

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Перевезенцева Евгения Александровича

«Особенности создания мощных дисковых лазеров на иттербиевых средах с криогенным охлаждением», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, специальность 01.04.21 – лазерная физика

Актуальность развития существующих и разработка новых лазерных систем с высокой средней и пиковой мощностью обусловлена широким спектром научных и научно-технологических приложений. Излучение применяется в качестве накачки при широкополосном оптическом параметрическом усилении чирпированных импульсов, создании компактных источников излучения от рентгеновского до среднего ИК и терагерцового диапазонов спектра, а также в области лазерного плазменного ускорения заряженных частиц. Непрерывно идет поиск методов и способов повышения эффективности лазерного усиления и поиск новых перспективных активных сред лазеров с высокой средней мощностью.

В диссертационной работе идет речь об исследовании широкого круга научных и научно-технических проблем, возникающих при решении задачи по созданию криогенных дисковых иттербиевых лазерных систем, работающих одновременно с высокой средней по времени и пиковой мощностью. Рассматриваются вопросы диагностики и выбора лазерных сред, разработки методов и подходов борьбы с паразитным усиленным спонтанным излучением, анализа и выбора схем стретчер-компрессор, поиска и реализации новых оптических схем криогенных многопроходных усилителей. В связи с этим тема диссертационной работы Е.А. Перевезенцева **актуальна**.

Диссертационная работа Е.А. Перевезенцева состоит из введения, двух глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 174 страницы, включая 74 рисунка и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 205 источников, включая 38 авторских работ.

Во **Введении** обоснованы актуальность темы работы и выбор предмета исследования, сформулированы основные цели и задачи, научная новизна, научная и практическая значимость диссертационной работы, основные защищаемые положения, указаны степень достоверности и апробация результатов, отмечен личный вклад автора. Определены основные подходы к решению поставленных задач для достижения цели, при этом особо подчеркивается перспективность использования криогенного охлаждения активных элементов лазерных систем. Приведены сведения о структуре, объеме и краткое содержание диссертационной работы.

**Первая глава** диссертации Е.А. Перевезенцева посвящена комплексному экспериментальному и теоретическому исследованию основных задач разработки мощных дисковых лазеров на иттербиевых средах. Отмечено, что для создания и совершенствования дисковых лазеров с высокой средней мощностью необходима диагностика материала активного элемента, а также определение связи между полученными значениями лазерных характеристик среды и выходными параметрами лазерного излучения. Указано на серьезную проблему при создании дисковых лазеров, которая заключается в проявлении сильного эффекта усиленного спонтанного излучения, эффективное подавление которого возможно при использовании композитных активных элементов. Отмечено, что для эффективного извлечения энергии из дискового активного элемента с невысоким продольным коэффициентом усиления необходимо обеспечить большое количество проходов усиливаемого излучения через активные элементы. В **разделе 1.1** приведены результаты измерений основных спектральных и лазерных характеристик кристаллов Yb:YAG, оптических керамик полторных оксидов Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в диапазоне температур 80-300 К. Приведена схема эксперимента и описана методика измерения спектра люминесценции и времени жизни на верхнем рабочем уровне примесного иона иттербия в образцах. Показано, что охлаждение кристалла Yb:YAG приводит к изменению его лазерных характеристик: сечение усиления увеличивается и становится сравнимым с Nd:YAG, ширина линии усиления уменьшается с ~ 10 нм до 1,3 нм, а максимум интенсивности спектра сечения усиления сдвигается с 1030,1 до 1029,3 нм. Этого достаточно для усиления пикосекундных импульсов, но наличие сдвига необходимо учитывать для эффективного усиления сигнала в криогенных усилителях. Отмечен интересный факт, что центральная длина волны усиления Yb:YAG при 300 К близка к центральной длине волны усиления Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при 80 К, поэтому излучение работающих при комнатной температуре Yb:YAG лазеров можно эффективно усиливать в мощных криогенных оконечных каскадах усиления на этих керамиках. В **разделе 1.2** предложен и подробно описан новый метод термодиффузионной сварки кристаллов различных гранатов для изготовления композитных лазерных элементов различного функционального назначения. Отмечены основные преимущества метода, заключающиеся в снижении требований к качеству поверхностей, отсутствию пресса и нагреве в воздушной атмосфере при высоких температурах. Несколькими способами исследовано качество контактов образцов, для которых применялась разработанная технология, и приведены примеры их использования. Для каждого этапа отжига был измерен коэффициент отражения от свариваемого слоя в зависимости от поперечной координаты и проведено сравнение механической прочности контакта на

различных стадиях сварки при помощи нагрева композитного элемента излучением импульсного диодного лазера. В дополнение образцы испытаны в качестве активных элементов в лазерных установках. Схема и фотографии композитных элементов, фотографии мест скола, сделанные с различным увеличением, при помощи электронного микроскопа дают представление о тщательности исследования. Показано, что метод позволил получить композитные элементы из кристаллов гранатов YAG, Yb:YAG, Yb:GGG, TGG апертурой до 20 мм с оптическим контактом, механическая прочность которого сравнима с прочностью монокристалла, а коэффициент отражения от границы близок к френелевскому. В **разделе 1.3** подробно обсуждены вопросы многопроходных схем для дисковых усилителей. Предложены две оптические схемы многопроходного (несколько десятков) дискового лазерного усилителя. Схемы названы матричными из-за расположения друг под другом мест отражения лазерного излучения на больших зеркалах телескопов в виде таблицы или матрицы. Предложенные схемы отличаются порядком обхода излучением усилителя. Рассчитана наиболее простая реализация схемы с наименьшим количеством оптических элементов и описано ее применение для создания многопроходного лазерного усилителя. Предложена модификация схемы для случая наличия тепловой линзы в активном элементе, что актуально при работе с высокой средней мощностью лазерного излучения. Приведены результаты экспериментов по созданию дискового усилителя на базе предложенной матричной схемы. Исследована зависимость выходной мощности 32 V-проходного усилителя, собранного по матричной схеме, от поглощенной мощности накачки при использовании дискового Yb:YAG и композитного Yb:YAG/YAG активного элемента. Получено усиление слабого сигнала с коэффициентом 1,26 раза за проход. При средней мощности входного излучения ~9 Вт на выходе достигнут уровень выходной мощности ~80 Вт в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения 10 кГц импульсов длительностью 2 нс с эффективностью по накачке ~20%. В **разделе 1.4** проведен сравнительный анализ наиболее часто используемых при количественном описании искажений пучка критериев качества – интеграла перекрытия  $\chi$ , числа Штреля  $S$  и параметра  $M^2$  – в случае трех часто встречающихся причин ухудшения качества пучка: тепловых искажений (тепловая изотропная линза), электронной самофокусировки и сферических aberrаций гауссовых и супергауссовых пучков. Численно и аналитически рассчитаны все три критерия для случая гауссова и супергауссова профиля интенсивности пучка и трех часто встречающихся типов фазовых искажений, найдены закономерности и соотношения между критериями. Проведен расчет компенсации параболической составляющей фазовых искажений путем постановки идеальной линзы. Расчетами показано, что

фокусное расстояние компенсирующей линзы можно довольно точно посчитать по приближенным аналитическим формулам. Вычислены фокусные расстояния необходимых компенсационных линз, а также максимизированные после компенсации искажений значения критериев качества. Проведено сравнение точных численных и приближенных аналитических расчетов. Исследовано влияние формы пучка на различные критерии качества. Из сравнения критериев сделан интересный вывод: выделив неискаженное (входное) поле в искаженном (выходном) поле, можно увеличить интенсивность на оси пучка в фокальной плоскости линзы, хотя полная мощность излучения при этом уменьшится.

**Вторая глава** диссертации посвящена работам по созданию криогенного дискового лазера, работающего с высокой средней и пиковой мощностью на основе кристаллов Yb:YAG и Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамики. Очерчен круг проблем, ограничивающих значения выходных параметров, в том числе связанных с технологией криогенного охлаждения активных элементов и найдены способы их решения. В **разделе 2.1** проведено теоретическое исследование основных параметров двухпроходного криогенного дискового Yb:YAG усилителя при различной частоте повторения и скважности диодной накачки. Получен набор приближенных решений системы балансных уравнений для 4-уровневой схемы, с которой взаимодействует монохроматическая накачка. Проанализированы коэффициенты усиления и запасенная энергия в криогенных дисковых элементах. Найдены области значений параметров, учтены эффекты насыщения и спонтанного излучения. Определено, что для кристалла толщиной 600 мкм оптимальным является легирование Yb<sup>3+</sup> на уровне 10 ат.%. В расчетах учтены форма, ширина и центральная частота контура линии поглощения и спектра накачивающего излучения. **Раздел 2.2** посвящен расчету параметров системы стретчер-компрессор для криогенного дискового Yb:YAG лазера и выбору оптимальных вариантов ее реализации. Написан программный код для расчета согласованной пары стретчер-компрессор на базе дифракционных решеток. Представлены результаты численного моделирования хода лучей в одно- и двухрешеточном стретчере и компрессоре, вычислены габариты и фокусные расстояния оптических элементов. Объяснена последовательность расчета параметров системы стретчер-компрессор, а затем, с использованием полученных данных компрессора (расстояние между двумя дифракционными решетками и угол падения луча на них), рассчитан согласованный стретчер. Рассчитана и экспериментально реализована схема стретчера на дифракционных решетках 1200 штрихов/мм. Сделан вывод, что для построения более оптимальных с точки зрения пропускания и размеров стретчера и компрессора на базе дифракционных решеток необходимо использовать решетки 1740

штрихов/мм, при этом размер дифракционной решетки уменьшится с 32 до 22 см, а рабочий угол падения станет ближе к углу Литтроу, что приведет к увеличению эффективности отражения в первый порядок дифракции. Представлен и проанализирован временной профиль импульсов на выходе стретчера на базе объемных чирпирующих брэгговских решеток. Подчеркивается, что использование компрессора на базе объемных чирпирующих брэгговских решеток на выходе импульсно-периодического лазера с высокой средней мощностью весьма затруднительно из-за опасности перегрева и оптического пробоя. Предлагается оптимальным для реализации CPA схемы криогенного дискового Yb:YAG лазера использование пары стретчер на объемных чирпирующих брэгговских решетках и компрессор на дифракционных решетках с подстройкой дисперсии. В этом же разделе отмечено, что для предварительного усиления задающего сигнала удобно и эффективно использовать многопроходные или регенеративные усилители на базе активных элементов в форме тонкого стержня. В **разделе 2.3** приводятся в большом количестве экспериментальные результаты, достигнутые при создании мощного криогенного дискового лазера на кристаллах Yb:YAG. Исследован эффект усиленного спонтанного излучения в активных элементах различной геометрии: тонкий диск, тонкий диск со скошенной боковой поверхностью без поглощающего покрытия на образующей и с покрытием, композитный элемент типа «сэндвич» Yb:YAG/YAG. Показано, что в композитном активном элементе эффект усиления спонтанного излучения существенно слабее, чем во всех остальных исследованных геометриях. На приведенных экспериментальных зависимостях нормированной интенсивности люминесценции от времени в дисковом элементе и времени установления люминесценции  $\tau_{\text{eff}}$  от интенсивности накачки отмечен излом, отображающий начало паразитной генерации, резонатором для которой является боковая поверхность активного элемента. Небольшой рост интенсивности люминесценции после этого излома объясняется нагревом активного элемента, что приводит к уменьшению сечения усиления и, соответственно, увеличению порога паразитной генерации. Предложен способ решения проблемы образования инея на активном элементе внутри вакуумного криостата, приводящего к снижению порога пробоя просветляющего покрытия, путем создания слабого потока газообразного азота внутри вакуумной криогенной камеры. Подробно описана экспериментальная схема разработанной импульсно-периодической лазерной системы на Yb:YAG-дисках с криогенным охлаждением с задающим генератором на Yb:YAG-диске с водяным охлаждением и выходными импульсами длительностью несколько наносекунд. Разработана оригинальная проточная система охлаждения жидким азотом при помощи погружного насоса, позволившая работать с диодной накачкой в

непрерывном режиме. Приведены результаты сравнения коэффициента усиления слабого сигнала при проточном и пассивном охлаждении активного элемента. После W-проходного оконечного усилителя на выходе лазера получено 120 мДж при частоте повторения 500 Гц и 145 мДж при частоте 400 Гц. Для повышения стабильности работы и средней мощности оконечного усилителя разработан компактный криогенный дисковый квантрон с апертурой активного элемента 20 мм. Предложена конструкция и описана изготовленная криогенная помпа с датчиками контроля скорости потока, давления и уровня жидкого азота для создания проточной системы охлаждения квантронов. Показано, что в сочетании с телескопической схемой усиления, усилитель с двумя разработанными квантронами позволяет значительно улучшить согласование между пучками сигнала и накачки на кристаллах, компенсировать тепловую линзу и реализовать необходимое количество проходов усиливаемого излучения через кристалл. Экспериментальные измерения показали, что спектральный и временной профили остаются неизменными по мере прохождения импульсом усилительных каскадов. **Раздел 2.4** посвящен применению иттербиевой лазерной керамики в качестве активной среды мощных дисковых криогенных лазеров. Первая часть данного раздела касается создания криогенного дискового усилителя на базе керамического материала Yb:YAG. Проанализированы зависимости увеличения максимума интенсивности люминесценции от температуры в Yb:YAG керамике с допированием 5 ат.% со средним размером гранул 7, 12 и 20 мкм. Измерены зависимости коэффициента усиления слабого сигнала и запасенной в активном элементе энергии от поглощенной мощности накачки. Экспериментальные результаты сравнены с расчетами, выполненными при помощи программного 3D кода, учитывающего зависимость параметров лазерной среды и радиатора от температуры, а также эффект усиления спонтанного излучения. На выходе W-проходного криогенного усилителя получена энергия 233 мДж на 2-х дисковых активных элементах из Yb:YAG керамики (диаметр 20 мм, толщина 1,4 мм) при длительности импульсов 70 пс и частоте повторения 143 Гц. Отмечено, что эффективность по накачке составила 20%, что является достаточно высоким значением для импульсно-периодических лазеров. Данные сравнительного обзора работ по тематике показали превосходство достигнутых выходных параметров среди созданных на сегодняшний день криогенных импульсно-периодических лазерных систем на базе тонких дисков из Yb:YAG керамики. Утверждается, что возможно увеличение выходной энергии импульсов и средней мощности, если использовать композитные Yb:YAG/YAG активные элементы и проточную систему охлаждения жидким азотом. Во второй части раздела рассказано о создании многопроходного дискового криогенного импульсно-периодического

усилителя на базе Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамики с выходной мощностью 15,8 Вт при частоте повторения 11,5 кГц и длительности импульсов 0,5 нс. Продемонстрирована схема измерения фазовых искажений в дисковом активном элементе криогенного квантрона методом фазово-сдвиговой интерферометрии. Приведены примеры полученного распределения изменения оптического пути от поперечной координаты при отражении от активного элемента. Приведена и описана блок-схема задающей системы на базе Yb:YAG и схема много-V-проходного криогенного дискового Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> усилителя. Измерены пространственное распределение пучка при максимальной выходной мощности и спектры входного и выходного сигналов. Обращено внимание на их полное совпадение при ширине ~1,2 нм. Делается вывод о том, что при наличии соответствующего источника возможно усиление более широкополосного излучения с дальнейшей компрессией в субпикосекундный диапазон длительностей импульсов.

В **Заключении** диссертационной работы Е.А. Перевезенцева изложены основные результаты работы, оценены возможности их применения и выводы, объясняющие особенности создания мощных дисковых лазеров на иттербиевых средах.

**Научная новизна и практическая значимость работы** не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 38 работах, из которых 10 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и неоднократно докладывались на международных конференциях. При выполнении работы проведен большой объем исследований, использована большая группа современных физических методов, результаты являются оригинальными и они интерпретированы на высоком уровне, с учетом современных представлений, выводы обоснованы.

**Некоторые замечания** по диссертации Е.А. Перевезенцева:

1. На стр. 12 выражение «с растяжением длительности импульсов от пикосекунд...» предпочтительнее писать «с увеличением длительности импульсов», поскольку растягивается импульс, а не длительность.
2. На стр. 23 при описании схемы установки для измерения времени жизни на верхнем рабочем уровне в зависимости от температуры (рис.1) отмечено, что «время выключения излучения должно быть значительно меньше времени жизни в исследуемой среде». Не совсем ясно, какие времена выключения и с какими фронтами были в реальном эксперименте, и с какой погрешностью было измерено время жизни?
3. На стр. 28 и далее везде в тексте обозначение концентрации ионов иттербия в атомных процентах дано латиницей «at.%», хотя в русском языке есть обозначение «ат.%».

4. На стр. 114 на рис. 516 приведена «Зависимость времени установления люминесценции  $\tau_{\text{eff}}$  от интенсивности накачки в АЭ различной геометрии». Почему для варианта "сэндвич" интенсивность накачки ограничена величиной 2000 Вт/см<sup>2</sup>? С чем это связано?

5. На стр. 119 приведено выражение «схема ППУ близка к регенеративными усилителям, однако избавлена от главного их недостатка – плохого контраста. Согласно выполненным измерениям, контраст импульсов в наносекундном диапазоне составлял более 10<sup>5</sup>». В тексте не описаны измерения. Каким образом измерялся контраст?

Отмеченные замечания и некоторое количество опечаток не влияют на общую высокую положительную оценку работы и носят рекомендательный характер.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Представленная диссертация соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, и её автор, Перевезенцев Евгений Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Петров Виктор Валерьевич  
кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.21 – лазерная физика)  
старший научный сотрудник  
лаборатории физики лазеров сверхкоротких импульсов  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института лазерной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН)

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации Е.А. Перевезенцева.

В.В. Петров

Почтовый адрес:

630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б, ИЛФ СО РАН  
Тел. +7(383)330-98-36, электронный адрес: [vpstv@laser.nsc.ru](mailto:vpstv@laser.nsc.ru)

Подпись Петрова В.В. заверяю,  
Учёный секретарь ИЛФ СО РАН,  
к.ф.-м.н.



П.В. Покасов