

На правах рукописи

АНТИПОВ Олег Леонидович

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ
С НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ
И ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород, 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Кочемасов Геннадий Григорьевич,
Институт лазерно-физических исследований
Российского федерального ядерного центра
– Всероссийского научно-исследовательско-
го института экспериментальной физики,
г. Саров;

член-корреспондент РАН, доктор физико-
математических наук, профессор
Бабин Сергей Алексеевич,
Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение Институт автоматики
и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск;

доктор физико-математических наук
Венедиктов Владимир Юрьевич,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет “ЛЭТИ”
им. В.И. Ульянова, г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

Защита состоится 21 мая 2018 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета
Д002.069.02 в Институте прикладной физики РАН по адресу: 603950, г.
Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального исследова-
тельского центра Институт прикладной физики Российской академии наук.

Автореферат разослан 13 марта 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.069.02
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

Актуальность исследований

За последние 25 лет техника твердотельных лазеров сделала гигантский скачок в своём развитии. Этот прогресс обусловлен улучшением характеристик активных сред (оптических волокон и кристаллов), появлением новых активных материалов (керамики и поликристаллов высокого оптического качества) и, главное, использованием диодно-лазерной накачки, позволивший существенно повысить эффективность лазерных систем и улучшить качество пучков генерации. Высокоэффективные, мощные и компактные твердотельные лазеры на основе оптических волокон, кристаллов и керамики всё шире применяются в различных отраслях производства, телекоммуникации, медицине, для решения военно-технических задач и в других областях. Дальнейшее расширение сферы применения лазеров требует освоения новых спектральных диапазонов (в частности, среднего инфракрасного (ИК)), а также улучшения пространственно-временных характеристик мощного лазерного излучения.

Для управления параметрами излучения и расширения спектрального диапазона генерации лазерных систем всё шире используются методы и устройства нелинейной оптики. Будущее развитие лазерной техники во многом связано с совершенствованием нелинейно-оптических материалов и структур, а также методов нелинейно-оптического преобразования. На повестке дня стоят, в частности, задачи когерентного и спектрального сложения световых пучков для достижения их высокой мощности при малой расходимости; решение этих задач требует применения и совершенствования методов когерентной и нелинейной оптики. Вместе с тем, повышение мощности излучения и энергии импульсов в твердотельных и волоконных лазерных системах сопровождается возникновением новых нелинейно-оптических эффектов (в частности, в самой активной среде), которые препятствуют достижению высокого пространственно-временного качества излучения. Для предотвращения негативного проявления нелинейно-оптических эффектов требуется лучшее понимание механизмов их развития, а также знание величины нелинейно-оптических параметров лазерных сред.

Таким образом, развитие твердотельных лазеров с высокой эффективностью использования накачки и нелинейно-оптическим управлением пространственно-временными характеристиками излучения и преобразованием длины волны в новые спектральные диапазоны, без сомнения, остаётся актуальной задачей лазерной физики.

Цели диссертационной работы

- выявление механизмов изменений показателя преломления и оптической нелинейности лазерных кристаллов и стёкол, активированных редкоземельными ионами, при их интенсивной накачке; определение параметров этих изменений и нелинейности;

- выявление нелинейно-оптических эффектов в активной среде твердотельных и волоконных лазеров и определение возможностей повышения порога их возникновения;
- определение возможностей использования нелинейно-оптических эффектов (в частности, динамических решёток в активных средах) для улучшения качества пучков лазерной генерации или управления световыми пучками;
- разработка новых высокоэффективных твердотельных лазеров с нелинейно-оптическим преобразованием (в частности, лазеров двухмикронного диапазона длин волн с параметрическим преобразованием излучения в средний ИК диапазон).

Для достижения этих целей выполнялись **следующие задачи**:

1. Исследование механизмов изменения показателя преломления (ИПП) лазерных кристаллов, активированных редкоземельными ионами Nd^{3+} и Yb^{3+} при их интенсивной накачке, методами интерферометрии, спектроскопии и нелинейной оптики. Определение параметров и кинетики электронных ИПП лазерных кристаллов, связанных с различием поляризуемости возбужденных и невозбужденных ионов активатора.

2. Исследование нелинейно-оптического взаимодействия двух и четырёх световых пучков в лазерных кристаллах ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ и $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$) при их интенсивной накачке.

3. Исследование параметрической генерации при совместном вынужденном рассеянии (ВР) пересекающихся световых пучков в лазерных кристаллах и нематических жидких кристаллах при наличии оптической обратной связи (в нелинейных средах с петлёй обратной связи (ПОС)). Определение возможности реализации эффекта обращения волнового фронта (ОВФ) световых пучков в нелинейной среде с ПОС.

4. Исследование твердотельных лазеров, резонаторы которых формируются с участием динамических решёток показателя преломления (РПП) и коэффициента усиления активной среды. Разработка и создание мощных твердотельных лазеров с ламповой и диодной накачкой с адаптивными резонаторами на динамических решётках.

5. Исследование механизмов ИПП сердцевины волоконно-лазерных усилителей на основе кварцевых стёкол (алюмосиликатных и фосфоросиликатных), активированных ионами Yb^{3+} .

6. Исследование возможности использования оптического управления ИПП иттербиевых лазерных волокон для когерентного сложения излучения многоканальных лазерных усилителей.

7. Исследование эффекта низкопроговой модовой неустойчивости в маломодовых иттербиевых волоконно-лазерных усилителях.

8. Разработка эффективных и мощных лазеров на кристаллах $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ с боковой диодной накачкой (в режимах непрерывной генерации, при активной

модуляции добротности или пассивной синхронизации мод) и параметрическим преобразованием излучения в средний ИК диапазон.

9. Исследование структурных, оптических, нелинейно-оптических, спектроскопических и теплофизических свойств лазерной керамики $Tm^{3+}:Lu_2O_3$.

10. Получение лазерной генерации в керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ в двухмикронном диапазоне длин волн (~1967 нм и ~2066 нм) с диодной, лазерной или волоконно-лазерной накачкой в различных режимах: непрерывном, активной модуляции добротности или пассивной синхронизации мод.

11. Исследование гибридных лазерных систем: тулиевый волоконный задающий генератор – усилитель мощности на керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ для излучения на длинах волн 1940 нм и 1908 нм.

12. Исследование возможностей использования лазеров на керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ для накачки параметрических генераторов света (ПГС) среднего ИК диапазона, а также лазеров на монокристаллах $Cr^{2+}:CdSe$ и поликристаллах $Cr^{2+}:ZnSe$, генерирующих в диапазоне длин волн 2,3–2,92 мкм.

13. Оптимизация параметров и разработка эффективных импульсно-периодических лазеров на кристаллах $Ho^{3+}:YAG$ с накачкой излучением $Tm^{3+}:YLF$ лазера или тулиевого волоконного лазера.

14. Исследование возможностей эффективного параметрического преобразования излучения лазеров на кристаллах $Ho^{3+}:YAG$ в средний ИК диапазон в ПГС на основе нелинейно-оптических кристаллов $ZnGeP_2$.

15. Исследование возможностей использования высокоэффективных лазеров на кристаллах $Ho^{3+}:YAG$ и $Tm^{3+}:YLF$ и керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ (генерирующих в диапазоне длин волн 1966–2100 нм) для хирургии биологических тканей и разрушения почечных камней.

Научная новизна

1. С использованием интерферометрических, нелинейно-оптических и спектроскопических методов впервые проведены комплексные исследования ИПП, обусловленных различием поляризуемости ионов активатора Nd^{3+} и Yb^{3+} в основном и возбуждённом состояниях, в лазерных кристаллах и стёклах при интенсивной накачке (диодной, ламповой или лазерной). Для ряда кристаллов, активированных ионами Nd^{3+} ($Nd^{3+}:YAG$, $Nd^{3+}:YVO_4$, $Nd^{3+}:GdVO_4$, $Nd^{3+}:GGG$, $Nd^{3+}:LMA$, $Nd^{3+}:KGW$) и Yb^{3+} ($Yb^{3+}:YAG$, $Yb^{3+}:GGG$, $Yb^{3+}:KYW$, $Yb^{3+}:KGW$, $Yb^{3+}:YVO_4$), а также для некоторых Nd^{3+} -содержащих и Yb^{3+} -содержащих стёкол определена величина различия их поляризуемости в основном и возбуждённом состояниях.

2. Экспериментально и теоретически исследованы нелинейные взаимодействия двух и четырёх световых пучков в лазерных кристаллах $Nd^{3+}:YAG$ на динамических РПП, сопровождающих решётки населённости и обусловленных различием поляризуемости ионов активатора Nd^{3+} .

3. Определены закономерности параметрической генерации при совместном ВР двух пересекающихся световых пучков в слое нелинейной среды (не-

матических жидких кристаллах или лазерных кристаллах) с ПОС при наличии или в отсутствие в ней невзаимных оптических элементов. Определены условия генерации световых пучков с волновым фронтом, обращённым к фронту исходного пучка.

4. Экспериментально и теоретически исследованы твердотельные лазеры на кристаллах $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ и $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ с ламповой или диодной накачкой и динамическим резонатором, формируемым с участием решёток показателя преломления и усиления в активной среде (или только в нелинейной среде), которые индуцируются интерференционным полем световых волн. Определены условия генерации мощных световых пучков высокого качества в лазерах с такими динамическими резонаторами. Показано, что высокая пространственно-угловая и частотная селективность динамических решёток способствует генерации узкополосного излучения с высоким качеством пучка. Показано также, что адаптивные свойства нелинейных петлевых зеркал обеспечивают частичную компенсацию термонаведённых искажений в активной лазерной среде при высокой мощности генерируемого пучка.

5. Проведены экспериментальные и теоретические исследования электронного механизма ИПП сердцевин волоконно-лазерных усилителей на основе кварцевых стёкол (алюмосиликатных и фосфоросиликатных), активированных ионами Yb^{3+} . Показано, что этот механизм обусловлен различием поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов активатора. Определена величина различия поляризуемости уровней ${}^2\text{F}_{5/2}$ и ${}^2\text{F}_{7/2}$ ионов Yb^{3+} в этих стёклах, связанная с различной вероятностью переходов с переносом заряда с лиганда на возбуждённые и невозбуждённые ионы активатора.

6. Экспериментально исследована возможность когерентного сложения излучения двухканального волоконного эрбиевого усилителя при оптическом управлении показателем преломления итербиевого волокна.

7. В волоконно-лазерных усилителях с диаметром сердцевин 8–10 мкм, активированной ионами Yb^{3+} , с малым числом поперечных мод и сохранением поляризации обнаружена низкопороговая неустойчивость основной моды и перекачка энергии в моды с более высоким индексом. Проведены аналитические исследования и численное моделирование показавшие, что основная причина такой модовой неустойчивости связана с рассеянием основной моды на динамических электронных решётках показателя преломления, сопровождающих изменения населённости, которые индуцируются интерференционным полем основной и высшей мод. Показано, что при наличии встречной волны порог модовой неустойчивости ещё более уменьшается из-за четырехволнового взаимодействия двух пар встречных волн на общих динамических РПП активной среды.

8. Предложено использовать керамику $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ для лазерной генерации на длине волны ~ 2 мкм. Проведены комплексные исследования структурных, оптических, нелинейно-оптических, спектроскопических и теплофизических свойств керамики $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$, впервые изготовленной по заказу

автора японской компанией “Konoshima Chemicals”. Получена лазерная генерация на длине волны 2060–2094 нм в керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с диодной-лазерной накачкой (на длине волны 796 нм, или 811 нм, или 1200 нм). Продемонстрированы возможности реализации импульсно-периодической генерации в лазерах на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ (с диодно-лазерной или лазерной накачкой на длине волны 796 нм) за счёт активной модуляции добротности (в импульсах наносекундной длительности) или пассивной синхронизации мод (в импульсах длительностью 150–400 фс) на длине волны ~2070 нм. Обнаружена перестройка длины волны лазерной генерации в этой керамике с 2066 нм на 1967 нм при её накачке интенсивным излучением волоконного лазера на длине волны 1670 нм. Исследованы гибридные лазерные системы: волоконный задающий генератор – усилитель мощности на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$, при этом усиливаемый сигнал (на длине волны 1940 нм или 1908 нм) и пучок накачки (на длине волны 1670 нм или 1678 нм) распространялись в одном и том же одномодовом волокне. Показана возможность использования импульсно-периодического излучения лазера на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ для накачки лазеров на монокристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ и поликристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, генерирующих на длинах волн ~2,92 мкм и 2,35–2,74 мкм, соответственно.

9. Проведены исследования и найдена оптимальная концентрация активатора, ионов Ho^{3+} , в кристаллах $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ и параметры резонаторов лазеров на этих кристаллах с накачкой излучением тулиевых волоконных лазеров для высокоэффективной генерации на длине волны ~2097 нм.

10. Продемонстрирована возможность получения импульсно-периодической генерации в диапазоне длин волн 3,5–5 мкм со средней мощностью более 10 Вт в ПГС на тандеме нелинейно-оптических элементов ZnGeP_2 с накачкой излучением $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазеров на длине волны 2097 нм. Получена высокая эффективность преобразования излучения $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазера в излучение ПГС среднего ИК диапазона (по суммарной средней мощности холостой и сигнальной волн), достигающая более ~40%, при общей эффективности преобразования мощности излучения волоконного лазера (на 1908 нм) в средний ИК диапазон – 25%. Развита теоретическая модель ПГС на ZnGeP_2 , учитывающая модовый состав генерации, снос пучков в нелинейном элементе и тепловые эффекты, и на её основе выполнены численные расчёты, результаты которых хорошо согласуются с экспериментами. В результате численных расчётов показано, что широкие спектральные линии сигнальной и холостой волн параметрического генератора при его узкополосной накачке обусловлены кластерами мод с волновой расстройкой, кратной 2π .

Научная и практическая значимость работы

Полученные данные о механизмах и параметрах ИПП лазерных кристаллов и стёкол позволяют точнее определять величину оптических искажений световых пучков в лазерных усилителях и генераторах при интенсивной

накачке (диодной, лазерной или ламповой). Продемонстрированные возможности оптического управления показателем преломления лазерных кристаллов и стёкол могут быть положены в основу создания мощных лазерных систем, в частности, многоканальных усилителей с когерентным сложением световых пучков. Развитые представления о нелинейно-оптическом взаимодействии световых пучков в твердотельных и волоконных усилителях позволяют предсказывать и повышать пороги возникновения негативных нелинейно-оптических эффектов, таких как пространственная модовая неустойчивость.

Полученные данные о структурных, оптических, нелинейно-оптических, спектроскопических, теплофизических и генерационных свойствах новой керамики $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ могут быть использованы для создания лазерных систем двухмикронного диапазона длин волн на её основе.

Созданы лабораторные макеты ряда высокоэффективных и мощных твердотельных и гибридных лазеров (в частности, на керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ и кристаллах $Ho^{3+}:YAG$, $Nd^{3+}:YAG$ и $Nd^{3+}:YVO_4$, $Cr^{2+}:ZnSe$), которые могут быть использованы для прецизионной обработки материалов, медицины, дистанционной диагностики и в других областях.

Создан и сдан заказчику опытный образец лазерной системы среднего ИК диапазона (на длинах волн 3,5–5 мкм). Создан опытный образец хирургического лазера на керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ для отоларингологии, который проходит доклиническую апробацию. Подобные лазеры могут быть использованы и в других отраслях медицины.

Достоверность полученных результатов обеспечивается высоким уровнем экспериментальной техники и методик измерений; сопоставлением результатов, полученных различными методами измерений и в различных условиях (лабораториях); проведением теоретических и численных исследований, моделирующих эксперименты; применением современных теоретических представлений и их развитием при анализе результатов экспериментов и численных расчётов; сравнением полученных результатов с литературными данными.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1) В лазерных кристаллах и стёклах, активированных редкоземельными ионами, при их интенсивной накачке (диодной, лазерной или ламповой) существуют изменения показателя преломления, обусловленные различием поляризуемости ионов активатора в основном и возбуждённом состояниях. Величина различия поляризуемости (определённая для ряда кристаллов $Nd^{3+}:YAG$, $Nd^{3+}:YVO_4$, $Nd^{3+}:GdVO_4$, $Nd^{3+}:GGG$, $Nd^{3+}:LMA$, $Nd^{3+}:KGW$, $Yb^{3+}:YAG$, $Yb^{3+}:GGG$, $Yb^{3+}:KYW$, $Yb^{3+}:KGW$, $Yb^{3+}:YVO_4$, а также ряда стёкол) зависит как от квантовых свойств иона активатора (Nd^{3+} , Yb^{3+} или других), так и от характеристик матрицы. В лазерных материалах, активированных

ионами Nd^{3+} , различие поляризуемости уровней $4\text{F}_{3/2}$ и $4\text{I}_{9/2}$ (вне линии усиления на переходе между этими уровнями) обусловлено разной вероятностью межконфигурационных переходов $4\text{f}^3 \rightarrow 4\text{f}^25\text{d}$ (между оболочками 4f и 5d) с этих уровней. Нерезонансное различие поляризуемости ионов Yb^{3+} на уровнях $2\text{F}_{5/2}$ и $2\text{F}_{7/2}$, в лазерных кристаллах и стёклах, активированных этими ионами, обусловлено разной вероятностью переходов с переносом заряда с лиганда на ион или переходов между смешанными орбиталями.

2) Взаимодействие двух или четырёх световых волн в активной среде твердотельных лазеров обусловлено динамическими решётками показателя преломления и усиления, которые сопровождают решётки населённости, индуцированные интерференционным полем световых волн в активной среде. Динамические решётки показателя преломления возникают вследствие различия поляризуемости ионов активатора, а также из-за различного тепловыделения в максимумах и минимумах решётки инверсной населённости активной среды.

3) В слое нелинейной среды (типа нематического жидкого кристалла или лазерного кристалла) с петлёй обратной связи существует параметрическая генерация световых волн, связанная с совместным вынужденным рассеянием исходного и прошедшего петлю световых пучков. Пучок параметрической генерации может иметь волновой фронт, обращённый к волновому фронту исходного светового пучка.

4) Резонаторы твердотельных лазеров могут формироваться с участием динамических решёток (или голографических зеркал), индуцируемых волнами генерации в нелинейной и/или активной среде. Высокая пространственно-угловая и частотная селективность динамических решёток способствует генерации узкополосного излучения с высоким качеством пучка. Адаптивные свойства резонаторов с динамическими голографическими зеркалами обеспечивают частичную компенсацию термонаведённых искажений в активной среде и позволяют получать пучки высокого качества при высокой в среднем по времени мощности лазерной генерации.

5) Когерентное сложение пучков излучения системы параллельных волоконно-лазерных усилителей может быть реализовано с высокой эффективностью за счёт оптически-управляемых изменений показателя преломления в самих лазерных волокнах. Управление показателем преломления итербиевого волокна, в частности, может быть осуществлено излучением накачивающей волны (на длине волны 980 нм) и сигнала насыщения (на длине волны 1064 нм). Использование алгоритма амплитудной модуляции управляющего сигнала и синхронного детектирования в цепи обратной связи обеспечивает высокое быстродействие фазовой подстройки, что позволяет компенсировать акустические шумы в полосе частот более 10 кГц.

6) В волоконно-лазерных усилителях с диаметром сердцевины 8–10 мкм, активированной ионами Yb^{3+} , с малым числом поперечных мод и сохранением поляризации существует низкопороговая неустойчивость основной моды

излучения, приводящая к перекачке её энергии в моды с более высоким индексом. Порог модовой неустойчивости по мощности выходного сигнала варьируется от 1 до 100 Вт и зависит как от параметров волокна (диаметра сердцевины, числовой апертуры, длины, уровня легирования ионами Yb^{3+} , отражения от выходного торца), так и от характеристик сигнала (ширины линии, мощности входного сигнала, длины волны, длительности импульсов). Основная причина низкопороговой модовой неустойчивости связана с рассеянием основной моды на динамических электронных решётках показателя преломления, сопровождающих решётки населённости, которые индуцируются интерференционным полем основной и высшей мод. При наличии встречной волны порог модовой неустойчивости ещё более уменьшается из-за четырехволнового взаимодействия двух пар встречных волн на общих динамических решётках показателя преломления активной среды.

7) Керамика $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ (высокого оптического качества) может быть использована для создания высокоэффективных и мощных лазеров (с диодной, лазерной или волоконно-лазерной накачкой), генерирующих в двухмикронном диапазоне длин волн. В лазерах на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ реализуется непрерывная или импульсно-периодическая генерация (в режиме модуляции добротности или синхронизации мод) в пучках высокого качества. Широкая линия усиления лазерной керамики $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ позволяет осуществлять перестройку длины волны лазерного усиления или генерации от 1900 до 2100 нм, а также генерацию последовательности фемтосекундных импульсов длительностью $\sim 150\text{--}400$ фс. Излучение лазеров на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ может быть использовано для накачки лазеров на монокристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ и поликристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, генерирующих на длинах волн $\sim 2,92$ мкм и $2,3\text{--}2,74$ мкм, соответственно, а также для нелинейно-оптического параметрического преобразования в средний ИК диапазон.

8) Параметрический генератор на основе тандема нелинейно-оптических элементов ZnGeP_2 с накачкой излучением импульсно-периодического $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазера (на длине волны 2097 нм) позволяет получать излучение среднего ИК диапазона (на длинах волн 3,6–4,7 мкм) со средней по времени мощностью более 10 Вт в пучках высокого качества. Широкие спектральные линии сигнальной и холостой волн при узкополосной накачке ПГС обусловлены кластерами мод с волновой расстройкой, кратной 2π .

9) Опытный образец лазера для хирургии мягких биотканей разработан на основе керамики $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с диодной накачкой. Применение импульсно-периодического излучения лазеров на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ на длине волны ~ 2 мкм с энергией импульсов 2–5 мДж, их длительностью 20–40 нс и частотой повторения 0,2–10 кГц позволяет также выполнять также контролируемый разлом почечных конкрементов (различного химического состава и плотности) до фрагментов, дающих возможность осуществить их удаление без разбрасывания содержимого.

Апробация работы. Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались автором на семинарах в ИПФ РАН, ИК РАН, ИОФ РАН, НЦВО РАН, ИПМ РАН, ННГУ, ИФМ РАН, ИФ НАН Беларуси (г. Минск), Имперском колледже г. Лондона (Великобритания), Техническом университете г. Берлина (Германия), Техническом университете г. Потсдама (Германия), лазерном центре г. Ганновера (Германия), Ливерморской национальной лаборатории (США), исследовательской лаборатории Хьюза в Лос-Анжелесе (США), исследовательском центре TRW в Лос-Анжелесе (США), Свободном Брюссельском университете и университете телекоммуникаций г. Монс (Бельгия), университетах г. Монтпелье и г. Каен (Франция), Астонском университете г. Бирмингема (Великобритания).

Материалы диссертации были представлены в более чем 300 докладах (из них в 16 приглашённых докладах) на международных и всероссийских конференциях.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 127 работ, из которых 3 монографии, 73 статьи опубликованы в реферируемых журналах (44 – в зарубежных журналах, 29 – в изданиях, входящих в перечень ВАК); 2 патента РФ; 1 препринт; 47 работ опубликованы в материалах крупных международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора. Все основные результаты работы получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Часть работ, результаты которых вошли в диссертацию, выполнено и опубликовано без соавторов, но большинство работ – в соавторстве. В коллективных работах соискателю принадлежит определяющий вклад в постановке задачи, определении направления и метода исследований, интерпретации результатов.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 353 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 428 наименований; содержит 238 рисунков и 16 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования. Отмечена научная новизна и практическая значимость работы. Приводятся основные положения, выносимые на защиту; перечень научных публикаций по теме диссертации; сведения об апробации работы, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

Первая глава посвящена исследованиям механизмов ИПП лазерных кристаллов при интенсивной накачке. В параграфе 1.1. приводится теоретическое описание основных механизмов инерционных ИПП в лазерных кристаллах при изменении населённости их энергетических уровней: теплового, обусловленного тепловыделением при релаксации возбуждённых ионов, и

электронного, обусловленного различием поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов активатора. Электронную компоненту ИПП кристалла δn_e при изменении населённости уровней ионов можно описать выражением (которое является следствием формулы Лорентца - Лоренца):

$$\delta n_e(\nu) = \frac{2\pi F_L^2}{n_0} \sum_q \Delta p_q(\nu) \delta N_q, \quad (1)$$

где $F_L = (n_0^2 + 2)/3$ – фактор локального поля (фактор Лорентца), n_0 – показатель преломления, δN_q – изменения населённости q -го уровня, $\Delta p_q(\nu)$ – различие поляризуемости частиц среды (на частоте ν) на q -м возбужденном уровне и в основном состоянии (либо в некотором промежуточном состоянии, с которого произошёл переход). Различие поляризуемости $\Delta p(\lambda)$ (при изменении населённости только одной пары уровней F и I , основного и возбуждённого состояний, соответственно) может быть рассчитано с помощью соотношения Крамерса-Кронига из известной дисперсионной зависимости сечений переходов $\Delta\sigma(\lambda) = \sigma_p(\lambda) + \sigma_e(\lambda) - \sigma_{ESA}(\lambda)$:

$$\Delta p_{FI}(\lambda) = \frac{n_0}{4F_L^2 \pi^3} P \int_0^\infty \frac{\Delta\sigma(\lambda')}{(\lambda'^2 / \lambda^2) - 1} d\lambda', \quad (2)$$

где σ_p , σ_e , σ_{ESA} – сечения переходов с поглощением из основного состояния, с излучением или поглощением из возбуждённого состояния, соответственно; $P \int_0^\infty \dots d\lambda$ – интеграл в смысле главного значения.

Изменения населённости уровней, имеющих различную поляризуемость, под действием световых волн приводят к изменению линейной восприимчивости среды и появлению “кубичной” оптической нелинейности для этих волн.

В параграфе **1.2** приводится методика и результаты исследования ИПП лазерного кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ при диодной накачке с помощью поляризационного интерферометра Жамена-Лебедева (рис. 1). В разделе **1.2.1** описываются интерферометрические исследования при продольной диодной накачке кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, в разделе **1.2.2** – интерферометрические исследования при поперечной диодной накачке этого кристалла, в разделе **1.2.3** – интерферометрические исследования при ламповой накачке этого же кристалла и усилении в нём светового пучка на длине волны резонансного перехода.

Основное внимание уделяется разделению тепловых и электронных ИПП, связанных с различием поляризуемости ионов Nd^{3+} в основном состоянии (на уровне ${}^4F_{3/2}$) и в возбуждённом состоянии (на уровне ${}^4I_{9/2}$). Сравниваются измеренные параметры электронных ИПП в кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ при различных способах накачки, отмечается нелинейный рост наведённых изменений при большой мощности накачки (особенно при широкополосной ламповой накачке), который объясняется заселением высоколежащих квазиметастабильных уровней ионов Nd^{3+} (${}^2F(2)_{5/2}$, ${}^4D_{3/2}$, ${}^2P_{3/2}$).

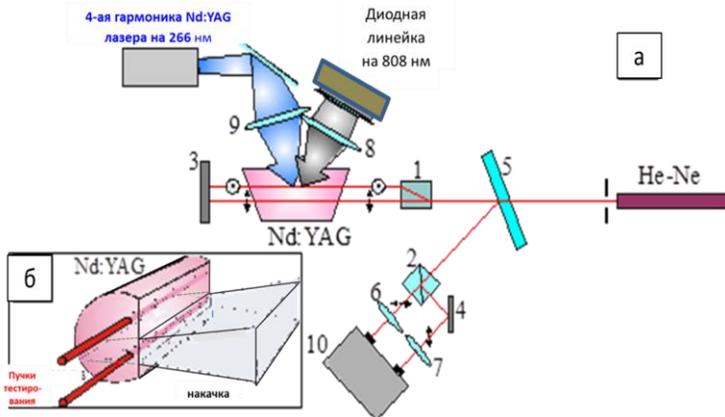


Рис. 1. Схема тестирования ИПП с помощью интерферометра Жамена-Лебедева (1, 7–10 – фокусирующие линзы; 2 – поляризационный делитель; 3, 6 – глухие зеркала; 4 – полупрозрачное зеркало; 11 – двухканальный дифференциальный усилитель) (а) и накачки кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ (диодной матрицей и 4-й гармоникой Nd:YAG лазера) (б).

В параграфе 1.3 приведены результаты исследований спектров люминесценции кристаллов $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ и $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ при их диодной накачке в комбинации с излучением на длинах волн 532 нм, 354,7 нм или 266 нм. При этом спектрально-идентифицированы переходы с высоколежащих квазиметаустойчивых энергетических уровней ионов Nd^{3+} : ${}^2\text{F}(2)_{5/2}$, ${}^4\text{D}_{3/2}$, ${}^2\text{P}_{3/2}$, заселяемых при комбинированной накачке за счёт переходов из возбуждённого состояния (с уровня ${}^4\text{F}_{3/2}$). Эти исследования подтвердили возможность двухступенчатого заселения высоких квазиметаустойчивых уровней, дающих вклад в нелинейный рост электронных ИПП при мощной полихроматической накачке.

В параграфе 1.4 приведены результаты исследований ИПП в кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ методом тестирования динамических решёток. В разделе 1.4.1 описывается тестирование динамических РПП в кристаллах $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ с лазерной накачкой (рис. 2). Динамическая решётка возбуждалась в элементе из кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ двумя пересекающимися лазерными пучками на одной из трёх длин волн: 808 нм, 1064 нм или 266 нм. В последних двух случаях использовалась также однородная накачка кристалла на длине волны 808 нм. Динамическая решётка считывалась излучением He-Ne лазера на длине волны 633 нм.

В подразделе 1.4.1.1 приводятся результаты тестирования решётки, записанной излучением на длине волны 808 нм (стандартной для диодной накачки этого кристалла). За счёт разного времени релаксации разделяются вклады тепловой и электронной составляющей динамической решётки, и определяются параметры этих решёток. Обсуждается роль тепловыделения при релаксации на верхнем (${}^4\text{F}_{3/2}$) и нижнем (${}^4\text{I}_{1/2}$) энергетических уровнях лазерного перехода. Обсуждается влияние кросс-релаксации и ап-конверсии ионов Nd^{3+} на результаты измерений.

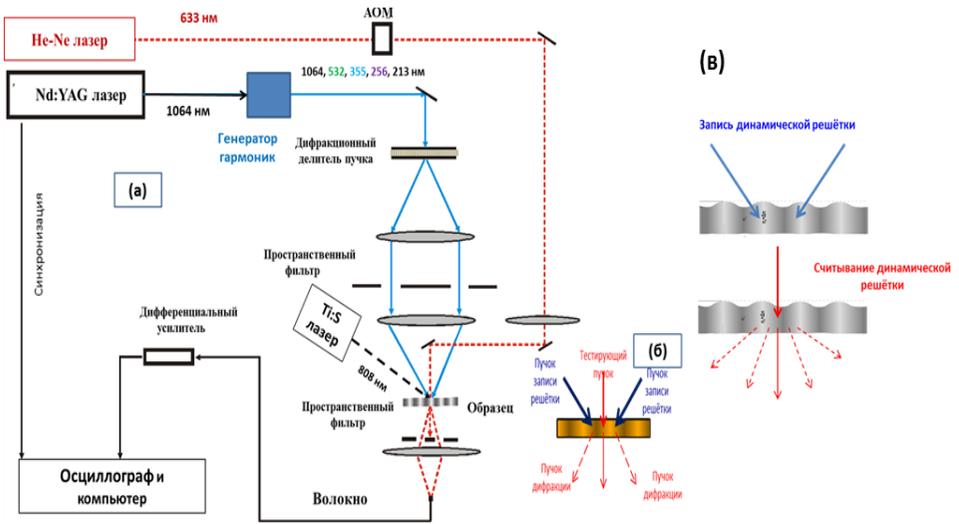


Рис. 2. Схема экспериментов по тестированию динамической решётки в пластине $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ (а), диаграмма пучков накачки, пробного и дифрагированных пучков, а также решетка показателя преломления в пластине (б); схема записи и считывания раздельно (в).

В подразделе **1.4.1.2** приводятся результаты тестирования РПП, сопровождающей решётку населённости, которая записывалась в лазерном кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ (при его однородной накачке на 808 нм) пучком на длине волны усиления 1064 нм. Обсуждаются проявления эффектов ап-конверсии при большой мощности накачки. В подразделе 1.4.1.3 приводятся результаты тестирования РПП, которая возбуждалась в кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ (с накачкой импульсами $\text{Ti}:\text{Sa}$ лазера на 808 нм или без неё) пучками лазерного излучения на длине волны 266 нм. Обсуждается вклад в амплитуду РПП заселения высоколежащего квазиметаустойчивого уровня ${}^2\text{F}(2)_{5/2}$, переходов с переносом заряда с иона на лиганд и генерации свободных носителей. В разделе **1.4.2** приводятся результаты тестирования динамической решётки, возбуждаемой в кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ с ламповой накачкой пересекающимися пучками излучения на длине волны резонансного усиления - 1064 нм. При этом тестирующий пучок имеет длину волны 1054 нм вне линии резонансного усиления. Приводится сравнение полученных результатов экспериментов по тестированию (или невырожденному четырёхволновому взаимодействию (ЧВВ)) с теорией. Отмечаются вклады процессов заселения высоколежащих квазиметаустойчивых уровней в формирование РПП.

В параграфе **1.5** обсуждаются зависимости электронных ИПП кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ и величины различия поляризуемости основного и возбуждённого состояний от длины волны (рис. 3). При этом сравниваются величины экспериментально-измеренных изменений вне линии усиления и аналитические оценки внутри этой линии (на длине волны ~ 1064 нм).

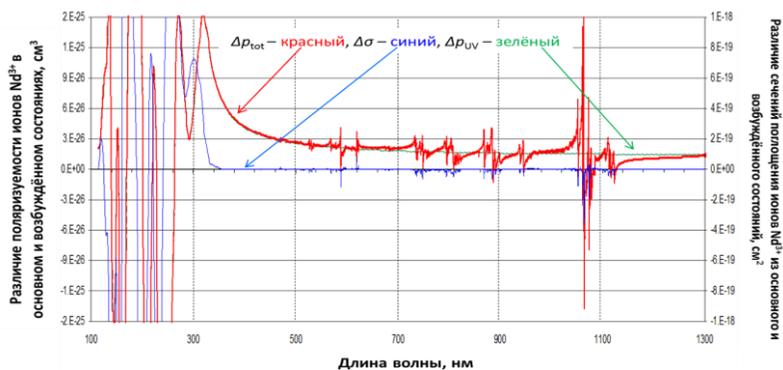


Рис. 3. Различия поляризуемости ионов Nd^{3+} в состояниях ${}^4\text{I}_{9/2}$ и ${}^4\text{F}_{3/2}$ в диапазоне длин волн 100 нм – 1300 нм (красная), “нерезонансная” часть $\Delta\rho$, обусловленная УФ крылом поглощения (зелёная), разница эффективных сечений переходов (синяя).

В параграфе 1.6 приводятся результаты сравнительных исследований электронных ИПП в лазерных кристаллах $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$, $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$, $\text{Nd}^{3+}:\text{GGG}$, $\text{Nd}^{3+}:\text{LMA}$, $\text{Nd}^{3+}:\text{KGW}$ и некоторых Nd^{3+} -содержащих стёклах, выполненных методами тестирования динамических решёток и поляризационной интерферометрии. Приводятся гистограммы (рис. 4) и таблицы результатов этих измерений для всех исследованных лазерных материалов.

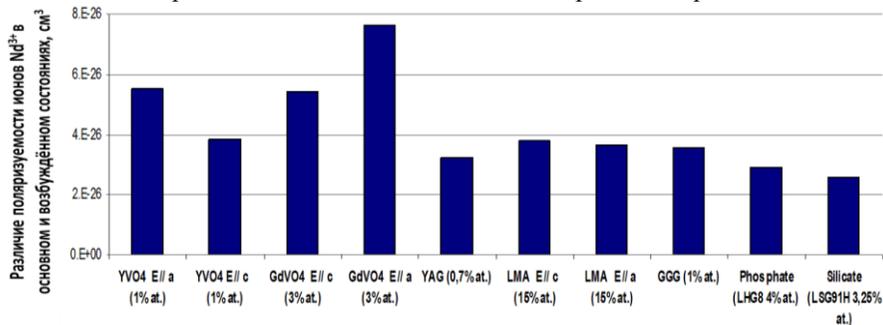


Рис. 4. Гистограмма различия поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов Nd^{3+} ($\Delta\rho_{\text{П}}$) для ряда Nd-содержащих кристаллов и стёкол.

В параграфе 1.7 приводятся результаты исследования ИПП лазерных кристаллов, активированных ионами Yb^{3+} , при диодно-лазерной и лазерной накачке. Для этого используются те же методы и приёмы, что и при исследовании Nd^{3+} -содержащих лазерных материалов. В разделе 1.7.1 описываются интерферометрические исследования ИПП в кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ при диодной накачке. Разделяются тепловой и электронный вклады ИПП, определяется величина $\Delta\rho$ ионов Yb^{3+} в основном (${}^2\text{F}_{7/2}$) и возбуждённом (${}^2\text{F}_{5/2}$) состояниях. Приводятся также результаты интерферометрических исследований ИПП в кристаллах $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ при их накачке излучением Ti:S лазера на длине волны 969 нм. В разделе 1.7.2 приводятся результаты иссле-

дований ИПП лазерных кристаллов $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Yb}^{3+}:\text{GGG}$, $\text{Yb}^{3+}:\text{KYW}$, $\text{Yb}^{3+}:\text{KGW}$, $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ методом тестирования динамических решёток. Разделяются тепловая и электронные компоненты этих решёток, и определяется величина $\Delta\rho$ ионов Yb^{3+} в основном (${}^2\text{F}_{7/2}$) и возбуждённом (${}^2\text{F}_{5/2}$) состояниях в этих кристаллах. Приводится сводная таблица для величины $\Delta\rho$ и экспериментально-определённых коэффициентов температуропроводности во всех исследованных лазерных кристаллах, активированных Yb^{3+} . В разделе **1.7.3** приводятся результаты исследования электронных ИПП кристаллов, активированных ионами Yb^{3+} , методом измерения поглощения из возбуждённого состояния. Из известных спектров поглощения с помощью соотношения Крамерса-Кронига рассчитывается величина $\Delta\rho$ ионов Yb^{3+} в основном (${}^2\text{F}_{7/2}$) и возбуждённом (${}^2\text{F}_{5/2}$) состояниях и сравнивается с результатами прямых экспериментальных измерений этой величины. В разделе **1.7.4** обсуждается механизм электронных ИПП кристаллов, активированных ионами Yb^{3+} . Показано, что в большинстве этих лазерных кристаллов основной вклад в различие поляризуемости уровней ${}^2\text{F}_{7/2}$ и ${}^2\text{F}_{5/2}$ (на длинах волн $\sim 0,6\text{-}1,0$ мкм) вносят переходы с переносом заряда с иона активатора на лиганд. В кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{KGW}$ дополнительный вклад может быть обусловлен переходом между смешанными орбиталями $\text{Yb}^{3+}(4f), \text{O}^{2-}(2p) \rightarrow \text{W}^{6+}(5d)$.

В заключительном параграфе **1.8** приводятся основные результаты и выводы этой главы. Отмечается, что электронные ИПП являются принципиально неустранимыми и накладывают серьёзные ограничения на создание безбаррационных лазерных систем. Электронные ИПП являются локальным механизмом, независимым от формы активных элементов, и могут преобладать над тепловыми при накачке с малым дефектом кванта в волокнах, стержнях или тонких дисках с ограниченным тепловым нагревом или в нестационарном режиме (при малом изменении температуры).

Вторая глава посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям параметрической генерации световых волн при ЧВВ на динамических решётках, формируемых с участием внешнего сигнала в слое нелинейной среды с ПОС. В параграфе **2.1** приводятся результаты теоретических исследований параметрической генерации при совместном ВР пересекающихся пучков в слое нелинейной среды с ПОС (рис. 5).

В разделе **2.1.1**, исходя из условий четырехволнового синхронизма, обсуждаются геометрические особенности совместного ВР пересекающихся световых пучков. В разделе **2.1.2** в приближении плоских монохроматических волн рассчитывается порог параметрической генерации при совместном ВР двух пересекающихся световых волн в слое нелинейной среды (с кубичной инерционной нелинейностью, типа тепловой или ориентационной) и с ПОС. В разделе **2.1.3** на основе аналитических оценок порога генерации обсуждаются особенности совместного ВР пространственно-неоднородных пучков в нелинейной среде с обратной связью. При этом обсуждается, в частности, возможность реализации эффекта ОВФ световых пучков в слое среды с ПОС (при наличии или в отсутствие в ней невзаимных элементов).

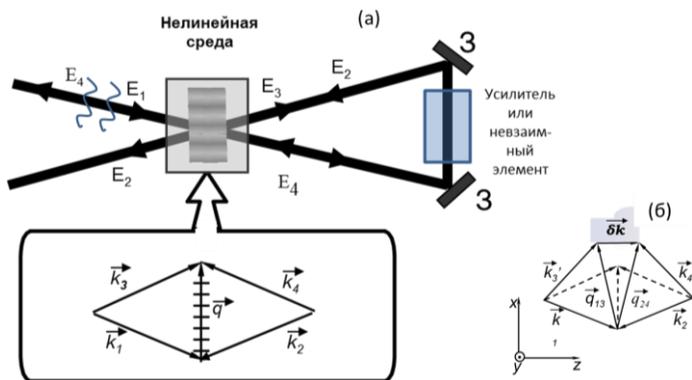


Рис. 5. Схема совместного рассеяния световых волн E_1 и E_2 (исходной и прошедшей ПОС с зеркалами 3) в нелинейной среде и диаграмма волновых векторов k_i и вектора решётки q . На вставке (б) показаны диаграммы волновых векторов при точном и неточном синхронизме.

В параграфе 2.2 приводятся результаты экспериментальных исследований параметрической генерации при совместном ВР световых пучков в слоях нематических жидких кристаллов (НЖК) с ПОС. В разделе 2.2.1 приводятся результаты исследований параметрической генерации при совместном температурном рассеянии в НЖК, а в разделе 2.2.2 – результаты исследований параметрической генерации и ОВФ лазерных пучков при совместном ориентационном рассеянии в НЖК. Экспериментально показано, что наличие фазовой невязанности в ПОС приводит к снижению порога генерации и улучшению качества ОВФ исходного светового пучка. Приводятся результаты экспериментов по использованию ОВФ зеркала на основе НЖК для компенсации искажений световых пучков в двух- и четырёхпроходных усилителях.

В параграфе 2.3 обсуждается параметрическая генерация при совместном ВР пересекающихся световых пучков в усиливающих лазерных кристаллах с ПОС. Вначале, в разделе 2.3.1, приведены результаты исследования взаимодействия двух световых волн и вынужденного резонансного рассеяния (ВРР) в лазерных усилителях на кристаллах $Nd^{3+}:YAG$ с ламповой накачкой. Показано, что слабая световая волна может усиливаться сильнее в усилителе на кристалле $Nd^{3+}:YAG$ с ламповой накачкой в присутствии встречной к ней сильной световой волны. Этот эффект, противоречащий представлениям о простом насыщении усиления, объясняется нелинейным взаимодействием встречных световых волн на РПП, сопровождающих решётки населённости в лазерном усилителе. Слабая встречная волна может появляться в результате диффузного отражения сильной волны от торца активного элемента, и усиление этой волны можно трактовать как ВРР в активной среде. Приведены оценки стационарного инкремента ВРР для волны с малым частотным сдвигом. В разделе 2.3.2 приведены результаты экспериментальных исследований параметрической генерации и ОВФ в лазерном усилителе на кристалле $Nd^{3+}:YAG$ с ПОС. Экспериментально исследовано влияние амплитудных и

фазовых невязимностей ПОС на порог параметрической генерации. Показано, что параметрическая генерация в такой системе существует как при наличии фазовой невязимности ПОС, так и без неё. В первом случае основной вклад в развитие эффекта даёт динамическая решётка насыщения усиления в лазерном усилителе, во втором случае – динамическая РПП (и такой эффект можно трактовать как совместное ВРР). Исследования ОВФ спекл-пучков (с фазовой пластинкой или амплитудным транспарантом на входе) во взаимной схеме показали возможность достижения высокого качества, существенно не отличающегося от качества ОВФ в невязимной схеме (при той же мощности прошедшей петлю волны). Приводятся также результаты экспериментальных исследований генерации в другом варианте схемы, когда исходный световой пучок и пучок, прошедший ПОС, могли интерферировать между собой в активной среде и создавать тем самым динамическое зеркало, замыкающее резонатор. Обсуждается влияние невязимности ПОС на порог генерации в этом случае и показано, что генерация может быть обусловлена совместным действием решёток усиления и РПП. В следующем разделе **2.3.3** приводятся результаты теоретических исследований параметрической генерации при ЧВВ в лазерном усилителе с обратной связью. В приближении плоских монохроматических волн, пересекающихся под малым углом в лазерном усилителе, проанализированы пороги генерации при наличии или в отсутствие динамических РПП. Показано, что при наличии одних только решёток усиления параметрическая генерация может развиваться в системе с амплитудной и фазовой невязимностью ПОС. При наличии динамических РПП (наряду с решётками усиления) порог генерации может быть достигнут и во взаимной схеме, что хорошо согласуется с результатами экспериментов. В параграфе **2.5** сформулированы основные результаты и выводы главы 2.

Третья глава посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям “самостартующих” твердотельных лазеров с резонаторами на динамических решётках (рис. 6). В параграфе **3.1** описываются общие принципы и таких лазеров. При этом в разделе **3.1.1** качественно рассматриваются условия генерации в резонаторе нелинейно-оптическим элементом и ПОС. Показано, что для достижения генерации необходима положительная обратная связь между ростом амплитуды рассеивающей решётки и ростом мощности световых волн, индуцирующих эту решётку. Такая положительная обратная связь возникает при наличии динамических РПП, а для решёток насыщения усиления требуется амплитудная и фазовая невязимность резонатора. В отличие от генерации в лазере с обычным резонатором лазер на динамических решётках имеет более быстрое нарастание мощности из-за самомодуляции добротности резонатора за счёт формирования динамического зеркала, а также лучшую дискриминацию высоких пространственных мод по сравнению с основной модой (которая обусловлена не только меньшими дифракционными потерями основной моды, но и лучшим её отражением от голографического зеркала по сравнению с другими модами).

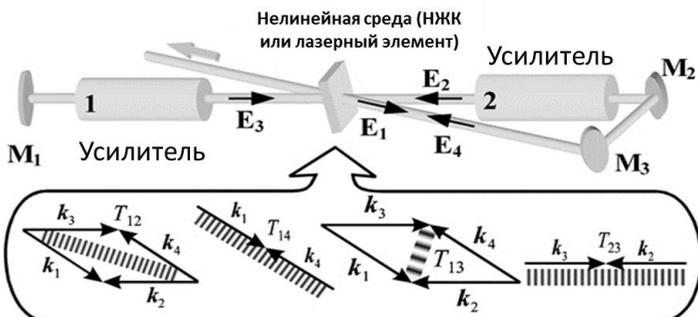


Рис. 6. Схема самостартующего лазера с динамическими решетками в нелинейной среде и диаграмма волновых векторов: k_1 - k_4 – волновые векторы пучков генерации, T_{ij} – различные решетки, M_1 - M_3 – линейные зеркала.

В разделе 3.1.2 проанализированы продольные моды лазера с петлевым резонатором на динамических решётках. На стадии формирования динамического резонатора волна на любой частоте вблизи максимума коэффициента усиления может индуцировать динамическую решётку, которая при наличии положительной обратной связи обеспечивает замыкание резонатора. После того, как динамическая решётка в резонаторе сформировалась, условия внутрирезонаторной селекции качественно меняются: появляется резонатор с заданной “распределённой обратной связью”. Теперь резонатор имеет выходное (голографическое) зеркало, которое наряду с другими зеркалами определяет спектр продольных мод. Число продольных мод (вокруг основной частоты) ограничивается условием брегговской селекции при отражении от объёмной решётки. Одновременное выполнение условий синхронизма и модовых условий для отражения от решёток с разными периодами (например, отражательных и просветных) существенно уменьшает число возможных продольных мод лазера с резонатором на динамических решётках. В следующем разделе 3.1.3 проанализированы поперечные моды лазера с петлевым резонатором. В формировании поперечной моды в лазере на динамических решётках наряду с геометрическими факторами (дифракцией в свободном пространстве, ограничением размера области усиления в активном элементе и апертуры зеркал) важную роль играет пространственно-угловая селективность объёмной голограммы, обеспечивающей замыкание резонатора. Число поперечных мод, отражаемых динамической решёткой, можно оценить как отношение угловой селективности к дифракционному углу одной моды. Если резонатор формируется несколькими решётками одновременно, то угловая селективность будет определяться этими решётками и условие одномодовой генерации упрощается.

Параграф 3.2 посвящён лазерам с резонаторами, формируемыми с участием динамических РПП в слое НЖК. В разделе 3.2.1 приведены результаты теоретического исследования самостартующего лазера с резонатором на динамических решётках в НЖК, особенностью которых является наличие одних

только инерционных РПП (тепловых или ориентационных). В разделе **3.2.2** приведены результаты экспериментальные исследования лазеров с резонаторами на динамических решётках в НЖК (ориентационных динамических решетках в НЖК, в разделе **3.2.2.1**, либо тепловых динамических решетках, в разделе **3.2.2.2**, реализуемых при разной ориентации директора НЖК относительно к поляризации световых волн). Приведены структуры пучков генерации в экспериментах с разной мощностью накачки активной среды.

Параграф **3.3** посвящён лазерам на динамических решётках населённости в лазерных кристаллах. В разделе **3.3.1** приводится теоретическое описание твердотельных лазеров с резонаторами на динамических решётках населённости в активной среде. При этом обсуждаются схемы таких лазеров с взаимным или невзаимным резонатором. Анализируются различные модели возникновения генерации: узкополосной волны генерации при наличии случайных источников и случайных отражений (**3.3.1.1**) и модель многочастотной волны генерации (широкополосной затравки усиленного спонтанного излучения (УСИ)) (**3.3.1.2**). Проведённые исследования показали, что наличие различных источников случайного отражения (“случайных” решёток населённости и РПП, диффузного рассеяния и отражения на границах активного элемента (АЭ)) позволяют сравнительно узкополосной компоненте УСИ достичь порога генерации, которая развивается с участием динамического зеркала, усиливаемого интерференционным полем волн генерации. Возможно предварительное выделение из широкополосного УСИ группы мод, имеющих фазированное интерференционное поле. Интерференционное поле такой группы мод (или одной моды) индуцирует (усиливает) динамическую РПП, способную обеспечить формирование более добротного резонатора и дальнейшее нарастание выходной мощности. Выделение группы мод из шумового спонтанного излучения в реальном эксперименте может быть связано с частотной зависимостью коэффициента усиления активной среды, спонтанным рассеянием на случайных РПП внутри этой среды именно в эту моду, а также диффузным рассеянием на границах АЭ или на поверхностях других оптических элементов (положение которых будет определять длину резонатора и, следовательно, набор мод). На стадии развития генерации моды конкурируют между собой, что способствует одномодовой генерации на пороге её возникновения. С ростом мощности накачки (при значительном превышении порога) возможна генерация дополнительных продольных мод (многочастотная генерация).

В разделе **3.3.2** обсуждаются результаты экспериментальных исследований лазеров на кристаллах, активированных ионами Nd^{3+} , с ламповой накачкой и резонаторами на динамических решётках в активной среде. При этом в подразделе **3.3.2.1** приведены различные схемы лазеров с резонаторами на динамических решётках (с линейной, кольцевой, петлевой и многопетлевой геометрией). Экспериментально показано, что в лазерах на кристаллах $Nd^{3+}:YAG$ с ламповой накачкой с кольцевыми и петлевыми резонаторами,

формируемыми с участием динамических решёток в активной среде, возможна эффективная генерация мощных пучков высокого качества, устойчивых к внутрирезонаторным искажениям. В **3.3.2.2** приводятся результаты тестирования внутрирезонаторной динамической РПП в голографическом лазере. Показано, что динамическая решётка развивается одновременно с началом генерации. В **3.3.2.3** приводятся результаты исследования кинетики и спектра генерации лазеров с петлевыми и кольцевыми резонаторами, формируемым с участием одиночной динамической решетки. Прослеживается эволюция спектра генерации от одночастотного до многочастотного (с большим числом продольных мод). Подраздел **3.3.2.4** посвящён лазерам на динамических решётках в режиме пассивной модуляции добротности с внутрирезонаторным насыщающимся поглотителем. Здесь показана возможность генерации импульсно-периодического излучения (со стабильными параметрами) при пассивной модуляции за счёт дополнительного насыщающегося поглотителя, кристаллов LiF:F_2^- или $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$. В **3.3.2.5** приводятся результаты исследований лазеров на динамических решётках в активной среде ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ с ламповой накачкой) с высокой в среднем по времени мощностью. Продемонстрирована импульсно-периодическая генерация пучков с высокой в среднем по времени мощностью до 200–300 Вт (энергия в пачках импульсов до 10 Дж при частоте повторения до 30 Гц) и высоким качеством пучка $M^2 \leq 2 \dots 4$, определяемым селективными свойствами объёмных голограмм (рис. 7).

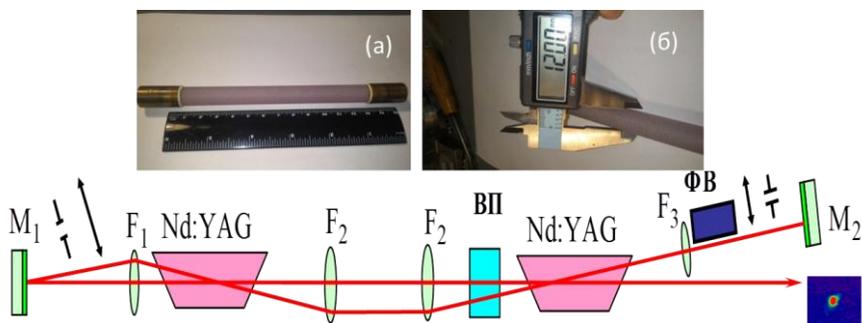


Рис. 7. Принципиальная схема мощного лазера: схема с переносом изображения и 90-градусным вращателем поляризации (ВП) и Фарадеевским вращателем (ФВ) для компенсации деполаризации. На вставках (а) и (б) – фотографии активных элементов большого размера (длина – 135 мм, диаметр – 12 мм). M_1 – M_2 – зеркала, F_1 – линзы.

Параграф **3.3.3** посвящён экспериментальным исследованиям лазеров на кристаллах с диодной накачкой и резонатором на динамических решётках. В подразделе **3.3.3.1** приведены результаты исследований лазеров на кристаллических пластинах $\text{Nd}:\text{YAG}$ с боковой импульсной диодной накачкой. При этом получена генерация с импульсной энергией до 6 мДж в пучке дифракционного качества ($M^2 \leq 1,5$). В **3.3.3.2** приведены результаты исследований лазера на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ с непрерывной диодной накачкой и динамическим резонатором. В этом лазере при 30 Вт диодной накачки мощность

генерации достигала 9,6 Вт (эффективности преобразования оптической мощности накачки в мощность генерации ~32%) при хорошем (близком к дифракционному пределу) качестве пучка генерации ($M^2 < 1,1$) (рис. 8).

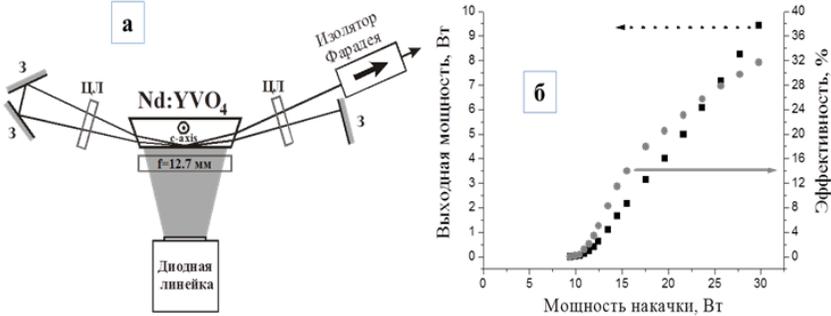


Рис. 8. Схема диодно-накачиваемого непрерывного лазера на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ с динамическим резонатором (а) (ЦЛ – цилиндрические линзы); зависимость выходной мощности и эффективности генерации от мощности накачки (б).

В параграфе 3.4 приведены основные результаты и выводы главы 3. Отмечается, в частности, что с ростом мощности накачки полная эффективность её использования в лазерах на динамических решётках возрастает и приближается к эффективности лазеров с оптимальным коэффициентом отражения выходного зеркала. Использование подобных резонаторов на динамических решётках, обладающих адаптивными свойствами к наводимым фазовым искажениям, представляется перспективным для импульсно-периодических лазерных систем со средней мощностью киловаттного уровня.

Четвёртая глава посвящена исследованиям электронных ИПП в иттербиевых волоконно-лазерных усилителях и возможностей их использования для когерентного сложения пучков многоканальных лазерных систем. В параграфе 4.1 приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований ИПП при накачке иттербиевых волоконных усилителей. Аналитические и численные исследования ИПП и фазового набег при накачке иттербиевых волоконных усилителей дали следующие основные результаты (4.1.1): соотношение величины электронного и теплового фазовых набегов в волоконном усилителе существенно зависит от длительности импульсов накачки. В отсутствие сигнала для коротких импульсов накачки (10^{-5} – 10^{-4} с) электронный фазовый набег значительно превосходит тепловой. С ростом длительности импульсов накачки соотношение меняется: электронный фазовый набег прекращает нарастать при длительности импульсов, большей времени жизни верхнего лазерного уровня ${}^2F_{5/2}$, в то время как тепловой фазовый набег продолжает увеличиваться (вплоть до времени установления равновесия с окружающей волокно средой). При длительности импульсов накачки $\sim 10^{-1}$ с тепловой фазовый набег становится доминирующим. Длительность импульса накачки, при которой амплитуды электронной и тепловой состав-

ляющих фазового набега сравниваются, зависит от диаметра волокна и пластиковой оболочки, их теплофизических параметров, а также от коэффициента теплопередачи между полимерной оболочкой и воздухом. При наличии усиливаемого сигнала в иттербиевом лазерном волокне (например, на длине волны 1064 нм) уменьшается населённость верхнего уровня ${}^2F_{5/2}$, а за счёт накачки происходит новое возбуждение ионов Yb^{3+} . За много циклов в системе рабочих уровней (${}^2F_{5/2} \leftrightarrow {}^2F_{7/2}$) увеличивается тепловыделение при постоянной средней населённости верхнего уровня; соотношение электронного и теплового вкладов ИПП может измениться в пользу последнего, особенно при длительных сигналах.

В разделе 4.1.2 приведены результаты экспериментальные исследований фазового набега и ИПП в алюмосиликатных и фосфоросиликатных кварцевых волокнах, активированных ионами Yb^{3+} , с помощью волоконного интерферометра Маха – Цандера (рис. 9). В результате измерений определена величина различия поляризуемости $\Delta\rho$ ионов Yb^{3+} на уровнях ${}^2F_{5/2}$ и ${}^2F_{7/2}$ в этих волокнах вне линии усиления (1450–1600 нм): $(9-15) \times 10^{-27} \text{ см}^{-3}$. В разделе 4.1.3 дана оценка $\Delta\rho$ в практически важном диапазоне длин волн накачки и усиления иттербиевых волокон (850–1600 нм), где резонансный вклад в $\Delta\rho$ может заметно превышать нерезонансный. Приведена также оценка отношения действительной и мнимой части изменения восприимчивости иттербиевых волокон $\beta = \Delta\chi_{re}^{(1)}/\Delta\chi_{im}^{(1)}$ при изменении населённости, которая в области усиления существенно превосходит 1.

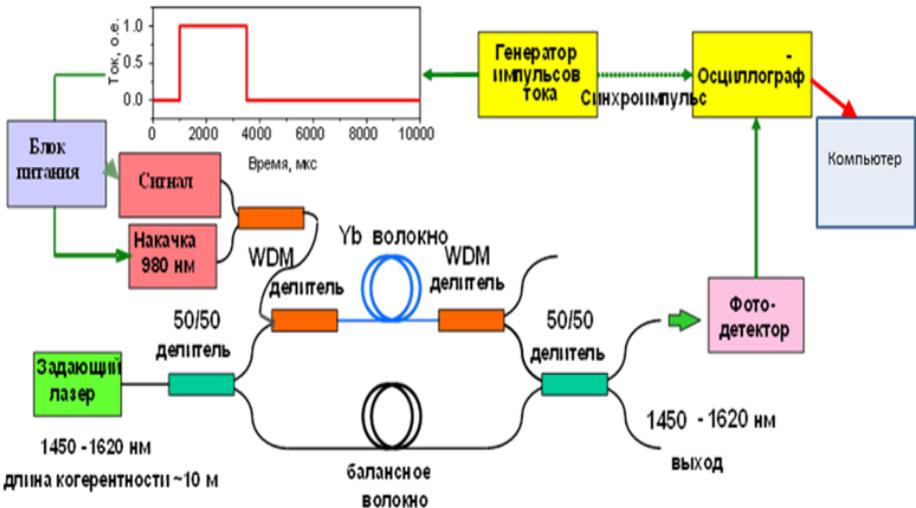


Рис. 9. Схема интерферометра Маха – Цандера при исследованиях ИПП в иттербиевых лазерных волокнах под действием накачки (на 980 нм) и сигнала (на 1060 нм).

Параграф 4.2 посвящён экспериментальным исследованиям когерентного сложения мощности в двухканальной системе эрбиевых волоконно-лазерных

усилителей за счёт нелинейно-оптического управления показателем преломления волокна, активированного Yb^{3+} . Когерентное сложение мощности излучения системы 2 параллельных эрбиевых волоконно-лазерных усилителей реализовано с высокой эффективностью за счёт оптически-управляемых ИПП в иттербиевых лазерных волокнах. Управление показателем преломления иттербиевого волокна осуществлено излучением накачивающей волны (на длине волны 980 нм) и сигнала насыщения (на длине волны 1064 нм). Использование алгоритма амплитудной модуляции управляющего сигнала и синхронного детектирования в цепи обратной связи обеспечивает высокое быстродействие фазовой подстройки, что позволяет компенсировать акустические шумы в полосе более 10 кГц.

В параграфе 4.3 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований низкопороговой поперечной модовой неустойчивости (ПМН) в маломодовых иттербиевых волоконных усилителях. При этом рассматривается ПМН в однонаправленном волоконном усилителе (4.3.1) и при наличии встречного сигнала (4.3.2). В волоконно-лазерных усилителях с диаметром сердцевины 8–10 мкм, активированной ионами Yb^{3+} , с малым числом поперечных мод и сохранением поляризации обнаружена неустойчивость основной моды квазинепрерывного излучения по отношению к модам с более высоким индексом. Порог возникновения неустойчивости (по мощности выходного сигнала) варьируется от 1 до 100 Вт и зависит как от параметров волокна (диаметра сердцевины, числовой апертуры, длины, уровня легирования ионами Yb^{3+} , отражения от выходного торца), так и от характеристик излучения (ширины линии, мощности входного сигнала, длины волны). Аналитические исследования и численное моделирование показали, что основная причина низкопороговой ПМН связана с рассеянием на динамических электронных РПП, сопровождающих решётки населённости, которые индуцируются интерференционным полем основной и высшей мод. При наличии встречной волны (из-за отражения от выходного торца волокна или запущенной от внешнего источника) порог ПМН ещё более уменьшается. В этом случае неустойчивость обусловлена ЧВВ двух пар встречных волн на общей динамической решётке.

Основные результаты и выводы главы 4 сформулированы в разделе 4.4.

Пятая глава посвящена высокоэффективным твердотельным лазерам с параметрическим преобразованием излучения в средний ИК диапазон. Параграф 5.1 посвящён экспериментальным исследованиям генерации лазеров на кристаллических пластинах $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ с боковой (поперечной) диодной накачкой. В разделе 5.1.1 приведены результаты исследований лазеров на пластинах из кристаллов $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ с боковой диодной накачкой и скользящим падением пучка генерации на накачиваемую поверхность. В таких лазерах кроме непрерывного реализованы различные режимы импульсно-периодической генерации: 1. активной модуляции добротности с генерацией импульсов длительностью ~15–25 нс; 2. пассивной синхронизации мод за

счёт органического насыщающегося поглотителя - полиметинового красителя в полиуретановой матрице с генерацией импульсов в 10–20 пс при частоте повторения ~150 МГц). Достигнута высокая эффективность преобразования накачки (на длине волны 808 нм) в излучение генерации (на 1064 нм) со средней мощностью до 15 Вт в пучке высокого качества (с оптической эффективностью использования накачки ~40–45%). В разделе 5.1.2 приведены результаты исследований параметрического преобразования излучения Nd³⁺:YVO₄ лазеров в средний ИК диапазон в виде узкополосной генерации холостой волны с длиной 3392,2 нм в ПГС на основе периодически-поляризованного MgO:LiNbO₃. В качестве затравки узкополосного излучения на длине волны 3392,2 нм использовано излучение He-Ne лазера. Эффективность преобразования мощности излучения лазера Nd³⁺:YVO₄ на 1064 нм в средний ИК диапазон (на 3392,2 нм) достигала 10%.

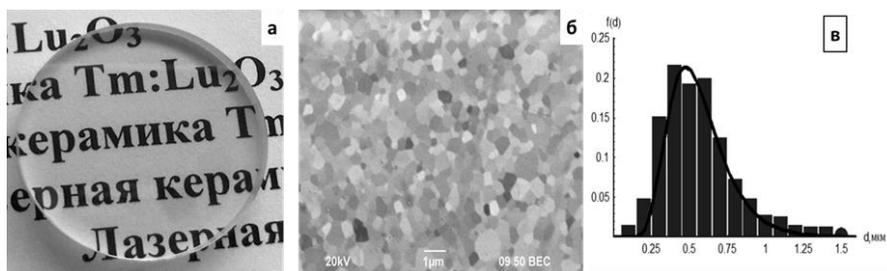


Рис. 10. Внешний вид образца керамики (а). Изображение структуры образца керамики Tm:Lu₂O₃, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (увеличение 10⁴) (б). Распределения зерен по размерам $f(d)$ (в).

Параграф 5.2 посвящён лазерам на керамике Tm³⁺:Lu₂O₃ с диодной, лазерной или волоконно-лазерной накачкой и преобразованию их излучения в средний ИК диапазон длин волн. В разделе 5.2.1 приведены результаты комплексных исследований керамики Tm³⁺:Lu₂O₃, впервые изготовленной по заказу автора японской компанией “Konoshima Chemicals”: исследованы структурные, оптические, нелинейно-оптические, спектроскопические и теплофизические характеристики этой керамики (рис. 10). В 5.2.2 приведены результаты исследований лазерной генерации в керамике Tm³⁺:Lu₂O₃ с диодной накачкой. Получена лазерная генерация на длине волны 2060-2094 нм в керамике Tm³⁺:Lu₂O₃ с диодной-лазерной накачкой (на длине волны 796 нм, или 811 нм, или 1200 нм) с мощностью до 34 Вт в непрерывном режиме (при полной эффективности преобразования накачки ~35% и дифференциальной эффективности ~38%) в многомодовом пучке ($M^2 \approx 6-7$) и до 6-7 Вт в пучке дифракционного качества. Продемонстрированы возможности реализации импульсно-периодической генерации в лазерах на керамике Tm³⁺:Lu₂O₃ (с диодно-лазерной или лазерной накачкой на длине волны 796 нм) за счёт активной модуляции добротности в импульсах длительностью 80–300 нс.

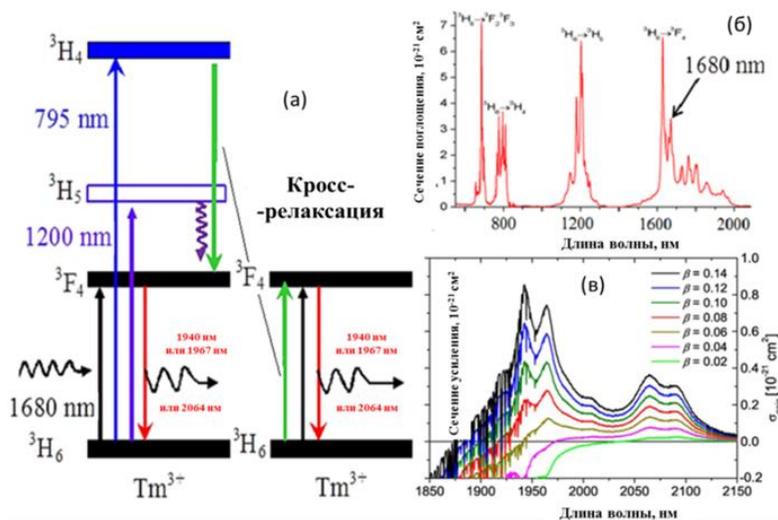


Рис. 11. Схема накачки и генерации керамики $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ с поглощением на 795, 1200 или 1670 нм) и усилением или генерацией на 1940 нм, или 1967 нм, или 2070 нм (красным) (а); спектр поглощения с отмеченным максимумом на 1680 нм (б); сечение усиления при различной степени инверсии β_{in} (в).

В разделе **5.2.3** приведены результаты исследований лазерной генерации в керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ (с накачкой излучением Ti:S лазера на длине волны 796 нм) в режиме пассивной синхронизации мод. В качестве насыщающихся поглотителей использовались полупроводниковые гетероструктуры с квантовой ямой InGaAsSb (или монослой графена на медной подложке). Получена импульсно-периодическая генерация на длине волны ~ 2070 нм с частотой следования импульсов 130-150 МГц при длительности 180–300 фс и средней мощности до 750 мВт.

Исследованы лазеры на керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ с накачкой излучением волоконных лазеров на длине волны 1670 нм (или 1678 нм) (раздел **5.2.4**). Получена непрерывная генерация на длине волны 2066 нм и/или 1967 нм с мощностью до 23 Вт (при эффективности преобразования накачки до 51%) и импульсно-периодическая генерация (при активной акустооптической модуляции добротности) со средней мощностью до 12–15 Вт в пучке дифракционно-го качества.

В разделе **5.2.5** приведены результаты исследований гибридных лазерных систем: волоконный задающий генератор – усилитель мощности на керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$, при этом усиливаемый сигнал (на длине волны 1940 нм или 1908 нм) и пучок накачки (на 1670 нм или 1678 нм) распространялись в одном и том же одномодовом волокне. В такой системе для импульсно-периодического излучения (с длительностью импульсов 10–100 нс при частоте повторения от 3 до 95 кГц) достигнута выходная мощность ~ 24 Вт и импульсная энергия $\sim 2,3$ мДж в пучке высокого качества.

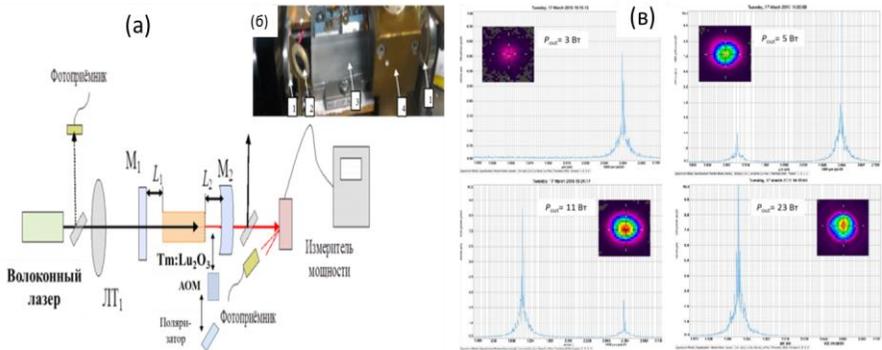


Рис. 12. Схема лазера на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с накачкой излучением волоконного лазера на 1670 нм и генерацией на 2064 нм или 1967 нм; показаны также АОМ и поляризатор, которые вставлялись в схему (а). На вставке (б) - фотография лабораторного лазера. Спектр генерации и структура пучка генерации при разных выходных мощностях генерации (в).

Раздел **5.2.6** посвящён исследованию лазеров на монокристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ и поликристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ с накачкой импульсно-периодическим излучением лазеров на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$. В лазерах на монокристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ получена лазерная генерация импульсно-периодического излучения на длине волны 2920 нм со средней по времени мощностью до 800 мВт в пучке дифракционного качества. В лазерах на поликристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ получена генерация на различных длинах волн в спектральном диапазоне 2,35–2,74 мкм со средней по времени мощностью до 3,6 Вт в пучке высокого качества (при эффективности по накачке до 35%).

Продемонстрирована возможность параметрического преобразования излучения лазера на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ в средний ИК диапазон в ПГС основе периодически-поляризованного $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ или кристаллов ZnGeP_2 (в разделе **5.2.7**). В этих ПГС достигнута генерация излучения на длинах волн в диапазоне 3,4–4,9 мкм со средней по времени мощностью до 3–4 Вт.

В параграфе **5.3** сообщается об исследованиях высокоэффективных лазеров на кристаллах $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ с накачкой излучением лазеров на кристаллах $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ (раздел **5.3.1**) или волоконных тулиевых лазеров на длине волны 1908 нм (раздел **5.3.2**). Получена непрерывная и импульсно-периодическая генерация на длинах волн 2091 нм, 2097 нм, 2123 нм. В результате оптимизации параметров лазера на кристалле $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ с волоконно-лазерной накачкой получена импульсно-периодическая генерация на длине волны 2097 нм со средней мощностью ~36 Вт в пучке высокого качества ($M^2 \leq 1,2$) при эффективности преобразования мощностей накачки в генерацию ~68%; стабильная генерация импульсов длительностью ~15–45 нс получена при частоте повторения 8–25 кГц. Максимальная эффективность непрерывной генерации (преобразования мощности накачки) составляла 73% при выходной мощности 38,5 Вт. Расчёты подтвердили оптимальную концентрацию ионов Ho^{3+} – 0,5 ат. % (при длине активного элемента 35 мм); максимум обусловлен влия-

нием эффектов ап-конверсии (при высокой концентрации) и ростом порога генерации из-за малого поглощения накачки (при низкой).

Раздел **5.3.3** посвящён исследованию параметрического преобразования излучения $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазера в средний ИК диапазон. Продемонстрирована возможность получения импульсно-периодической генерации в диапазоне длин волн 3,5–5 мкм со средней мощностью до 10 Вт в ПГС на тандеме нелинейно-оптических элементов ZnGeP_2 . Эффективность преобразования излучения $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазера в излучение ПГС (по суммарной средней мощности холостой и сигнальной волн) достигала ~40%. Развита теоретическая модель ПГС на ZGP_2 , учитывающая модовый состав генерации, снос пучков в нелинейном элементе и тепловые эффекты, и выполнены численные расчёты, результаты которых хорошо согласуются с экспериментами. Обсуждаются особенности спектра частот ПГС. Создан опытный образец системы среднего ИК диапазона (на длинах волн 3,7–4,6 мкм) на основе ПГС на кристалле ZGP_2 с накачкой $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазером.

Параграф **5.4** посвящён исследованиям использования разработанных тулиевых и гольмиевых лазеров в медицине. Продемонстрированы возможности использования лазеров на основе керамики $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ и кристаллов $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ с диодно-лазерной накачкой, а также кристаллов $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ с волоконно-лазерной накачкой для хирургии биологических тканей при минимальной карбонизации и ограниченной зоне коагуляции. Продемонстрированы также возможности использования импульсно-периодического излучения лазеров на кристаллах $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ или керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с волоконно-лазерной накачкой для контролируемого разреза (деструкции) почечных камней (что должно позволить удалять фрагменты конкрементов без разбрасывания их содержимого по полостной системе почки). Создан опытный образец непрерывного лазера на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с диодно-лазерной накачкой и с волоконным выходом для хирургии в отоларингологии, который проходит доклиническую апробацию в медицинском учреждении Нижнего Новгорода.

Заканчивается диссертационная работа **заключением**, в котором сформулированы основные результаты, и списком цитируемой литературы.

Основные результаты диссертации

1. Методами поляризационной интерферометрии, динамической голографии (тестирования динамических решёток) и спектроскопии исследованы динамические ИПП в лазерных кристаллах и стёклах, активированных ионами Nd^{3+} или Yb^{3+} , при их интенсивной накачке: диодной, лазерной или ламповой. Доказано, что существует значительная по величине электронная компонента этих изменений, обусловленная различием поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов Nd^{3+} или Yb^{3+} (соотношением Крамерса-Кронига между действительной и мнимой частью восприимчивости). Величина этих электронных ИПП на рабочих длинах волн лазеров может достигать значений 10^{-6} – 10^{-5} в зависимости от плотности мощности (или энергии) накачки.

Различие поляризуемости ионов Nd^{3+} , в лазерных кристаллах активированных этими ионами (на уровнях ${}^4\text{F}_{3/2}$ и ${}^4\text{I}_{9/2}$), обусловлено разным положением этих уровней относительно межконфигурационных переходов $4f^3 \rightarrow 4f^25d$ (между оболочками $4f$ и $5d$). В этих кристаллах электронные ИПП значительно возрастают при накачке УФ излучением, приводящей к заселению высоколежащих квазиметаустойчивых уровней энергии (в частности, при накачке на длинах волн 280–320 нм, 240–280 нм, обеспечивающей заселение высоколежащего квазиметаустойчивого уровня ${}^2\text{F}(2)_{5/2}$).

Различие поляризуемости ионов Yb^{3+} , в лазерных кристаллах активированных этими ионами (на уровнях ${}^2\text{F}_{5/2}$ и ${}^2\text{F}_{7/2}$), обусловлено разной вероятностью ППЗ с лиганда на ион или переходов между смешанными орбиталями ($\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ или $\text{Yb}^{3+}(4f), \text{O}^{2-}(2p) \rightarrow \text{W}^{6+}(5d)$). Отношение действительной части электронной восприимчивости к её мнимой части на линиях поглощения или излучения в этих кристаллах может существенно превышать 1.

2. Исследованы общие закономерности параметрической генерации при совместном ВР световых пучков (с импульсами длительностью в сотни микросекунд и более) в нелинейных средах с инерционными кубичными нелинейностями (тепловой или ориентационной в НЖК или нелинейностью насыщения усиления в лазерных кристаллах) и с ПОС. Показана возможность параметрической генерации волны, распространяющейся навстречу исходной и имеющей обращённый волновой фронт, с низким порогом возникновения и большим коэффициентом отражения. Механизм возникновения параметрической генерации связан с совместным ВР на динамических РПП, индуцированных интерференционным полем исходных световых волн и волн рассеяния в нелинейной среде. Порог параметрической генерации зависит от амплитудного и фазового преобразования светового пучка в ПОС (от величины амплитудной и фазовой невязности обратной связи).

В НЖК с тепловой и ориентационной нелинейностью порог параметрической генерации обращённой волны по мощности входной волны составлял сотни милливольт (или единицы $\text{кВт}/\text{см}^2$ по интенсивности). Ячейки НЖК с ПОС были использованы для компенсации термонаведённых искажений в импульсно-периодических двух- и четырёхпроходных усилителях на кристаллах $\text{Nd}:\text{YAG}$ с ламповой накачкой. Ограничение использования четырёхволновых НЖК-зеркал для мощных лазерных пучков связано с их перегревом выше точки фазового перехода нематик-изотропная жидкость.

В лазерных усилителях $\text{Nd}:\text{YAG}$ с ламповой накачкой исследовано взаимодействие двух встречных резонансных световых пучков. При этом показана возможность дополнительного усиления слабой волны за счёт нелинейной перекачки энергии из сильной на динамических РПП, сопровождающих решётки населённости активной среды. Показана также возможность нелинейного усиления слабого сигнала, возникающего в результате вынужденного резонансного рассеяния сильной волны в лазерном усилителе.

В лазерных усилителях Nd:YAG с ПОС происходит параметрическая генерация волны, распространяющейся навстречу исходной. Волновой фронт этой волны может быть обращённым по отношению к волновому фронту исходной волны. Порог параметрической генерации нелинейно зависит от усиления слабого сигнала в усилителе и может составлять десятки-сотни милливатт по мощности входного пучка. Доказана доминирующая роль динамических РПП, сопровождающих индуцированные светом решётки населённости, для возникновения параметрической генерации в лазерных усилителях со взаимной ПОС.

3. Экспериментально и теоретически исследованы твердотельные лазеры, резонаторы которых формируются с участием динамических голографических решёток, индуцируемых в нелинейной среде самими волнами генерации. Высокая пространственно-угловая и частотная селективность динамических решёток способствует генерации узкополосного излучения с высоким качеством пучка. Адаптивные свойства нелинейных зеркал обеспечивают частичную компенсацию термонаведённых искажений в активной лазерной среде при высокой мощности генерируемого пучка.

Экспериментально и теоретически показано, что динамические голографические решётки, индуцированные в НЖК с ориентационной или тепловой нелинейностью интерференционным полем пересекающихся световых волн, обеспечивают формирование резонатора и генерацию в петлевом или кольцевом резонаторе с АЭ. Лазер на основе Nd:YAG усилителя с резонатором, сформированным с участием динамических решёток в жидком кристалле, способен генерировать излучение с высоким качеством пучка и стабильной направленностью. Мощность генерации ограничивается нагревом нелинейной среды и фазовым переходом НЖК в изотропную фазу.

Показано, что динамические РПП, сопровождающие решётки населённости, которые индуцируются в активной среде интерференционным полем световых волн, способны обеспечивать положительную обратную связь между ростом волны генерации и дифракционной эффективностью динамического зеркала. Решётки показателя преломления, обеспечивающие формирование динамического резонатора, сопровождают в активной среде решётки населённости вследствие различия поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов активатора, а также неоднородного тепловыделения в интерференционном световом поле. Самостартующие лазеры на усилителях Nd:YAG с динамическим резонатором, формируемым с участием РПП в активной среде, способны генерировать в импульсно-периодических режимах свободной генерации или модуляции добротности с высокой в среднем по времени мощностью, хорошим качеством пучка генерации и узкой спектральной линией (в одной продольной моде). Экспериментально продемонстрирована возможность генерации в таких лазерах импульсно-периодического излучения со средней по времени мощностью до 250...300 Вт (при энергии до 10 Дж

в пачках импульсов длительностью 250...300 мкс и частоте повторения до 30 Гц) и с высоким качеством пучка ($M^2 \leq 3...5$).

Экспериментально исследованы также лазеры на кристаллах $Nd^{3+}:YAG$ и $Nd^{3+}:YVO_4$ с интенсивной диодной накачкой и взаимным резонатором на динамических голографических решётках. В схеме импульсно-периодического лазера на кристалле $Nd:YAG$ была получена генерация с высоким, близким к дифракционному пределу, качеством пучка и с эффективностью преобразования энергии накачки более чем 15%. Продемонстрирован также высокоэффективный самоорганизующийся лазер на кристалле $Nd^{3+}:YVO_4$ с непрерывной диодной накачкой и взаимным резонатором на динамических решётках. Достигнута генерация с выходной мощностью до 10 Вт (при эффективности использования накачки до $\sim 32\%$) при высоком качестве пучка, близкому к дифракционному пределу.

4. С помощью волоконного интерферометра Маха-Цандера исследованы ИПП иттербиевых волоконных усилителей при накачке и усилении резонансного сигнала, обусловленные различием поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов Yb^{3+} . Определена величина различия поляризуемости ионов Yb^{3+} (на уровнях ${}^2F_{7/2}$ и ${}^2F_{5/2}$) для ряда АС и ФС световодов (от разных изготовителей): $\Delta p \approx (8-15) \times 10^{-27} \text{ см}^3$ (на длинах волн вне линий поглощения и люминесценции 1450–1650 нм). Теоретические расчёты показали, что вблизи максимумов линий поглощения и люминесценции резонансная часть Δp существенно превосходит нерезонансную, но вне линий поглощения и люминесценции доминирует нерезонансная компонента (обусловленная “далёкими”, но сильными УФ переходами). Электронная компонента ИПП, обусловленная различием поляризуемости ионов Yb^{3+} , превосходит тепловую компоненту ИПП для коротких импульсов накачки (≤ 10 мс) для волокон с диаметром сердцевины в 3–10 мкм или в непрерывном режиме на начальной стадии. В стационарном режиме тепловые ИПП доминируют.

5. Экспериментально продемонстрирована возможность когерентного сложения излучения двухканального эрбиевого усилителя за счёт оптического управления показателем преломления волокна, активированного ионами Yb^{3+} . Управление показателем преломления иттербиевого волокна осуществлялось излучением накачивающей волны (на длине волны 980 нм) и волны насыщения (на длине волны 1064 нм). Использование алгоритма амплитудной модуляции управляющего сигнала и синхронного детектирования в цепи обратной связи обеспечивало высокое быстродействие фазовой подстройки. В результате удалось обеспечить компенсацию акустических шумов (в полосе более 10 кГц), что привело к когерентному сложению излучения двух волоконных усилителей с эффективностью $\sim 95\%$. Проведённые оценки указывают на возможность использования (через временное мультиплексирование) всей доступной полосы системы управления фазой, что позволяет увеличить число фазированных волоконно-лазерных каналов до 50–100.

6. В волоконно-лазерных усилителях с диаметром сердцевины 8–10 мкм, активированной ионами Yb^{3+} , с малым числом поперечных мод и сохранением поляризации обнаружена неустойчивость основной моды по отношению к модам с более высоким индексом. Порог возникновения ПМН (по мощности выходного сигнала) варьируется от 1 до 100 Вт и зависит как от параметров волокна (диаметра сердцевины, числовой апертуры, длины, уровня легирования ионами Yb^{3+} , отражения от выходного торца), так и от характеристик излучения (ширины линии, мощности входного сигнала, длины волны). Аналитические исследования и численное моделирование показали, что основная причина низкопороговой модовой неустойчивости связана с рассеянием на динамических электронных РПП, сопровождающих решётки населённости, которые индуцируются интерференционным полем основной и высшей мод. При наличии встречной волны (из-за отражения от выходного торца волокна или запущенной от внешнего источника) порог ПМН ещё более уменьшается. В этом случае ПМН обусловлена ЧВВ двух пар встречных волн на общей динамической РПП.

7. Проведены исследования лазеров на кристаллах $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ с боковой (поперечной) диодной накачкой и скользящим падением пучка генерации на накачиваемую поверхность. В таких лазерах реализованы различные режимы генерации: непрерывный и импульсно-периодические (I. активной модуляции добротности с генерацией импульсов длительностью ~15–25 нс; II. пассивной синхронизации мод за счёт органического насыщающегося поглотителя - полиметинового красителя в полиуретановой матрице с генерацией импульсов в 10–20 пс при частоте повторения ~150 МГц). Достигнута высокая эффективность преобразования накачки (на длине волны 808 нм) в излучение генерации (на 1064 нм) со средней мощностью до 15 Вт в пучке высокого качества (с оптической эффективностью использования накачки ~40–45%). Продемонстрирована возможность параметрического преобразования излучения $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ лазера в средний ИК диапазон в виде узкополосной генерации холостой волны на 3392,2 нм в ПГС на основе периодически-поляризованного $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ (с накачкой излучением лазера на $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ и затравкой излучением He-Ne лазера); эффективность генерации в среднем ИК диапазоне составила ~10% от полной мощности пучка излучения на 1064 нм.

8. Впервые предложено использовать керамику $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ для лазерной генерации на длине волны ~2 мкм. Проведены комплексные исследования керамики $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$, изготовленной по заказу автора японской компанией “Konoshima Chemicals”: исследованы структурные, оптические, нелинейно-оптические, спектроскопические и теплофизические характеристики этой керамики. Получена лазерная генерация на длине волны 2060–2094 нм в керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с диодной-лазерной накачкой (на длине волны 796 нм, или 811 нм, или 1200 нм) с мощностью до 34 Вт в непрерывном режиме (при полной эффективности преобразования накачки ~35% и дифференциальной эффективности ~38%) в многомодовом пучке ($M^2 \approx 6-7$) и до 6–7 Вт в пучке

дифракционного качества. Продемонстрированы возможности реализации импульсно-периодической генерации в лазерах на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ (с диодно-лазерной или лазерной накачкой на длине волны 796 нм) за счёт активной модуляции добротности (в импульсах наносекундной длительности) и пассивной синхронизации мод (в импульсах длительностью 150–300 фс) на длине волны ~2070 нм.

9. Исследованы лазеры на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с накачкой излучением волоконных лазеров на длине волны 1670 нм (или 1678 нм); получена непрерывная генерация на длине волны 2066 нм и 1967 нм с мощностью до 23 Вт (при эффективности преобразования накачки до 51%) и импульсно-периодическая генерация (при активной акустооптической модуляции добротности) со средней мощностью до 12–15 Вт в пучке дифракционного качества.

Исследованы гибридные лазерные системы: волоконный задающий генератор – усилитель мощности на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$, при этом усиливаемый сигнал (на длине волны 1940 нм или 1908 нм) и пучок накачки (на 1670 нм или 1678 нм) распространялись в одном и том же одномодовом волокне. В такой системе для импульсно-периодического излучения (с длительностью импульсов 10–100 нс при частоте повторения от 3 до 95 кГц) достигнута выходная мощность ~24 Вт и импульсная энергия ~2,3 мДж в пучке высокого качества.

10. Исследованы лазеры на монокристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ и поликристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ с накачкой импульсно-периодическим излучением лазеров на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$. В лазерах на монокристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ получена лазерная генерация импульсно-периодического излучения на длине волны 2920 нм со средней по времени мощностью до 800 мВт в пучке дифракционного качества. В лазерах на поликристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ получена генерация на различных длинах волн в спектральном диапазоне 2,35–2,74 мкм со средней по времени мощностью до 3,6 Вт в пучке высокого качества (при эффективности по накачке до 35%).

11. Продемонстрирована возможность параметрического преобразования излучения лазера на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ в средний ИК диапазон в ПГС основе периодически-поляризованного $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ или кристаллов ZnGeP_2 . В этих ПГС достигнута генерация излучения на длинах волн в диапазоне 3,4–4,9 мкм со средней по времени мощностью до 3–4 Вт.

12. Разработаны и созданы высокоэффективные лазеры на кристаллах $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ с накачкой излучением лазеров на кристаллах $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ или волоконных тулиевых лазеров (на длине волны 1908 нм). Получена непрерывная и импульсно-периодическая генерация на длинах волн 2091 нм, 2097 нм, 2123 нм. В результате оптимизации параметров лазера на кристалле $\text{Ho}:\text{YAG}$ с волоконно-лазерной накачкой получена импульсно-периодическая генерация на длине волны 2097 нм со средней мощностью ~36 Вт в пучке высокого качества ($M^2 \leq 1,2$) при эффективности преобразования накачки в мощность гене-

рации ~68%; стабильная генерация импульсов получена при частоте повторения 8–25 кГц и длительности ~15–45 нс. Максимальная эффективность непрерывной генерации (преобразования мощности накачки) составляла 73% при выходной мощности 38,5 Вт. Расчёты подтвердили оптимальную концентрацию ионов Ho^{3+} в 0,5 ат. % (при длине активного элемента 35 мм); максимум обусловлен влиянием эффектов апконверсии (при высокой концентрации) и ростом порога (при низкой).

13. Продемонстрирована возможность получения импульсно-периодической генерации в диапазоне длин волн 3,5–5 мкм со средней мощностью до 10 Вт в ПГС на тандеме нелинейно-оптических элементов ZnGeP_2 . Эффективность преобразования излучения $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазера в излучение ПГС среднего ИК диапазона (по суммарной средней мощности холостой и сигнальной волн) достигала ~40%, общая эффективность преобразования мощности излучения волоконного лазера (на 1908 нм) в средний ИК диапазон – 25%. Развита теоретическая модель ПГС на ZGP , учитывающая модовый состав генерации, снос пучков в нелинейном элементе и тепловые эффекты, и выполнены численные расчёты, результаты которых хорошо согласуются с экспериментами. Объяснена кластерная структура спектра ПГС. Создан опытный образец лазерной системы среднего ИК диапазона (на длинах волн 3,7–4,6 мкм) на основе ПГС на кристалле ZGP с накачкой $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазером.

14. Продемонстрированы возможности использования лазеров двухмикронного диапазона длин волн на основе керамики $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ и кристаллов $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ с диодно-лазерной накачкой, а также кристаллов $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ с волоконно-лазерной накачкой для хирургии биологических тканей при минимальной карбонизации и ограниченной зоне коагуляции. Продемонстрированы возможности использования импульсно-периодического излучения лазеров на кристаллах $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ или керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с волоконно-лазерной накачкой для контролируемого разреза (деструкции) почечных камней (который способен предотвратить разбрасывание содержимого конкрементов по полостной системе почки). Создан опытный образец непрерывного лазера на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ с диодно-лазерной накачкой и с волоконным выходом для хирургии в отоларингологии, который проходит доклиническую апробацию в медицинском учреждении Нижнего Новгорода.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Антипов О.Л., Кужелев А.С., Лукьянов А.Ю., Зиновьев А.П. Изменения показателя преломления лазерного кристалла $\text{Nd}:\text{YAG}$ при возбуждении ионов Nd^{3+} . // Квантовая электроника - 1998. Т. 28, № 10. С. 867-874.

2. Antipov O.L., Belyaev S.I., Kuzhelev A.S., Chausov D.V. Resonant two-wave mixing of optical beams by refractive index and gain gratings in inverted $\text{Nd}:\text{YAG}$. // Journal of Optical Society of America B - 1998, V. 15. P. 2276-2281.

3. Antipov O.L., Kuzhelev A.S., Chausov D.V., Zinov'ev A.P. Dynamics of refractive index changes in $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser crystal under Nd^{3+} -ions excitation. // Journal of Optical Society of America B - 1999. V. 16. P. 1072-1079.

4. *Antipov O.L., Eremykin O.N., Savikin A.P., Vorob'ev V.A., Bredikhin D.V., Kuznetsov M.S.* Electronic Changes of Refractive Index in Intensively Pumped Nd:YAG Laser Crystals. // IEEE Journal of Quantum Electronics – 2003. V. 39, № 7. P. 910-918.

5. *Антипов О.Л., Еремейкин О.Н., Савикин А.П.* Интерферометрические исследования электронных изменений показателя преломления лазерного кристалла Nd:YAG при интенсивной накачке. // Квантовая электроника – 2003. Т. 33, № 10. С. 861-868.

6. *Soulard R., Zinoviev A., Doualan J.L., Ivakin E., Antipov O., Moncorgé R.* Detailed characterization of pump-induced refractive index changes observed in Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ and Nd:KGW. // Optics Express - 2010. Vol. 18, No. 2. P. 1553-1568.

7. *Антипов О.Л., Еремейкин О.Н., Савикин А.П.* Спектроскопические исследования заселения высокоэнергетических уровней Nd³⁺-содержащих лазерных кристаллов при интенсивной накачке. // Квантовая электроника - 2002. Т. 32, №9. С. 793-798.

8. *Antipov O.L., Kuzhelev A.S., Chausov D.V.* Nondegenerate four-wave mixing measurement of resonantly induced refractive index grating in Nd:YAG amplifier. // Optics Letters - 1998. V. 23. P. 448-451.

9. *Антипов О.Л., Кужелев А.С., Чаусов Д.В.* Решетки показателя преломления в процессе резонансного четырехволнового смещения в Nd:YAG усилителе. // Известия РАН: Серия физическая - 1999. Т. 63, № 4. С. 740-747.

10. *Антипов О.Л., Бредихин Д.В., Еремейкин О.Н., Ивакин Е.В., Савикин А.П., Суходолов А.В., Федорова К.А.* Механизмы изменений показателя преломления лазерного кристалла Yb:YAG при интенсивной накачке. // Квантовая электроника – 2006. Т. 36, № 5. С. 418–423.

11. *Antipov O.L., Bredikhin D.V., Eremykin O.N., Savikin A.P., Ivakin E.V., Sukhadolau A.V.* Electronic mechanism of refractive index changes in intensively pumped Yb:YAG laser crystals. // Optics Letters - 2006. V. 31, № 6. P. 763-765.

12. *Ivakin E.V., Sukhadolau A.V., Antipov O.L., Kuleshov N.V.* Transient grating measurements of refractive-index changes in intensively pumped Yb-doped laser crystals. // Applied Physics B - 2007. V. 86, PP. 315–318.

13. *Ivakin E.V., Kisialiou I.G., Malashkevich G.E., Antipov O.L., Sigaev V.N.* Time-resolved spectroscopy of light-induced refraction: the latest results. // Журнал прикладной спектроскопии - 2016. Т. 83, № 6-16. P. 514-515.

14. *Moncorgé R., Eremykin O.N., Doualan Jean-Louis, Antipov O.L.* Origin of athermal refractive index changes observed in Yb³⁺ doped YAG and KGW. // Optics communications - 2008. V. 281. P. 2526-2530.

15. *Soulard R., Moncorgé R., Zinoviev A., Petermann K., Antipov O., Brignon A.* Non-linear spectroscopic properties of Yb³⁺-doped sesquioxides Lu₂O₃ and Sc₂O₃. // Optics Express - 2010. V. 18, № 11. P. 11173-11180.

16. *Ivakin E.V., Kisialiou I.G., Antipov O.L.* Laser ceramics Tm: Lu₂O₃. Thermal, thermo-optical, and spectroscopic properties. // Optical Materials - 2013. V. 35, №3. P. 499-503.

17. *Антипов О.Л., Анашкина Е.А., Федорова К.А.* Электронные и тепловые линзы, наводимые продольной диодной накачкой, в стержневых и дисковых лазерных элементах на основе кристаллов Yb:YAG. // Квантовая электроника - 2009. Т. 38, №12. С. 1131-1136.

18. *Anashkina E.A., Antipov O.L.* Electronic (population) lensing versus, thermal lensing in Yb: YAG and Nd: YAG laser rods and disks. // J. Optical Society of America B - 2010. V. 27, № 3. P. 363-369.

19. Антипов О.Л., Беспалов В.И., Пасманик Г.А. О новых возможностях генерации сопряженных накачком пучков при вынужденном рассеянии встречных световых волн. // ЖЭТФ - 1986. Т. 90, Вып. 5. С. 1577-1587.
20. Антипов О.Л. Неустойчивость встречных однородных лазерных пучков в слое среды с локальной инерционной нелинейностью. // Квантовая электроника - 1992. Т. 19, № 1. С. 56-60.
21. Antipov O.L. Mechanism of self-pumped phase conjugation by near-forward scattering of heterogeneous laser beam in nematic liquid crystal. // Optics Communication - 1993. V. 103. P. 499-506.
22. Антипов О.Л., Дворянинов Н.А., Шешкаускас В.А. Параметрическая генерация и ОВФ пересекающихся лазерных пучков в слое НЖК с красителем. // Письма в ЖЭТФ - 1991. Т. 90, В. 12. С. 586-590.
23. Mendl P., Macdonald R., Eichler H.J., Antipov O.L. Self-pumped phase conjugation of an Ar-laser beam in dye-doped nematic liquid crystal. // Molecular Crystals and Liquid Crystals - 1996. V. 282. P. 429-435.
24. Антипов О.Л., Кужелев А.С. Двухпроходовой усилитель с ОВФ-зеркалом на основе НЖК для лазерных импульсов миллисекундной длительности. // Известия РАН. Серия физическая - 1994. Т. 58, № 2. С. 138-141.
25. Антипов О.Л., Кужелев А.С., Турыгин В.В. Оптимизация ОВФ-НЖК зеркала в двухпроходовом лазерном усилителе. // Квантовая электроника - 1994. Т. 21, № 5. С. 446-450.
26. Антипов О.Л., Беляев С.И., Кужелев А.С. Лазерные кристаллы с невязимой обратной связью, как параметрические зеркала, самообращающие волновой фронт световых пучков. // Письма в ЖЭТФ - 1994. Т. 60, Вып. 3. С. 163-166.
27. Antipov O.L., Belyaev S.I., Pasmanik H.A. Four-Pass laser Amplifier with PC-NLC-Mirror. // Laser Physics - 1994. V. 4, №6. P. 1185-1189.
28. Антипов О.Л., Кужелев А.С. Параметрическое ОВФ лазерных пучков в слое нематического жидкого кристалла с невязимой обратной связью. // Квантовая электроника - 1995. Т. 25, № 1. С. 49-52.
29. Антипов О.Л., Беляев С.И., Кужелев А.С. Ориентационное обращение волнового фронта светового пучка в слое нематического жидкого кристалла с невязимой обратной связью. // Известия вузов. Радиофизика - 1995. Т. 38, В. 3-4. С. 304-311.
30. Antipov O.L., Belyaev S.I., Kuzhelev A.S., Chausov D.V. Resonant two-wave mixing of optical beams by refractive index and gain gratings in inverted Nd:YAG. // Journal of Opt. Society of America B - 1998. V. 15. P. 2276-2281.
31. Антипов О.Л., Беляев С.И., Кужелев А.С. Вынужденное резонансное рассеяние световых волн в лазерных кристаллах с инверсией населённости. // Письма в ЖЭТФ - 1996. Т. 63, В. 1. С. 13-18.
32. Antipov O.L., Belyaev S.I., Kuzhelev A.S. Self-pumped phase conjugation of the light heterogeneous beam in the inverted Nd:YAG-rod with nonreciprocal feedback. // Optics Communications - 1995. V. 117. P. 290-294.
33. Антипов О.Л., Беляев С.И., Кужелев А.С. Обращение волнового фронта светового пучка в усилителе на кристалле ИАГ:Nd с обратной связью. // Известия РАН. Серия физическая - 1995. Т. 59, № 12. С. 170 - 177.
34. Antipov O.L., Chausov D.V., Yarovoy V.V. Increase in phase-conjugate reflectivity of a holographic Nd:YAG oscillator due to resonant refractive-index grating. // Optics Communications - 2001. V. 189. P. 143-150.

35. Анпилов О.Л., Беспалов В.И., Бетин А.А. Самодифракция излучения CO₂ лазера в НЖК вблизи фазового перехода нематик - изотропная жидкость. // Квантовая электроника - 1988. Т. 16, №6. С. 1098-1100.
36. Antipov O.L., Belyaev S.I., Kuzhelev A.S., Zinov'ev A.P. Nd:YAG laser with cavity formed by population inversion gratings. // Proc. SPIE - 1998. V. 3267. P. 181-190.
37. Antipov O.L., Kuzhelev A.S., Zinov'ev A.P., Vorob'ev V.A. Pulse repetitive Nd:YAG laser with distributed feedback by self-induced population grating. // Optics Communications - 1998. V. 152. P. 313-318.
38. Antipov O.L., Kuzhelev A.S., Chausov D.V. Formation of dynamic cavity in a self-starting high-average-power Nd:YAG laser oscillator // Opt. Exp. - 1999. V. 5. P. 286-292.
39. Fedin A.V., Gavrilov A.V., Basiev T.T., Antipov O.L., Kuzhelev A.S., Smetanin S.N. Passive Q-switching of self-pumped phase-conjugate Nd:YAG loop resonator. // Laser Physics - 1999. V. 9. P. 433-436.
40. Antipov O.L., Chausov D.V., Kuzhelev A.S., Zinoviev A.P. Self-starting laser oscillator with a nonlinear nematic liquid crystal mirror. // Jour. of Opt. Soc. of America B - 2001. V. 18, № 1. P. 13-20.
41. Antipov O.L., Chausov D.V., Kuzhelev A.S., Vorob'ev V.A., Zinoviev A.P. 250W-Average-Power Nd:YAG Laser with Self-Adaptive Cavity Completed By Dynamic Refractive-Index Gratings. // IEEE Journal of Quant. Electronics - 2001. V. 37, Is. 5. P. 716-724.
42. Antipov O.L., Ereneykin O.N., Ievlev A.V., Savikin A.P. Diode-pumped Nd:YAG laser with reciprocal dynamic holographic cavity. // Optics Express - 2004. V. 12, № 18. P. 4313-4319.
43. Antipov O.L., Damzen M.J., Minassian A., Ereneykin O.N. Efficient continuous-wave generation in a self-organizing diode-pumped Nd:YVO₄ laser with a reciprocal dynamic holographic cavity. // Optics Letters - 2004. V. 29, №20. P. 2390-2392.
44. Ostermeyer M., Sträßer A., Scheikh-Obeid A., Kong H.J., Yoon J.W., Shin J.S., Beak D.H., Kovalev V.I., Harrison R.G., Kotova N.E., Fotiadi A.A., Mégret P., Kalal M., Slezak O., Lee S.K., Lü Z., Wang S., Lin D., Wang Y., He W., Yoshida H., Fujita H., Nakatsuka M., Hatae T., Park H., Lim C., Omatsu T., Nawata K., Shiba N., Antipov O.L., Kuznetsov M.S., Zakharov N.G. Trends in stimulated Brillouin scattering and optical phase conjugation. Chapter: "Laser oscillators with nonlinear dynamic cavity formed by resonant refractive-index gratings. // Laser and Particle Beams - 2008. V. 26, № 3. C. 297-362.
45. Fotiadi A.A., Antipov O.L., Mégret P. Dynamics of pump-induced refractive index changes in single-mode Yb-doped optical fibers. // Optics Express - 2008. V. 16, Iss. 17. P. 12658-12663.
46. Фотиади А., Анпилов О., Степанов С., Мегрет П. Эффект изменения показателя преломления в активных световодах и его применение. // Фотоника - 2008. № 3. С. 20-21.
47. Fotiadi A.A., Antipov O.L., Kuznetsov M.S., Panajotov K., Mégret P. Rate Equation for the Nonlinear Phase Shift in Yb-Doped Optical Fibers Under Resonant Diode-Laser Pumping. // Journal of Holography and Speckle - 2009. V. 5. P. 1-4.
48. Kuznetsov M.S., Antipov O.L., Fotiadi A.A., Mégret P. Electronic and thermal refractive index changes in Ytterbium-doped fiber amplifiers. // Optics Express - 2013. V. 21, Iss. 19. P. 22374-22388.
49. Fotiadi A.A., Zakharov N., Antipov O.L., Mégret P. All-fiber coherent combining of Er-doped amplifiers through refractive index control in Yb-doped fibers. // Optics Letters - 2009. V. 34, Iss. 22. P. 3574-3576.

50. *Kuznetsov M., Vershinin O., Tyrtysnyy V., Antipov O.* Low-threshold mode instability in Yb³⁺-doped few-mode fiber amplifiers. // *Optics Express* - 2014. V. 22, Iss. 24. P. 29714-29725.

51. *Antipov O., Kuznetsov M., Alekseev D., Tyrtysnyy V.* Influence of a backward reflection on low-threshold mode instability in Yb³⁺-doped few-mode fiber amplifiers. // *Optics Express* - 2016. V. 24, Iss. 13. P. 14871-14879.

52. *Канев Ф.Ю., Цыро Е.И., Макенова Н.А., Куксенюк Д.С., Антипов О.Л.* Распространение в атмосфере излучения, генерируемого многоканальной лазерной системой с когерентным сложением. Ч. 1. Условия свободной дифракции. // *Известия Томского политехнического университета* – 2012. Т. 321, № 2. С. 71-75.

53. *Канев Ф.Ю., Цыро Е.И., Макенова Н.А., Куксенюк Д.С., Антипов О.Л.* Распространение в атмосфере излучения, генерируемого многоканальной лазерной системой с когерентным сложением. Ч. 2. Влияние искажений и их компенсация. // *Известия Томского политехнического университета* - 2012. Т. 321, № 2. СС. 76-80.

54. *Новиков А.А., Зиновьев А.П., Антипов О.Л.* Эффективный лазер на пластине из Nd:YVO₄ с боковой диодной накачкой в различных режимах генерации. // *Квантовая электроника* – 2009. Т. 39, № 4. С. 309-312.

55. *Антипов О.Л., Новиков А.А., Зиновьев А.П.* Структура пучка генерации лазера на пластине Nd³⁺:YVO₄ с боковой диодной накачкой. // *Квантовая электроника* – 2009. Т. 39, № 11. С. 1047–1049.

56. *Антипов О.Л., Головкин С.Ю., Горшков О.Н., Захаров Н.Г., Зиновьев А.П., Касаткин А.П., Круглова М.В., Марычев М.О., Новиков А.А., Сахаров Н.В., Чупрунов Е.В.* Структурные, оптические и спектроскопические свойства новой лазерной керамики Tm³⁺:Lu₂O₃ и эффективная двухмикронная лазерная генерация на её основе. // *Квантовая электроника* – 2011. Т. 41, № 10. С. 860-867.

57. *Antipov O.L., Novikov A.A., Zakharov N.G., Zinoviev A.P.* Optical properties and efficient laser oscillation at 2066 nm of novel Tm:Lu₂O₃ ceramics. // *Optical Materials Express* – 2012. V. 2. P. 183-189.

58. *Saarinen E.J., Vasileva E., Antipov O., Penttinen J.-P., Tavast M., Leinonen T., Okhotnikov O.G.* 2-µm Tm:Lu₂O₃ ceramic disk laser intracavity-pumped by a semiconductor disk laser. // *Optics Express* – 2013. V. 21, № 20. P. 23844-23850.

59. *Lagatsky A.A., Antipov O.L., Sibbett W.* Broadly tunable femtosecond Tm:Lu₂O₃ ceramic laser operating around 2070 nm. // *Opt. Express* – 2012. V. 20, № 17. P. 19349-19354.

60. *Lagatsky A.A., Sun Z., Kulmala T.S., Sundaram R.S., Milana S., Torrisi F., Antipov O.L., Lee Y., Ahn J.H., Brown C.T.A., Sibbett W., Ferrari A.C.* 2-µm solid-state laser mode-locked by single-layer graphene. // *Appl. Phys. Letters* – 2013. V. 102. P. 013113.

61. *Antipov O.L., Novikov A.A., Zakharov N.G., Zinoviev A.P., Yagi H., Sakharov N.V., Kруглова М.В., Марычев М.О., Горшков О.Н., Lagatskii A.A.* Efficient 2.1-µm lasers based on Tm³⁺:Lu₂O₃ ceramics pumped by 800-nm laser diodes. // *Phys. Status Solidi C* – 2013. V. 10, № 6. P. 969–973.

62. *Larin S., Antipov O., Sypin V., Vershinin O.* Hybrid booster at 1940 nm based on Tm:Lu₂O₃ ceramics implementing fiber combined signal and pump sources. // *Optics Letters* – 2014. V. 39, Iss. 11. P. 3216-3218.

63. *Antipov O., Novikov A., Larin S., Obronov I.* Highly efficient 2 µm CW and Q-switched Tm³⁺:Lu₂O₃ ceramics lasers in-band pumped by a Raman-shifted erbium fiber laser at 1670 nm. // *Optics Letters* – 2016. V. 41, № 10. P. 2298-2301.

64. *Antipov O.L., Novikov A.A., Eranov I.D., Frolov M.P., Korostelin Y.V., Kozlovsky V.I., Podmar'kov Yu.P., Skasyrsky Y.K.* 2.92 µm Cr²⁺:CdSe single crystal laser pumped by a

repetitively pulsed $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ ceramics laser at 2.066 μm . // *Laser Phys. Lett.* – 2015. V. 12, № 4. P. 045801.

65. *Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Савикин А.П., Шарков В.В., Еремейкин О.Н., Фролов Ю.Н., Мищенко Г.М., Великанов С.Д.* Эффективная генерация на длине волны 1908 нм в лазере на кристалле $\text{Tm}:\text{YLF}$ с диодной накачкой. // *Квантовая электроника* – 2009. Т. 39, №5. С. 410-415.

66. *Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Шарков В.В., Савикин А.П.* Эффективная генерация на длине волны 2,1 мкм в лазере на кристалле $\text{Ho}:\text{YAG}$ с накачкой излучением $\text{Tm}:\text{YLF}$ лазера. // *Квантовая электроника* – 2010. Т. 40, №2. С. 98-100.

67. *Antipov O.L., Kositsyn R.I., Eranov I.D.* 36W Q-switched $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ Laser at 2097 nm Pumped by a Tm Fiber Laser: Evaluation of Different Ho^{3+} Doping Concentrations. // *Laser Physics Letters* – 2017. V. 14, №1. P. 015002 (6).

68. *Антипов О.Л., Еранов И.Д., Косицын Р.И.* Параметрические генераторы света среднего ИК диапазона мощностью 10 Вт на основе элементов ZnGeP_2 , накачиваемых излучением $\text{Ho}:\text{YAG}$ -лазера с волоконно-лазерной накачкой. Экспериментальное и численное исследование. // *Квантовая электроника* – 2017. Т. 47, №7. С. 601-606.

69. *Antipov O.L., Zakharov N.G., Fedorov M., Shakhova N.M., Prodanets N.N., Snopova L.B., Sharkova V.V., Sroka R.* Cutting effects induced by 2 mkm laser radiation of cw $\text{Tm}:\text{YLF}$ and cw and Q-switched $\text{Ho}:\text{YAG}$ lasers on *ex-vivo* tissue. // *Medical Laser Applications* - 2011, V. 26. P. 67–75.

70. *Antipov Oleg L.* Self-Pumped Phase Conjugation by Joint Stimulated Scatterings in Nematic Liquid Crystals and Its Application for Self-Starting Lasers // Chapter 10 In book: “Phase Conjugate Laser Optics”, edited by J.-P. Huignard and A. Brignon, John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey, 2004. P. 331-366.

71. *Fotiadi A.A., Antipov O.L., Mégret P.* Resonantly induced refractive index changes in Yb-doped fibers: the origin, properties and application for all-fiber coherent beam combining. // Chapter 11 in books “Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics,” InTech: Croatia, 2011. P. 209-233.

72. *Fotiadi A., Antipov O., Kuznetsov M., Mégret P.* Refractive Index Changes in Rare Earth-Doped Optical Fibers and Their Applications in All-Fiber Coherent Beam Combining. // Chapter 7 in book “Coherent Laser Beam Combining,” edited by A. Brignon, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim (Germany), 2013. P. 193-230.

73. *Антипов О.Л., Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Кужелев А.С., Сметанин С.Н., Федин, А.В.* Лазерная система одномодового излучения с динамическим резонатором. Патент РФ №2157035. Приоритет от 27.05.1998 по заявке №98109913. Дата публикации 27.09.2000.

74. *Антипов О.Л., Новиков А.А., Захаров Н.Г.* “Оптический квантовый генератор двухмикронного диапазона длин волн”. Патент РФ на изобретение N2459328 (заявка на патент РФ 2011106907, приоритет от 25.02.2012), зарегистрировано в Госреестре изобретений РФ 20 августа 2012 года.

АНТИПОВ Олег Леонидович

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ
С НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ
И ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Автореферат

Подписано к печати 20.02.2018 г.

Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100 экз. Заказ № 11(2018).

Отпечатано в типографии ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова 46