fe-B ферромагнитного сплава увеличивается линейно при охлаждении и достигает максимума при 160 К. При дальнейшем охлаждении напряженность уменьшается и при 80 К сравнивается с напряженностью при комнатной температуре. Напряженность магнитного поля магнитной системы из Sm-Co ферромагнитного сплава при охлаждении до 80 К увеличивается линейно. Таким образом, поскольку при комнатной температуре Sm-Co магниты обладают меньшим запасом магнитной энергии, чем Nd-Fe-B, при 80 К разница между рассмотренными ферромагнитными сплавами практически отсутствует.
4. Увеличение напряженности магнитного поля вращателей Фарадея за счет использования сверхпроводящих электромагнитов позволяет существенно увеличить максимальную мощность. Для поля напряженно-

- стью 50 кЭ, с МОЭ из стекла марки МС-04 с поглощением $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ длиной 9 мм максимальная мощность составляет 620 Вт; из кристалла TGG с поглощением 10^{-3} см^{-1} и длиной 3,5 мм — 6 кВт.
- Использование в криогенном вращателе Фарадея МОЭ из кристалла TGG в форме диска с длиной 3,4 мм и сниженным поглощением $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ позволяет получить стабильную степень изоляции 30 дБ при мощности лазерного излучения 1500 Вт. При этом термонаведенным эффектом, ограничивающим максимальную мощность, является впервые экспериментально обнаруженная и измеренная деполяризация, вызванная температурной зависимостью постоянной Верде.
 - В криогенном вращателе Фарадея с дисковым МОЭ возможно увеличение степени изоляции за счет торцевого теплоотвода. Для МОЭ из кристалла TGG длиной 3,4 мм и сниженным поглощением $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ возможно увеличение степени изоляции при помощи сапфирового диска до 33 дБ (при мощности излучения 1400 Вт) и при помощи диска из YAG — до 38 дБ (при мощности излучения 705 Вт). Обеспечение теплоотвода через обе оптические поверхности МОЭ при помощи двух дисков из YAG увеличивает максимальную мощность до 6 кВт.

Апробация работы. Настоящая диссертационная работа является итогом исследований, проведенных автором в Институте прикладной физики РАН в 2004—2011 гг. Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах отдела 370 и отделения Нелинейной динамики и оптики, а также на следующих областных, всероссийских и международных конференциях и научных школах: X, XI XII, XIII, XV, XVI Нижегородские сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины); Научная студенческая конференция Высшей школы общей и прикладной физики ННГУ «ВШОПФ 2005»; XIII, XIV Конференции молодых ученых «Нелинейные волновые процессы» научной школы «Нелинейные волны»; IV, V Всероссийские школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов; VII международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки»; International conference «ICONO/LAT 2005, 2007, 2010»; 12th, 13th, 14th conference on Laser Optics; Fourth Russian French Laser Symposium; International conference «Photonics West 2006»; International conference «High Power Laser Beams 2006»; International conference «CLEO-Europe IQEC 2007»; International conference «Nonlinear Optics: East-West Reunion 2011». Результаты данной работы докладывались на IX и XIII конкурсах молодых ученых ИПФ РАН в 2007 и 2011 годах, а также на конкурсе молодых специалистов ИПФ РАН «Техника эксперимента-2007».

По теме диссертации опубликовано 5 статей в реферируемых журналах, 2 статьи в сборниках трудов конференций SPIE-Proceedings и 23 тезиса конференций. Кроме того, материалы диссертационной работы легли в ос-

пову патента РФ на изобретение и методического пособия по использованию оптической автоматизированной криогенной системы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы, включающего и работы автора. Общий объем диссертации составляет 121 страниц, включая 27 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 160 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной темы, сформулирована цель работы, приведены выносимые на защиту основные положения, отражена научная новизна, представлена структура и общее содержание работы, подытожены основные результаты.

В работе в качестве подхода к уменьшению тепловыделения во вращателях Фарадея с их последующим использованием в лазерных схемах высокой средней мощности рассматривается криогенное охлаждение устройства или одной из его частей. Реализацией данного подхода является создание криогенного изолятора Фарадея. Увеличение постоянной Верде парамагнитной магнитоактивной среды в таком устройстве позволяет укоротить МОЭ и снизить тепловыделение в нем.

В первой главе приводятся результаты исследования температурных зависимостей термооптических характеристик нескольких магнитооптических сред при охлаждении жидким азотом от комнатной температуры 300 К до 80 К. Перед исследованием, изложенным в рамках данной главы, стояла задача выбрать магнитооптическую среду, использование которой в КИФ в качестве МОЭ было бы наиболее оправдано. Были рассмотрены температурные зависимости термооптических и магнитооптических характеристик трех наиболее распространенных оптических гранатов – тербий-галлиевого граната (TGG), гадолиний-галлиевого граната (GGG), алюмоиттриевого граната (YAG).

В разделе 1.1 вводятся термооптические характеристики ИФ, характеризующие его работу, и параметры магнитоактивной среды, которые, в конечном счете, выступают критериями выбора наилучшей среды.

Изоляторы Фарадея ориентированные на высокую среднюю мощность, характеризуется двумя параметрами: степенью изоляции I и тепловой линзой F_T .

$$F_T = 4\pi a^2 \left(\frac{\alpha L P}{\kappa} P_{las} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$I[\text{dB}] = 10 \lg \left(\frac{1}{\gamma} \right), \quad (2)$$

где α, κ — коэффициенты поглощения и теплопроводности среды; L — длина МОЭ; λ, P_{las} — длина волны, мощность падающего излучения; a — радиус лазерного пучка по уровню e^{-1} ; P — термооптическая постоянная. Деполяризация излучения γ складывается из трех эффектов, первый из которых является прямым следствием неидеальности МОЭ — $\gamma_{\text{хол}}$; второй вызван поперечной неоднородностью продольной компоненты МС — γ_{H} ; третий (термонаведенная деполяризация) обусловлен поглощением излучения и возникновением неоднородного поперечного распределения температуры в МОЭ — γ_{term} . Величина γ_{H} , как и $\gamma_{\text{хол}}$, не зависит от поглощенной мощности, тогда как γ_{term} имеет квадратичную зависимость от мощности излучения. Для аналитической оценки величины γ_{H} в случае параболической зависимости напряженности магнитного поля от поперечной координаты, в рамках главы выведена формула: $\gamma_{\text{H}} \approx \frac{\pi^2}{16} \Delta H^2 \frac{a^4}{H^4}$, где ΔH — носительная разница напряженности магнитного поля в центре кристалла и на его боковой поверхности, характеризуемая поперечной неоднородностью среднего по длине МОЭ магнитного поля.

Термонаведенная деполяризация γ_{term} возникает в связи с неоднородным распределением температуры в МОЭ, ведущем как к неоднородности угла поворота плоскости поляризации, обусловленным зависимостью постоянной Верде от температуры (γ_{ν}) [21], так и к возникновению наряду с циркулярным линейного двулучепреломления (фотоупругий эффект) [19, 21] (γ_{τ}). Деполяризация γ_{τ} в кубическом кристалле зависит от ориентации кристаллографических осей относительно поляризации падающего излучения [19]. В ориентации [001] в магнитном поле наибольшее и наименьшее значения γ_{τ} могут быть вычислены по формуле [21]:

$$\gamma_{\tau}^{\max} = \frac{A}{\pi^2} \left(\frac{\xi \alpha Q L P_{\text{las}}}{\lambda \kappa} \right)^2; \quad \gamma_{\tau}^{\min} = \frac{A}{\pi^2} \left(\frac{\alpha Q L P_{\text{las}}}{\lambda \kappa} \right)^2,$$

где ξ — параметр оптической анизотропии [21]; A — коэффициент, зависящий от профиля лазерного пучка и ориентации кристалла (для ориентации [001] и гауссова пучка $A = 0,137$); Q — термооптическая постоянная, характеризующая величину фотоупругого эффекта [21].

Величина γ_V вычисляется по формуле [21]: $\gamma_V = B \left(\frac{\alpha P_{\text{las}}}{\kappa T} \right)^2$, где B —

численный коэффициент (для гауссова пучка $B = 0,00104$). Именно величина термонаведенной деполяризации ограничивает степень изоляции вращателя Фарадея при высокой средней мощности излучения.

Влияние магнитоактивной среды на степень изоляции изолятора Фарадея при большой средней мощности характеризуется магнитооптической добротностью: $M = \frac{V\kappa}{\alpha Q}$. Магнитоактивные среды представляется разум-

ным сравнивать между собой по величине M , а созданные на их основе вращатели Фарадея — по максимальной мощности лазерного излучения P_{max} , при которой степень изоляции составляет $I = 25$ дБ — приемлемое требование к степени изоляции ИФ, работающих при большой мощности.

В разделе 1.2 обсуждаются результаты измерения температурных зависимостей термооптических характеристик кристаллов TGG. Было выявлено, что при охлаждении до 80 К в кристаллах достигается ослабление тепловой линзы в 3,4 раза [1а], термооптические постоянные P и Q уменьшаются в 6,8 и 5,7 раза соответственно [7а], параметр оптической анизотропии ξ уменьшается в 1,8 раза [2а]. Таким образом, γ_T^{min} уменьшается в 8 раз, что в совокупности с увеличением постоянной Верде в 3,6 раза позволяет увеличить максимальную мощность в 10 раз. В рамках раздела описываются первые экспериментальные измерения γ_V [7а], теоретически описанной в [21] и ограничивающей максимальную мощность ИФ на дисковых МОЭ.

В разделе 1.3 приводятся результаты измерения температурных зависимостей термооптических характеристик кристаллов GGG. Было выявлено, что при охлаждении до 80 К параметр оптической анизотропии ξ уменьшается в 2,4 раза, γ_T^{min} уменьшается в 24 раза [6а], что в совокупности с увеличением постоянной Верде в 2 раза позволяет увеличить максимальную мощность в 12 раз.

В разделе 1.4 приводятся результаты измерения температурных зависимостей магнитооптических характеристик кристаллов YAG. Было выявлено, что, несмотря на наличие допирования 1%ат парамагнитных ионов Nd, имеющая небольшое значение при комнатной температуре постоянная Верде не изменяется при охлаждении [6а]. Однако сравнение величин постоянных Верде кристаллов Nd:YAG ($0,09 \text{ град}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{кЭ}^{-1}$) и Yb:YAG ($0,055 \text{ град}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{кЭ}^{-1}$) с чистым диамагнитным YAG ($0,096 \text{ град}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{кЭ}^{-1}$) с учетом одинакового направления вращения плоскости поляризации этими средами подтверждает увеличение парамагнитной составляющей эффекта Фарадея при наличии парамагнитных допантов.

В разделе 1.5 проводится сравнение исследованных магнитоактивных сред. С точки зрения использования в КИФ со световой апертурой < 30 мм, TGG является самой лучшей средой, поскольку имеет наибольшее значение магнитооптической добротности. В широкоапертурных вращателях Фарадея, с апертурой > 30 мм, GGG значительно превосходит по значению магнитооптической добротности свой единственный аналог — МОС, как во вращателях, работающих при комнатной температуре, так и в криогенных вращателях Фарадея.

В разделе 1.6 подытожены основные результаты первой главы, опубликованные в работах [1а, 2а, 6а, 7а].

Во второй главе приводятся результаты исследования возможности укорочения МОЭ за счет увеличения магнитного поля.

В разделе 2.1 рассмотрены температурные зависимости напряженности магнитного поля наиболее распространенных для создания магнитных систем Nd-Fe-B и Sm-Co ферромагнитных сплавов [1а—5а]. Было выявлено, что напряженность магнитного поля МС из Nd-Fe-B увеличивается линейно при охлаждении и достигает максимума при 160 К. При дальнейшем охлаждении напряженность уменьшается и при 80 К сравнивается с напряженностью при комнатной температуре. Напряженность магнитного поля МС из Sm-Co при охлаждении до 80 К увеличивается линейно. Таким образом, поскольку при комнатной температуре Sm-Co магниты обладают меньшим запасом магнитной энергии, чем Nd-Fe-B, при 80 К разница между рассмотренными ферромагнитными сплавами практически отсутствует.

В разделе 2.2 описываются вращатели Фарадея, в которых увеличение магнитного поля достигается за счет использования соленоидов, криогенно охлажденных до состояния сверхпроводимости [3а, 4а]. Такие МС обеспечивают магнитное поле напряженностью до 50 кЭ. Особенностью описанных ВФ является то, что в процессе работы МОЭ находится при комнатной температуре. Максимальная мощность ВФ на магнитооптическом стекле марки МОС-04 длиной 9 мм составляет 620 Вт. Во ВФ на TGG длиной 3,5 мм было впервые экспериментально продемонстрировано подавление термонаведенной деполяризации в 1,6 раз при 96 Вт за счет охлаждения кристалла TGG через оптическую поверхность. Максимальная мощность такого вращателя при использовании кристалла TGG с традиционным площадью 10^{-3} см² составит 6 кВт.

В разделе 2.3 подытожены основные результаты второй главы опубликованные в работах [1а—5а].

В третьей главе описываются экспериментальные реализации новых типов вращателей Фарадея — криогенных изоляторов Фарадея (КИФ) [5а] — качественно новых устройств, создание которых явилось логическим продолжением наших исследований [1а—4а], изложенных в первой и частично во второй главе. Как упоминалось, охлаждение вращателей Фарадей жидким азотом было предложено ранее [3], но необходимость этого была про-

диктована отсутствием магнитооптических элементов приемлемого оптического качества, ни о какой высокой средней мощности излучения и, соответственно, термонаведенных эффектах речь тогда не шла. Сейчас охлаждение жидким азотом широко используется. В то же время очень привлекательно выглядит возможность совокупного использования эффектов увеличения постоянной Верде и магнитного поля при охлаждении для значительного укорочения МОЭ и уменьшения термонаведенных эффектов в нем. Работы по созданию КИФ были возобновлены [5а—7а]. Результаты измерений основных характеристик КИФ при мощности лазерного излучения более 1 кВт приведены в третьей главе.

В разделе 3.1 приводятся измерения основных характеристик КИФ с МОЭ стержневой геометрии, т. е. имеющего теплоотвод через боковую поверхность. Для TGG длиной 3,4 мм и коэффициентом поглощения $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ продемонстрирована стабильная степень изоляции 31 дБ при мощности лазерного излучения 1500 Вт [7а]. Также в разделе 3.1 обсуждаются способы улучшения теплоотвода, а также методы уменьшения γ_H и γ_V , ограничивающих степень изоляции такого устройства.

Увеличение постоянной Верде и магнитного поля при охлаждении позволило существенно укоротить МОЭ из кристалла TGG, значительно уменьшив в нем количество выделяемого тепла. Поскольку МОЭ КИФ имеет форму диска, можно получить дополнительное подавление термонаведенных эффектов за счет организации торцевого теплоотвода [28, 29]. В разделе 3.2 приводятся результаты модельных экспериментов по организации торцевого теплоотвода с оптических элементов, демонстрирующих 14-кратное уменьшение термонаведенных искажений [4а]. Этот эффект использован при создании КИФ на основе МОЭ из TGG дисковой геометрии длиной 3,4 мм и коэффициентом поглощения $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, в котором за счет торцевого теплоотвода с МОЭ получено увеличение степени изоляции с 30 дБ до 33 дБ (при мощности излучения 1400 Вт) при помощи сапфирового диска и с 36 дБ до 38 дБ (при мощности излучения 705 Вт) при помощи диска из YAG [7а]. Обеспечение теплоотвода через обе оптические поверхности магнитооптического элемента при помощи двух дисков из YAG увеличит, по оценкам, степень изоляции до 37 дБ (при мощности излучения 1400 Вт), а максимальную мощность — до 6 кВт.

В разделе 3.3 подытожены основные результаты третьей главы, опубликованные в работах [4а, 5а, 7а].

В приложении к работе описываются принцип работы и основные характеристики несъемлемой части КИФ, разработанной в процессе создания этого нового типа оптических вентилялей — оптической автоматизированной криогенной системы (АКС) — автономной (не требующей подключения к азотной магистрали) системы с регуляцией температуры, позволяющей реализовать различные (по скорости и по форме зависимости тем-

пературы рабочего тела от времени), наперед заданные режимы охлаждения [5a].

В заключении обсуждаются результаты работы и формулируются планы на ближайшее будущее. Основным результатом работы на данном этапе можно считать создание четырех оригинальных вращателей Фарадея, которых идеологически объединяет одно общее направление — криогенное охлаждение устройства или одной из его частей. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности создания ИФ, работающего при средней мощности вплоть до 50 кВт.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате измерения температурных зависимостей термооптических характеристик ряда гранатов выявлено, что при охлаждении до 80 К в кристаллах TGG достигается ослабление тепловой линзы в 3,4 раза, термооптические постоянные P и Q уменьшаются в 6,8 и 5,7 раза соответственно, параметр оптической анизотропии ξ уменьшается в 1,8 раза, γ_T^{\min} — в 8 раз, что в совокупности с увеличением постоянной Верде в 3,6 раза позволяет увеличить максимальную мощность в 10 раз; в кристаллах GGG параметр оптической анизотропии ξ уменьшается в 2,4 раза, а γ_T^{\min} — в 34 раза, что в совокупности с увеличением постоянной Верде в 2 раза позволяет увеличить максимальную мощность в 12 раз; в кристаллах Nd:YAG постоянная Верде не изменяется при охлаждении, однако сравнение величин постоянных Верде кристаллов Nd:YAG и Yb:YAG с чистым диамагнитным YAG подтверждает увеличение парамагнитной составляющей эффекта Фарадея при наличии парамагнитных допантов.
2. В результате измерения температурных зависимостей напряженности поля магнитных систем выявлено, что при охлаждении до 80 К напряженность магнитного поля Nd-Fe-B сплава увеличивается линейно, достигает максимума при 160 К, при дальнейшем охлаждении напряженность уменьшается и при 80 К сравнивается с напряженностью при комнатной температуре; напряженность магнитного поля Sm-Co сплава увеличивается линейно во всем исследованном диапазоне температур. При 80 К разница между рассмотренными ферромагнитными сплавами практически отсутствует.
3. При температуре 80 К измерены компоненты деполяризации, обусловленные поперечной неоднородностью магнитного поля и зависимостью постоянной Верде магнитооптического элемента от температуры. Экспериментальные результаты подтверждаются проведенными аналитическими оценками величины деполяризации, вызванной поперечной

неоднородностью магнитного поля для случая квадратичной зависимости магнитного поля от поперечной координаты.

4. Разработаны и созданы вращатели Фарадея с использованием сверхпроводящих соленоидов в качестве магнитных систем. Экспериментально продемонстрирована возможность уменьшения термонаведенных эффектов в дисковом МОЭ при помощи организации теплоотвода через оптическую поверхность. Получено уменьшение термонаведенной деполаризации в 1,6 раза при мощности излучения 96 Вт. Для вращателя Фарадея с МОЭ из стекла марки МОС-04 с поглощением $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ длиной 9 мм максимальная мощность составляет 620 Вт; из TGG с поглощением 10^{-3} см^{-1} и длиной 3,5 мм — 6 кВт.
5. Разработан и создан криогенный изолятор Фарадея на МОЭ из кристалла TGG длиной 3,4 мм и сниженным поглощением $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, в котором продемонстрирована стабильная степень изоляции 30 дБ при мощности лазерного излучения 1500 Вт.
6. Разработан и создан криогенный изолятор Фарадея на дисковом МОЭ из кристалла TGG длиной 3,4 мм и сниженным поглощением $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, в котором за счет торцевого теплоотвода осуществляется дополнительное увеличение степени изоляции с 30 дБ до 33 дБ (при мощности излучения 1400 Вт) при помощи сапфирового диска и с 36 дБ до 38 дБ (при мощности излучения 705 Вт) при помощи диска из YAG. Обеспечение теплоотвода через обе оптические поверхности МОЭ при помощи двух дисков из YAG увеличит, по оценкам, степень изоляции до 37 дБ (при мощности излучения 1400 Вт), а максимальную мощность — до 6 кВт.

Цитируемая литература

1. *Robinson C.C.* The Faraday rotation of diamagnetic glasses from 0.334 micrometer to 1.9 micrometer // *Applied Optics*. 1964. V. 3. P. 1163-1166.
2. *Aplet L.J., Carson J.W.* A Faraday effect optical isolator // *Applied Optics*. 1964. V. 3. P. 544-545.
3. *Padula C.F., Young C.G.* Optical isolators for high-power 1.06-micron glass laser systems // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1967. V. QE-3. P. 493-498.
4. *Boord W., Yoh-Han P., Phelps Jr. F., Claspy P.* Far-infrared radiation isolator // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1974. V. 10. P. 273-279.
5. *Gauthier D.J., Narum P., Boyd R.W.* Simple, compact, high-performance permanent-magnet Faraday isolator // *Optics Letters*. 1986. V. 11. P. 623-625.
6. *Андреев Н.Ф., Гаас В.Г., Жаков С.В., Зарубина Т.В., Кузнецов С.В., Новиков М.А., Палашов О.В., Пасманик Г.А., Розентейн П.С., Растегав В.С., Савчук А.И., Смирнова Л.А.* Оптические вентили Фарадея на

- постоянных магнитах для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов длин волн / Препринт ИПФ РАН № 251. г. Горький, 1989.
7. Fischer G. The Faraday optical isolator // Journal of Optical Communications. 1987. V. 8. P. 18-21.
 8. Sansalone F.J. Compact optical Isolator // Applied Optics. 1971. V. 10. P. 2329-2331.
 9. Phipps C.R., Thomas J., Thomas S.J. High-power isolator for the 10- μm region employing interband Faraday rotation in germanium // Journal of Applied Physics. 1976. V. 47. P. 204-213.
 10. Yasuhara R., Tokita S., Kawanaka J., Kawashima T., Kan H., Yagi H., Nozawa H., Yanagitani T., Fujimoto Y., Yoshida H., Nakatsuka M. Cryogenic temperature characteristics of Verdet constant on terbium gallium garnet ceramics // Optics Express. 2007. V. 15. P. 11255-11261.
 11. Palashov O.V., Voitovich A.V., Mukhin I.B., Khazanov E.A. Faraday isolator with 2.5 tesla magnet field for high power lasers // CLEO / EUROPE-EQEC 2009, June 14-19. Munich, Germany, 2009. P.CA1.6 MON.
 12. Хазанов Е.А. Особенности работы различных схем изолятора Фарадея при высокой средней мощности лазерного излучения // Квантовая Электроника. 2000. Т. 30. С. 147-151.
 13. VIRGO-Collaboration In-vacuum Faraday isolation remote tuning // Applied Optics. 2010. V. 49. P. 4780-4790.
 14. Mueller G., Amin R.S., Guagliardo D., Mcferon D., Lundock R., Reitze D.H., Tanner D.B. Method for compensation of thermally induced modal distortions in the input optical components of gravitational wave interferometers // Classical and Quantum Gravity. 2002. V. 19. P. 1793-1801.
 15. TGG (Terbium Gallium Garnet) [электронный ресурс] // Northrop Grumman Corporation. http://www.as.northropgrumman.com/products/synoptics_tgg/index.html (дата обращения: 24.01.2012).
 16. VIRGO-Collaboration In-vacuum optical isolation changes by heating in a Faraday isolator // Applied Optics. 2008. V. 47. P. 5853-5861.
 17. Mukhin I.B., Voitovich A.V., Palashov O.V., Khazanov E.A. 2.1 tesla permanent-magnet Faraday isolator for subkilowatt average power lasers // Optics Communications. 2009. V. 282. P. 1969-1972.
 18. Chen X., Gonzalez S. Laser-induced anisotropy in terbium-gallium garnet // Applied Physics B. 1998. V. 67. P. 611-613.
 19. Хазанов Е.А. Компенсация термонаведенных поляризационных искажений в вентилях Фарадея // Квантовая Электроника. 1999. Т. 26. С. 59-64.
 20. Poteomkin A., Andreev N., Khazanov E., Shaykin A., Zelenogorsky V., Ivanov I., Use of scanning Hartmann sensor for measurement of thermal lensing in TGG crystal., in Laser Crystals, Glasses, and Nonlinear Materials Growth and Characterization III, Y.Y. Kalisky, Editor. 2003, Proc. SPIE: San Jose, California. P. 10-21.

21. *Khazanov E.A., Kulagin O.V., Yoshida S., Tanner D., Reitze D.* Investigation of self-induced depolarization of laser radiation in terbium gallium garnet // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1999. V. 35. P. 1116-1122.
22. *Khazanov E., Andreev N., Babin A., Kiselev A., Palashov O., Reitze D.* Suppression of self-induced depolarization of high-power laser radiation in glass-based Faraday isolators // *Journal of the Optical Society of America B*. 2000. V. 17. P. 99-102.
23. *LIGO-Collaboration T.* Status of the LIGO detectors // *Classical and Quantum Gravity*. 2008. V. 25. P. 114041.
24. *VIRGO-Collaboration T.* VIRGO status // *Classical and Quantum Gravity*. 2008. V. 25. P. 184001.
25. *Zelenogorsky V.V., Kamenetsky E.E., Shaykin A.A., Palashov O.V., Khazanov E.A.* Adaptive compensation of thermally induced aberrations in Faraday isolator by means of a DKDP crystal // *Topical Problems of Nonlinear Wave Physics-2005*, August, 2-9 St.Petersburg - N.Novgorod, 2006. P.597501-1-597501-8.
26. *Андреев Н.Ф., Катин Е.В., Палашов О.В., Потемкин А.К., Райтци Д.Х., Сергеев А.М., Хазанов Е.А.* Использование кристаллического кварца для компенсации термонаведенной деполяризации в изоляторах Фарадея // *Квантовая Электроника*. 2002. Т. 32. С. 91-94.
27. *Snetkov I., Mukhin I., Palashov O., Khazanov E.* Compensation of thermally induced depolarization in Faraday isolators for high average power lasers // *Optics Express*. 2011. V. 19. P. 6366-6376.
28. *Мухин И.Б., Хазанов Е.А.* Использование тонких дисков в изоляторах Фарадея для лазеров с высокой средней мощностью // *Квантовая Электроника*. 2004. Т. 34. С. 973-978.
29. *Tokita S., Kawanaka J., Fujita M., Kawashima T., Izawa Y.* Sapphire-conductive end-cooling of high power cryogenic Yb:YAG lasers // *Applied Physics B*. 2005. V. 80. P. 635-638.
30. *Миронов Е.А., Войтович А.В., Палашов О.В.* Изоляторы Фарадея на постоянных магнитах с неортогональной намагниченностью // *Квантовая Электроника*. 2011. Т. 41. С. 71-74.
31. *Ripin D.J., Ochoa J.R., Aggarwal R.L., Fan T.Y.* 165-W cryogenically cooled Yb:YAG laser // *Optics Letters*. 2004. V. 29. P. 2154-2156.
32. *Backus S., Bartels R., Thompson S., Dollinger R., Kapteyn H.C., Murnane M.M.* High-efficiency, single-stage 7-kHz high-average-power ultrafast laser system // *Optics Letters*. 2001. V. 26. P. 465-467.
33. *Жуков В.В., Закуренко О.Е.* Эффект Фарадея в силикатных стеклах, содержащих редкоземельные элементы, при низких температурах // *Журнал прикладной спектроскопии*. 1967. Т. 6. С. 350-353.
34. *Lee H.G., Won Y.H., Lee G.S.* Faraday rotation of Hoya FR5 glass at cryogenic temperature // *Applied Physics Letters*. 1996. V. 68. P. 3072-3074.

35. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н., Гладышев П.А., Грацианов Ю.А., Зейн Е.Н., Кавалерова Л.А., Пятин Ю.М., Сасатунов Ю.С., Сергеев В.Г., Скоков А.Д., Сухоруков Р.Ю., Чернявская А.М. Постоянные магниты: Справочник. М.: Энергия, 1980. 488 с.
36. 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. 41. С. 1045-1050.
37. Takeuchi Y., Yoshida A., Tokita S., Fujita M., Kawanaka J. Electro-Optic Characteristics of a Cooled Deuterated Potassium Dihydrogen Phosphate Crystal // Japanese Journal of Applied Physics. 2010. V. 49. P. 042602.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

- 1а. Железнов Д.С., Войтович А.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Значительное уменьшение термооптических искажений в изоляторах Фарадея при их охлаждении до 77 К // Квантовая Электроника. 2006. Т. 36. С. 383-388.
- 2а. Zheleznov D.S., Mukhin I.B., Voitovich A.V., Palashov O.V., Khazanov E.A. Cryogenic Faraday isolator for high average power lasers // Proceedings of SPIE. 2006. V. 6100. P. 61000N.
- 3а. Zheleznov D.S., Khazanov E.A., Mukhin I.B., Palashov O.V., Voitovich A.V. Faraday rotators with short magneto-optical elements for 50-kW laser power // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2007. V. 43. P. 451-457.
- 4а. Zheleznov D.S., Khazanov E.A., Mukhin I.B., Palashov O.V. Drastic reduction of heat release in magneto-optical elements: new ways towards a 100 kW average power Faraday isolator // Proceedings of SPIE. 2007. V. 6610. P. 66100F.
- 5а. Железнов Д.С., Зеленогорский В.В., Катин Е.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Криогенный изолятор Фарадея // Квантовая Электроника. 2010. Т. 40. С. 276-281.
- 6а. Starobor A.V., Zheleznov D.S., Palashov O.V., Khazanov E.A. Novel Magneto-optical Media for Cryogenic Faraday Isolators // Journal of Optical Society of America B. 2011. V. 28. P. 1409-1415.
- 7а. Zheleznov D.S., Starobor A.V., Palashov O.V., Khazanov E.A. Cryogenic Faraday isolator with the disk-shaped magneto-optical element // Journal of Optical Society of America B. 2012. V. 29. P. 331-340.
- 8а. Железнов Д.С., Мухин И.Б., Войтович А.В., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Качественное улучшение характеристик магнитооптических устройств за счет их охлаждения до азотных температур // X Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины, 17-22 апреля. "Голубая Ока", Н.Новгород, 2005. С. 110-111.

- 9а. Железнов Д.С., Мухин И.Б., Войтович А.В., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Качественное улучшение характеристик магнитооптических устройств за счет их охлаждения до азотных температур // Научная студенческая конференция Высшей школы общей и прикладной физики ННГУ «ВШОПФ 2005», 26-28 мая. Н. Новгород, 2005.
- 10а. Zheleznov D.S., Mukhin I.B., Voytovich A.V., Palashov O.V., Khazanov E.A. Qualitative improvement of magneto-optical devices by cooling to nitric temperatures // ICONO/LAT, may 11-15. St. Petersburg, 2005. P. ISuT22.
- 11а. Zheleznov D.S., Mukhin I.B., Palashov O.V., Voytovich A.V., Khazanov E.A. Drastic reduction of thermal effect in Faraday isolator by cooling to nitrogen temperatures // Fourth Russian French Laser Symposium September 21-23. Nice, France, 2005.
- 12а. Zheleznov D.S., Voytovich A.V., Mukhin I.B., Palashov O.V., Khazanov E.A. Cryogenic Faraday isolator for high average power lasers // Photonic West. Solid state lasers XV: technology and devices, January 21-26. San Jose. USA, 2006. P. 61000N.
- 13а. Железнов Д.С., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Подавление термонаведенной деполяризации в дисковых оптических элементах // Труды научной школы «Нелинейные волны-2006», Нижний Новгород, 2006.
- 14а. Железнов Д.С., Мухин И.Б., Сидоров Д.В., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Исследование термонаведенной деполяризации в оптических элементах, охлаждаемых жидким азотом // Труды научной школы «Нелинейные волны-2006», Нижний Новгород, 2006.
- 15а. Железнов Д.С., Войтович А.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Улучшение магнитооптических характеристик элементов изолятора Фарадея, при охлаждении до 77К // Труды научной школы «Нелинейные волны-2006», Нижний Новгород, 2006.
- 16а. Железнов Д.С., Войтович А.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Экспериментальная реализация некоторых моделей криогенных изоляторов Фарадея // XI Нижегородская сессия молодых ученых, 16-21 апреля. "Татинец", Нижний Новгород, 2006.
- 17а. Железнов Д.С., Войтович А.В., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Качественное улучшение характеристик охлаждаемых до азотных температур изоляторов Фарадея // XI Нижегородская сессия молодых ученых, 16-21 апреля. "Татинец", Нижний Новгород, 2006.
- 18а. Zheleznov D.S., Khazanov E.A., Mukhin I.B., Palashov O.V. Drastic reduction of heat release in magneto-optical elements: new ways towards 100 kW average power Faraday isolator // XII Conference on Laser Optics, June 26-30. St. Petersburg, 2006. P.TuR1-21.
- 19а. Zheleznov D.S., Khazanov E.A., Mukhin I.B., Palashov O.V. A new way toward faraday isolator for 100 kW average laser power: drastic suppression of heat release in magneto-optical element // International Conference on

High Power Laser Beams, July 3-8. Nizhny Novgorod - Yaroslavl - Nizhny Novgorod, 2006. P. 121.

- 20a. Железнов Д.С. Уменьшение тепловыделения в магнито-оптических элементах – путь создания изоляторов Фарадея для лазеров с высокой средней мощностью // XII Нижегородская сессия молодых ученых «Татинец», 22-27 апреля. «Татинец», Нижний Новгород, 2007.
- 21a. Zheleznov D.S., Khazanov E.A., Mukhin I.B., Palashov O.V., Voitovich A.V. Cryogenic Faraday isolator with Sm-Co magnets // ICONO/LAT May 28 - June 1. Minsk, Belarus, 2007. P. L01-18.
- 22a. Zheleznov D.S., Khazanov E.A., Mukhin I.B., Palashov O.V., Voitovich A.V. Magneto-optical elements shortening - The way towards Faraday isolators for high average laser power // CLEO/Europe - IQEC 2007, June 17-22 munich, Germany, 2007. P. CA-27-MON.
- 23a. Железнов Д.С., Мухин И.Б. Криогенные изоляторы Фарадея на постоянных магнитах из Sm-Co и Nd-Fe-B сплавов // XIII Нижегородская сессия молодых ученых 20-25 апреля. «Татинец», Нижний Новгород, 2008.
- 24a. Zheleznov D.S. Experimental investigation of the cryogenic Faraday isolator // XIII Conference on Laser Optics, June 23-28. St. Petersburg, Russia, 2008.
- 25a. Железнов Д.С., Мухин И.Б. Автоматизированная криогенная система для лазеров высокой средней мощности // VII международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки», 20-21 мая. Нижний Новгород, 2008.
- 26a. Zheleznov D.S., Starobor A.V., Palashov O.V. Cryogenic faraday isolator with disk-shaped magneto-optical element // XIV Conference on Laser Optics, June 28 - July 1. St.Petersburg, Russia, 2010. P. WeR1-p58.
- 27a. Starobor A.V., Zheleznov D.S., Palashov O.V., Khazanov E.A. Novel magneto-optical mediums for cryogenic Faraday isolator // ICONO/LAT 2010, August 23-26. Kazan, Russia, 2010. P. LTuL23.
- 28a. Железнов Д.С., Палашов О.В. Криогенный изолятор Фарадея для лазерной мощности мультикиловаттного уровня // Сборник трудов IV Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, 26-29 апреля. Саров, 2010.
- 29a. Железнов Д.С., Старобор А.В. Криогенный изолятор Фарадея // XVI Нижегородская сессия молодых ученых, 17-22 апреля. «Красный плес», Нижний Новгород, 2011.
- 30a. Zheleznov D.S., Starobor A.V., Palashov O.V. Features of depolarization in cryogenic Faraday isolator with disk-shaped magneto-optical element // Nonlinear Optics: East-West Reunion, September 21-23. Suzdal, Russia, 2011.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Содержание.....	2
Введение.....	4
Глава 1. Измерение температурных зависимостей термооптических характеристик магнитооптических сред.....	22
1.1. Магнитооптическая добротность и другие термооптические характеристики.....	23
1.2. Термооптические характеристики кристалла TGG.....	31
1.3. Термооптические характеристики кристалла GGG.....	46
1.4. Термооптические характеристики кристалла YAG.....	51
1.5. Сравнение гранатов: TGG, GGG и YAG.....	53
1.6. Заключение.....	54
Глава 2. Исследование возможности укорочения МОЭ за счет увеличения магнитного поля.....	57
2.1. Свойства ферромагнитных сплавов при криогенном охлаждении.....	57
2.2. Использование сверхпроводящих соленоидов.....	63
2.3. Заключение.....	66
Глава 3. Криогенные изоляторы Фарадея.....	68
3.1. Стержневая геометрия МОЭ	
3.1.1 Охлаждение через боковую поверхность.....	69
3.1.2 Стержневая геометрия МОЭ. Степень изоляции.....	73
3.2. Дисковая геометрия МОЭ	
3.2.1 Охлаждение через оптическую поверхность. Аспектное соотношение.....	78
3.2.2. Дисковая геометрия МОЭ. Степень изоляции.....	82
3.3. Заключение.....	84
Заключение	85
Список сокращений и основных понятий.....	90
Приложение. Оптическая АКС.....	92
Список литературы.....	103

ЖЕЛЕЗНОВ Дмитрий Сергеевич

**КРИОГЕННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ
ВРАЩАТЕЛЕЙ ФАРАДЕЯ
ДЛЯ ЛАЗЕРОВ ВЫСОКОЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 2.02.2012 г.
Формат $60 \times 90^{1/16}$. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 120 экз. Заказ № 17 (2012).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46