Обронов Иван Владимирович

# Гибридные импульсные лазерные источники с накачкой выходного усилителя одномодовым волоконным лазером

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

# Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Москва - 2018

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель:

**Евтихиев Николай Николаевич** - доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерная физика» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Официальные оппоненты:

**Цветков Владимир Борисович** - доктор физико-математических наук, заведующий лаборатории активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук.

**Бабин Сергей Алексеевич** - доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, ВРИО директора Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «20» июня 2018 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 8(495)788-56-99 доб. 95-26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета МИФИ и на сайте: http://ods .mephi.ru

Автореферат	разослан	<b></b>	<b>&gt;&gt;</b>		2018	3	Γ
-------------	----------	---------	-----------------	--	------	---	---

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.130.05

Доктор физ.-мат. наук

Р.С. Стариков

## Общая характеристика работы

#### Введение

Благодаря особым физическим механизмам взаимодействия ультракоротких импульсов (УКИ) лазерного излучения с веществом, УКИ лазеры с высоким качеством излучения широко востребованы в полупроводниковой промышленности и точном машиностроении.

Основными особенностями оптических УКИ при обработке различных материалов являются:

- Многофотонные процессы поглощения излучения и быстрая передача энергии материалу с его абляцией до наступления фазы плавления. Этот переход происходит на временах порядка 10пс, что приблизительно соответствует электрон-фононному времени релаксации.
- Незначительный расплав материала и малый размер перегретой зоны в окрестности области воздействия лазерного излучения на поверхности образца. Благодаря этому удается минимизировать тепловые повреждения, например, образование внутренних напряжений материала в области обработки.
- Отсутствие взаимодействия между абляционным шлейфом частиц, покидающих материал при воздействии лазерного излучении УКИ и самим лазерным излучением, приводящего к рассеянию падающего излучения.

УКИ лазеры используются для прецизионной микрообработки поверхностей, сверления отверстий, скрайбирования, резки и сварки различных материалов. Известно, что максимальная эффективность процесса абляции достигается при определенных оптимальных значениях плотности энергии УКИ. Для высокоточного лазерного сверления, скрайбирования и лазерной резки требуются значения энергий импульсов лазерного излучения порядка 20-200мкДж при длительности импульсов до 15пс. При этом для увеличения скорости обработки необходима достаточно высокая частота следования импульсов, а, следовательно, и высокая средняя мощность.

Кроме того, лазерное излучение УКИ за счет высоких пиковых мощностей, воздействуя на различные оптически прозрачные диэлектрические материалы (стекло, плавленый кварц, сапфир и т.д.), способно индуцировать в них нелинейное многофотонное поглощение, что в свою очередь позволяет производить их обработку с высокой точностью.

Как правило, для таких применений используют лазеры с длиной волны вблизи 1мкм благодаря широкой распространенности оптических компонентов и источников излучения. Для медицинских применений, а также обработки различных полимеров, могут использоваться импульсные лазеры с длиной волны вблизи 2мкм. Для получения и усиления коротких и ультракоротких импульсов (УКИ) существует большое разнообразие лазеров и усилителей. Они отличаются как типом активной среды, так и конфигурацией оптической схемы. Наиболее популярные конфигурации в настоящее время, обладающие выше обозначенными параметрами — дисковые лазеры, волоконные лазеры со схемой усиления чирпированных импульсов (СРА), лазеры с выходными трапециевидными усилителемя или кристаллическими стержнями, в т.ч. кристаллическими волокнами. Каждый тип обладает своими преимуществами и недостатками, о чем более подробно описано в литературном обзоре.

В текущей работе представлены результаты разработки и оптимизации импульсных лазеров с длиной волны 1.03 мкм и 1.94 мкм на основе новой гибридной схемы. Такая схема подразумевает использование волоконной части в качестве предусилителя, а также одномодового волоконного лазера в качестве накачки выходного каскада. Выходной каскад представляет собой кристаллический стержень, легированный редкоземельными ионами. Описанным в работе гибридным лазерам свойственны преимущества волоконных лазеров - высокая эффективность, надежность, хорошее качество излучения, себестоимость. При этом, недостатки, такие как высокая нелинейность, маленькая энергия импульсов, низкий порог разрушения среды, компенсируются за счет использования объемного выходного каскада.

## Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлась исследование и разработка гибридных импульсных лазерных источников с длиной волны 1030 нм и 1940 нм для получения высокого усиления и большей средней мощности при сохранении хорошего качества пучка.

В ходе исследований для достижения данной цели решались следующие задачи:

- Моделирование твердотельного выходного усилителя с учетом комплекса физических явлений, возникающих в среде, при распространении лазерного излучения с высокой плотностью мощности.
- Разработка и оптимизация конфигурации усилителя для схемы прямого усиления
   УКИ с длиной волны 1030 нм для достижения высокой средней мощности.

- Разработка и оптимизация конфигурации объемного усилителя для схемы усиления чирпированных импульсов с длиной волны 1030 нм с высоким коэффициентом усиления.
- Разработка и оптимизация конфигурации задающего лазера с модуляцией усиления для получения импульсного наносекундного излучения с длиной волны 1940 нм.
- Экспериментальное исследование конфигурации объемного усилителя на элементах Tm:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### Научная новизна работы

- Предложена новая схема гибридного усилителя импульсного излучения на кристаллах Yb:YAG с использованием одномодовой осевой накачки с длиной волны 920 нм для получения высокого коэффициента усиления.
- Впервые предложена схема гибридного усилителя импульсного излучения на кристаллах Yb:YAG с использованием одномодовой осевой накачки в зону усиления с длиной волны 1007 нм для уменьшения разогрева среды и получения высокой средней мощности.
- Произведена теоретическая оптимизация параметров гибридных усилителей на основе кристаллов Yb:YAG. В модели учитывались следующие эффекты: усиление и поглощение излучения средой, термооптический эффект, керровская нелинейность, инверсионная линза, разогрев среды за счет безизлучательных процессов, зависимость сечений переходов и времени жизни верхнего лазерного уровня от температуры и концентрации редкоземельных ионов, искажение волнового фронта излучения на неоднородностях среды, паразитная генерация и суперлюминесценция.
- Предложена новая схема гибридного усилителя на основе керамических элементов Тm:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для усиления импульсного излучения с длиной волны 1940 нм с использованием одномодовой осевой накачки с длиной волны 1680 нм.
- Произведена теоретическая оптимизация параметров задающего генератора для получения коротких импульсов с длиной волны 1940 нм.

## Практическая значимость работы

Практическая значимость работы связана с разработкой и оптимизацией параметров импульсных лазерных источников, которые используются при точной обработке различных материалов. Работа закладывает основы для дальнейшего проектирования гибридных лазеров коротких и ультракоротких импульсов с высокой

средней мощностью. Развитие подобных лазерных источников способствует распространению и развитию сфер применения УКИ лазеров и задач прецизионной материалообработки.

#### Положения, выносимые на защиту

- Использование одномодовой осевой накачки с длиной волны 920 нм для получения большого усиления излучения с длиной волны 1030 нм в кристаллах Yb:YAG при сохранении хорошего качества пучка.
- Использование одномодовой осевой накачки с длиной волны 1007 нм в зону усиления для уменьшения разогрева среды и получения высокой средней мощности при усилении импульсного излучения с длиной волны 1030 нм в кристаллах Yb:YAG.
- Создание теоретической модели с учетом комплекса эффектов (усиление и поглощение излучения средой, термооптический эффект, керровская нелинейность, инверсионная линза, разогрев среды за счет безизлучательных процессов, зависимость сечений переходов и времени жизни верхнего лазерного уровня от температуры и концентрации редкоземельных ионов, искажение волнового фронта излучения на неоднородностях среды, паразитная генерация и суперлюминесценция) для оптимизации объемного усилителя с одномодовой осевой накачкой
- Использование керамических элементов Tm:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для усиления импульсного излучения с длиной волны 1940 нм в условиях одномодовой осевой накачки с длиной волны 1680 нм.

#### Апробация результатов работы

По теме диссертации опубликованы 4 научных статьи в рецензируемых журналах, 2 тезиса в трудах международных конференций, 7 тезисов в трудах российских конференций. Общее количество публикаций 11. Результаты были доложены на международных и российских конференциях: Laser Optics 2014, Laser Optics 2016, 57-я конференция МФТИ, 60-я конференция МФТИ, научная сессия НИЯУ МИФИ-2015.

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка всех публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 109 страниц. Список цитируемой литературы содержит 84 наименований.

#### Личный вклад автора

Все использованные экспериментальные и теоретические результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Материалы, представленные в работе, получены в результате экспериментальных и теоретических исследований, выполненных автором в НТО ИРЭ-Полюс и НИЯУ МИФИ.

## Краткое содержание работы

Во Введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и основные защищаемые положения.

В Главе 1 проанализированы физические механизмы излучения ультракоротких импульсов с веществом. Описаны параметры, влияющие на характер взаимодействия, показана зависимость механизма абляции от длины волны и длительности импульса. Кроме того, проанализирована зависимость порога оптического пробоя прозрачных материалов при воздействии ультракоротких импульсов от параметров среды

Приведен обзор применений лазеров ультракоротких импульсов в различных сферах точной обработки материалов. На основе литературных данных установлены требуемые параметры оптических импульсов при различных процессах обработки материалов.

Таблица 1 Параметры лазерного излучения в различных процессах обработки

Параметр \ Метод обработки	Сверление	Резка	Сварка	
Длительность импульсов, пс	1-20	1-10	5-10	
Энергия импульсов, мкДж	50-70	50-200	<20	
Частота, кГц	>1MHz	>500kHz	>400kHz	
Длина волны, нм	1030	1030	1030	

Приведен обзор популярных в настоящее время типов выходных усилителей для лазеров ультракоротких импульсов. Дано детальное описание преимуществ и недостатков типичных конфигураций – тонкие диски, трапециевидные элементы, оптические волокна. Дано обоснование разработки гибридных усилителей с осевой накачкой волоконным лазером.

Приведен анализ доступных лазерных материалов со сравнением по ряду параметров, обоснован выбор типа активной среды – Yb:YAG.

Таблица 2 Сравнение основных параметров лазерных сред

Матрица	YAG	KGW	KYW	Y2O3	YLF	CaF2	GGG
Пиковые сечения	2,3	2,7	3	0,85	0.9	0,25	2
излучения, (10 <sup>-20</sup> см <sup>2</sup> )	(1030нм)	(1023нм)	(1025нм)	(1031нм)	(1020нм)	(1045нм)	(1025нм)
Пиковые сечения	0,8	12	13,3	2,4	1	0,54	0.66
поглощения, (10 <sup>-20</sup> см <sup>2</sup> )	(940нм)	(981нм)	(981нм)	(975нм)	(940нм)	(980нм)	(968нм)
Ширина полосы излучения,	15	20	24	14,5	14	70	10
НМ							
Время жизни, мс	0,95	0,3	0,3	0,85	2,21	2,4	0,8
Коэфф. теплопроводности, Вт/м*К	11	3.3	3.3	13.6	4.3	9.7	8
Нелинейный коэффициент $(10^{-16} \text{ cm}^2/\text{Bt})$	7.7	20/15	8.7	11.6	1.7	1.24	12.5
Термооптический коэффициент (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	7,3	0,4	0,4	9	-6,6	-11,3	0.17
Изотропный.	да	нет	нет	да	нет	да	да
Твердость, Мооса	8-9	4-5	4-5	5.5	4-5	4	6.5-7.5
Температура плавления, °С	1940	1075	1050	2425	819	1360	1730

В ходе детального литературного анализа существующих типов УКИ лазеров были выявлены недостатки и преимущества у каждого типа. Волоконные лазеры обладают простой конструкцией, однако из-за высокой нелинейности имеют сильное ограничение по пиковой мощности. Лазеры с использованием дисковых и многопроходных усилителей обладают выдающимися выходными параметрами, однако, вместе с тем высокой сложностью, чувствительностью схемы и ценой. Популярная в последнее время конфигурация с использованием кристаллических волокон позволяет получать достаточно хорошие параметры, но из-за высокого разогрева имеет ограничение по средней мощности.

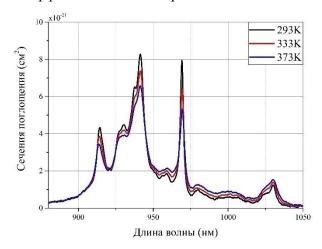
Для преодоления существующих ограничений нами была предложена конфигурация гибридного лазера с волоконной частью формирования и предусиления импульсов и кристаллическим выходным каскадом с одномодовой осевой лазерной накачкой. Такая схема обладает относительной простотой и надежностью, при этом за счет одномодовой лазерной накачки поддерживается хорошее качество пучка и низкий разогрев среды.

В Главе 2 представлено описание теоретической модели, использованной для моделирование выходного объемного усилителя с осевой лазерной накачкой.

Представлено объяснение метода расчета распространения пучка, определены основные нелинейные эффекты, учитываемые при расчетах.

- Усиление и поглощение излучения средой;
- Термооптический эффект;
- Керровская нелинейность;
- Инверсионная линза;
- Разогрев среды за счет безызлучательных процессов;
- Зависимость сечений переходов и времени жизни верхнего лазерного уровня от температуры и концентрации редкоземельных ионов;
- У Искажение волнового фронта излучения на неоднородностях среды;
- > Паразитная генерация и люминесценция среды;

Приведен алгоритм расчета теплового распределения в кристалле и анализ зависимостей различных параметров от температуры и концентрации. Наиболее характерными для Yb:YAG можно назвать зависимости коэффициента теплопроводности от концентрации и спектров сечений переходов от температуры, что отражено на рисунках 1-2. В работе так же показана зависимость разогрева усилителя от коэффициентов теплопроводности и теплообмена.



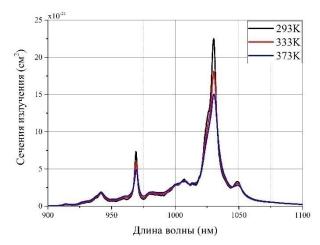


Рис. 1 Сечения поглощения Yb: YAG для различных температур.

Рис. 2 Сечения излучения Yb:YAG для различных температур.

Изменение спектра сечений излучения и поглощения является основным ограничивающим фактором при разогреве кристалла. В первую очередь лимитирующим фактором является снижение пиковых сечений люминесценции, которое достигает 30% при разогреве на 80К.

Приведено описание и количественная оценка эффекта инверсионной линзы, влияющей на распространение пучков в Yb: YAG при высоком уровне возбуждения.

Описаны методы вычисления паразитной генерации и суперлюминесценции в зависимости от условий распространения излучений сигнала и накачки

Приведена методика расчета качества пучка и оценки параметра  $M^2$ .

Разработанная теоретическая модель позволила нам с достаточной точностью выполнить анализ эволюции пучков сигнала и накачки в усилителе и произвести оптимизацию конфигурации.

В Главе 3 отражены результаты теоретического моделирования объемного усилителя в условиях одномодовой осевой лазерной накачки. В случае использования лазерной накачки с длиной волны 920нм показана возможно получений коэффициента усиления до 39дБ по малому сигналу в кристалле Yb:YAG с концентрацией 5%, размерами 1х17мм. Произведен анализ разогрева и возбуждения кристалла в условиях высокого усиления.

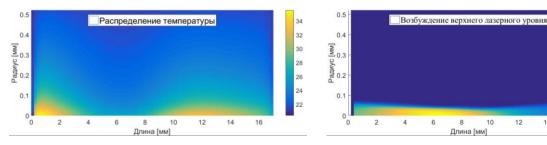


Рис. 3 Расчетное тепловое распределение в кристалле Yb:YAG.

Рис. 4 расчетное распределение возбуждения в кристалле Yb:YAG

Показано, что инверсионная линза в этом случае сравнима по абсолютному значению в термолинзой. При возбуждении порядка 80% нелинейная добавка к коэффициенту преломления составит около 1,3\*10<sup>-4</sup>, причем dn/dt= 8\*10<sup>-6</sup>, т.е. при перегреве около 16 К инверсионная добавка сравнится с термооптической и для некоторых режимов работы это может играть существенную роль

Произведена теоретическая оценка влияния инверсионной линзы на распространение пучка сигнала в активном элементе и вне его. На рисунке 6 представлена зависимость положения перетяжки сигнала, перефокусированного вне кристалла от входной мощности сигнала, другими словами, от коэффициента усиления.

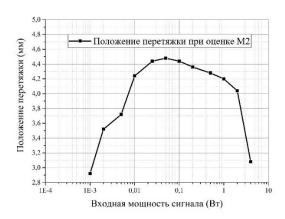


Рис. 5 Изменение положения перетяжки лазерного излучения в зависимости от входной мощности сигнала в кристалле Yb:YAG

Представлены теоретические результаты по расчету объемного усилителя с одномодовой осевой лазерной накачкой в зону усиления. Обоснован выбор длины волны волоконного лазера накачки. Максимальная мощности достигается при длине волны лазера накачки, близкой к 1000 нм, однако с укорочением длины волны излучения существенно увеличивается коэффициент паразитной генерации, что ограничивает максимальную эффективность лазера. Был разработан волоконный лазер с длиной волны 1007 нм и выходной мощностью 200 Вт. Дифференциальная эффективность составила 75%.

Представлены теоретические оценки параметров усилителя при использовании текущего лазера накачки. Для кристалла Yb:YAG с длиной 40мм и концентрацией 10% максимальное усиление составит около 27 дБ, в то время как максимальная эффективность составит порядка 60% из-за высокой мощности спонтанной люминесценции. В качестве рабочих параметров был выбран режим с коэффициентом усиления порядка 20 дБ и эффективностью 35-45%.

Показаны пути увеличения эффективности усилителя. Охлаждение обкладок кристалл до 0°С позволит увеличить выходную мощность на 20% за счет увеличения поглощения накачки, однако, снижение температуры способствует выпадению росы и снижению долговечности усилителя. Увеличение выходной мощности за счет увеличения длины активного элемента невозможно из-за керровской нелинейности. При увеличении длины произойдет схлопывание пучка и оптический пробой среды. Такой метод возможен только опри уменьшении максимально-достижимой пиковой мощности импульсов.

В **Главе 4** описаны результаты экспериментов по усилению импульсного излучения в кристалле Yb:YAG в условиях одномодовой осевой лазерной накачки. Схема эксперимента изображена на рисунке 7.

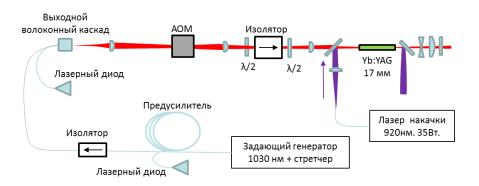
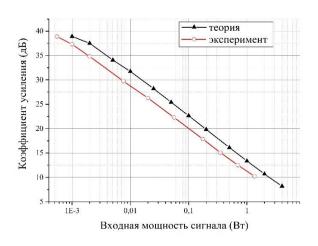


Рис. 6 Схема экспериментальной установки

При использовании накачки на длине волны 920 нм было получено усиление до 39 дБ, (23 дБ/см) в одном проходе по сигналу и накачке, что является рекордом для стержневых усилителей, согласно литературным данным. Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала представлена на рис. 8. В качестве задающего генератора использовался волоконный лазер, основанный на принципе пассивной синхронизации мод с нелинейным вращением поляризации. Импульсы были предварительно растянуты во времени по спектру с помощью чирпированной волоконной брэгговской решетки до 40 пс. Акустооптический модулятор после 2-х волоконных каскадов использовался для прореживания частоты задающего генератора. Мощность сигнала на входе в кристаллический усилитель изменялась до 0.5 до 1.3 Вт.



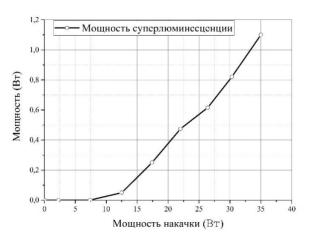


Рис. 7 Зависимость коэффициента усиления в кристалле при различных сигналах на входе.

Рис. 8 Мощность паразитной генерации и суперлюминесценции в отсутствии сигнала входе в усилитель.

На рисунке 9 приведена зависимость выходной мощности из кристалла от мощности накачки в отсутствии сигнала на входе. Видно, что в таком режиме максимальная мощность на выходе составляет чуть более 1 Вт. Расхождение между сигналом и теорией, наблюдаемое на рисунке 8 связано с чрезмерным разогревом

кристалла из-за неудачной конструкции радиатора, обладающей низким коэффициентом теплообмена.

Была произведена оценка сдвига перетяжки излучения сигнала после перефокусирования вне кристалла. Зависимость отражена на рисунке 10. В зависимости наблюдается экстремум, как и при теоретических оценках на рисунке 6. Мы связываем такой характер изменения положения перетяжки с тем, что при высоких коэффициентах усиления основное изменение испытывает инверсионная линза, а при низком усилении – термолинза. Выходные импульсы были сжаты с помощью чирпированной объемной решетки до длительности около 1 пс.

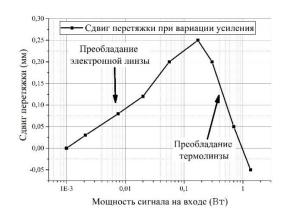


Рис. 9 Зависимость положения перетяжки сигнала от входной мощности после перефокусировки излучения на выходе из усилителя.

В случае использования в качестве лазера накачки одномодового волоконного лазера с длиной волны 1007 нм была получена выходная средняя мощность более 70 Вт при энергии в импульсах 70 мкДж и длительности 10 пс. При этом, использование лазерной накачки в зону усиления позволило существенно снизить тепловую нагрузку на кристалл и максимальный разогрев составил около 4 К, что находится в согласии с теоретическими предсказаниями. На рисунке 11 представлена термографическое изображение кристалла в медном радиаторе. Для сравнения на рисунке 12 изображено расчетное тепловое распределение.

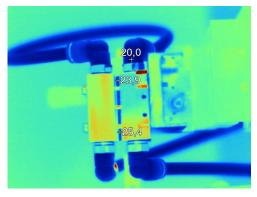


Рис. 10 Термографическое изображение кристалла в процессе усиления

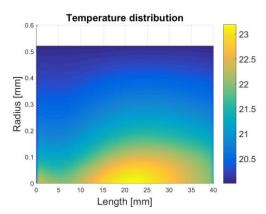


Рис. 11 Расчетное тепловое распределение в кристалле в процессе усиления

Благодаря низкому разогреву среды качество и размер пучка не изменяются с ростом мощности. При максимальной выходной мощности происходит небольшое искажение профиля пучка из-за керровской нелинейности, как видно на Рис. 12.  $M^2$  параметр излучения не изменяется с ростом мощности и составляет порядка 1.1.

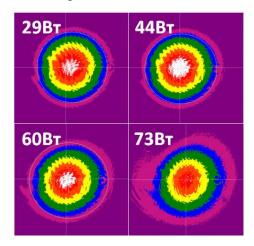


Рис. 12 Изображение пучка при изменении средней выходной мощности.

В **Главе 5** представлены результаты разработки импульсного наносекундного гибридного лазера с длиной волны 1940 нм. Таким лазеры могут быть использованы в медицине, в частности в хирургии и при обработке кожи. Кроме того, разработанная схема гибридного усилителя с осевой одномодовой лазерной накачкой имеет перспективу для использования в схеме ультракоротких импульсов с длиной волны 1940 нм.

В качестве задающего генератора был использован лазер с модуляцией усиления. Принципиальная схема представлена на Рис. 13, в качестве накачки используется импульсный эрбиевый лазер. Такая схема достаточно простая и надежная, что делает ее более выгодной по сравнению с традиционными схемами получения наносекундных импульсов, например, модуляцией добротности или задающим полупроводниковым лазером из-за новизны и ненадежности соответствующих компонентов на длине волны

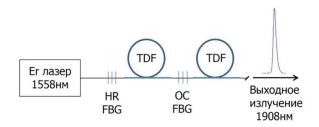


Рис. 13 Схема задающего генератора на принципе модуляции усиления помощью теоретической модели на основе скоростных уравнений.

В результате теоретического моделирования были получены зависимости длительности импульсов и их пиковой мощности от параметров резонатора. На Рис. 14 и Рис. 15 наблюдаются явно выраженные экстремумы, благодаря чему удалось получить в экспериментах импульсы с длительностью 10 нс, кроме того, при увеличении концентрации ионов Tm<sup>3+</sup> возможно получение более коротких импульсов с длительностью до 5нс.

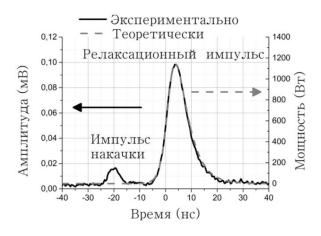




Рис. 14 Зависимости длительности оптического импульса и пиковой мощности от пропускания выходной ВБР

Рис. 15 Зависимости длительности импульса и пиковой мощности от длины резонатора.

На Рис. 16 представлена осциллограмма импульса, совмещенная с теоретической формой. Кроме того, на Рис. 17 представлен спектр импульса. Уширение спектра в область длинных волн связано с нелинейностью в волокне, приводящей у генерации суперконтинума.



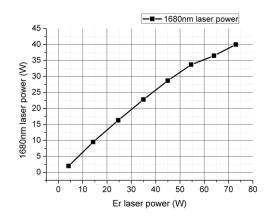
Спектр импульсов

-20
-30
-30
-40
-50
-60
-70
-400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 2100 2200 2300 2400
Длина волны (нм)

Рис. 16 Осциллограммы импульсов, полученные в результате моделирования и эксперимента

Рис. 17 Спектр релаксационного импульса.

Для реализации схемы гибридного усилителя был разработан волоконный лазер с длиной волны 1680 нм. Основной принцип работы такого лазера — вынужденное комбинационное рассеяние непрерывного излучения от эрбиевого волоконного лазера с длиной волны 1567 нм. В результате было получено более 40 Вт выходной средней мощности при ширине спектра порядка 10дБ по полувысоте, как можно видеть на



Raman fiber laser spectrum

40

40

40

20

10

1550

1600

1650

1700

1750

1800

1850

Wavelength (nm)

Рис. 18 Ватт-Ваттная характеристика ВКР лазера с длиной волны 1680нм. рисунках ниже.

Рис. 19 Спектр выходного излучения

Принципиальная схема гибридного усилителя представлена на Рис. 20. В качестве среды для усиления оптических импульсов были выбраны керамические элементы оксида лютеция, легированные ионами туллия благодаря высоким сечениям переходов и теплопроводности.

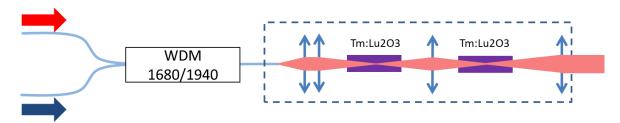


Рис. 20 Принципиальная схема усилителя

В результате усиления было получено до 20 Вт выходной средней мощности при энергии в импульсе до 1 мДж и длительности импульса 15-20 нс (см. Рис. 21). При усилении импульсов качество пучка сохранялось хорошим, с  $M^2 < 1.3$  и эллиптичностью близкой к 1 (см. Рис. 22).

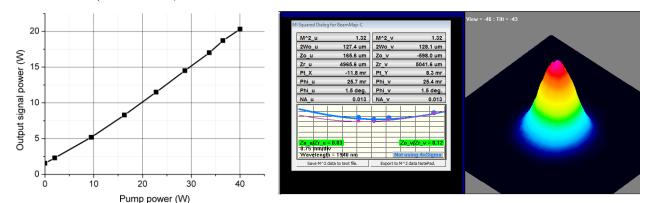


Рис. 21 Ватт-ваттная характеристика усилителя

Рис. 22 Перетяжка пучка сигнала при выходной средней мощности 20Вт. Изображение получено с помощью прибора BeamMap2.

## Основные результаты диссертации

- 1. Предложена теоретическая модель для учета комплекса физических явлений в кристаллическом усилителе на базе метода FD-BPM, в том числе усиления и поглощения излучения, тепловых и нелинейных эффектов.
- 2. Предложена конфигурация усилителя с использованием одномодового волоконного лазера с длиной волны 1007 нм в качестве осевой накачки. Такая конфигурация позволяет достичь коэффициента усиления порядка 20 дБ (5 дБ/см) при средней мощности до 70 Вт и пиковой мощность до 7 МВт. Результаты находятся в согласии с теоретическими прогнозами.
- 3. Показано усиление в кристалле Yb:YAG до 39 дБ (23 дБ/см) в одном проходе по сигналу при использовании осевой накачки с помощью одномодового волоконного лазера с длиной волны 920 нм. Результаты находятся в согласии с теоретическими прогнозами.

- 4. Продемонстрировано влияние инверсионной линзы на выходной пучок сигнала при высоком коэффициенте усиления (>20 Дб).
- 5. На основе теоретической модели произведена оптимизация параметров задающего лазера с модуляцией усиления. Получены импульсы с длительность около 10нс, показана возможность получения импульсов с длительность 5 нс.
- 6. Разработан одномодовой волоконный лазер с длиной волны 1680 нм и мощностью более 40 Вт.
- 7. Предложена конфигурация двухкаскадного усилителя на керамических элементах  $Tm:Lu_2O_3$ . Получено более 20 Вт средней мощности при сохранении хорошего качества пучка с  $M^2<1.3$ .

## Список публикаций по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах:

- 1. **Obronov I. V.**, Sypin V. E., Larin S. V. Research of the Features of Generation Pulsed Radiation in Gain-Switch Thulium Fiber Lasers //Physics Procedia. 2015. T. 71. C. 287-292.
- Obronov I. V., Sypin V. E., Larin S. V. Optimisation of thulium fibre laser parameters with generation of pulses by pump modulation //Quantum Electronics. 2015. T. 45. №. 7. C. 617.
- 3. Antipov O., Novikov A., Larin S., **Obronov I**. Highly efficient 2 µm CW and Q-switched Tm 3+: Lu 2 O 3 ceramics lasers in-band pumped by a Raman-shifted erbium fiber laser at 1670 nm //Optics letters. − 2016. − T. 41. − №. 10. − C. 2298-2301.
- 4. **Обронов И.В.,** Демкин А.С., Мясников Д.В. Твердотельный усилитель на основе кристалла Yb:YAG с одномодовой лазерной накачкой на длине волны 920 нм //Квантовая электроника. -2018. Т. 48. №. 3. С. 212-214.

Тезисы в трудах международных конференций:

- Antipov O., Novikov A., Kositsyn R., Larin S., Obronov I. Highly Efficient 2066-nm Tm: Lu 2 O 3 Ceramic Lasers In-Band Pumped by Raman-Shifted Erbium Fiber Laser at 1670 nm //The European Conference on Lasers and Electro-Optics. – Optical Society of America, 2015. – C. CA 12 2.
- 6. Antipov O., Novikov A., Larin, S., **Obronov, I**. Hybrid lasers based on Tm 3+: Lu 2 O 3 ceramics in-band pumped by Raman-shifted erbium fiber lasers and their OPO frequency conversion //Laser Optics (LO), 2016 International Conference. IEEE, 2016. C. S1-3-S1-3.

#### Конференции МФТИ:

- 7. И.В. Обронов, В.Е. Сыпин, С.В. Ларин Оптимизация параметров тулиевого волоконного лазера, работающего в режиме модуляции усиления//57-ая научная конференция МФТИ, 2014
- 8. И.В.Обронов, А.С. Демкин, Д.В. Мясников Усилитель УКИ на кристалле Yb:YAG с одномодовой накачкой // 60-ая научная конференция МФТИ, 2014