

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Антипова Олега Леонидовича  
« **Высокоэффективные твердотельные лазеры с нелинейно-оптическим управлением и преобразованием параметров излучения**»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.21 - Лазерная физика

Диссертация Антипова О.Л. посвящена исследованию нелинейно-оптических эффектов, имеющих принципиальное влияние на пространственно-временные характеристики излучения твердотельных лазеров, наиболее ярким из которых является формирование динамических решёток в активной среде. На этой основе автором созданы твердотельные источники с высокой эффективностью использования накачки, нелинейно-оптическим управлением и преобразованием длины волны в новые спектральные диапазоны, в частности, средний ИК диапазон, что значительно расширяет возможности их применений.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 353 страницах, содержит 238 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 428 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, а также обсуждается научная новизна и практическая значимость работы. Далее приводятся основные положения, выносимые на защиту, и ссылки на соответствующие публикации, а также сведения об апробации работы, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

**В главе 1** проводятся теоретические и экспериментальные исследования механизмов изменения показателя преломления (ИПП) лазерных кристаллов при интенсивной накачке. При изменении населённостей энергетических уровней ионов активатора основными процессами являются тепловой, обусловленный тепловыделением при релаксации возбуждённых ионов, и электронный, обусловленного различием поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов. Изменения населённости уровней приводят к ИПП в соответствии с соотношением Крамерса-Кронига. Для измерения ИПП используются поляризационный интерферометр Жамена-Лебедева, сравниваются кристаллы  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  с продольной и поперечной диодной накачкой, и с ламповой накачкой. Основное внимание уделяется разделению тепловых и электронных ИПП. Отмечается нелинейный рост электронных ИПП при большой мощности накачки (особенно при ламповой). Далее описывается тестирование динамических решёток показателя преломления (РПП) в кристаллах  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  с лазерной накачкой. Динамическая решетка возбуждалась пересекающимися лазерными пучками на 1064, 808 или 266 нм и считывалась излучением He-

Ne лазера на 633 нм. За счёт разного времени релаксации разделяются вклады тепловой и электронной составляющей динамической решётки, и определяются параметры этих решёток. Приводятся полученные зависимости электронных ИПП кристалла  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  и величины различия поляризуемости основного и возбуждённого состояний от длины волны. Далее приводятся результаты сравнительных исследований электронных ИПП методами динамических решёток и поляризационной интерферометрии в 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  $\text{Nd}^{3+}$ -содержащих стёклах. Теми же методами исследуются кристаллы  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ ,  $\text{Yb}^{3+}:\text{GGG}$ ,  $\text{Yb}^{3+}:\text{KYW}$ ,  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGW}$ ,  $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$  при диодной и лазерной накачке. Сделаны выводы о том, что электронные ИПП неустранимы, имеют локальный характер (независимы 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 импульсном режиме.

**Глава 2** посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям параметрической генерации световых волн при четырёхволновом взаимодействии (ЧВВ) на динамических решётках, формируемых с участием внешнего сигнала в слое нелинейной среды, в частности, в лазерных и нематических жидких кристаллах (НЖК), с петлёй обратной связи (ПОС). ОВФ зеркало на основе НЖК используется для компенсации искажений световых пучков в двух- и четырёхпроходных усилителях. Экспериментально исследовано влияние амплитудных и фазовых невязимостей ПОС на порог параметрической генерации в лазерном усилителе на кристалле  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  с ПОС. Показано, что параметрическая генерация в такой системе существует как при наличии фазовой невязимости 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. Теоретически показано, что при наличии динамических РПП наряду с решётками усиления порог генерации может быть достигнут и во взаимной схеме, что согласуется с результатами экспериментов.

**В главе 3** экспериментально и теоретически исследованы твердотельные лазеры с резонаторами на динамических решётках. Сначала описываются общие принципы таких лазеров. 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 для РПП, а для решёток насыщения усиления требуется амплитудная и фазовая невязимность резонатора. Лазер на динамических решётках (в сравнении с обычным) имеет более быстрое нарастание мощности из-за самомодуляции добротности резонатора, а также лучшую дискриминацию высших пространственных мод по сравнению с основной. Для продольных мод любая частота вблизи максимума коэффициента усиления может индуцировать динамическую решётку на

начальной стадии, но после того как динамическая решётка в резонаторе сформировалась, появляется резонатор с заданной “распределённой обратной связью”, выходное (голографическое) зеркало которого определяет спектр генерируемых мод. Число продольных мод ограничивается условием брэгговской селекции при отражении от решётки. На стадии развития генерации моды конкурируют между собой, что способствует одномодовой генерации, а с ростом мощности накачки возможна генерация дополнительных продольных мод. Число поперечных мод, отражаемых динамической решёткой, оценивается как отношение угловой селективности к дифракционному углу одной моды. Если резонатор формируется несколькими решётками одновременно, то условие одномодовой генерации упрощается. Модовая селекция исследована в различных схемах. В лазерах на кристаллах  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  с ламповой накачкой с кольцевыми и петлевыми резонаторами, формируемыми с участием динамических решёток в активной среде, оказалась возможна эффективная генерация мощных пучков высокого качества, устойчивых к внутрирезонаторным искажениям. Продемонстрирована импульсно-периодическая генерация пучков с высокой в среднем по времени мощностью (200–300 Вт) и высоким качеством пучка ( $M^2=2-4$ ), определяемым селективными свойствами объёмных решёток. В лазере на кристалле  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  с непрерывной диодной накачкой и динамическим резонатором мощность генерации достигала 9,6 Вт при дифракционном качестве пучка ( $M^2 < 1,1$ ). 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.

**Глава 4** посвящена исследованиям электронных ИПП в иттербиевых волоконных усилителях и возможностей их использования для когерентного сложения пучков. Экспериментальные исследования ИПП с помощью волоконного интерферометра Маха – Цандера в алюмосиликатных и фосфоросиликатных кварцевых волокнах, активированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , позволило определить величину различия поляризуемости  $\Delta p$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$  на лазерных уровнях  $^2F_{5/2}$  и  $^2F_{7/2}$  в этих волокнах вне линии усиления (1450–1600 нм) и оценить  $\Delta p$  в практически важном диапазоне длин волн накачки и усиления иттербиевых волокон (850–1600 нм), где резонансный вклад в  $\Delta p$  может заметно превышать нерезонансный. Приведена также оценка отношения действительной и мнимой части изменения восприимчивости иттербиевых волокон при изменении населённости, которая в области усиления существенно превосходит 1. Экспериментально исследовано когерентное сложение мощности в двухканальной системе иттербиевых волоконных усилителей за счёт нелинейно-оптического управления показателем преломления волокна, активированного  $\text{Yb}^{3+}$ . Управление показателем преломления иттербиевого волокна осуществлено излучением

накачивающей волны (980 нм) и сигнала (1064 нм). Использование алгоритма амплитудной модуляции управляющего сигнала и синхронного детектирования в цепи обратной связи обеспечивает высокое быстродействие фазовой подстройки (более 10 кГц). Проведено теоретическое и экспериментальное исследование низкопороговой поперечной модовой неустойчивости (ПМН) в маломодовых иттербиевых волоконных усилителях. Порог возникновения неустойчивости варьируется от 1 до 100 Вт и зависит как от параметров волокна (диаметра сердцевины, числовой апертуры, длины, уровня легирования ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , 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 торца или от внешнего источника) порог ПМН ещё более уменьшается. В этом случае неустойчивость обусловлена ЧВВ двух пар встречных волн на динамической решётке.

**Глава 5** посвящена высокоэффективным твердотельным лазерам с параметрическим преобразованием излучения в средний ИК диапазон. В частности, исследовано параметрическое преобразование излучения  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  лазеров в средний ИК диапазон (3392,2 нм) в кристалле PPLN. Эффективность преобразования достигала 10%. Предложена керамика  $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ , впервые изготовленная по заказу автора японской компанией “Konoshima Chemicals”, и в схеме с диодной накачкой получена лазерная генерация на 2060-2094 нм с мощностью до 34 Вт в непрерывном режиме (при полной эффективности преобразования накачки ~35%) в многомодовом пучке ( $M^2 \approx 6-7$ ). При накачке излучением  $\text{Ti}:\text{S}$  лазера в режиме пассивной синхронизации мод с насыщающимся поглотителем  $\text{InGaAsSb}$  получена импульсно-периодическая генерация на ~2070 нм с частотой следования 130-150 МГц при длительности 180-300 фс и средней мощности до 750 мВт. С накачкой излучением волоконных лазеров на 1670 нм получена непрерывная генерация на длине волны 2066 нм мощностью до 23 Вт (при эффективности преобразования 51%) в пучке дифракционного качества. Также исследованы гибридные лазерные системы: волоконный задающий генератор – усилитель мощности на керамике  $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ . Для импульсно-периодического излучения (с длительностью импульсов 10-100 нс при частоте повторения до 95 кГц) достигнута выходная мощность ~24 Вт и импульсная энергия ~2,3 мДж в пучке высокого качества. Генерация на монокристаллах  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  и поликристаллах  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  с накачкой импульсно-периодическим излучением лазеров на керамике  $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$  дает длину волны 2920 нм со средней мощностью до 800 мВт в пучке дифракционного качества. В лазерах на поликристаллах  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  получена генерация в спектральном диапазоне 2,35-2,74

мкм со средней по времени мощностью до 3,6 Вт в пучке высокого качества. Продемонстрирована возможность параметрического преобразования излучения лазера на керамике  $Tm^{3+}:Lu_2O_3$  в средний ИК диапазон (3,4–4,9 мкм) в PPLN или ZnGeP со средней мощностью 3–4 Вт. Исследованы другие схемы, в частности, параметрическое преобразование излучения  $Ho^{3+}:YAG$  лазера в средний ИК диапазон (3,5–5 мкм) со средней мощностью до 10 Вт на тандеме нелинейно-оптических элементов ZnGeP<sub>2</sub> с эффективностью преобразования до ~40%. Продемонстрированы возможности лазеров на основе керамики  $Tm^{3+}:Lu_2O_3$  и кристаллов  $Tm^{3+}:YLF$  с диодно-лазерной накачкой, а также кристаллов  $Ho^{3+}:YAG$  с волоконно-лазерной накачкой для хирургии биологических тканей при минимальной карбонизации и зоне коагуляции, а также лазеров на кристаллах  $Ho^{3+}:YAG$  или керамике  $Tm^{3+}:Lu_2O_3$  с волоконной накачкой для контролируемой деструкции почечных камней.

Завершает работу заключение, включающее основные научные результаты.

**Научная новизна и значимость** работы заключается в получении большого количества новых результатов, наиболее важные из которых:

1. Детально изучены динамические изменения показателем преломления (ПП) в лазерных кристаллах и стёклах, активированных ионами  $Nd^{3+}$  или  $Yb^{3+}$ , при их интенсивной накачке (диодной, лазерной или ламповой) и доказано, что существует значительная по величине электронная компонента этих изменений, обусловленная различием поляризуемости возбуждённых и невозбуждённых ионов.

2. Экспериментально и теоретически исследованы твердотельные лазеры, резонаторы которых формируются с участием динамических решёток, индуцируемых в нелинейной среде самими волнами генерации. Высокая пространственно-угловая и частотная селективность динамических решёток способствует генерации узкополосного излучения с высоким качеством пучка, а их адаптивные свойства - компенсации наведённых искажений в активной лазерной среде при высокой мощности пучка.

3. Продемонстрирована возможность когерентного сложения излучения двухканального эрбиевого усилителя за счёт оптического управления показателем преломления волокна, активированного ионами  $Yb^{3+}$ , с эффективностью ~95%. Управление ПП иттербиевого волокна осуществлялось излучением накачивающей волны (на длине волны 980 нм) и волны насыщения (на длине волны 1064 нм).

4. В волоконно-лазерных усилителях с малым числом поперечных мод обнаружена неустойчивость основной моды по отношению к модам с более высоким индексом, связанная с рассеянием на электронных решетках ПП. Порог возникновения неустойчивости варьируется от 1 до 100 Вт и зависит как от параметров волокна, так и от характеристик излучения.

5. Предложено использовать керамику  $Tm^{3+}:Lu_2O_3$  для лазерной генерации на длине волны  $\sim 2$  мкм. Проведены комплексные исследования керамики, изготовленной по заказу автора компанией "Konoshima Chemicals". В керамике с диодной накачкой получена лазерная генерация в диапазоне 2060–2094 нм мощностью до 34 Вт в непрерывном режиме (при полной эффективности преобразования накачки  $\sim 35\%$ ).

6. Продемонстрирована возможность параметрического преобразования излучения лазера на керамике  $Tm^{3+}:Lu_2O_3$  в средний ИК диапазон (3,4–4,9 мкм) в периодически-поляризованном кристалле  $MgO:LiNbO_3$  или кристалле  $ZnGeP_2$  со средней мощностью до 4 Вт.

Научная новизна и значимость подтверждается большим количеством публикаций в ведущих рецензируемых журналах (73!), а также их обсуждением в рамках докладов на российских и международных конференциях и семинарах.

**Практическая значимость** подтверждается наличием патентов, созданием опытных образцов приборов и проведенными исследованиями возможностей их применений.

Основные **замечания** обусловлены тем, что диссертация и автореферат содержат очень большое количество результатов, что приводит к сильной сжатости изложения материала:

1. В автореферате отсутствуют ссылки на работы других авторов.
2. В разделе 3.1.2 помимо качественного рассмотрения механизмов селекции продольной моды был бы полезен количественный расчет условий селекции одной продольной моды.

Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Все поставленные автором задачи выполнены с большим превышением. Автор показал глубокое знание тематики. Тема диссертации является актуальной, а полученные результаты - оригинальными. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Представленная диссертационная работа соответствует всем требованиям ВАК России, и её автор, Антипов Олег Леонидович, безусловно достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

**Отзыв составил:**

Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., ВРИО директора, заведующий лабораторией волоконной оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

С.А. Бабин

**Почтовый адрес:**

630090 г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1  
Тел. 8(383) 330-69-39, эл. адрес: [babin@iae.nsk.su](mailto:babin@iae.nsk.su)

**Подпись Сергея Алексеевича Бабина заверяю:**  
Ученый секретарь ИАиЭ СО РАН, к.ф.-м.н.



Е.И. Донцова