

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»
(ИОФ РАН)



На правах рукописи

Мамонов Дмитрий Николаевич

**МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ЯРКОСТИ И УПРАВЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МАССИВОВ
ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И ЛАЗЕРОВ С СЕКЦИОНИРОВАННОЙ НАКАЧКОЙ**

01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

Научный руководитель:

Климентов Сергей Михайлович, кандидат физико-математических наук, начальник центра Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный консультант:

Аполлонов Виктор Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Официальные оппоненты:

Глова Александр Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)

Есаулков Михаил Николаевич, кандидат физико-математических наук, руководитель группы Общества с ограниченной ответственностью "ФЕМТОНИКА" (ООО "ФЕМТОНИКА")

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Защита диссертации состоится «06» июня 2022 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ФИЦ «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) и на сайте www.gpi.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Диссертационного совета Д 002.063.02
кандидат физико-математических наук

А.А. Ушаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

История работ по лазерной физике насчитывает уже более 60 лет. На данный момент лазерные системы, в той или иной степени, применяются практически во всех областях науки и техники, а решение проблемы эффективного управления их основными характеристиками остается одной из главных задач дальнейшего развития данного раздела научного знания. Широкое распространение в последние годы получили интегрированные твердотельные лазерные системы. В зависимости от их назначения, активно применяются методы модификации пространственных, спектральных, временных и энергетических характеристик совокупности излучателей. Данное исследование направлено на развитие методов управления характеристиками лазерных систем на основе интегрированных массивов излучателей с целью повышения их выходной мощности и управления временными режимами излучения. В работе рассмотрены методы когерентного и некогерентного (спектрального) сложения излучения массива диодных активных элементов, а также связывания (синхронизации) каналов генерации, формируемых в пределах одного твердотельного активного элемента в лазере с пассивной модуляцией добротности.

Когерентное сложение или фазировка излучения при генерации массива диодных элементов считается наиболее многообещающим методом, с точки зрения увеличения яркости системы, однако известные успешные результаты относятся лишь к уникальным лабораторным образцам. Теоретически, основное преимущество данного метода состоит в том, что использование N одинаковых диодных излучателей позволяет увеличивать интенсивность результирующего пучка в N^2 раз при снижении его расходимости в N раз по сравнению с излучением одиночного диода. Результирующий пучок сфазированных лазерных диодов будет иметь узкий спектр и расходимость, близкую к дифракционному пределу для одномодовой генерации. Яркость излучения в этом случае оказывается значительно выше по сравнению со случаем одиночного лазера. Излучение массива диодов, в свою очередь, можно также когерентно складывать, масштабируя выходную мощность до более высоких значений. Наилучшие результаты по когерентному сложению линеек лазерных диодов получены в схемах, использующих общий резонатор. Связь между диодами организуется за счет отвода части излучения в соседний элемент, как внешним зеркалом, так и с помощью планарного волновода, формирующих тем самым синфазный режим их генерации. Особенность схемы заключается в формировании коллективных мод (супермод) и выделение одной моды остается главной проблемой в практике фазировки. Сложность ее решения обусловлена близостью

порогов генерации супермод, что объясняет недостаточную эффективность многих предложенных ранее способов селекции.

Некогерентное сложение пучков обеспечивает меньшую эффективность по сравнению с когерентным сложением, поскольку спектральная яркость источника не увеличивается. Интенсивность возрастает в N раз, пропорционально количеству элементов, а расходимость суммарного пучка сравнима с расходимостью одиночного излучателя. Однако, некогерентное сложение, в силу простоты реализации, получило более широкое распространение на практике. Внутррезонаторное спектральное сложение является одним из эффективных способов некогерентного сложения излучения диодных лазеров. Метод позволяет объединить и придать единое направление пучкам большого числа диодных излучателей, отличающихся длиной волн генерации. В такой схеме достигаются мощности в несколько киловатт и пространственная когерентность, сравнимая с одномодовым лазерным пучком. Для ее реализации необходимо избегать наложения линий генерации излучения лазеров, составляющих массив излучателей. В противном случае, диоды перестают излучать независимо, нарушается пространственно-спектральное согласование с дисперсионным элементом схемы, в роли которого выступает, как правило, дифракционная решётка.

Интегрированный массив активных элементов может быть образован не только совокупностью близкорасположенных полупроводниковых излучателей, но и путем формирования множества разнесенных областей инверсной населенности (каналов накачки) в пределах одного активного элемента. Так, в работе нами впервые изучена **синхронизация коротких импульсов излучения в сегментированной лазерной системе с пассивной модуляцией добротности**. Каналы формировались параллельно оси резонатора при торцевой диодной накачке. Показано, что при наличии двух и более каналов накачки существует характерное расстояние между ними, превышение которого приводит к независимой генерации коротких импульсов излучения. Однако, при сближении продольных каналов на расстояние сравнимое с размером моды заметная часть излучения канала с наименьшим временем развития генерации (ведущий или запускающий канал) попадает в соседнюю область накачки (ведомый канал), усиливается в ней и тем самым ускоряет просветление насыщающегося поглотителя, происходит синхронизация лазерных импульсов. Практическая значимость такого подхода подтверждена созданием малогабаритного лазера с рекордными в своем классе энергетическими характеристиками. Имеющиеся в литературе данные не описывают наблюдаемый эффект. В подобных системах ранее исследовались лишь условия возникновения когерентной непрерывной генерации, а также изучалось применение внешнего источника излучения для включения короткого импульса генерации.

Общность физических принципов характерна для всех трех изученных в работе подходов к сложению источников лазерного излучения, которые могут быть классифицированы по критерию эффективности связи. В случае сильной связи число фотонов, перетекающих из одного элемента в другой, велико (когерентное сложение) и систему можно рассматривать как единую усиливающую среду со сложным пространственным профилем. В случае отсутствия связи излучатели работают независимо, и их перекрестное взаимодействие пренебрежимо мало (спектральное сложение). В пограничном случае связь не достаточно велика для образования совместных мод за время генерации короткого импульса, но оказывает влияние на временной характер излучения, синхронизует импульсы, фиксируя задержку генерации между каналами.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является исследование методов модификации пространственных, временных и энергетических характеристик совокупности лазерных элементов, обеспечивающих высокую интенсивность/яркость результирующего излучения.

Для ее достижения были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка и создание экспериментальной установки для когерентного сложения излучения линейки одномодовых лазерных диодов и выделения одной супермоды с использованием резонансного волноводного зеркала; исследование энергетических, спектральных и пространственных характеристик сфазированного излучения в непрерывном и импульсном режимах; изучение возможности импульсной модуляции излучения при выделении одной супермоды.
2. Разработка и создание экспериментальной установки для внутррезонаторного спектрального сложения линейки одномодовых лазерных диодов; исследование пространственных и спектральных характеристик излучения; разработка методики определения параметров широкополосного зеркала резонатора с учетом возможности перехода в нежелательный режим собственной генерации диодных излучателей.
3. Разработка и создание экспериментальной установки на основе Nd:YAG/Cr:YAG импульсного лазера для генерации гигантских импульсов в двух продольных каналах диодной накачки в активной среде; изучение условий возникновения связанной генерации в зависимости от геометрии каналов, величины усиления и длины резонатора; изучение пространственных характеристик, временных задержек и когерентности выходного излучения; определение влияния тепловой линзы на процесс связывания.
4. Разработка расчетно-теоретической модели возникновения связанных коротких импульсов генерации в твердотельном активном элементе с сегментированной продольной накачкой для лазера с пассивной модуляцией добротности.

5. Разработка и создание мощной компактной импульсной твердотельной лазерной системы с секционированной продольной диодной накачкой, содержащей до семи каналов генерации.
6. Разработка системы генерации последовательностей коротких лазерных импульсов при связывании каналов накачки в пределах одного твердотельного активного элемента с использованием схемы внутррезонаторного спектрального сложения.

Научная новизна

1. В схеме когерентного сложения (фазировки) излучения линейки одномодовых лазерных диодов осуществлено выделение одной супермоды с применением резонансного волноводного зеркала на основе наноструктуры для частотной генерации с длительностью импульса до 3 нс.
2. В схеме некогерентного спектрального сложения излучения одномодовых лазерных диодов продемонстрирован эффект расширения спектра лазерной генерации в коротковолновую область.
3. В импульсном режиме работы продемонстрирован эффект связывания излучения близкорасположенных каналов генерации в активной среде твердотельного лазера с пассивной модуляцией добротности при сегментированной продольной накачке. В отличие от связывания излучения лазерных каналов в непрерывном режиме работы продемонстрировано отсутствие когерентности излучения и обнаружена временная задержка между короткими импульсами генерации в каналах, величиной которой можно управлять, варьируя уровень накачки и расстояние между каналами.
4. Разработана расчетно-теоретическая модель возникновения связанной генерации излучения в условиях заданного пространственного профиля усиления с учетом взаимного влияния каналов для лазера с пассивной модуляцией добротности.

Практическая значимость работы

1. Линейка лазерных диодов, сфазированная с помощью резонансного волноводного зеркала и работающая в режиме высокочастотной модуляции тока накачки, может быть использована в качестве передатчика в высокоскоростных системах лазерной связи.
2. Для лазерных систем с внутррезонаторным спектральным сложением лазерных диодов продемонстрирована возможность расширения в коротковолновую область рабочего спектрального диапазона для непрерывного режима работы. Это позволяет увеличить максимальное число складываемых лазеров и максимальную яркость подобных систем.
3. Показано, что на основе метода связывания импульсного излучения в близкорасположенных каналах генерации при сегментированной накачке твердотельного активного элемента для лазеров с пассивной модуляцией добротности могут создаваться

устройства с управляемым временным профилем импульса, и дифракционным качеством пучка. Разработана методика управления временными характеристиками излучения.

4. Разработанный микролазер с семью продольными каналами накачки активного элемента может служить прототипом для создания целого класса мощных компактных лазерных устройств, применяемых для поджига топливных смесей, оптической локации, дистанционного определения химического состава материалов, лазерной микрообработки и абляционного синтеза наноматериалов. Конструкция устройства допускает монолитное исполнение резонатора и передачу излучения накачки по оптическому кабелю, что обеспечивает высокую надежность в условиях вибраций и экстремальных температурных перепадов.

Методология и методы исследования

Для решения указанных выше экспериментальных задач анализировались пространственные профили излучения, осциллограммы импульсов с применением статистической обработки; проводился Фурье-анализ наложения распределения излучения различных каналов генерации, в том числе, в интерферометре Майкельсона с различными плечами. Для построения расчетно-теоретической модели использовалась стандартная схема Гюйгенса-Френеля, описывающая распространение излучения в пространстве, совмещенная со скоростными уравнениями для элементов резонатора. В сечениях активного элемента анализировался профиль усиления, и оценивалось влияние эффектов, приводящих к появлению набега фазы. Регистрация и предварительная обработка результатов измерений пространственных профилей излучения осуществлялись прикладным программным обеспечением используемых устройств. При разработке лазерного устройства использовалось программное обеспечение, основанное на принципах матричной оптики. Для расчета резонансного волноводного зеркала использовалось программное обеспечение «MC Grating Diffraction Grating Analysis».

Объем исследования, и его методология являются достаточными для решения поставленных задач, обеспечивают достоверность результатов исследования и сформулированных выводов.

Положения, выносимые на защиту

1. В двух близкорасположенных продольных каналах накачки цилиндрической геометрии внутри единого твердотельного активного элемента в режиме пассивной модуляции добротности связанная генерация гигантских импульсов возникает с временной задержкой, при этом опережающий по запуску канал является ведущим, а второй ведомым. Время задержки между импульсами генерации изменяется в диапазоне от

единиц до сотен наносекунд и зависит от расстояния между каналами и величины усиления в них.

2. В системе близкорасположенных каналов накачки внутри единого твердотельного активного элемента в режиме пассивной модуляции добротности синхронизация импульсов и возникновение задержки между ними связаны с ускоренным просветлением насыщающегося поглотителя в области ведомого канала за счет попадания и усиления в ней доли излучения ведущего канала. Развитие генерации и появление временной задержки между импульсами для двух и более каналов может быть описано в рамках модели, анализирующей многопроходное преобразование поля излучения в условиях неоднородного усиления.
3. Метод синхронизации коротких импульсов излучения в системе с близкорасположенными каналами накачки внутри единого твердотельного активного элемента в режиме пассивной модуляции добротности может охватывать большое число каналов. Совместное использование схемы внутриврезонаторного спектрального сложения и метода синхронизации коротких импульсов излучения позволяет получить источник с дифракционным качеством пучка и возможностью управления временным профилем излучения.
4. В схемах внутриврезонаторного спектрального сложения одномодовых лазерных диодов происходит расширение спектра генерации в коротковолновую область (до 5 нм) в непрерывном режиме работы при перестройке из длинноволновой области.
5. Сфазированный режим генерации с выделением одной супермоды для линейки одномодовых лазерных диодов с шириной полоска 4 мкм и фактором заполнения 50% устанавливается за время меньшее 3 нс.

Личный вклад диссертанта

Личный вклад автора заключается в проведении экспериментальных измерений и численных расчетов, в написании научных статей и их подготовке к публикации. Все использованные в работе экспериментальные результаты, описанные в главах 2-6, получены автором лично или при его определяющем участии. Материалы, представленные в работе, получены в результате экспериментальных исследований, выполненных автором в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Степень достоверности и апробация результатов

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. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и представлены автором на российских и международных конференциях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемой литературы. Объем диссертации составляет 144 страниц, в том числе 106 рисунков, 6 таблиц и 2 приложения. Список литературы содержит 106 источников.

Во введении обосновывается актуальность проводимых в рамках данной диссертационной работы исследований, формируются цели и ставятся задачи работы, позиционируется место данной работы в области исследования интегрированных массивов излучателей и связывания каналов генерации, обосновывается научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе обосновывается актуальность проводимых в рамках данной диссертационной работы исследований, формируются цели и ставятся задачи работы, позиционируется место данной работы в области исследования интегрированных массивов излучателей и связывания каналов генерации, обосновывается научная новизна и практическая значимость работы.

Во второй главе приводятся результаты экспериментов по связыванию излучения двух близкорасположенных продольных каналов накачки цилиндрической геометрии внутри одного твердотельного активного элемента в лазере с пассивной модуляцией добротности. Выявляются основные факторы влияющие на процесс возникновения связанной генерации. Обсуждается механизм, отвечающий за наблюдаемый эффект.

Исследуемый во второй главе плоскопараллельный резонатор лазера (рисунок 1) содержал активный элемент Nd:YAG длиной 15 мм и модулятор добротности на основе кристалла Cr:YAG с начальным пропусканием 80%. Обращенные друг к другу поверхности элементов просветлялись на длину волны генерации. Для большинства экспериментов излучение выходило из резонатора через внешний торец модулятора с нанесенным на него диэлектрическим покрытием с коэффициентом отражения 80%. Накачка осуществлялась через внешний торец активного элемента с дихроичным диэлектрическим покрытием (HR@1064; AR@808). Характерная частота следования импульсов накачки составляла 10 Гц. Длина резонатора изменялась в эксперименте от 50 до 400 мм.

Две области генерации в активном элементе формировались излучением диодных лазерных модулей с волоконным выводом (ММ 400 мкм) и импульсной мощностью до 120 Вт каждый. Торцы световодов отображались в объем активного элемента с помощью

двухлинзового объектива с варьируемым увеличением Γ . Увеличение объектива, как правило, подбиралось для генерации нулевой гауссовой моды в каналах при заданной длине резонатора. На рисунке 1 также представлены распределение поглощенной энергии накачки по оси кристалла, поперечные профили поглощенной энергии накачки и генерации в резонаторе длиной 392 мм при увеличении объектива $\Gamma = 1,8$ и расстоянии между каналами $D = 1,7$ мм. Последнее варьировалось в эксперименте за счет изменения расстояния между световодами. Размер моды генерации по уровню $1/e$ составлял порядка 0,73 мм.

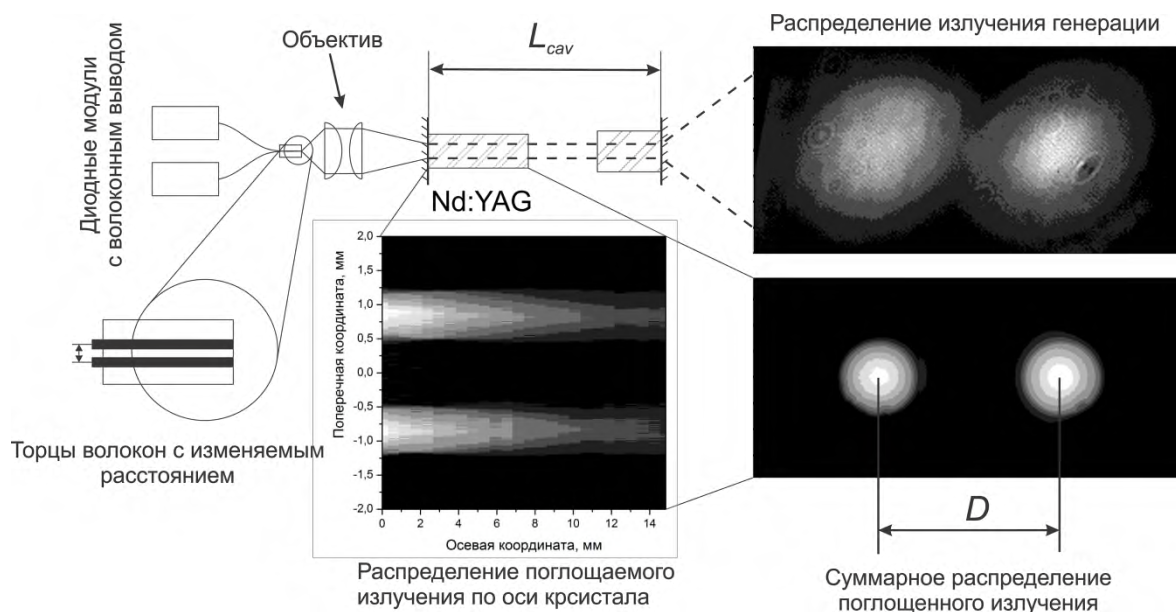


Рисунок 1 – Схема эксперимента по связыванию каналов импульсной генерации; профили запасенной энергии излучения накачки и выходного излучения.

Во второй главе показано, что при достаточно большом, по сравнению с размером возбуждаемых мод, расстоянии D между центрами каналов накачки в них развивается независимая генерация гигантских импульсов. Длительность импульса накачки до начала генерации в таком режиме определяется током накачки, добротностью резонатора и плотностью затвора; ее характерная величина составляла ~ 300 мкс при разбросе в несколько микросекунд. При сближении торцов волокон все большая часть лазерного излучения первого по генерации (ведущего) канала попадает во второй (ведомый) канал за счет искажения распределения генерации при наличии близкорасположенного канала усиления. При определенном расстоянии D происходит синхронизация генерации в двух каналах. Устанавливается фиксированная временная задержка dt между импульсами, величина которой значительно уменьшается по сравнению со случаем независимой генерации. Характерная осциллограмма пары связанных лазерных импульсов длительностью 50 нс по полувысоте представлена на рисунке 2 (а). Задержка между импульсами в паре зависела от расстояния

между осями областей накачки D , их диаметров, длины резонатора и усиления в ведомом канале. Канал становился ведомым в силу меньшей запасенной энергии накачки или большего уровня потерь в нем. При этом решающим являлось именно малое отличие запасенной энергии или потерь в канале.

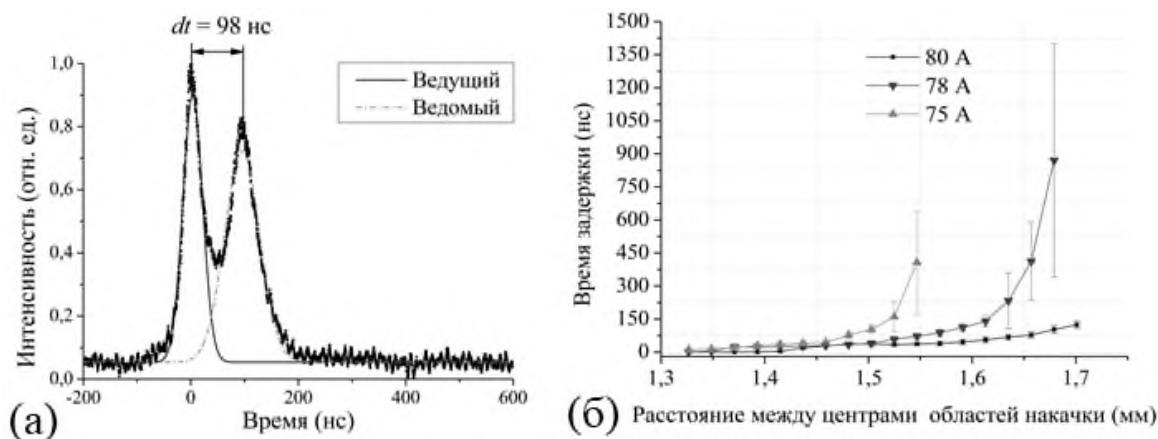


Рисунок 2 – Осциллограмма пары связанных импульсов, следующих с задержкой dt между ведущим и ведомым каналами (а). Экспериментальные зависимости времени задержки от расстояния между каналами и тока накачки в ведомом канале (б).

Зависимости времени задержки dt от расстояния между каналами для различных уровней накачки в ведомом канале представлены на рисунке 2 (б). Момент наступления генерации в лазерах с пассивной модуляцией добротности можно характеризовать запасенной энергией накачки. В первом приближении, пренебрегая влиянием суперлюминесценции, запасенную энергию можно оценить по интегралу тока накачки до момента начала генерации. В эксперименте ток накачки ведущего канала фиксировался на уровне 79 А, что соответствовало времени 300 мкс до начала генерации в нем. Для ведомого канала ток варьировался в сторону уменьшения и для каждого его значения определялся диапазон синхронизации импульсов излучения. Было замечено, что в связанном режиме длительность импульса накачки, необходимая для возникновения генерации в ведущем канале, могла быть незначительно сокращена (на несколько мкс). Таким образом, влиянием пространственного перекрытия накачки в каналах можно было пренебречь.

В каждой из зависимостей на рисунке 2 (б) можно выделить три характерные области: область независимой генерации, область связывания каналов генерации и область генерации моды высокого порядка. При достаточно большом расстоянии D , за пределами представленных зависимостей, каналы излучают независимо, временной разброс между импульсами определяется флуктуациями накачки и составляет несколько микросекунд. При сближении областей накачки задержка, и ее разброс начинают резко уменьшаться от ~ 1 мкс до нескольких наносекунд. При еще большем сближении каналов накачки D на расстояние, соответствующее размеру моды резонатора, наблюдается генерация моды более высокого порядка. В этом

последнем случае система излучает одиночный импульс, пространственный профиль выходного излучения при этом изменяется. На графиках рисунка 2 (б) можно видеть, что для заданного расстояния между каналами время задержки dt минимально при наиболее близких параметрах накачки в двух каналах. Видно также, что с уменьшением уровня накачки ведомого канала диапазон расстояний D , соответствующих связанной генерации, сокращается. В случае равенства токов накачки в каналах диапазон синхронизации максимален, достичь его пределов в эксперименте не удавалось из-за конечных размеров активного элемента (6 мм). Зависимость времени задержки как функция расстояния между каналами и величины усиления в них имеет экспоненциальный характер.

Во второй главе на основании проведенных исследований делается вывод о том, что связывание происходит за счет экспансии поля излучения ведущего канала в область ведомого в условиях неоднородного усиления, определяемого профилем накачки. Так часть излучения ведущего канала, попавшая в область ведомого канала, оказывается сравнимой по интенсивности с излучением предгенерации, что ускоряет просветление насыщающегося поглотителя в ведомой области.

Третья глава диссертационной работы посвящена построению расчетно-теоретических моделей процесса связывания каналов генерации в пределах одного твердотельного оптического элемента в лазере с пассивной модуляцией добротности. Рассматривается несколько моделей с их постепенным усложнением и соотнесением результатов моделирования и эксперимента на каждом из этапов.

Наилучшее соответствие давала трехмерная модель, рассматривающая кинетику формирования распределения излучения генерации при многопроходном распространении в резонаторе в условиях неоднородного пространственного профиля усиления в двух близкорасположенных областях накачки. Рассматриваются как изменения усиления в активном элементе, так и поглощения в насыщающемся поглотителе, а также дифракционное распространение излучения в совокупности со скоростными уравнениями для оптических переходов в каждом из элементов схемы. Моделирование осуществляется численными методами, для этого в поперечном направлении к оси генерации производится разбиение пространства на ячейки с размерами, значительно меньшими размера ожидаемой моды генерации, чтобы обеспечить плавное изменение фазы излучения генерации. Возможные резкие скачки фазы излучения в этом случае не рассматриваются. Каждой ячейке присваивается набор параметров, включающий населенности верхнего лазерного уровня в активном элементе, населенность основного уровня насыщающегося поглотителя, число фотонов в ячейке и комплексную амплитуду поля. Для простоты расчета протяженный активный кристалл и насыщающийся поглотитель заменяются бесконечно тонкими в осевом направлении

элементами. Поперечные распределения параметров в них определяются суммированием соответствующих распределений населенностей вдоль продольной оси. Изменение поля излучения на длине волны генерации при распространении между элементами рассчитывается по стандартной схеме Гюйгенса-Френеля. При этом дополнительно учитывается изменение фазы, связанное с тепловой линзой, эффектом Керра и эффектом изменения показателя преломления в кристаллах при возбуждении активных центров. В осевом направлении размер ячеек выбирается равным длине резонатора, что задает расчетный шаг по времени. Поле излучения соотносится с числом фотонов в ячейке через энергию фотона и мгновенную интенсивность. Для задания связи между числом фотонов и населенностями нижнего уровня насыщающегося поглотителя и верхнего лазерного уровня активного элемента используются соответствующие скоростные уравнения. Последовательность проведения расчетов такова:

1. Задаются значения переменных для векторов комплексной амплитуды поля E_n , населенности верхнего лазерного уровня N_n^u , населенности основного уровня насыщающегося поглотителя N_n^{sg} , числа фотонов в резонаторе q_n .
2. Вычисляются связанные с активным элементом изменения для числа фотонов Δq_n ; населенности ΔN_n^u и вычисляется комплексная амплитуда поля, предполагая, что с ростом числа фотонов растет модуль амплитуды, а фаза сохраняется $|E_n| \sim \sqrt{q_n}$.
3. Проводится учет набега фазы, связанный с термической линзой, керровской линзой и электронным возбуждением в активном элементе.
4. Вычисляется новое распределение комплексной амплитуды поля после прохождения отрезка пространства эквивалентного полной длине резонатора.
5. Аналогично пункту 2, вычисляются связанные с насыщающимся поглотителем изменения для числа фотонов Δq_n и населенности ΔN_n^{sg} и вычисляется комплексная амплитуда поля.
6. Проводится учет набега фазы, связанного с термической линзой и керровской линзой в насыщающемся поглотителе. Возмущение фазы, вызванное электронным возбуждением для насыщающегося поглотителя, предполагается малым, в сравнении с тепловым эффектом, и не рассматривается.
7. Аналогично пункту 4 вычисляется распределение комплексной амплитуды поля после прохождения расстояния между элементами.
8. Вычисляются новые значения для основных параметров E_n , N_n^u , N_n^{sg} , q_n и происходит переход к пункту 2.

В результате были рассчитаны пространственные зависимости основных параметров E_n , N_n^u , N_n^{sg} , q_n с шагом по времени $2l_{cav}/c$. Наблюдалась зависимость времени задержки между

импульсами генерации, близкая к экспериментальной. Так, при большом расстоянии между каналами накачки, положения импульсов генерации – при запуске каждого из каналов по отдельности и совместно – совпадали на расчетной сетке и были разнесены по времени на десятки мкс. При сближении областей накачки на расстояние порядка двух размеров установившейся моды генерации задержка между максимумами импульсов сокращалась. А при достаточно малых расстояниях наблюдалось образование моды более высокого порядка. Пример пространственно-временных профилей интенсивности для связанного режима излучения ($I \sim q_n$) представлен на рисунке 3 (а).

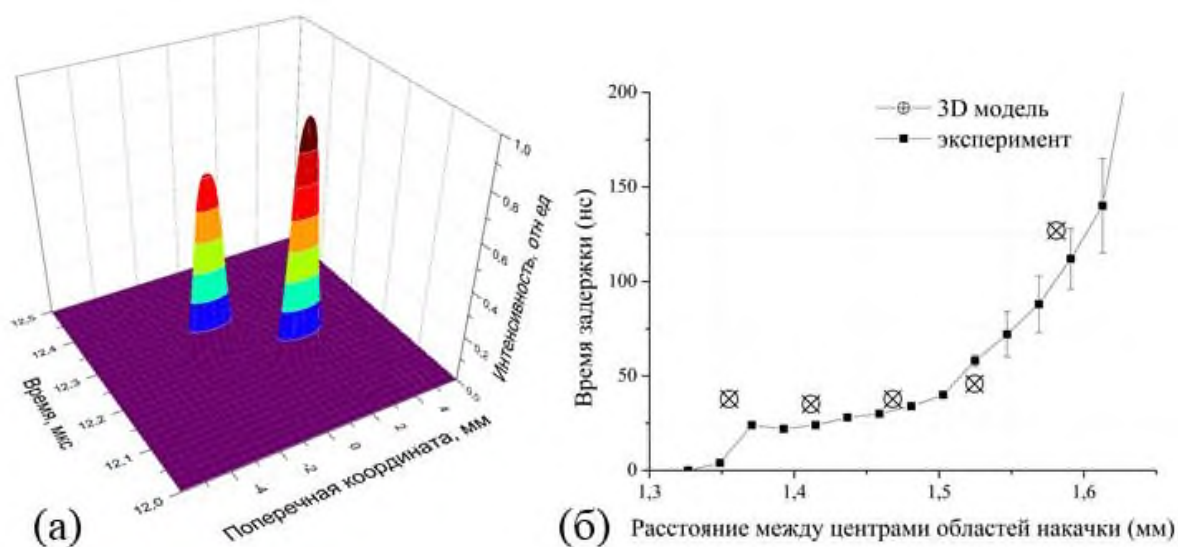


Рисунок 3 – (а) Кинетика генерации связанного излучения в двух каналах. (б) Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей задержки генерации в 3D модели.

Совокупность подобных распределений при вариации расстояния между каналами или уровня накачки в ведомом канале позволяет сравнить результаты расчетов с экспериментально полученными профилями пучков и осциллограммами сигналов. Сопоставление результатов эксперимента и 3D моделирования представлено на рисунке 3 (б). Ограниченное число расчетных точек на графике связано с чрезмерно большим (десятки часов) временем вычислений. Следует отметить, что расчетный размер TEM_{00} моды лазерного резонатора оказался несколько больше наблюдаемого в эксперименте, что может быть связано с пренебрежением процессами самовоздействия пучков в элементах резонатора. Наилучшее совпадение получено при нормировке расчетных размерных зависимостей на экспериментально измеренные. Хорошее согласование экспериментальной зависимости и результатов расчета подтверждает правильность выбора доминирующего механизма связывания каналов генерации, положенного в основу расчетов.

В четвертой главе излагаются экспериментальные результаты по спектральному внутрирезонаторному сложению излучения одномодовых лазерных диодов и приводятся

данные моделирования системы, определяются основные требования к оптическим элементам, даются расчеты для дифракционной решетки в специализированном программном пакете. В главе также приводятся результаты по спектральному распределению интенсивности изучаемой схемы сложения (рисунок 4(а)) и даются оценки, направленные на оптимизацию системы с использованием спектрально селективного зеркала. Описывается обнаруженный эффект расширения спектрального диапазона генерации в коротковолновую область, зависящий от условий возникновения генерации в данной области, и обсуждается механизм его появления. Приводятся результаты по сложению излучения двух диодных лазеров по схеме спектрального сложения и поясняется механизм образования когерентного канала для элементов в данной схеме. Принципиальная схема экспериментальной установки по сложению излучения диодов в схеме с внешним резонатором показана на рисунке 4 (б).

В эксперименте использовалась коммерчески доступная дифракционная решетка от Edmund Optics с эффективностью в исследуемом диапазоне вблизи 80 % и углом блеска для 750 нм. Период решетки 1200 штр./мм. В качестве комбинирующей линзы использовался, так же коммерчески доступный, F-тета объектив SL-1064-70-100G. Использовались полупроводниковые активные элементы на основе GaAs с одной квантовой ямой. Длина активной среды – 3 мм. Одна грань кристалла имела глухое зеркало, другая была просветлена до величины отражения 0,5 %. На выходе из диода, в режиме собственной генерации, излучение было поляризованным (более 95 %). Качество пучка $Q_x = BVP_x = 0,45 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, $Q_y = BVP_y = 0,47 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. Исследования спектрального распределения усиления в активной среде для различных зеркал представлены на рисунке 4 (а). Спектральная ширина пика генерации диода с внешним зеркалом составляла $1,3 \text{ \AA}$, ток накачки 0,9 А.

Из полученных результатов можно выделить две основные тенденции: с увеличением отражения выходного зеркала происходит расширение спектра генерации; для каждой из длин волн существует оптимальное отражение внешнего зеркала, позволяющее максимизировать выходную интенсивность. Существование оптимального отражения для каждой из длин волн позволяет предположить возможность использования спектрально-селективного выходного зеркала. Для такого зеркала можно получить максимальную допустимую интенсивность для каждой из длин волн (получить распределение по огибающей максимальные значения представленные на рисунке 4 (а)). По проведенным оценкам выигрыш по энергетике для такого зеркала должен составлять около 15 %.

При более детальном изучении генерационных характеристик, используемого одномодового диодного лазера, был обнаружен эффект расширения спектрального диапазона генерации лазерного диода при постепенной перестройке длины волны генерации от области максимального усиления в активной среде в коротковолновую сторону. Так в непрерывном

режиме работы поворотом дифракционной решетки, при сохранении уровня потерь во внешнем резонаторе, можно было перестроить длину волны генерации лазерного диода в коротковолновую сторону до 913 нм. Причем, генерация на этой длине волны была устойчива при любых уровнях накачки вплоть до порогового значения тока. При выключении, и последующем включении лазера, или временном перекрытии оптического пути резонатора снова на этой же длине волны генерация не возникала, а наблюдалась собственная генерация, образующаяся на гранях полупроводникового кристалла на длине волны, соответствующей максимуму усиления кристалла. Генерацию во внешнем резонаторе вновь можно было получить только при положении дифракционной решетки, соответствующей длине волны ≥ 918 нм. Расширение спектрального диапазона генерации в коротковолновую область показано в увеличенном масштабе на рисунке 5.

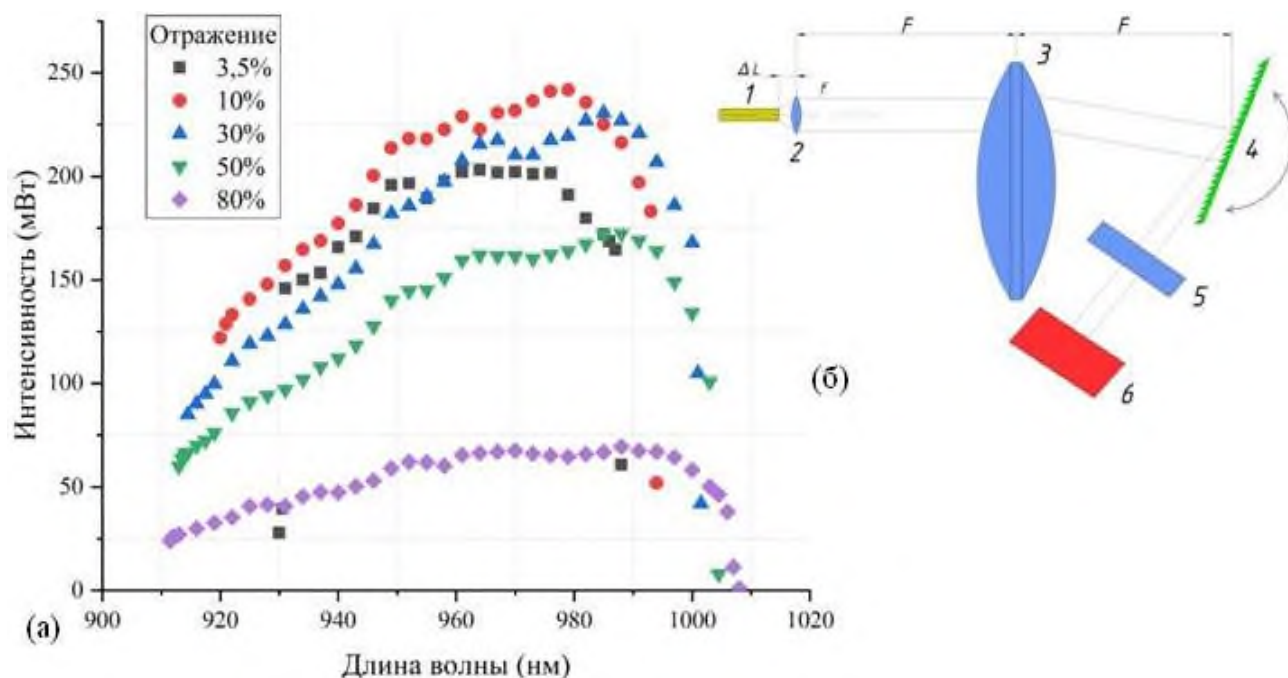


Рисунок 4 – (а) Распределения выходной интенсивности при спектральной перестройке для различных коэффициентов отражения выходного зеркала. (б) Схема установки: 1 - одномодовый лазерный диод; 2 - микролинза $f=350$ мкм; 3 - комбинирующий объектив $F=100$ мм, 4 - дифракционная решетка 1200 штр./мм; 5 - выходное зеркало; 6 - измеритель мощности или спектрометр.

Расширение спектральной области генерации возникает из-за искажения спектрального распределения усиления в активной среде при лазерной генерации. Так, при генерации во внешнем резонаторе на длине волны, отличной от длины волны собственной генерации, усиление для длины волны собственной генерации уменьшается, что изменяет условия ее возникновения. Это приводит к тому, что в коротковолновой области возможна стабильная генерация. Прерывание генерации ведет к релаксации населенности в активной среде и, тем самым, к восстановлению начального распределения усиления. Таким образом, генерация с выбранной длиной волны не возникает, а развивается собственная генерация.

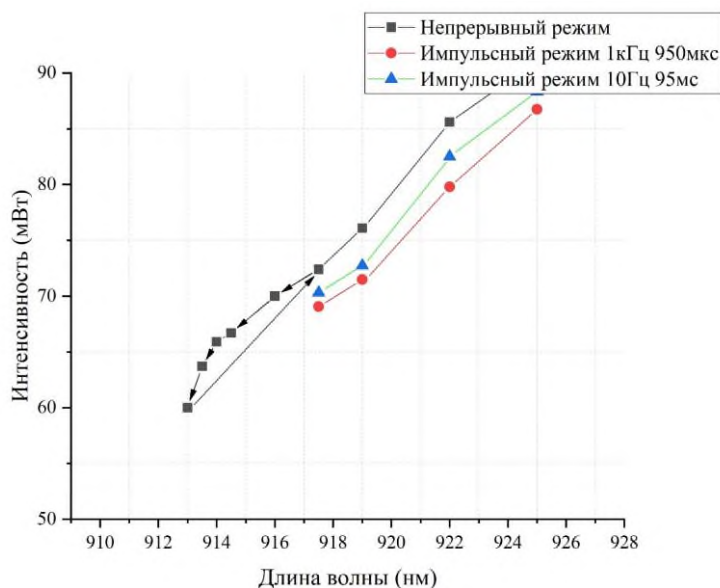


Рисунок 5 – Зависимость выходной интенсивности одномодового диодного лазера в схеме внутрирезонаторного спектрального сложения от длины волны генерации при сохранении уровня потерь в резонаторе.

Также проводились эксперименты по сложению двух одномодовых лазерных диодов по схеме внутрирезонаторного спектрального сложения. В результате было реализовано сложение двух пучков с длинами волн 9631 \AA и 9390 \AA . Расстояние между диодами 10 мм, выходное зеркало 50 %. Качество пучка при сложении пиков составляло $Q_y = BVP_y = 0,53 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, что примерно на 10 % хуже, чем для одиночного диода. Предположительно, это связано с перекрытием пучков на дифракционной решетке. В дальней зоне помимо центрального пика с двумя длинами волн (пик спектрального сложения) наблюдалось два пика с одинаковой длиной волны 9521 \AA распространяющихся симметрично под углом к центральному пику. При этом, при перекрытии излучения от одного из диодов в дальней зоне наблюдалось только излучения от второго диода в пике спектрального сложения. Наличие паразитных пиков связано, предположительно, с попаданием излучения одного из диодов во второй при отражении от выходного зеркала. Таким образом, образуется резонатор между двумя задними гранями каждого из диодов. Этот эффект можно рассматривать как образование когерентного канала генерации в схеме спектрального сложения.

В пятой главе излагаются материалы по когерентному сложению одномодовых лазерных диодов в схеме с выделением одной супермоды с помощью резонансного волноводного зеркала и исследуется возможность работы такой системы с высокой частотой повторения.

В экспериментах были использованы одномодовые линейки лазерных диодов с длиной волны 930 – 950 нм (разброс значений обусловлен технологической погрешностью производителя), которые состоят из набора субмезоструктур шириной 4 мкм и расстоянием

между ними 4 мкм. Задняя грань линеек имеет 100% отражающее покрытие, передняя (излучающая) просветлена и имеет 99,5% пропускания. Эксперименты проводились на диодных линейках с общим числом одиночных диодных лазеров – 25, 50, 75, 100; длина резонатора каждого из них – 1 мм. Используемое резонансное волноводное зеркало представляет собой планарную многослойную дифракционную структуру, один из слоев которой имеет внутренний корригированный (гофрированный) профиль и служит волноводом. Отличительным свойством таких зеркал является существование отражения только в узком угловом и спектральном диапазоне.

Пояснение принципа фазировки проводится на примере антифазной супермоды (в этой супермоды фазы излучения соседних диодов противоположны), рисунок 6 (а). В дальней зоне она имеет два основных дифракционных пика, разделенных углом λ/d , где λ – длина волны, d – расстояние между соседними диодами. Ей соответствует конфигурация поля, в которой разница фазы излучения между соседними диодами равна π , т.е. находятся в противофазе. В этом случае излучение диодной линейки, падающее на резонансное зеркало, является излучением +1 или -1 порядка дифракции плоской волны, прошедшей через соответствующую фазовую дифракционную решетку (распределение амплитуды волны показано в верхней части рисунка б). Резонансное зеркало, установленное под углом $\lambda/2d$ к выходному торцу линейки, будет обеспечивать резонансное отражение только одного (+1 или -1) порядка дифракции. При этом второй порядок дифракции, для которого резонансное зеркало прозрачно, будет формировать выходной пучок линейки лазерных диодов. Этот пучок будет иметь дифракционную расходимость излучения, определяемую полной апертурой линейки лазерных диодов λ/D , где D – полная апертура линейки, и может рассматриваться как фундаментальная мода выходного излучения. При $D = 0,2$ мм, $\lambda=930$ нм эта расходимость составляет 0,027 угловых градуса, что сопоставимо с угловой шириной резонанса для используемого зеркала. Важно отметить, что нулевые значения в распределении поля антифазной супермоды приходятся на промежутки между диодами, поэтому для этой супермоды потери энергии минимальны, и она имеет самый низкий порог генерации по сравнению с остальными.

Максимальная выходная интенсивность составила 0,75 Вт при токе 3,4 А, пороговый ток генерации был равен 0,45 А. Это подтверждает полученные ранее результаты. Трехмерная диаграмма распределения интенсивности приведена на рисунке 6 (б). Как видно, главный пик имеет малые пики-спутники по медленной (вдоль линейки) и быстрой (по нормали к линейке) осям. Спутники вдоль быстрой оси вызваны с абберациями коллимирующей линзы, вдоль медленной – являются естественным следствием дифракции когерентно излучающих диодов. Значение параметра M^2 для главного пика близко к теоретическому пределу, равному приблизительно 1,2. Для линейки из 100 диодов при токе накачки 5,0 А была получена

выходная мощность 1,41 Вт в непрерывном режиме работы с сохранением структуры супермоды. Однако дальнейшее увеличение тока приводило к рассогласованию резонансной частоты волноводного зеркала и спектра суперлюминесценции линейки.

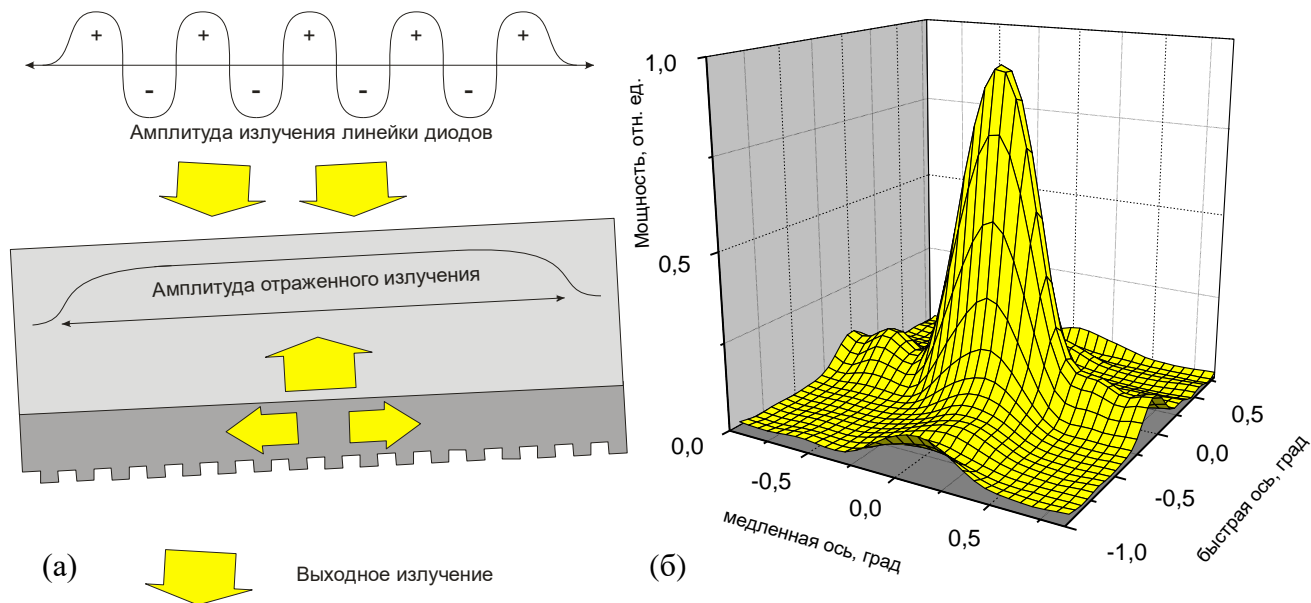


Рисунок 6 – (а) Схема организации сфазированного режима для антифазной моды. (б) Наблюдаемое распределение излучения в главном пике.

В пятой главе представлены результаты исследований по получению стабильной генерации наносекундных импульсов излучения, лучшее достигнутое значение длительности импульса составило около 3 нс. На рисунке 7 изображены осциллограммы для режима одиночных импульсов и импульсно-периодического режима, соответственно. На нижних половинах рисунков изображена временная зависимость тока накачки, на верхних – генерации излучения линейки. Значения по осям ординат даны в относительных единицах.

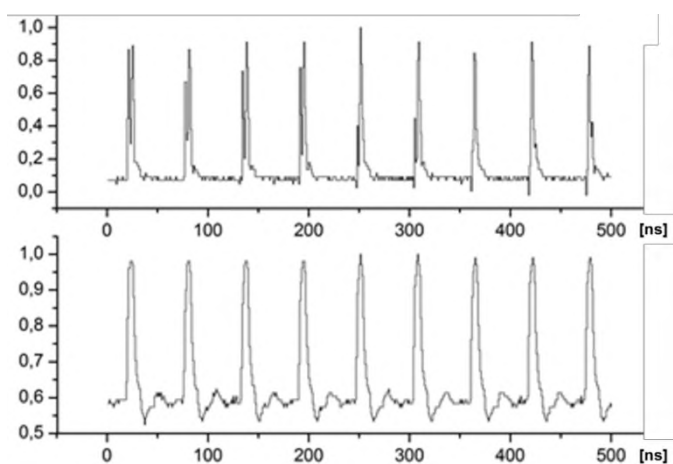


Рисунок 7 – Импульсно-периодический режим генерации сфазированной линейки с длительностью импульсов излучения 3–8 нс, частота повторения импульсов 20 МГц.

В шестой главе рассмотрены два примера устройств, основанных на методе связывания каналов генерации, описанному во второй и третьей главах. Первое из них рассматривалось

только с теоретической точки зрения и предназначено для генерации пакетов импульсов с их последующим объединением в пространстве методом спектрального сложения. Во втором примере описывается реализованное на практике устройство, с объединением нескольких импульсов в один, выполненное при разработке системы лазерного поджига компонентов топлива в ракетных двигателях. Также в главе приводятся результаты исследований, полученных в процессе его разработки.

Задачей первого устройства являлось получение импульсов генерации с регулируемой временной задержкой между ними и объединение излучения нескольких пространственно разнесенных каналов генерации. Принципиальная схема устройства показана на рисунке 8. Схема включает заднее 1 и переднее (выходное) 6 зеркала лазерного резонатора, лазерный активный элемент 2, два 3 и 5 пассивных затвора выполненных из насыщающегося поглотителя, и спектрального элемента аналогичного компенсатору дисперсии групповых скоростей 4. Для подтверждения работоспособности устройства рассматривалась экспериментально-расчетная схема с конкретизацией описанных выше элементов.

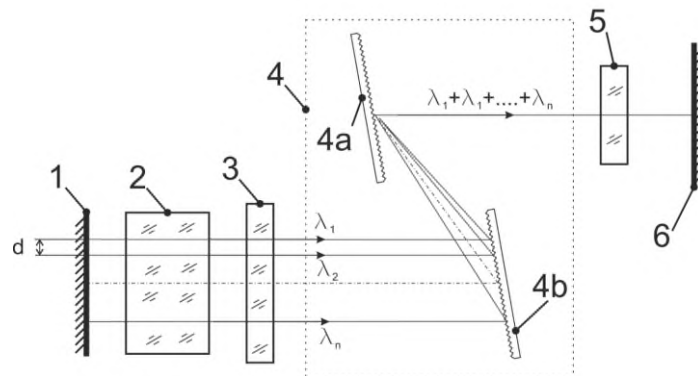


Рисунок 8 – Принципиальная схема устройства с управляемым временным профилем и пространственным объединением излучения.

Работоспособность системы оценивалась с помощью модели аналогичной той, что описана в главе 3. Так, оценка работоспособности системы производилось на основе упрощенной 2-мерной модели, в которой каналы были бесконечными по одной из поперечных координат. Было выяснено, что, варьируя расстояние между каналами и уровень накачки в них, можно в широком диапазоне изменять значения времен задержки между импульсами их генерации, при этом распределение излучения на выходе из системы изменяется слабо. Такой подход при использовании большого количества каналов позволяет создавать источник излучения с контролируемым временным профилем и качеством пучка близким к дифракционному. Для одного из конечных вариантов системы была реализована расчетно-экспериментальная модель для четырех каналов генерации в 3-мерной геометрии. По результатам моделирования разница длин волн между каналами генерации составила $\sim 3,4$ нм, а временная задержка между импульсами генерации регулировалась в диапазоне от 26 до 173 нс.

Длительность импульса генерации по полувысоте составляла ~ 41 нс, а суммарная выходная энергия составляла $\sim 2,83$ мДж.

Далее в шестой главе описан второй пример реализации устройства, в котором семь каналов генерации объединяются и излучают короткие импульсы практически одновременно. Работа выполнялась в рамках проекта по созданию системы поджига компонентов топлива в ракетных двигателях. Цель состояла в разработке и создании малогабаритного лазера со следующими параметрами: энергия в импульсе ~ 15 мДж, длительность импульса ≤ 5 нс. Рабочий цикл лазера без охлаждения длился 6 с при частоте 30 Гц. Принципиальная схема установки показана на рисунке 9. В качестве активного элемента использовался кристалл Nd:YAG с плоскопараллельными торцами. Один его торец являлся глухим зеркалом резонатора, а второй просветлялся на длину волны генерации. Укорочение импульса осуществлялось пассивным затвором Cr:YAG. Отражение внешнего зеркала резонатора варьировалось в ходе эксперимента, и оптимальное значение составило $R = 50\%$. Величина начального пропускания модулятора также варьировалась, и оптимальное значение составило $T_0 = 40\%$. Длина резонатора составляла 24 мм. Активная среда возбуждалась семью импульсными лазерными диодными модулями с волоконным выводом общей импульсной мощностью 700 Вт. Подвод излучения к активной среде осуществлялся с помощью семи оптических волокон, объединенных в один жгут. Накачиваемая область формировалась в активном элементе с помощью двухлинзового объектива. Его параметры указаны на рисунке.

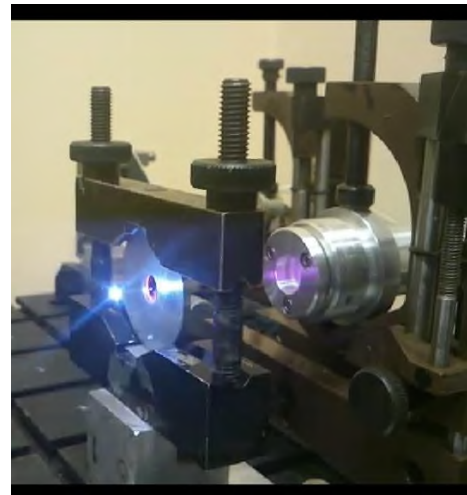
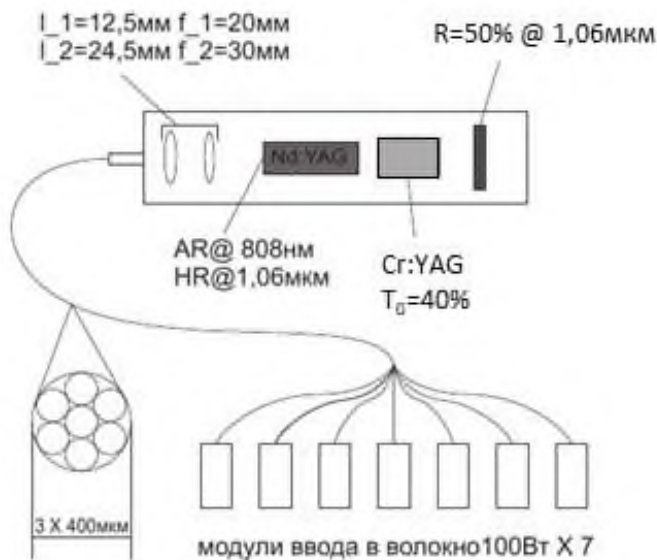


Рисунок 9 – Принципиальная схема установки по связыванию семи каналов генерации и внешний вид лазера с продольной секционированной накачкой и синхронизацией каналов.

В установке можно добиться эффекта аналогичного наблюдаемому при сближении двух каналов генерации. В этом случае роль ведущего канала играет центральный, а все остальные - ведомые. В такой геометрии периферийные каналы могут оказывать заметное влияние на время

просветления центрального и остальных каналов, приводя к ускорению процесса развития генерации. Таким образом, синхронизация излучения в конфигурации с плотной упаковкой обеспечивает минимальную задержку между импульсами в каналах. При этом, на осциллограмме излучения системы присутствует только один импульс генерации, длительность которого лишь незначительно превышает длительность импульса одного канала.

Максимальная достигнутая энергия составляла 19,6 мДж при длительности импульса 3,3 нс. Для этого производилась оптимизация относительного поворота насыщающегося поглотителя, активного элемента и жгута накачки, а, так же, размера каналов накачки. Для итогового изделия, был выбран более стабильный режим работы с меньшей энергией в импульсе: длительность ≈ 3 нс и энергия 14,7 мДж.

ВЫВОДЫ

В заключении сформированы основные результаты исследования. Они заключаются в следующем:

1. Впервые на активном элементе Nd:YAG с модулятором Cr:YAG, накачиваемом двумя диодными модулями с волоконным выводом мощностью 120 Вт, формирующими продольные каналы накачки диаметром ~ 700 мкм с межосевым расстоянием, варьируемым в диапазоне 1,375 мм до 1,700 мм, наблюдалось сокращение и стабилизация времени задержки между импульсами генерации вплоть до единиц наносекунд. Показано, что в этом процессе один из каналов играет роль запускающего, а второй – ведомого. Время задержки в режиме связанной генерации экспоненциально зависит от расстояния между каналами и величины усиления в них.
2. Показана определяющая роль пространственного перекрытия генерирующих каналов в процессе их связывания. Возникновение короткого лазерного импульса в ведомом канале может быть описано в рамках модели многопроходного преобразования поля излучения в условиях неоднородного усиления. Наблюдалось искажение распределения излучения генерации ведущего канала в области ведомого так, что на момент генерации ведущего канала заметная его доля присутствует в области ведомого. Полученные экспериментальные результаты подтверждены численным моделированием.
3. Впервые на активной среде Nd:YAG с модулятором Cr:YAG создана лазерная система с семью связанными каналами генерации и рекордной выходной энергией для данного типа устройств до 19,6 мДж при длительности импульса излучения 3,3 нс. На основе разработанной модели связывания каналов генерации и их последующего спектрального сложения теоретически показана возможность создания нового типа устройств с контролируемым временным профилем излучения.

4. Экспериментально продемонстрировано выделение супермоды для линек одномодовых лазерных диодов длиной до 800 мкм с фактором заполнения 50%. Для 100 диодных элементов в составе линейки в режиме когерентного сложения достигнута выходная мощность – 1,41 Вт при выделении одной антифазной моды. Проведена модуляция излучения супермоды с длительностью импульса от 3 до 8 нс, показана возможность частотной модуляции до сотен МГц.
5. Экспериментально продемонстрировано расширение спектра генерации в коротковолновую область на 5 нм в схеме внутриврезонаторного спектрального сложения излучения лазерных диодов. Генерация в данной области достигалась в непрерывном режиме работы лазера при перестройке в нее из длинноволновой области при сохранении уровня потерь в резонаторе.

В Приложении А излагается построение теоретической модели, используемой для описания процесса развития генерации в лазерах с насыщающимся поглотителем.

В приложении Б описываются известные способы построения мод генерации в лазерах и эффекты, определяющие их распределение.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Mamonov D.N., Klimentov S.M., Derzhavin S.I., Kravchenko Ya.V., Generation Dynamics of Coupled Pulses from a Single Active Element of the End-Pumped Solid-State Laser: Experiment and Simulation // *Physics of Wave Phenomena*. – 2018. – Т. 26. – №. 3. – С. 214-220.
2. Мамонов Д.Н., Климентов С.М., Державин С.И., Тимошкин В.Н., Кравченко Я.В., Карпов Н.В., Мощный короткоимпульсный твёрдотельный микролазер с сегментированной диодной накачкой // *Оптический журнал*. – 2020. – Т. 87. - №. 8.
3. Мамонов Д.Н., Ильичев Н.Н., Сироткин А.А., Пивоваров П.А., Ребров С.Г., Державин С.И., Климентов С.М., Мощный компактный лазер с сегментированной продольной накачкой связанных каналов генерации // *Квантовая электроника*. – 2015. – Т. 45. – № 6. – С. 508-510.
4. Державин С.И., Лындин Н.М., Мамонов Д.Н., Новиков Г.Г., Тимошкин В.Н., Использование сфазированной линейки лазерных диодов в космической лазерной связи // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2017. – Т. 22. – №. 8. – С. 19-24.
5. Derzhavin S.I., Yakunin V.P., Grishaev R.V., Kravchenko Y.V., Mamonov D.N., Khomenko M.D., Investigation of the Efficiency of Spectral Beam Combining of Laser Diode Array in a Cavity with the Spectrally Selective Output Coupler // *Journal of Russian Laser Research*. – 2020. – Т. 41. – №. 4. – С. 434-440.

6. Derzhavin S.I., Yakunin V.P., Grishaev R.V., Timoshkin V.N., Mamonov D.N., Khomenko M.D., Lasing Characteristics of Single-Mode Laser Diode Arrays // *Physics of Wave Phenomena*. – 2020. – Т. 28. – №. 3. – С. 208-212.
7. Bairamov M.N., Derzhavin S.I., Kravchenko Ya.V., Mamonov D.N., Cheban M.D., Yakunin V.P., Extension of the Spectral Lasing Range of Semiconductor Lasers in the Dispersive Resonator // *Physics of Wave Phenomena*, 2021, Vol. 29, No. 4, pp. 307–310.
8. Мамонов Д.Н., Державин С.И., Климентов С.М., Многоканальный генератор последовательных импульсов с регулируемой временной задержкой и спектральным сложением выходного пучка (МГПИ) // Свидетельство о государственной регистрации, рег. №182596 от 23.08.2018. – М.: Роспатент, 2018.
9. Мамонов Д.Н. Связывание каналов генерации при продольной секционированной накачке твердотельных лазеров // *Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2016»*.
10. Mamonov D.N., Derzhavin S.I., Klimentov S.M., Conjugated short-pulse generation in longitudinal channels formed within an active crystal by segmented end pumping // *Материалы Международного симпозиума «Основы лазерных микро- и нанотехнологий» FLAMN-16*.
11. Derzhavin S.I., Lyndin N.M., Klimentov S.M., Mamonov D.N., Podmazov S.V., Collective generation in laser diode array of single mode emitters // *Материалы Международного симпозиума «Основы лазерных микро- и нанотехнологий» FLAMN-16*
12. Мамонов Д.Н., Климентов С.М., Державин С.И., Сироткин А.А., Пивоваров П.А., Подмазов С.В., Масштабирование мощности импульсных микролазеров для воспламенения топливных смесей при связывании нескольких каналов генерации // *Материалы Международного междисциплинарного семинара "Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах и передовых научных технологиях" LPrM3-2016*.
13. Мамонов Д.Н., Климентов С.М., Державин С.И., Связывание импульсной генерации каналов при продольной сегментированной накачке // *Материалы школы-конференции молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели» 2018 г.*