

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук Есаулкова Михаила Николаевича на диссертационную работу Мамонова Дмитрия Николаевича «Методы увеличения яркости и управления временными характеристиками интегрированных массивов излучателей и лазеров с секционированной накачкой», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика

Диссертация Мамонова Дмитрий Николаевича на тему «Методы увеличения яркости и управления временными характеристиками интегрированных массивов излучателей и лазеров с секционированной накачкой» соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным в п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. № 74 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой автор исследует обнаруженный эффект синхронизации лазерных импульсов в твердотельном лазере с пассивной модуляцией добротности и продольной секционированной накачкой, приводит результаты создания расчетно-теоретической модели для описания данного эффекта, исследует эффект расширения спектрального диапазона генерации в коротковолновую область для схемы внутрирезонаторного спектрального сложения излучения лазерных диодов, приводит результаты, характеризующие возможности импульсной генерации в схеме с когерентным сложением излучения одномодовых лазерных диодов с помощью волноводного решетчатого зеркала.

**Актуальность темы диссертации.** Одной из основных задач в лазерной тематике является увеличение выходных параметров лазерных источников (яркость, интенсивность, энергия в импульсе). На практике, в зависимости от области применения, для решения этой задачи используются схемы генератор–усилитель, многомодовые системы или интегрированные массивы изначально независимых лазерных источников. Однако, усилительные схемы зачастую не обеспечивают достаточный рост энергии или мощности за проход, а применение многомодовых систем и интегрированных массивов снижает качество выходного пучка. Существуют методы устранения данных недостатков. Так для систем генератор–усилитель можно использовать многопроходные или регенеративные схемы, а для систем с высокой порядковой модой изготавливать фазовые маски для улучшения качества выходного пучка. На практике реализация данных методов ведет к усложнению изделий и значительно увеличивает их стоимость. В случае интегрированных массивов, в свою очередь, применяются методы модификации энергетических, пространственных и временных характеристик пучков совокупности лазеров. Их изучению, как экспериментальному, так и теоретическому, и посвящена настоящая работа. К ним относится спектральное (некогерентное) сложение излучателей, когерентное сложение, а также связывание каналов генерации в пределах одного активного элемента. Первые два метода рассматриваются для массивов диодных лазеров, а последний – для совокупности пространственно разнесенных каналов генерации в активном элементе твердотельного лазера с модулированной добротностью.

В целом, диссертационная работа изучает особенности установления генерации для различных лазерных систем при наличии нескольких областей усиления, выделяя при этом три важных физических случая:

- области генерации обладают «сильной» связью в случае, когда число фотонов, переходящих из одной области в другую велико, а саму систему из нескольких излучателей следует рассматривать как единую усиливающую среду со сложным пространственным профилем. В работе этому посвящена глава, описывающая когерентное сложение лазерных диодов.

- области излучают независимо друг от друга, и их перекрестное воздействие пренебрежимо мало. Случай рассмотрен на примере схем, реализующих спектральное сложение полупроводниковых лазеров.

- пограничный случай, когда связь между излучателями недостаточно велика для образования совместных мод генерации, но уже оказывает влияние на характер и кинетику развития излучения близко расположенных каналов. К этому случаю относится рассмотрение системы со связыванием каналов импульсной генерации в твердотельном лазере с пассивной модуляцией добротности, в которой наблюдается перетекание излучения из одного канала в другой, но формирования моды совместной генерации не происходит.

Таким образом, проведенное исследование охватывает широкий спектр лазерных устройств, при этом для каждого из них получены новые **научно значимые и практически ценные** результаты. Для линейки лазерных диодов с когерентным сложением излучения продемонстрировано сохранение структуры коллективной моды при генерации коротких импульсов. Для системы внутрирезонаторного спектрального сложения обнаружен эффект расширения спектрального диапазона генерации в коротковолновую область, достижимый только в непрерывном режиме работы. Для твердотельного лазера с сегментированной накачкой и пассивной модуляцией добротности обнаружен и исследован эффект синхронизации каналов импульсной генерации. Каждый из полученных результатов может быть использован для создания лазерных систем с уникальными выходными характеристиками. К примеру, режим связывания каналов генерации в пределах одного твердотельного активного элемента может быть использован для создания миниатюрных мощных устройств для дистанционного зондирования и воспламенения горючих смесей.

**Достоверность** полученных результатов основана на анализе выполненных ранее работ, применении апробированных методик и подтверждается сравнением полученных численных результатов с экспериментальными данными. Исследования проводились на современном экспериментальном и вычислительном оборудовании. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и представлены автором на российских и международных конференциях.

**Основные результаты** работы сформулированы следующим образом:

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  $\sim 700$  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. 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.

4. Обнаружен эффект расширения спектра генерации в коротковолновую область на 5 нм в схеме внутрирезонаторного 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.

5. 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.

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, позиционируется место данной работы в области физики формирования интегрированных массивов излучателей и связывания каналов генерации, обосновывается научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проводится обзор литературных источников, посвященных проблеме сложения излучения изначально независимых лазерных источников. В частности, приводятся данные по когерентному и спектральному сложению излучения лазеров, а также по связыванию каналов генерации в пределах одного кристаллического активного элемента.

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.

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 сопоставлением результатов моделирования и эксперимента на каждом из этапов.

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. Описывается обнаруженный эффект расширения спектрального диапазона генерации в коротковолновую область 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.

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 шестой главе рассмотрены два примера устройств, использующих принцип связывания каналов генерации, описанном 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 синхронизацией нескольких импульсов, предназначенное для системы лазерного воспламенения компонентов ракетного топлива. Приводятся результаты исследований, проведенных в процессе его разработки.

В заключении сформулированы основные результаты исследования.

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.

Сделанные в диссертационной работе выводы и вынесенные положения основываются на описанных в главах 2 – 6 результатах. Основные результаты опубликованы соискателем в семи статьях удовлетворяющих требованиям ВАК. Проведенные исследования в достаточной степени обосновывают выносимые положения и сделанные выводы. Так, к примеру, первое выносимое положение и соответствующий ему вывод, сделаны на основе результатов экспериментальных исследований, приведенных в первой главе диссертационной работы, при этом ключевые из представленных результатов опубликованы в соответствующей статье.

Материалы диссертации соответствуют научной специальности 01.04.21 Лазерная физика по формуле паспорта специальности. В диссертации представлены "исследования когерентного оптического излучения" (из формулы специальности).

Область исследования: Процессы генерации и преобразования когерентного оптического излучения, физические методы управления свойствами и параметрами лазерного излучения, включая разработку источников излучения с неклассическими свойствами.

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.

Безусловным достоинством представленной работы является тщательность исследования особенностей каждого типа рассмотренных лазерных источников. Автор последовательно исключает факторы, оказывающие важное, но не определяющее влияние на наблюдаемое в эксперименте поведение системы, и выделяет наиболее значимые физические механизмы. Таким образом, в каждой главе складывается достаточно детальное представление об очередном исследованном лазерном источнике. Более того, последняя глава развивает описанные ранее в работе методы для решения конкретных актуальных практических задач.

Тем не менее, приведенная работа не лишена и недостатков.

1. Недостаточно подробно описаны и проиллюстрированы практические эксперименты последней главы диссертации. Например, в ней не указаны геометрические размеры активного элемента лазера, и поэтому с ними невозможно соотнести данные о распределении энергии накачки вблизи фокуса объектива, а также оценить роль смещения входной грани кристалла относительно объектива. Подпись вертикальной оси графика 6.5 также не вносит ясности – указанные на ней положения входной грани кристалла не соответствуют диапазонам положений, которые в дальнейшем упоминаются в результатах измерений. При описании результатов неясно также, о каком оптическом пробое идет речь – об оптическом пробое воздуха при дальнейшей фокусировке выходного излучения лазера? Этих вопросов можно было бы избежать, добавив одну или две дополнительных иллюстрации к главе.

2. В этой же главе хотелось бы более подробно описать, почему в итоге автор остановился на выбранных значениях пропускания выходного зеркала и насыщающегося поглотителя. Сравнивая напрямую энергии генерации, полученные на первом этапе исследования этой главы, и на втором, возникает вопрос об изначальных причинах проведения второго этапа, преимуществах и недостатках выбранных значений пропускания поглотителя и зеркала перед использованными на первом этапе.

3. Во второй главе, возможно, было бы более наглядно при смене роли канала (ведущий либо ведомый) изменять знак значения временной задержки с положительного на отрицательный на соответствующих графиках.


4. В главе 3 на графике 3.10а динамика установления температуры имеет характер частых осцилляций с амплитудой 2 градуса и периодом менее 0.1 секунды. Остается неясным, являются ли эти осцилляции реальными, чем они объясняются?

Указанные замечания не снижают общую высокую оценку работы. Диссертация содержит оригинальные научные результаты, решающий вклад в получение которых принадлежит автору. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. По материалам диссертации опубликованы 7 статей в рецензируемых журналах, в том числе 6 статей в журналах, индексируемых в базе Web of Science и удовлетворяющих требованиям ВАК. Диссертация «Методы увеличения яркости и управления временными

характеристиками интегрированных массивов излучателей и лазеров с секционированной накачкой» Мамонова Дмитрия Николаевича соответствует всем требованиям ВАК Российской Федерации, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Официальный оппонент  
кандидат физико-математических наук,  
руководитель группы  
общества с ограниченной  
ответственностью «Фемтоника»

Есаулков Михаил Николаевич



Подпись Есаулкова М.Н. заверяю  
Генеральный директор  
общества с ограниченной  
ответственностью «Фемтоника»

Конященко Матвей Александрович

