

На правах рукописи



**Погода Анастасия Павловна**

**СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ  
РЕШЕТОК КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ  
В ЛАЗЕРАХ  
С МНОГОПЕТЛЕВЫМИ ОВФ-РЕЗОНАТОРАМИ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре лазерной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (ФГБОУ ВПО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)

Научный руководитель – **Петров Виктор Михайлович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой квантовой электроники  
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты: **Никоноров Николай Валентинович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой оптоинформационных  
технологий и материалов Санкт-Петербургского  
национального исследовательского университета  
информационных технологий, механики и оптики

**Пастор Александр Александрович**,  
кандидат физико-математических наук, доцент  
кафедры оптики федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования «Санкт-  
Петербургский государственный университет»

Ведущая организация – **Акционерное общество "Государственный  
оптический институт имени С.И. Вавилова"**  
(г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится “22” декабря 2015 г. в 17:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте университета eltech.ru.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (организации), просим направлять по указанному адресу в диссертационный совет Д.212.238.08

Автореферат разослан “21” октября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.08,  
кандидат технических наук, доцент

 Смирнов Е.А.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Многообразие схем и областей применения лазерных систем привело к возникновению спектра задач, связанных с доставкой энергии на значительные расстояния, что особенно актуально в космическом пространстве.

Для таких применений создается новое поколение мощных импульсных твердотельных лазеров с высокой яркостью, то есть обладающих большой пиковой мощностью и энергией в импульсе при близкой к дифракционному пределу расходимости излучения. В основе таких характеристик излучения лежит явление обращения волнового фронта путем четырехволнового смешения.

Такие лазеры являются перспективными в задачах дистанционного энергопитания малых спутников [1] и изменения траекторий космических объектов, например, малых астероидов и космического мусора [2]. Наряду с космическими приложениями, мощные лазеры позволяют решать задачи дистанционного мониторинга поверхностей путем лазерно-эмиссионной спектроскопии [3, 4, 5]. Мощные лазеры также находят применение в области лидарного зондирования атмосферы [6, 7], обработке металлов, особенно в задачах сверления отверстий малого (около 1 мкм) диаметра и ряде других областей.

Представленная работа позволит выявить и количественно описать явления, влияющие на возможность получения генерации и характеристики излучения лазеров с обращением волнового фронта.

Приведённый анализ литературы показал что:

1. Имеется теоретическое описание и моделирование процесса четырехволнового смешения в активной среде лазера. Описано формирование решеток коэффициента усиления. Исследованы геометрические параметры и дифракционная эффективность решеток. Однако в проведенных исследованиях отсутствует моделирование решеток коэффициента усиления в лазерах с петлевым резонатором при наличии насыщающегося поглотителя. Описано влияние пассивного затвора в петлевом резонаторе лазера на контраст записанных в активном элементе решеток коэффициента усиления, однако отсутствует описание влияния поглотителя на коэффициент связи записывающих решетку лучей..

2. Исследованы энергетические, временные и спектральные характеристики лазеров. Показано, что лазеры джоулевого уровня реализованы с ламповой накачкой [9], обеспечивающий низкий, по сравнению с диодной, уровень коэффициента полезного действия. Лазер с диодной накачкой представлен в [13], но для повышения энергии в импульсе

используются дополнительные квантроны-усилители, что повышает коэффициент усиления. Для повышения дифракционной эффективности решеток в схемах с одним квантроном используется невзаимный элемент [10, 11], улучшающий обратную связь. В приведенных работах отсутствует указание возможности получения генерации лазера одновременно с джоулевым уровнем энергии в импульсе, как в [9], на базе одного активного элемента без дополнительных квантронов-усилителей, как в [10], и без невзаимного элемента, как в [8, 9].

3. Исследование спектральных свойств генерации твердотельных лазеров с петлевыми резонаторами ограничивается измерением ширины полосы генерации [10, 11] вблизи порога и при значительном превышении. Имеется указание на спектральную селективность решеток, как причину сужения полосы генерации. При этом отсутствует указание на сужение полосы генерации из-за модуляции добротности резонатора (самомодуляции решетками или пассивной модуляции насыщающимся поглотителем). Также отсутствует количественное описание зависимости ширины полосы генерации от параметров записанной в среде решетки.

4. В работе [9], а также [12], проведено исследование режимов пассивной модуляции добротности резонатора насыщающимся поглотителем  $\text{LiF:F}_2^-$ . Показано, что использование насыщающегося поглотителя переводит лазер в режим генерации гигантских импульсов. Однако отсутствует описание особенностей генерации в режиме высокоэффективной диодной накачки и при широком выборе материала насыщающегося поглотителя.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Цель работы – изучение влияния параметров решеток усиления, формируемых при вырожденном четырехволновом взаимодействии непосредственно в активной среде лазера под действием узкополосной диодной накачки, на характеристики генерации твердотельных лазеров с многопетлевыми ОВФ-резонаторами в интересах управления параметрами генерации и повышения энергетических параметров лазерного излучения при сохранении высокого качества пучка.

На основании представленного обзора литературы можно сформулировать следующие задачи диссертационной работы:

1. Исследовать влияние формирования дополнительных решеток усиления в активной среде лазера при увеличении числа петель голографической обратной связи лазерного резонатора на параметры генерации твердотельного лазера с петлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором.

2. Изучить спектральные параметры генерации твердотельного лазера с многопетлевым резонатором на самонакачивающемся ОВФ-зеркале в активной среде в зависимости от длины области накачки активной среды.

3. Исследовать режим пассивной модуляции добротности твердотельного лазера с петлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором при модуляции не только насыщающегося поглощения пассивного затвора, но и дифракционной эффективности решеток насыщающегося усиления.

4. Исследовать параметры генерации ИАГ: $\text{Nd}^{3+}$  лазеров с двух-, трех- и четырехпетлевыми самонакачивающимися ОВФ-резонаторами на решетках усиления непосредственно в активной среде при диодной накачке, и найти возможности повышения выходной энергии лазера до джоулевого уровня при сохранении качества пучка, близкого к дифракционному, без использования каких-либо дополнительных оптических элементов.

**Научная новизна.** Впервые показано, что формирование дополнительных решеток усиления с большей дифракционной эффективностью в активной среде лазера при увеличении числа петель голографической обратной связи лазерного резонатора повышает параметры генерации твердотельного лазера с петлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором.

Обнаружено, что ширина полосы генерации в лазере с многопетлевым резонатором на самонакачивающемся ОВФ-зеркале непосредственно в активной среде имеет обратно пропорциональную зависимость от толщины объёмной отражательной решётки коэффициента усиления, равной длине области перекрытия пучков в активной среде.

Установлено, что насыщающийся поглотитель, помещенный так, чтобы захватывать все взаимодействующие пучки, позволяет уменьшать различие интенсивностей пучков, записывающих решетки усиления, что повышает контраст их интерференции и дифракционную эффективность решеток коэффициента усиления, и в конечном счете приводит к увеличению пиковой мощности излучения лазера с петлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором.

**Практическая значимость работы.** На основе проведенных исследований разработаны схемы резонатора лазера, реализующего обращение волнового фронта в двух-, трех- и четырехпетлевых самонакачивающихся ОВФ-резонаторах. Это позволяет получить схемы с оптическим коэффициентом полезного действия 19%. Преимуществом данных лазеров является отсутствие выходного зеркала, невзаимного элемента и дополнительных квантронов-усилителей, увеличивающих обратную связь и коэффициент усиления за обход резонатора.

Научные результаты, полученные в ходе выполнения работы, позволили сформулировать следующие **научные положения, выносимые на защиту:**

1. Наличие дополнительных петель голографической обратной связи на решетках усиления в активной среде приводит к записи дополнительных решеток усиления, что обеспечивает повышение эффективности генерации лазера с петлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором.
2. Ширина полосы генерации в лазере с многопетлевым резонатором на самонакачивающемся ОВФ-зеркале непосредственно в активной среде имеет обратно пропорциональную зависимость от толщины объёмной отражательной решётки коэффициента усиления, равной длине области перекрытия пучков в активной среде.
3. Насыщающийся поглотитель ИАГ:Cr<sup>4+</sup>, помещенный так, чтобы захватывать все взаимодействующие пучки, позволяет уменьшать различие интенсивностей пучков, записывающих решетки усиления, что повышает контраст их интерференции и дифракционную эффективность решеток коэффициента усиления. Повышение эффективности работы решетки коэффициента усиления приводит к возможности реализации режима с эффективностью преобразования в режим модуляции добротности 55% и пиковой мощностью 15 МВт.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы неоднократно докладывались на всероссийских и международных научных конференциях: VII международная конференция молодых ученых и специалистов НИУ ИТМО «Оптика 2011», СПб, 17-21 октября, 2011; IV общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос», СПб, 14-16 марта, 2012; 22-ая международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация», СПб, 5-7 июня, 2012; 15th international conference on laser optics "LO-2012", St.Petersburg, 25-29 июня, 2012; XIX international symposium on high-power laser systems and applications "HPLS&A", Istanbul, Turkey, 10-14 сентября, 2012; XX международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии», Новороссийск, 11-15 сентября, 2012; VII международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО – 2012), 15 - 19 Октября, 2012; V общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос», СПб, 20-22 марта, 2013; 23-я международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация», СПб, 5-6 июня, 2013; International conference on coherent and nonlinear optics & The lasers, applications, and technologies "ICONO/LAT:2013", Москва, 18-22 июня,

2013; VIII международная конференция молодых ученых и специалистов НИУ ИТМО «Оптика 2013», СПб, 14-18 октября, 2013; XXI Международной Конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии», Новороссийск, 10-14 сентября, 2013; Advanced Solid-State Lasers Congress “ASSL-2013”, Paris, France, 27 октября – 1 ноября, 2013; Petergof workshop on laser physics “PWLP-2014”, St-Petersburg, 15-17 апреля, 2014; 24-я международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация», СПб, 9 - 11 июня, 2014; 16th international conference on laser optics “LO-2014”, St.Petersburg, 30 июня – 4 июля, 2014; XX international symposium on high-power laser systems and applications “HPLS&A”, Chengdu, China, 25-29 августа, 2014.

**Достоверность** результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается использованием апробированных и обоснованных физических методов, а также воспроизводимостью. Достоверность экспериментальных данных подтверждается использованием современного высокоточного оборудования. Результаты эксперимента согласуются с теоретическим описанием явлений, а также с данными других исследователей.

**Личный вклад автора.** Цели исследования сформулированы автором совместно с сотрудниками кафедры «Лазерной техники» БГТУ «ВОЕНМЕХ», задачи работы сформулированы автором лично. В работе изложены результаты исследований, выполненные автором лично или в соавторстве. Численная оценка дифракционной эффективности решеток и моделирование работы пассивного лазерного затвора выполнены совместно со Сметаниным С.Н. Эксперименты по исследованию характеристик лазера с четырехпроходной схемой резонатора, а также регистрация явления само модуляции добротности в результате рассеяния излучения лазера на мишени, выполнены совместно с Лебедевым В.Ф. Исследования параметров динамических решеток, записываемых в фоторефрактивных кристаллах, выполнены совместно с научным руководителем Петровым В.М. Эксперименты по исследованию режимов работы и характеристик излучения лазера с трех- и пятипроходной схемой резонатора, сопоставление и анализ эффективности решеток коэффициента усиления в таких лазерах, а также влияния пассивного лазерного затвора на параметры решетки, выполнены автором лично. Также автором проведено исследование спектральных свойств излучения и показана связь с явлением спектральной селективности решеток коэффициента усиления. Таким образом, все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы отражено в 26 научных работах общим объемом 78 печатных листов, в том числе 6 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций, а также 21 текст тезисов и докладов на всероссийских и международных конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, одного приложения и списка цитируемой литературы из 103 наименований. Материалы работы изложены на 118 страницах, включая 64 рисунка, 5 таблиц.

### **Краткое содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность выбора темы диссертационной работы, сформулированы основные проблемы разработки мощных твердотельных лазеров, произведена постановка задачи исследования и сформулирована общая цель работы.

В **первой главе** произведен анализ подходов к теоретическому описанию явления обращения волнового фронта, а также его реализации в активной среде лазера путем четырехволнового смешения. Показана перспективность данного пути в решении задачи создания источников с высокой яркостью. Приведен обзор и анализ экспериментальных работ по реализации твердотельных лазеров с петлевыми и многопетлевыми резонаторами.

Приведённый анализ литературы показал, что имеется теоретическое описание и моделирование процесса четырехволнового смешения в активной среде лазера. Описано формирование решеток коэффициента усиления. Исследованы геометрические параметры и дифракционная эффективность решеток. Однако в проведенных исследованиях отсутствует детальное описание моделирования решеток коэффициента усиления в лазерах с петлевым резонатором при наличии насыщающегося поглотителя. Отсутствует описание влияния пассивного затвора в петлевом резонаторе лазера на характеристики записываемых в активном элементе решеток коэффициента усиления. Исходя из этого, сформулированы цели и задачи исследования.

Во **второй главе** рассмотрены различные резонаторы лазера, коэффициенты усиления на проход которых различны, несмотря на идентичный объем активного вещества. Приведен ход лучей в данных резонаторах.



1. Рассмотрены схемы резонатора лазера, реализующего обращение волнового фронта путем четырехволнового смешения в процессах шести-, восьми- и десятиволнового взаимодействия.

2. Определено количество решеток коэффициента усиления исходя из геометрии схем резонатора. Рассчитана дифракционная эффективность решеток и их вклад в формирование обратной связи. Расчет проведен с использованием следующих соотношений для решетки с номером  $i$  [14]:

$$\eta_i \approx G \cdot (b_i \cdot L \cdot V_i)^2$$

где  $G = \exp(\alpha \cdot L)$  – усиление за проход среды;  $\alpha$  – коэффициент усиления среды;  $L$  – длина среды;  $i$  – номер решетки (от 1 до 24);

$$V_i = \frac{2\sqrt{I_{1i}I_{2i}}}{I_{1i} + I_{2i}}$$

– контраст интерференции волн, записывающих  $i$ -ю решетку;  $I_{1i}$  и  $I_{2i}$  – интенсивности волн, записывающих  $i$ -ю решетку;

$$b_i \approx \frac{\alpha}{4} \cdot e^{-\sigma_i} \cdot \tau_i$$

– коэффициент четырехволновой связи на  $i$ -й решетке,

$$\text{где } \sigma_i = U_S^{-1} \cdot \int (I_{1i} + I_{2i} + I_{3i} + I_{4i}) dt,$$

$$\tau_i = U_S^{-1} \cdot \int 2\sqrt{I_{1i}I_{2i}} dt = U_S^{-1} \cdot \int (I_{1i} + I_{2i}) dt,$$

$I_{3i}$  и  $I_{4i}$  – интенсивности волн, участвующих в процессе считывания  $i$ -й решетки;  $U_S$  – плотность энергии насыщения усиления. Показано, что наибольшей эффективностью обладают решетки, записанные пучками с большей интенсивностью.

3. Показана возможность использования механизма управления энергией в импульсе путем изменения количества проходов в активной среде. Увеличение количества проходов приводит к увеличению интенсивности записывающих решетки пучков, что приводит к появлению дополнительных, создающих обратную связь, решеток коэффициента усиления с большей дифракционной эффективностью. Важным преимуществом данного механизма является то, что качество излучения и его расходимость при этом не ухудшаются.

4. Показано, что длина активного элемента в лазерах с петлевым резонатором также является параметром, управляющим характеристиками генерации. Изменение длины активной среды приводит к изменению толщины решетки коэффициента усиления, влияя на ее спектральную селективность, согласно соотношению:  $\delta\lambda = \lambda^2 / 2nT$ , где  $\lambda$  – длина волны

излучения,  $n$  – показатель преломления,  $T$  – толщина записанной решетки. Показана возможность осуществлять управление шириной полосы генерации лазера с петлевым резонатором – увеличение длины активного элемента приводит к сужению полосы генерации.

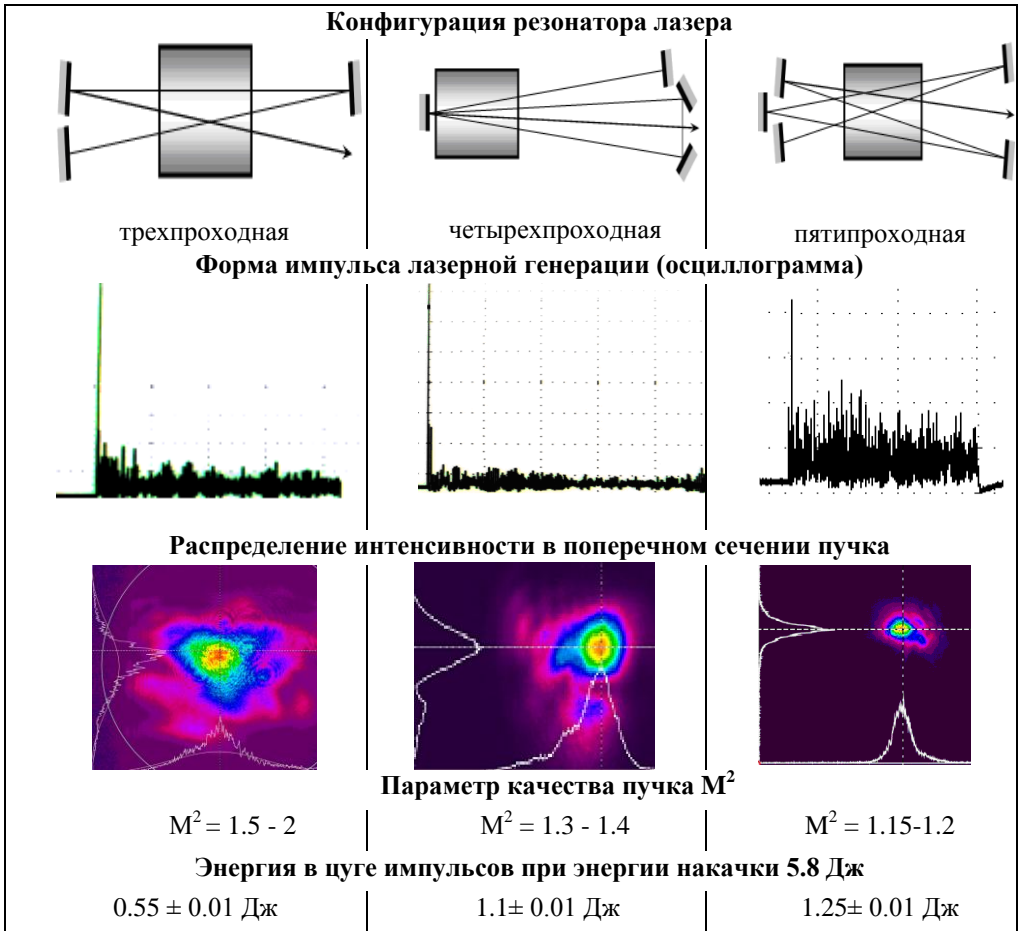
5. Показано, что пассивная модуляция добротности резонатора повышает дифракционную эффективность записываемых решеток коэффициента усиления, что приводит к модуляции дифракционной эффективности решеток. Данное обстоятельство позволяет управлять длительностью гигантских импульсов и пиковой мощностью генерации.

В **третьей** главе приведены результаты экспериментов по исследованию явлений, лежащих в основе управления временными, пространственными, спектральными и энергетическими характеристиками излучения. Раздел 3.1 посвящен описанию необходимого оборудования, а в разделе 3.2 приведено описание методик измерений характеристик излучения. В разделе 3.3 представлены сравнительные экспериментальные исследования лазерной генерации в различных конфигурациях самонакачивающихся ОВФ-резонаторов на многоволновом взаимодействии непосредственно в лазерной среде на одиночном кристалле Nd-YAG при накачке мульткиловаттными лазерными диодными матрицами (Таблица 1). В лазерных конфигурациях с шести- и восьмиволновым взаимодействием генерируется высокоинтенсивный 200-наносекундный лазерный импульс в режиме самомодуляции добротности резонатора, за которым следуют низкоинтенсивные пики свободной генерации. Первый импульс характерен для режима самомодуляции добротности, реализуемой в периодическом процессе записи и стирания решеток коэффициента усиления внутрирезонаторными пучками излучения.

Последующие пики низкоинтенсивной свободной генерации реализуются вследствие низкого остаточного усиления в лазерной среде после генерации первого гигантского импульса. Увеличение числа волн участвующих в многоволновом взаимодействии с шести до восьми приводит к росту энергии импульса лазерной генерации и оптического КПД с 0.55 до 1.1 Дж и с 8.3% до 19% соответственно. Энергия в импульсе генерации лазера с десятиволновым взаимодействием достигает 1.25 Дж. При этом временные и спектральные характеристики отличаются от подобных характеристик для схем с шести- и восьмиволновым взаимодействием. В конфигурации резонатора с десятиволновым взаимодействием не только первый импульс, но и весь цуг импульсов соответствует режиму одночастотной генерации в режиме самомодуляции добротности, реализующейся в динамическом режиме записи и стирания решеток коэффициента усиления внутрирезонаторными пучками. Генерация реализуется на одной поперечной

TEM00 моде с качеством пучка, близким к дифракционному пределу ( $M^2 = 1.15-1.2$ ).

Таблица 1



В разделе 3.4 показано, что спектральная селективность решеток коэффициента усиления обусловлена двумя параметрами. С одной стороны, голограмму можно рассматривать как брэгговскую решетку, где селективность пропорциональна количеству тонких голограмм, то есть обратно пропорциональна длине активного элемента. В этом случае ширина полосы генерации определяется только геометрическими параметрами решетки и не зависит от интенсивности записывающих пучков. Данная

тенденция проверена экспериментально не только для динамической решетки коэффициента усиления в активной среде кристалла, но для решетки показателя преломления в фоторефрактивном кристалле.

С другой стороны, самомодуляцию добротности, вызванную голограммой, сформированной в активной среде, можно рассматривать аналогично воздействию пассивного затвора, изменяющего ширину полосы генерации за счет большего усиления центральных частотных компонент голограммами большей дифракционной эффективности, что оказывает наиболее существенный вклад в селективность при больших интенсивностях записываемых пучков. Критерием заметного воздействия голограммы как пассивного затвора может служить самомодуляция добротности резонатора. При этом существенным является сам факт модуляции добротности, а не способ, которым она достигается, что доказано наличием узкополосной составляющей в режиме свободной генерации. Описанные явления являются механизмом, позволяющим осуществлять управление спектральными характеристиками излучения голографического лазера.

В разделе 3.5 представлены результаты исследования энергетических, временных и пространственных характеристик генерации лазеров с рассматриваемыми типами резонаторов. Использовались линейки пассивных затворов  $\text{YAG:Cr}^{4+}$ ,  $\text{LiF:F}_2^-$  и  $\text{GSGG:Cr}^{4+}$  с различными начальными пропусками. Насыщающийся поглотитель  $\text{YAG:Cr}^{4+}$ , помещенный так, чтобы множество всех взаимодействующих пучков пересекало его объем, позволяет уменьшать интенсивности усиленных пучков, что повышает контраст решетки коэффициента усиления. Повышение эффективности работы решетки коэффициента усиления приводит к возможности реализации режима с эффективностью преобразования в режим модуляции добротности 55% и пиковой мощностью до 15 МВт.

Из проведенных исследований также следует, что варьируя материал и начальное пропускание затвора, а также энергию и длительность импульса накачки, можно осуществлять управление режимами генерации гигантских импульсов в диапазоне от 100 кВт до 15 МВт, при незначительном изменении энергии в цуге гигантских импульсов и без изменения энергии накачки. Возможно изменять энергию и длительность пика генерации, пиковую мощность, а также плотность пиков в цуге. При этом все режимы сохраняют качество излучения близкое к дифракционному пределу.

В **заклучении** приведены общие результаты представленной работы.

### **Основные результаты диссертационной работы:**

1. Исследован спектр генерации  $\text{Nd:YAG}$  лазера с петлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором на вырожденном четырехволновом взаимодействии непосредственно в лазерной среде при

поперечной мультикиловаттной диодной накачке с мощностью до 13.9 кВт в зависимости от длины области накачки. Выявлено, что ширина полосы генерации обратно пропорциональна длине области накачки. Абсолютные значения ( $>100$  МГц) ширины полосы генерации и выявленная закономерность оказались близки к величинам спектральной селективности голографических решеток коэффициента усиления и ее обратно пропорциональной зависимости от толщины объемной голограммы. Это подтверждает, что механизм лазерной генерации при самонакачивающемся вырожденном четырехволновом взаимодействии в лазерной среде определяется в основном работой решеток коэффициента усиления.

2. Наличие дополнительной петли обратной связи в исследуемом Nd-YAG лазере с многопетлевой схемой резонатора при низкой (припороговой) интенсивности накачки компенсирует недостаток интенсивности накачки благодаря увеличению числа проходов усиливающей лазерной среды за обход резонатора лазерным излучением. Это приводит к повышению интенсивности повторяющихся пиков генерации по сравнению с интенсивностью начального гигантского лазерного импульса при самомодуляции добротности резонатора на решетках усиления с дифференциальным к.п.д. генерации 25 % и выходной энергией до 1.25 Дж. Это также обеспечивает сокращение длительности генерируемых импульсов с 13 до 7 нс и увеличение пиковой мощности до 14 МВт в режиме пассивной модуляции добротности оптически плотным кристаллом YAG:Cr<sup>4+</sup>, что объясняется более быстрым протеканием процессов записи и стирания решеток усиления в активной среде под действием генерируемого лазерного импульса, но при повышении энергии накачки, когда превышение порога генерации приближается к двукратному, эффективность пассивной модуляции добротности в лазере без дополнительных петель оказывается выше.
3. Пассивная модуляция добротности ОВФ-резонатора обусловлена не только насыщением поглощения пассивного затвора, но и модуляцией дифракционной эффективности голографических решеток насыщающегося усиления активной лазерной среды на кристалле Nd<sup>3+</sup>-YAG. Насыщающийся поглотитель YAG:Cr<sup>4+</sup>, помещенный так, чтобы захватывать все взаимодействующие пучки, позволяет уменьшать различие интенсивностей пучков, записывающих решетки усиления, что повышает контраст их интерференции и дифракционную эффективность решеток коэффициента усиления. Повышение эффективности работы решеток коэффициента усиления приводит к реализации режима генерации ОВФ-лазера с эффективностью преобразования в режим модуляции добротности 55% и пиковой мощностью до 14 МВт.

4. Предложены новые схемы резонатора лазера, реализующего обращение волнового фронта в результате шести-, восьми- и десятиволнового взаимодействия, позволяющие получить генерацию джоулевого уровня без выходного зеркала, невзаимного элемента и дополнительных квантронов-усилителей.

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Погода А.П., Ермолаев А.А., Лебедев В.Ф., Сметанин С.Н., Борейшо А.С. Спектральная селективность голографических решеток коэффициента усиления в мощном твердотельном лазере с петлевым резонатором // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013.– № 2 (170).– С. 121–129.
2. Погода А.П., Петров В.М. Спектральная селективность отражательных голограмм в кристалле ВаTiO<sub>3</sub>:Со // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2014.– № 2 (194).– С. 62.– 68.
3. Лебедев В.Ф., Погода А.П., Сметанин С.Н., Борейшо А.С., Федин А.В. Режимы генерации импульсного Nd-YAG-лазера с поперечной полупроводниковой накачкой и многопетлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором // ЖТФ. 2014.– № 12 (84).– С.107-111.
4. Pogoda A.P., Lebedev V.F., Makarchuk P.S., Smetanin S.N., Boreysho A.S. All-solid-state Nd:YAG lasers with self-pumped multiwave-mixing phase conjugate cavities // Optical Memory and Neural Networks. 2013.– V. 22 (4).– P. 267-271.
5. Pogoda A.P., Lebedeva T.B., Yusupov M.R., Liventsov R.A., Lebedev V.F., Boreysho A.S., Gavrilov A.V., Smetanin S.N., Fedin A.V. High power Nd:YAG laser with self-pumped phase-conjugate loop cavity and repetitive pulsed diode-matrix side-pumping // Proc. SPIE 8677, XIX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2012, 86770Z (January 30, 2013)
6. Lebedev V.F., Pogoda A.P., Boreysho A.S., Smetanin S.N., Fedin A.V. Passively Q-switched high-energy all-solid-state holographic Nd:YAG laser with a multiloop cavity, Proc. SPIE 9255, XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014, 925509 (February 3, 2015).
7. Ливенцов Р.А., Бельков К.А., Лебедев В.Ф., Мясников А.А., Погода А.П. Сравнительный анализ применения активных элементов различной геометрии в мощном импульсном твердотельном лазере с поперечной полупроводниковой накачкой // Сборник трудов Международной конференции и семинаров. 2011.– Т79, , Т.1. «Оптика-2011» , Санкт-Петербург, / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: НИУИТМО, 2011. – Т.1. с. 163
8. Лебедев В.Ф., Лебедева Т.Б., Погода А.П., Юсупов М.Р. Импульсный твердотельный Nd-YAG лазер с поперечной полупроводниковой накачкой и петлевым резонатором, реализующим явление обращения волнового

- фронта в активной среде кристалла // Труды четвертой общероссийской молодежной научно-технической конференции. Библиотека журнала «Военмех». Вестник БГТУ, 2012.– № 15.– С. 172-174.
9. Погода А.П., Лебедева Т.Б., Лебедев В.Ф., Борейшо А.С. Импульсный твердотельный голографический Nd-YAG лазер с полупроводниковой накачкой // Труды 22-ой международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». 2012.– СПб: Политехнический университет.– С.112-113.
  10. Погода А.П., Лебедева Т.Б., Лебедев В.Ф., Борейшо А.С. Импульсный твердотельный голографический Nd-YAG лазер с полупроводниковой накачкой, Сборник докладов 22-ой международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». 2012.– СПб: Политехнический университет.– С. 256-266.
  11. Pogoda A.P., Lebedeva T.B., Yusupov M.R., Liventsov R.A., Lebedev V.F., Boreysho A.S., Gavrilov A.V., Smetanin S.N., Fedin A.V. Joule range high beam quality Nd:YAG laser with self-pumped phase-conjugate loop cavity and repetitive pulsed diode-matrix side-pumping // Laser Optics. 2012.– Proc., ThR1-20, 0386
  12. Pogoda A.P., Lebedeva T.B., Yusupov M.R., Lebedev V.F., Smetanin S.N. Analysis of gain-grating diffraction efficiency and oscillation in the self-pumped phase-conjugate multi-loop laser cavity // Laser Optics. 2012.– Proc. 0404.
  13. Погода А.П., Лебедев В.Ф., Лебедева Т.Б., Борейшо А.С. Мощный импульсный Nd-YAG голографический лазер с поперечной полупроводниковой накачкой и пассивной модуляцией добротности // Труды XX Международной Конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии».– Новороссийск, 2012.– С. 38-39.
  14. Погода А.П., Юсупов М.Р., Лебедев В.Ф., Сметанин С.Н. Анализ дифракционной эффективности решеток коэффициента усиления в многопетлевом голографическом Nd<sup>3+</sup>:YAG лазере // Труды VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО – 2012), 2012.– С. 26-28.
  15. Ермолаев А.А., Погода А.П., Лебедев В.Ф., Вальтман А.П. Исследование принципов уменьшения ширины полосы генерации импульсного голографического твердотельного лазера // Труды пятой общероссийской молодежной научно-технической конференции.– Библиотека журнала «Военмех».– Вестник БГТУ, 2013.– № 17.– С. 112-114.
  16. Погода А.П., Лебедев В.Ф., Борейшо А.С. Сравнение различных схем резонаторов импульсных голографических лазеров // Труды 23-ей международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», СПб: Политехнический университет, 2013, С.118.

17. Lebedev V.F., Pogoda A.P., Boreysho A.S., Smetanin S.N., Spectral selectivity of gain gratings in the solid-state holographic laser with a multiloop self-pumped phase-conjugate cavity at powerful pumping by 2D diode stacks // ICONO/LAT 2013 Proc.
18. Погода А.П., Лебедев В.Ф., Особенности режима пассивной модуляции добротности импульсного твердотельного голографического лазера // Сборник трудов Международной конференции и семинаров., Т.1. «Оптика-2013», Санкт-Петербург, 2013 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: НИУИТМО, 2013,
19. Макаrchук П.С., Лебедев В.Ф., Погода А.П., Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия жидкостей // Сборник трудов Международной конференции и семинаров., Т.1. «Оптика-2013», Санкт-Петербург, 2013/ Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: НИУИТМО, 2013
20. Погода А.П., Лебедев В.Ф., Бореysho А.С. Оптимизация геометрии многопетлевого резонатора голографического лазера // Труды XXI Международной Конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии», Новороссийск, 2013, с. 34 – 35.
21. Макаrchук П.С., Лебедев В.Ф., Погода А.П., Тельная Ю.С. Лазерно-искровая спектроскопия микропримесей в жидкости // Труды XXI Международной Конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии», Новороссийск, 2013, с. 35 – 36.
22. Lebedev V.F., Pogoda A.P., Smetanin S.N., Makarchuk P.S., Boreysho A.S., Fedin A.V., High-energy compact all-solid-state holographic Nd:YAG laser with a multiloop cavity // in Advanced Solid-State Lasers Congress, G. Huber and P. Moulton, eds., OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper ATu3A.44.
23. С.В. Ивакин, Погода А.П. Современные подходы к созданию мощных твердотельных лазеров // Труды международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация - 2014», СПб: Политехнический университет, 2014, с.107.
24. Макаrchук П.С., Лебедев В.Ф., Погода А.П., Пономаренко В.А. Возможности применения количественного ЛИЭС анализа в процессе лазерной обработки материала // Труды международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация - 2014», СПб: Политехнический университет, 2014, - с.114-115.
25. Погода А.П., Петров В.М. Спектральная селективность отражательных голограмм в ВаTiO<sub>3</sub>:Со // Труды международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация - 2014», СПб: Политехнический университет, 2014, - с.142.



26. Ershkov M.N., Vasiliev A.Yu., Smetanin S.N. Fedin A.V., Lebedev V.F., Pogoda A.P., Boreysho A.S. Numerical simulation of a passive Q-switching operation of the diode-pumped solid-state laser with a multiloop self-phase-conjugate cavity // Laser Optics, 2014 International Conference, ( June 30 2014- July 4 2014), IEEE, 2014. – 1 page.
27. Lebedev V.F., Pogoda A.P., Boreysho A.S., Smetanin S.N., Fedin A.V. Passively Q-switched high-energy all-solid-state holographic Nd:YAG laser with a multiloop cavity // The 20th international symposium on high power laser systems and applications, 25-29 august 2014. - с.36.

#### **Список цитируемой литературы:**

1. Грибков А.С., Евдокимов Р.А., Синявский В.В., Соколов Б.А., Тугаенко В.Ю. Перспективы использования беспроводной передачи электрической энергии в космических транспортных системах, Известия РАН: Энергетика, 2, 2009. - С. 118-123.
2. Rubenchik A. M., Fedoruk M. P. and Turitsyn S. K., The effect of self-focusing on laser space-debris cleaning, Light: Science & Applications 3, 2014. - e159.
3. Rehse S. J., Salimnia H. and Miziolek A.W. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS): an overview of recent progress and future potential for biomedical applications, Journal of Medical Engineering & Technology, 36(2) 2012, - pp. 77–89.
4. Anabitarte F., Cobo A., Lopez-Higuera J.M. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Fundamentals, Applications, and Challenges, ArticleID285240, 2012. - 12 pages.
5. Скворцов Л.А. Лазерные методы обнаружения следов взрывчатых веществ на поверхностях удаленных объектов, Квантовая электроника, 42(1), 2012. – С. 1-11.
6. Кашеев Б. Л. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Кашеева Б. Л. , Прошкина Е. Г. , Лагутина М. Ф. . — Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. — 426 с.
7. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. – СПб: Лань, 2013. – 288 с.
8. Басиев Т.Т. , Федин А.В. , Гаврилов А.В. , Сметанин С.Н. , Кялбиева С.А. , Одномодовый ИАГ:Nd-лазер с самонакачивающимся фазово-сопряженным петлевым резонатором, Квант. электроника, 27(5), 1999. – С. 145–148.
9. Fedin A. V., Kyalbieva S.A., Gavrillov A.V., Smetanin S.N. Self-Q-switching at phase conjugation in active media, SPIE 4644, Seventh International Conference on Laser and Laser-Information Technologies, (30 April 2002) 7 pages
10. Eremeykin O.N., Antipov O.L., Minassian A., Damzen M.J. Efficient continuous-wave generation in a self-organizing diode-pumped Nd:YVO4 laser

- with a reciprocal dynamic holographic cavity, *Optics Letters*, 29 (20), 2004. – pp. 2390-2392
11. Antipov O.L., Ereneykin O.N., Ievlev A.V., Savikin A.P. “Diode-pumped Nd-YAG laser with reciprocal dynamic holographic cavity”, *Optics Express*, 12 (18), 2004. – pp. 4313 - 4319
  12. Zendzian W., Jabczynski J. K., Kaskow M., Gorajek L., Kwiatkowski J., Kopczynski K., Passive Q-switching operation in self-adaptive, diode-side-pumped, Nd:YAG slab laser, in *Advanced Solid-State Lasers Congress*, G. Huber and P. Moulton, eds., OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper ATu3A.53.
  13. Soulard R., Brignon A., Raby S., Durand E., Moncorgé R., Diode-pumped Nd:YAG self-adaptive resonator with a high-gain amplifier operating at 100 Hz, *Applied Physics B*, 106 (2), 2012. – pp. 295-300
  14. Басиев Т.Т. , Гаврилов А.В., Сметанин С.Н. , Федин А.В. , Управление фазовой синхронизацией многоканальной голографической неодимовой лазерной системы с помощью пассивного лазерного затвора, *Доклады Академии Наук*, 430(3), 2010. - С. 321–325.