

На правах рукописи



Гурьев Денис Аркадьевич

**ДИСКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ С РЕЗОНАТОРАМИ ВЫРОЖДЕННОГО ТИПА
И МНОГОТОЧЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ**

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
1.3.19. Лазерная физика

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

Научный руководитель: Цветков Владимир Борисович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ИОФ РАН.

Официальные оппоненты:

Антипов Олег Леонидович, доктор физико-математических наук, Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, ведущий научный сотрудник лаборатории импульсных твердотельных лазеров.

Чешев Евгений Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), город Москва, ведущий научный сотрудник лаборатории полупроводниковых лазеров.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), г. Владимир.

Защита состоится «_____» 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.02 при ИОФ РАН по адресу: г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН <https://diss.gpi.ru/all/>

Автореферат разослан «_____» 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.223.02

кандидат физико-математических наук  Т.Б. Воляк

тел. +7(499) 503-8777 доб. 1-47

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Термооптические эффекты (термонаведенная линза, наведенное двулучепреломление) [1,2], возникающие в активных элементах непрерывных твердотельных лазеров за счет поглощения излучения накачки, приводят к ухудшению качества выходного излучения (увеличению значения M^2) и его деполяризации [3,4,5,6].

Одним из способов уменьшить влияние термооптических эффектов в твердотельных лазерах является использование активных элементов в виде слэбов [7–10]. Слэбы представляют собой пластины с малой толщиной, поперечные размеры которых значительно превосходят их толщину. Такая геометрия активного элемента позволяет обеспечить равномерный отвод тепла от активного элемента, так как охлаждение осуществляется через поверхности, имеющие большую площадь. Оптическая накачка слэбов может осуществляться несколькими способами: через грани с большей площадью (поперечная) и через торцы (продольная). Накачка слэбов может быть как ламповой, так и диодной. Ламповая применяется в случае накачки через большие грани, но в таком случае могут быть использованы и лазерные диоды. В случае использования тонких слэбов поперечная накачка может быть неэффективна вследствие малой длины распространения излучения накачки внутри активного элемента, поэтому при поперечной накачке используются слэбы с бóльшей толщиной и с бóльшей степенью легирования, что приводит к возникновению бóльшего градиента температуры в направлении, перпендикулярном распространению излучения генерации, и к заметному проявлению тепловых эффектов, влияющих на качество выходного излучения, даже несмотря на зигзагообразное распространение излучения внутри слэба. Непрерывные лазеры на слэбах демонстрируют высокие мощности генерации с хорошим КПД, однако получаемое на выходе излучение может обладать невысоким качеством и сильно зависит от конструкции квантрона. В данном аспекте лазеры на слэбах уступают непрерывным волоконным и дисковым лазерам, обладающим киловаттным уровнем выходной мощности при

хорошем качестве выходного излучения и относительно простой системе охлаждения.

Концепция дисковых лазеров (лазеров с активным элементом в форме тонкого диска) заключается в использовании активных элементов, имеющих толщину существенно меньшую (сотни мкм), чем их поперечные размеры. Диск закрепляется на охлаждаемой подложке, поэтому охлаждение осуществляется только через одну грань, имеющую большую площадь. Поверхность диска, непосредственно прилегающая к подложке, является зеркалом для излучения накачки и генерации. В дисковых лазерах применяется продольная схема накачки, т.е. вдоль оптической оси резонатора и перпендикулярно поверхности диска. Использование дисковых активных элементов было впервые предложено Гизеном [2]. Большая площадь охлаждения при очень малой толщине диска позволяет осуществлять эффективный теплоотвод от активного элемента, что позволяет существенно уменьшить влияние термооптических эффектов и повысить качество выходного излучения. Однако с уменьшением длины уменьшается и доля поглощенной мощности накачки в активном элементе. Для повышения доли поглощенной накачки были реализованы многопроходные схемы накачки [11–15], в которых излучение накачки многократно возвращается в активный элемент, тем самым увеличивая оптический путь излучения накачки внутри активного элемента. Повышение доли поглощенной мощности накачки повышает не только энергоэффективность дисковых лазеров, но также позволяет использовать дисковые элементы с меньшей степенью легирования. Более того, многопроходные схемы накачки дисков открывают перспективы использования сред с трёхуровневой системой энергетических уровней (т.е. в случае, когда требуется организовать высокую долю инверсии). В дисковых лазерах с многопроходными схемами накачки уже получены высокие мощности генерации при расходимости излучения близкой к дифракционной; более того, такие лазеры являются коммерчески доступными. На данный момент уже были продемонстрированы 32-проходные схемы накачки, но развитие в данном направлении продолжается и уже

предлагаются схемы, которые могут обеспечить до 100 проходов накачки через активный диск [15].

Для дальнейшего увеличения выходной мощности в дисковых лазерах было предложено использование нескольких дисков [3,16,17], связанных единым пучком генерации и накачки. Также существуют и схемы, в которых для каждого диска реализована многопроходная накачка. В таких схемах уровень мощности в непрерывном режиме генерации достигает десятков киловатт при хорошем качестве выходного излучения.

Дисковые лазеры, в которых применяются два описанных выше подхода (многопроходная накачка и использование нескольких активных дисков), широко распространены в сфере промышленности и производства, и они являются коммерчески доступными. Однако их схемы представляются технически сложными и громоздкими. В том числе и потому, что для распределения тепла по объему диска прибегают к увеличению размеров области накачки. Увеличение размеров области накачки при сохранении того же уровня мощности приводит к уменьшению градиента температуры. Кроме того, это позволяет более эффективно использовать объем активного элемента и увеличить мощность генерации. Однако увеличение размеров области накачки вызывает появление поперечных мод высших порядков, и для получения выходного излучения в основной поперечной моде требуется создавать резонаторы с большим полем основной поперечной моды, что, как правило, приводит к увеличению размеров резонатора. Поэтому появляется интерес к более компактным и простым конфигурациям дисковых лазеров с использованием меньшего количества оптических элементов [18–26], однако позволяющим реализовать одномодовый режим генерации.

К таким схемам можно отнести лазеры на “мульти-слэбах” [20,21], клиновидных дисках [22,23]. В этих схемах уже была реализована генерация с киловаттным уровнем выходной мощности при хорошем качестве выходного излучения [18–23].

Однако существуют и другие перспективные схемы дисковых лазеров. Это дисковые лазеры с вырожденными резонаторами и многопучковой накачкой [24,25]. Накачка в таком типе лазеров осуществляется несколькими пучками,

создающими в активном элементе несколько областей инверсной населенности. Вырожденный резонатор в данном случае позволяет осуществить такую схему распространения излучения генерации, при которой оно проходит через все области инверсной населенности.

Также были предложены схемы дисковых лазеров с двухзеркальной конфигурацией резонатора и с многопучковой накачкой [26], в которых осуществляется внутрирезонаторное когерентное сложение всех лазерных каналов, создаваемых каждой областью инверсной населенности. При сложении нескольких лазерных каналов есть возможность получения так называемой коллективной генерации или супермоды. В таком режиме в дальней зоне будет наблюдаться существенное увеличение интенсивности генерации при очень малой расходимости.

Генерационные характеристики твердотельных лазеров с вырожденными резонаторами и внутрирезонаторным сложением не были подробно исследованы, несмотря на их перспективность с точки зрения использования многоточечной накачки и относительной простоты конструкции [27]. А в дисковых твердотельных лазерах с внутрирезонаторным сложением каналов не было продемонстрировано синфазной коллективной генерации [26].

Цели и задачи работы

Целью данной работы было исследование характеристик и реализация схем непрерывных дисковых твердотельных лазеров с многоточечной накачкой и двухзеркальным резонатором, обеспечивающих расходимость выходного излучения, близкую к дифракционной, при различных режимах генерации.

Для достижения заявленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование наведенной термолинзы, образованной под действием многопучковой накачки, с близко расположенными областями накачки. Построение модели, описывающей термооптическую линзу при данных условиях.

2. Исследование условий, при которых в лазере с 8–10-пучковой накачкой осуществляется когерентное сложение лазерных каналов, а также построение модели, объясняющей природу возникновения коллективной генерации.

3. Создание лазера с вырожденным резонатором и трёхпучковой накачкой, в котором реализуется одночастотный режим генерации. Построение модели, объясняющей причины существования одной продольной моды в таком резонаторе.

4. Получение стабильных биений в 2-частотном режиме генерации в лазере с вырожденным резонатором М-типа и трёхпучковой накачкой.

Научная новизна

1. Впервые экспериментально исследованы термооптические эффекты в твердотельном дисковом элементе, возникающие под действием многопучковой накачки, при расстояниях между пучками, соизмеримых с размерами самих пучков. Показано, что распределение изменения оптической толщины диска в данном случае лучше всего описывается гауссовой функцией. Показано, что амплитуда фазового набега прямо пропорциональна мощности накачки, а ширина распределения практически не зависит от мощности накачки.

2. Впервые получен режим генерации супермоды в дисковом твердотельном лазере с 10-пучковой накачкой. Показано, что данный режим реализуется при осуществлении связи между удаленными лазерными каналами. Показано, что получение такой связи возможно в резонаторе с вырожденной конфигурацией. Показана область условий возникновения режима супермоды.

3. Впервые получен режим генерации одной продольной моды в лазере с вырожденным резонатором М-типа и трёхпучковой накачкой. Проведенный анализ условий существования одночастотного режима генерации показал, что реализация одночастотной генерации возможна при изменении угла наклона выходного сферического зеркала относительно оптической оси резонатора.

4. Получен режим генерации 2-х мод в лазере с вырожденным резонатором М-типа и трёхпучковой накачкой. Зарегистрированы биения двух

частот с частотой 360 МГц. Продемонстрировано, что данный частотный сдвиг соответствует межмодовому интервалу между TEM_{00} и TEM_{10} поперечными модами. Показано, что в вырожденном резонаторе М-типа ширина линии генерации не превышает 3 кГц.

Научно-практическая значимость работы

Проведенные исследования по когерентному сложению 8–10 лазерных каналов продемонстрировали возможность получения непрерывного интенсивного выходного излучения лазера с малой расходимостью при суммарном размере зоны накачки, значительно превышающем диаметр фундаментальной моды. Данная схема позволяет более эффективно использовать площадь активного элемента, а также распределить тепловую нагрузку на него при сохранении высокой выходной мощности излучения с хорошим качеством пучка. Предложенная модель анализа термооптических эффектов при многоточечной накачке позволяет определить оптическую силу термолинзы, что помогает в реализации условий, необходимых для получения режима генерации коллективной моды. Точность определения параметров термолинзы подтверждается соответствием экспериментальных и расчетных результатов.

Возможность получения одночастотного режима с узкой шириной линии в дисковом лазере с вырожденным резонатором создает новый подход в разработке лазеров с узкой шириной линии, с высокой мощностью генерации и хорошим качеством излучения, что может быть использовано при создании задающих генераторов лазерных систем высокой мощности.

Положения, выносимые на защиту

1. Распределение изменения оптической толщины дискового активного элемента лазера при многоточечной накачке, с расстояниями между пучками накачки, сопоставимыми с их собственными размерами, лучше всего описывается функцией Гаусса. Амплитуда этого распределения прямо пропорциональна

поглощенной мощности накачки, ширина распределения практически не зависит от мощности накачки.

2. Режим генерации супермоды в дисковом лазере с плоскопараллельным резонатором возможен при реализации условий существования вырожденного резонатора.

3. Спектрально-селективные свойства плоско-сферического вырожденного резонатора М-типа зависят от угла наклона сферического зеркала относительно оптической оси резонатора и от положения пятен генерации на поверхности активного диска.

4. Дискový лазер с вырожденным резонатором М-типа может устойчиво работать в режиме биений двух соседних мод с предельно узкой шириной линии генерации.

Апробация работы

Основные результаты проведенных в работе исследований докладывались автором лично на следующих конференциях: IX Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Институт лазерно-физических исследований (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2015); V международная молодежная научная школа-конференция “Современные проблемы физики и технологий”, (НИЯУ МИФИ, Москва, 2016); X всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2015); XI всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2015), International Conference Laser Optics, (Санкт-Петербург, 2020); 9th EPS-QEOD Europhoton Conference on Solid-State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources (EUROPHOTON 2020); XX International Conference Laser Optics, (Санкт-Петербург, 2022).

Результаты, представленные в диссертационной работе, отмечались наградами на конкурсах научных работ: Диплом за третье место на IX

Всероссийской школе-конференции для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2015 г.). Работа диссертанта была поддержана грантом РФФИ №19-32-90248 (Аспиранты).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 11 работ, из которых 8 в трудах конференций, 3 в рецензируемых журналах из WoS core collection и журналах из списка ВАК. Основные результаты исследования вошли составной частью в работу, поддержанную грантом №19-32-90248 (Аспиранты) Российского фонда фундаментальных исследований.

Достоверность результатов и личный вклад автора

Достоверность полученных результатов основана на анализе выполненных ранее работ и подтверждается сравнением полученных численных результатов с экспериментальными данными. Исследования проводились на современном научном оборудовании, с использованием современных вычислительных систем и математических пакетов.

Все результаты, предоставленные в диссертационной работе, получены автором лично либо при его непосредственном участии.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Список литературы содержит 102 наименований. Объем диссертации 103 страниц, в том числе 47 рисунков и 1 таблица.

Содержание работы

Во введении сформулирована цель и задачи работы, показана научная новизна и значимость полученных результатов, перечислены защищаемые

положения и кратко рассматривается содержание диссертационной работы по главам.

В главе 1, являющейся обзором литературы, представлено описание эффектов, возникающих в твердотельных лазерах из-за тепловыделения при поглощении излучения накачки. Рассмотрены подходы, которые позволяют уменьшить влияние термооптических эффектов в мощных твердотельных лазерах. Использование дисковых активных дисков представлено как один из наиболее эффективных методов по уменьшению влияния термооптических эффектов. Рассмотрены и недостатки использования дисковых активных сред, такие как слабое поглощение и усиление. Представлены методы, позволяющие минимизировать эти недостатки – использование многопроходной накачки и многодисковых схем. Также представлены новые концепции создания высокомошных дисковых лазеров, в их числе схемы с когерентным сложением лазерных каналов и резонаторы вырожденного типа, обладающие спектрально-селективными свойствами. Рассмотрены методы получения одночастотной генерации в твердотельных лазерах, проанализированы выходные мощности и ширины линии лазерного излучения, получаемые с помощью этих методов.

В главе 2 представлены результаты исследования термонаведенных эффектов (рисунок 1) в Nd:YVO_4 дисковом элементе с толщиной 0,5 мм, полученные с использованием интерференции в активном диске.

Предложена модель для обработки и анализа интерференционных картин. Результаты анализа интерферограмм, полученных при разной поглощенной мощности накачки, показали, что распределение изменения оптической толщины диска лучше всего описывается гауссовой функцией. Расчетные распределения интерференционных картин имели хорошее сходство с экспериментальными интерферограммами (рисунок 2).

В главе 3 представлено описание лазера с двухзеркальным плоским резонатором с внутррезонаторным сложением лазерных каналов, а также описание экспериментальной установки для исследования выходных характеристик излучения лазера. Лазер мог работать в двух режимах генерации, которым соответствовали две области экспериментальных условий (рисунок 3).

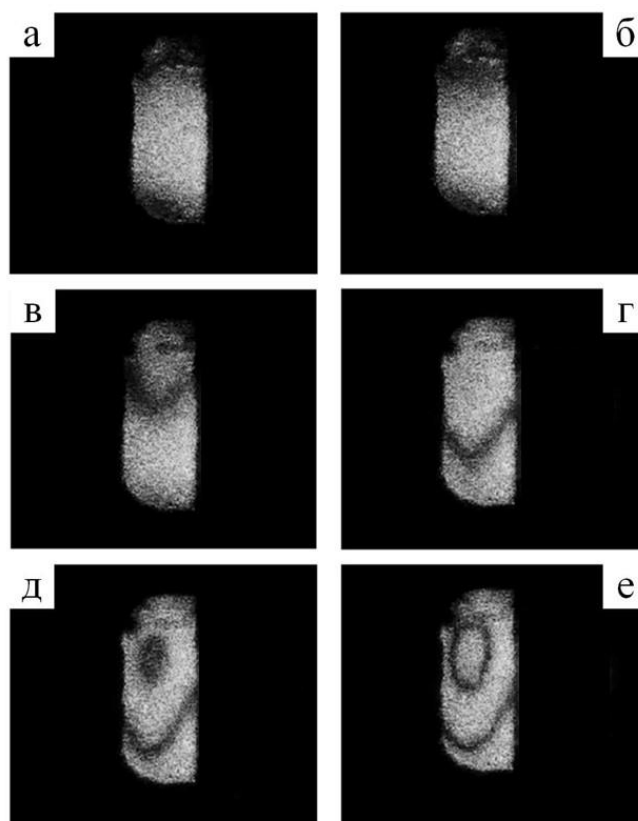


Рисунок 1. Интерферограммы, локализованные на поверхности активного элемента, при разных значениях поглощенной мощностях накачки: а – 0 Вт, б – 1.8 Вт, в – 2.7 Вт, г – 4,4 Вт, д – 5,3 Вт, е – 6,5 Вт.

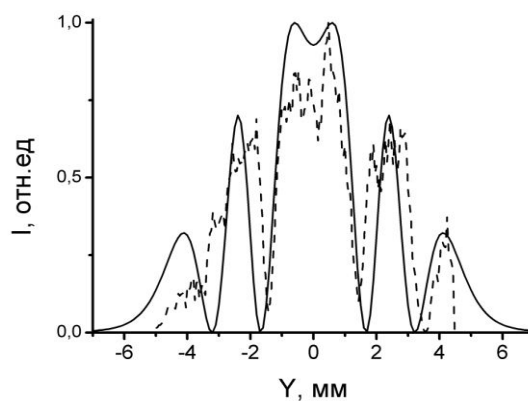


Рисунок 2. Распределение интенсивности излучения в интерференционной картине: экспериментально наблюдаемое (пунктир) и расчетное (сплошная линия) для мощности накачки 6,5 Вт.

Первый режим соответствовал случаю ближней оптической связи между каналами, которая осуществлялась за счет частичного перекрытия излучения между ними. В данном режиме наблюдалось структурное соответствие между

наблюдаемыми распределениями интенсивности излучения генерации внутри активного элемента и в дальней зоне (рисунок 4).

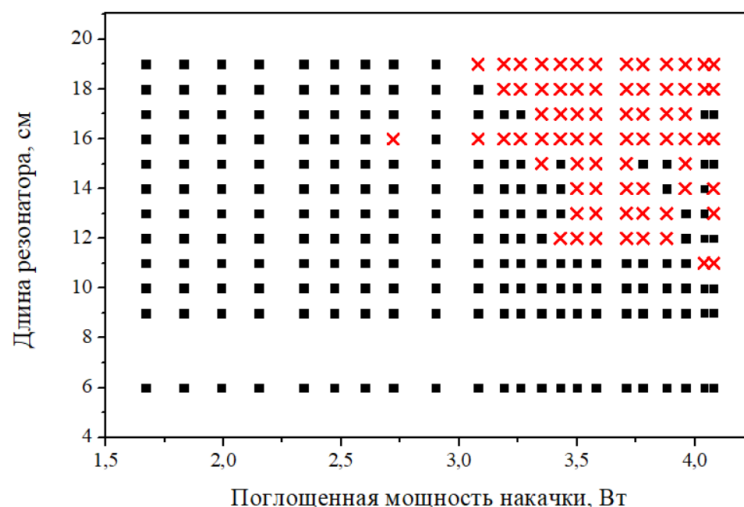


Рисунок 3. Диаграмма экспериментальных условий, при которых наблюдалась (красный крест) и не наблюдалась (черный квадрат) генерация коллективной моды.

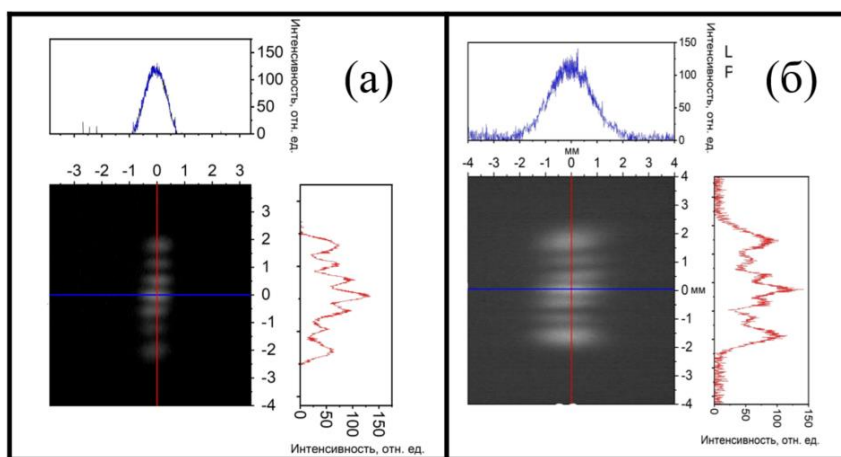


Рисунок 4. Фотографии лазерного излучения и распределение интенсивности излучения в активном элементе (а) и в дальней зоне (б) при длине резонатора $L = 15$ см и поглощенной мощности накачки $P_{abs} = 2,5$ Вт.

Во втором режиме не наблюдалось структурного соответствия между распределением интенсивности излучения внутри активного элемента и в дальней зоне (рисунок 5). В данном режиме в активном элементе наблюдалась область, по размеру соответствующая суммарной апертуре 5–7 лазерных каналов. В дальней

зоне наблюдался интенсивный центральный пик с 60% общей мощностью излучения в нем и два боковых пика меньшей интенсивности. Наблюдаемая картина соответствовала случаю синфазной коллективной генерации (генерации супермоды) с глобальной оптической связью между каналами, которая осуществлялась за счет того, что все лазерные каналы были связаны единым внеосевым пучком. Теоретически было показано, что создание подобной связи было возможно при реализации вырожденной конфигурации резонатора.

Условия, при которых было возможно получение режима генерации супермоды, были описаны расчетной кривой, соответствующей области экспериментальных условий, в которых наблюдалась синфазная коллективная генерация. Расчеты распространения излучения внутри резонатора производились при помощи метода матричной оптики. Для произведения данного расчета распределение оптической толщины активного диска было описано параболической кривой вместо гауссовой. Данное допущение было уместно, так как в области расположения лазерных каналов параболическая функция имела незначительные отклонения от гауссовой функции. Полученные на основе расчетов распределения излучения генерации в дальней зоне совпали с экспериментально полученными данными.

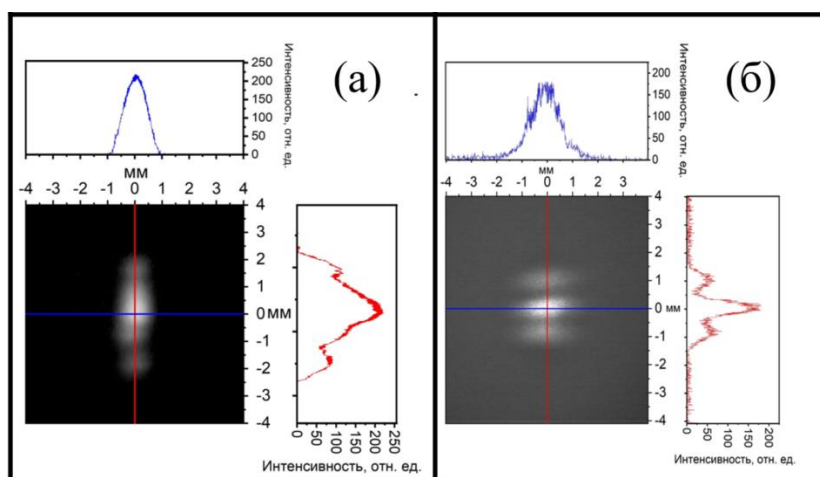


Рис. 5 Фотографии лазерного излучения и распределение интенсивности излучения в активном элементе (а) и в дальней зоне (б) при длине резонатора $L = 16$ см и поглощенной мощности накачки $P_{\text{abs}} = 3,7$ Вт.

В главе 4 представлено описание схемы дискового лазера с трёхпучковой накачкой и вырожденным резонатором М-типа (рисунок 6), а также описание экспериментальной установки для исследования его выходных характеристик. У данного лазера было два выходных канала генерации, которые имели одинаковые спектральные и энергетические характеристики.

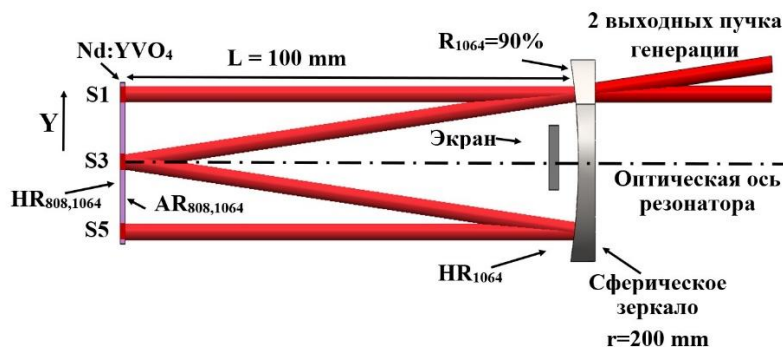


Рисунок 6. Схема вырожденного резонатора М-типа: S1, S3, S5 – пятна генерации.

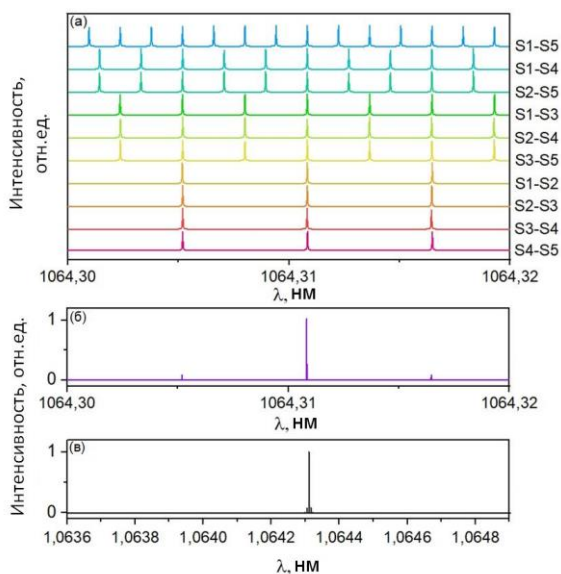


Рисунок 7. (а) Спектры продольных мод отдельных плеч вырожденного резонатора; (б) спектр продольных мод вырожденного резонатора М-типа; (в) спектр продольных вырожденного резонатора М-типа в масштабе спектра усиления кристалла Nd:YVO₄.

В данном лазере был продемонстрирован одночастотный режим генерации с выходной мощностью излучения 1,35 Вт суммарно с двух каналов при 10 Вт

поглощенной мощности накачки. Расходимость излучения составляла приблизительно 2,2 мрад и практически не зависела от уровня поглощенной мощности накачки. Выходные пучки соответствовали основной TEM_{00} моде с качеством пучка не хуже 1,2 ($M^2 < 1,2$).

Было проведено теоретическое исследование возможности существования одночастотной генерации в вырожденном резонаторе М-типа (рисунок 7).

В основу расчета возможного набора продольных мод всего резонатора легло предположение, что резонатор является составным и включает в себя набор плеч разной длины. Поскольку на поворотных зеркалах вырожденного резонатора находятся узлы электромагнитной волны, длина плеча должна соответствовать целому числу полуволн. Поэтому спектр продольных мод всего резонатора был определен как произведение спектров всех плеч резонатора. Исследование показало, что существование одночастотной генерации возможно при определенном угле наклона сферического зеркала резонатора и при определенном положении пятна накачки $S1$, положение которого определяло позиции остальных двух пятен накачки и генерации. Также было показано, что управлять спектрально-селективными свойствами такого резонатора можно при помощи угла поворота сферического зеркала.

В главе 5 представлен дисковый лазер с трёхпучковой накачкой и вырожденным резонатором М-типа, работающий в режиме генерации 2-х мод. Для получения двухчастотного режима пятна накачки активного элемента были увеличены по сравнению с описанным в главе 4. Как и в главе 4, лазер имел два выходных направления генерации. В данном режиме были исследованы спектрально-временные и энергетические характеристики выходного излучения обоих каналов генерации.

Продемонстрированные в главе 5 интерферограммы (рисунок 8), осциллограммы (рисунок 9) и радиочастотные спектры (рисунок 10) соответствовали биениям 2 мод с частотой 360 МГц. Был произведен расчет спектрального интервала между продольными и поперечными модами в вырожденном резонаторе М-типа. Расчет показал, что частотный интервал

360 МГц должен соответствовать двум поперечным модам с отличающимися поперечными индексами на единицу.

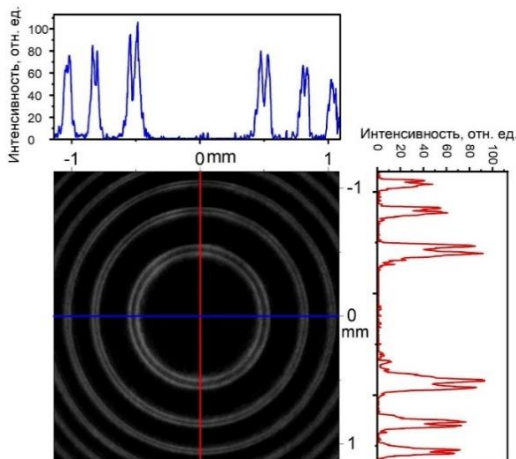


Рисунок 8. Интерферограмма лазерного излучения и её поперечные профили интенсивности.

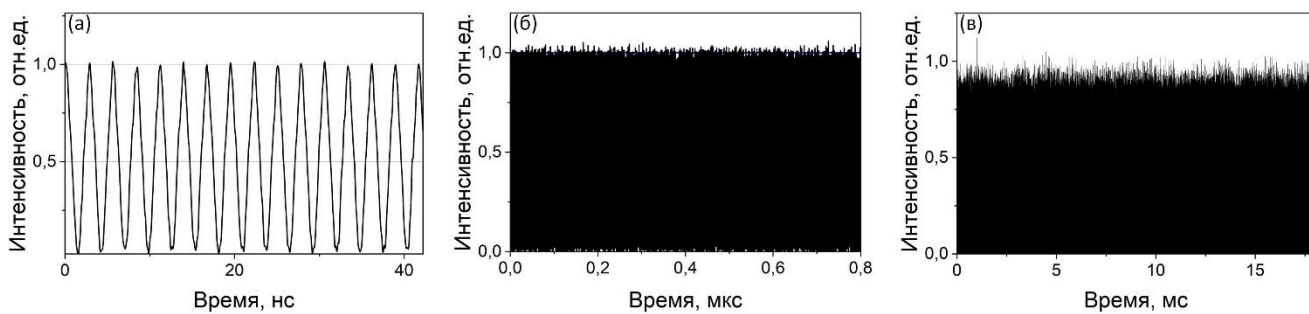


Рисунок 9. Осциллограммы лазерного излучения на разных развертках осциллографа: а) 10 нс; б) 200 нс; в) 4 мс.

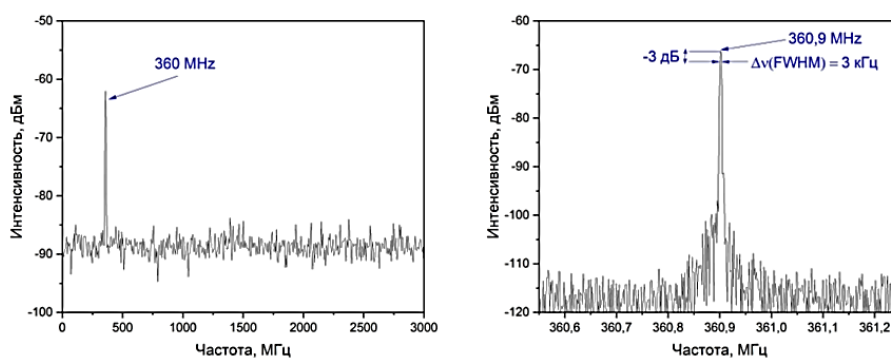


Рисунок 10. Радиочастотные спектры лазерного излучения: (а) полоса обзора 3 ГГц; (б) полоса обзора 1 МГц.

Исследование расходимости излучения в дальней зоне показало, что излучение генерации действительно соответствует TEM_{00} и TEM_{01} (или TEM_{10}) поперечным модам.

Измеренное значение ширины пика радиочастотного спектра биений составляло не более 3 кГц (FWHM). Ширина обеих линий генерации не превосходит 3 кГц, что говорит о высокой добротности резонатора вырожденной конфигурации М-типа.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В конце работы представлен список цитируемой литературы, перечень работ автора, а также благодарности автора диссертации.

Основные результаты диссертации

1. Установлено, что термонаведенная линза, образованная под действием многопучковой накачки, с гауссовыми профилями интенсивности и близко расположенными областями накачки имеет профиль распределения изменения оптической длины активного элемента близкий к гауссовому. Показано, что изменение мощности поглощенной накачки не влияет на ширину распределения, которая определяется суммарной апертурой всех областей накачки.

2. Впервые реализован дисковый лазер с многопучковой накачкой и близко расположенными областями накачки, работающий в режиме полной синхронизации нескольких лазерных каналов в двухзеркальном плоскопараллельном резонаторе. В дальней зоне продемонстрирован интенсивный TEM_{00} пучок генерации с расходимостью, соответствующей излучателю с суммарной апертурой всех лазерных каналов (генерация супермоды). Показано, что полная синхронизация лазерных каналов реализуется в условиях вырожденного резонатора.

3. Впервые реализована одночастотная генерация в дисковом лазере с вырожденным резонатором М-типа и трёхпучковой накачкой. Показано, что спектрально-селективными свойствами вырожденных резонаторов можно управлять при помощи поворота одного из зеркал резонатора относительно

оптической оси, что приводит к изменению положения областей накачки на поверхности активного диска.

4. Реализован дисковый лазер, устойчиво работающий в субгигагерцовом режиме биений двух мод. Продемонстрировано, что полученный режим генерации соответствует биениям двух поперечных мод. На основании полученных экспериментальных результатов для режима биений двух мод с частотой 360 МГц был сделан вывод, что ширина линии генерации в вырожденном резонаторе М-типа не превосходит 3 кГц.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. **Guryev D.A.**, Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B. Nd: GGG disk laser with multipoint spatially periodic optical pumping // Laser Phys. Lett. 2016. Т. 13, № 4. С. 045003.
2. **Guryev D.A.**, Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B., Shcherbakov I.A. Thermally induced optical deformation of a Nd: YVO₄ active disk under the action of multi-beam spatially periodic diode pumping // Laser Phys. Lett. 2018. Т. 15, № 5. С. 055003.
3. **Guryev D.A.**, Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B. Nd:YVO₄ disk laser with multipoint diode pumping and diffraction limited output», Laser Phys. Lett. 2019. Т. 16, № 7. С. 075002.

Список докладов на конференциях по теме диссертации

- 1) Гурьев, Д.А., Николаев Д.А., Цветков В.Б. ND:GGG дисковый лазер с многозонной пространственно-периодической диодной накачкой. // IX Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Институт лазерно-физических исследований (ИЛФИ) 2015. С. 54.
- 2) Guryev D.A., Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B. ND:GGG disc laser with multipoint spatially periodic optical pumping // V международная молодежная научная школа-конференция Современные проблемы физики и технологий. 2016. С. 38 – 40.
- 3) Гурьев, Д.А., Николаев Д.А., Цветков В.Б. Дисковый лазер с многопучковой накачкой и плоским резонатором Тальбо // X всероссийская школа для студентов,

аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. 2016. С. 49 – 51.

4) Гурьев, Д.А., Николаев Д.А., Цветков В.Б. Термонаведенные изменения оптической толщины дискового активного элемента под действием пространственно-периодической накачки // XI всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. 2017.

5) Bul'kanov A.M., Guryev D.A., Ivanov I.A., Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B. Nd:GGG disk laser with coherent beam combining in Talbot laser cavity at multi beam diode pumping // In The European Conference on Lasers and Electro-Optics. 2017.

6) Guryev D.A., Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B. Interferometric study of thermal induced deformations of Nd:YVO₄ disc element under the action of multipoint diode pumping // International Conference Laser Optics. 2020.

7) Guryev D.A., Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B. CW Nd:YVO₄ disk laser with multipoint diode pumping and in-phase super-mode lasing // 9th EPS-QEOD Europhoton Conference on Solid-State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources (EUROPHOTON 2020). 2020.

8) Guryev D.A., Kashin V.V., Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B. Narrow linewidth lasing in Nd:YVO₄ disk laser with two-mirror cavity with M-type degenerate configuration // XX International Conference Laser Optics. 2022.

Список цитируемой литературы

1. W. Koechner. Solid-State Laser Engineering / Berlin: Springer, 1999 Chapt. 7. P. 59.
2. A. Giesen et al. Scalable Concept for Diode-Pumped High-Power Solid-State Lasers // Appl. Phys. B, 1994. Т. 58. С. 365 – 372.
3. A. Giesen, J. Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws // J. Sel. Top. Quantum Electron. IEEE. 2007. Т. 13, №3. С. 598–609.
4. H. Bruesselbach, D. S. Sumida. A 2.65-kW Yb:YAG single-rod laser // J. Sel. Top. Quantum Electron. IEEE. 2005. Т. 11, № 3. С. 600–603.

5. V. Sazegari, M. R. J. Milani, A. K. Jafari. Structural and optical behavior due to thermal effects in end pumped Yb:YAG disk lasers // *Appl. Opt.* 2010. T. 49 № 3. C. 6910–6916.
6. Y. Chen et al. Calculation of thermal-gradient-induced stress birefringence in slab lasers-II // *IEEE J. Quantum Electron.* 2004 T. 40, №7. C. 917–928.
7. T. S. Rutherford et al. Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers // *Opt. Lett.* 2001. T. 26, №13. C. 986.
8. K. Du et al. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator // *Opt. Lett.* 1998. T. 23, № 5, C. 370.
9. Y. Guo et al. 24.6 kW near diffraction limit quasi-continuous-wave Nd:YAG slab laser based on a stable-unstable hybrid cavity // *Opt. Lett.* 2020. T. 45, № 5. C. 1136.
10. T. J. Kane et al. Reduced thermal focussing and birefringence in zig-zag slab geometry crystalline lasers // *IEEE J. Quantum Electron.* 1983. T. 19, № 9, C. 1351.
11. J. Mende et al. Thin-disk laser – Power scaling to the kW regime in fundamental mode operation // *Proc. SPIE* 2009. T. 7193, C. 71931V.
12. X. Mateos et al. Holmium thin-disk laser based on Ho:KY(WO₄)₂/ KY(WO₄)₂ epitaxy with 60% slope efficiency and simplified pump geometry // *Opt. Lett.* 2017, T. 42, № 17. C. 3490-3493.
13. N. Pavel et al. Multipass pumped Nd-based thin-disk lasers: continuous-wave laser operation at 1.06 and 0.9 μm with intracavity frequency doubling // *Appl. Opt.* 2007. T. 46, № 34. C. 8256-8263.
14. A. Giesen et al. Thin-disk lasers come of age // *Photonics Spectra.* 2007. T. 41, № 5. C. 52–58.
15. Karsten Schuhmann et al. Thin-disk laser pump schemes for large number of passes and moderate pump source quality // *Appl. Opt.* 2015. T 54, № 32. C. 9400-9408.
16. S Erhard et al. Pumping schemes for multi-kW thin disk lasers // In *Advanced Solid-State Lasers*, OSA Technical Digest Series. 2020. MB16.
17. Giesen, A. Thin disk lasers / *Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC.* 2013. P. PL_1_1.

18. G. Zhu et al. A Multi-pumped Configuration with Conjugated Dual Parabolic Mirrors for Thin Disk Laser // In 2017 European Conference on Lasers and Electro-Optics and European Quantum Electronics Conference. 2017. CA_P_19.
19. Y. Huang et al. A multi-pass pumping scheme for thin disk lasers with good anti-disturbance ability // Opt. Express. 2015. T. 23, № 4. C. 4605 – 4613.
20. X. Fu et al. 3kW liquid-cooled elastically-supported Nd:YAG multi-slab CW laser resonator // Opt. Express. 2014. T. 22, № 15. C. 18421 – 18432.
21. K. Wang et al. 7kW direct-liquid-cooled side-pumped Nd:YAG multi-disk laser resonator // Opt. Express. 2016. T.24, № 13. C. 15012 – 15020.
22. R. Lorbeer et al. Monolithic thin-disk laser and amplifier concept New compact pump geometry for thin disk lasers with a tilted optical long-pass filter // Optica. 2020. T. 7, № 10. C. 1409 – 1414.
23. A. M. Bul'kanov et al. Single-mode Nd:GGG laser with three-beam diode pumping and a generate cavity // Quantum Electron. 2018. T. 48, № 5. C. 468 – 471.
24. D. A. Nikolaev, V. B. Tsvetkov. CW TEM00 spectral narrow band Nd:YVO 4 disk laser with two-mirror degenerate cavity configuration // Laser Phys. 2021. T. 31, № 9. C. 095002.
25. D. A. Guryev, D. A. Nikolaev, V. B. Tsvetkov. Nd:GGG disk laser with multipoint spatially periodic optical pumping. // Laser Phys. Lett. 2016. T. 13, №4. C. 045003.
26. S. V Garnov et al. Study of the possibility of developing a multichannel-diode-pumped multikilowatt solid-state laser based on optically dense active media // Quantum Electron. 2007. T. 37, № 10. C. 910–915.
27. T. Y. Fan. Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Sources // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2005. T. 11, № 3, C. 567 – 577.