Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научноисследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» и Федеральное государственное бюджетное учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

На правах рукописи

Claffer

# Сафронова Елена Сергеевна

# ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ КВАНТРОНЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА, РАБОТАЮЩИЕ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ БЕЗ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ

Специальность 01.04.21 Лазерная физика

# ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Москва-2022

Работа выполнена на Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

# Научный руководитель:

Дормидонов Александр Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, начальник научно-исследовательского отдела, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

# Официальные оппоненты:

Ребров Сергей Григорьевич – доктор технических наук, начальник отдела, Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

Коняшкин Алексей Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук

# Ведущая организация:

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»

Защита диссертационной работы состоится «\_\_\_\_» \_\_\_\_2022 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 002.063.02 кандидат физико-математических наук

А.А. Ушаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Предмет диссертации и ее актуальность.** Наносекундные твердотельные лазеры (ТТЛ) ближнего инфракрасного (ИК) диапазона с лазерной диодной накачкой находят все больше применений в устройствах различного назначения. Для лазерных дальномеров, целеуказателей, систем обнаружения и оптической подсветки объектов, системах лазерной искровой спектроскопии (LIBS) и лидарах, в перспективных лазерных системах зажигания жидкостных ракетных двигателей и газо-поршневых двигателях внутреннего сгорания, в качестве предусилителей в современных установках мегаджоульного уровня для проведения экспериментов по управляемому инерциальному термоядерному синтезу и исследованию свойств вещества в экстремальных состояниях необходимы источники лазерных импульсов с энергией до 100 мДж и изменяемой частотой повторения от одиночного импульса до 50 Гц и более [П1, П5].

В ряде случаев, использование данных квантронов накладывает требование на их работоспособность в температурном диапазоне от -50 до +50 °C. Также часто предъявляются условие ограниченного электропотребления и требование мгновенной готовности лазерной системы к работе как в режиме одиночного импульса, так и на заданной частоте следования импульсов (т.е. работа в заведомо нестационарном режиме), которые затрудняют возможность активной термостабилизации. Учитывая, что длина волны лазерных диодов накачки значительно зависит от температуры (0.15 - 0.3 нм°C), то она специально подбирается так, чтобы совпадать со спектром поглощения активного элемента (АЭ). При изменении температуры лазерного диода узкополосное излучение накачки может выходить из полосы максимального поглощения излучения активной среды, что приводит к значительному увеличению длины поглощения (уменьшению коэффициента поглощения). При этом происходит изменение распределения инверсной населенности в активном элементе, что сказывается на режиме генерации, эффективности и работоспособности лазера.

Важным фактором, определяющим КПД лазерной системы, является эффективность распределения излучения накачки в активном элементе. Основная сложность связана с существенно различной расходимостью излучения лазерных диодов в перпендикулярных плоскостях, что затрудняет использование сферической оптики для фокусировки излучения накачки. Необходимо подобрать такую схему оптической накачки АЭ, чтобы форма профиля инверсной населенности в поперечном сечении кристалла была инвариантна к изменению температуры в диапазоне от – 50 до + 50 °C.

В настоящее время существует два основных типа оптических схем накачки АЭ с помощью полупроводниковых излучателей: продольная (торцевая) и поперечная (боковая)

накачки. В большинстве трудов рассматривается работоспособность лазерных систем в лабораторных условиях (20 - 25 °C). В работах Л. Голдберга использовалась схема торцевой накачки, где за счет большой длины взаимодействия излучения накачки с АЭ была получена лазерная генерация в температурном диапазоне – 20 до + 50 °C. В РФЯЦ-ВНИИТФ создан лазер с поперечной диодной накачкой, активной модуляцией добротности и кондуктивной системой охлаждения на основе контурной тепловой трубки. Данный лазер работает в диапазоне от – 50 до + 65 °C с активной системой термостабилизации.

Таким образом, на сегодняшний день не предложено готового решения по созданию твердотельного наносекундного лазера ближнего ИК - диапазона с кондуктивной системой охлаждения, работоспособного в широком температурном диапазоне от – 50 до + 50 °C без активной системы термостабилизации.

Разработка твердотельного лазерного генератора с диодной накачкой АЭ без активной системы термостабилизации и нечувствительного к изменению температуры является сложной задачей современной физики. Комплексное математическое моделирование, включающее в себя расчеты по пространственному распределению инверсной населенности в поперечном сечении АЭ, термодинамический расчет квантрона, а так же поиск оптимальных параметров резонатора наносекундных лазеров с пассивной модуляцией добротности – является необходимым инструментом, позволяющим решить данную задачу. Современные работы П. П. Николаева, И. Вана, Д. Ляна, К. Ду, С. Ли, В. В. Кийко, С. Б. Саттона, С. Д. Джексона, Р. Кошеля, которые затрагивают этот вопрос, не объединяют расчеты в один метод математического моделирования квантрона.

Таким образом, создание комплексной математической модели и последующая разработка высокоэффективных твердотельных квантронов с полупроводниковой накачкой нового поколения, расширение их функциональных возможностей, достижение их работоспособности в широком температурном диапазоне ( $\Delta T = 100$  °C) без активной термостабилизации по-прежнему является актуальной задачей, решение которой способно обеспечить значительный прогресс в большинстве из перечисленных выше направлений.

#### Цель работы

Разработка метода создания твердотельных лазеров и усилителей на базе квантронов с диодной накачкой без активной системы термостабилизации источников накачки и активного элемента, работающих в температурном диапазоне от – 50 до + 50 °C. Для ее решения были поставлены и выполнены следующие **задачи**:

1. Разработка комплексной математической модели твердотельного квантрона с диодной накачкой.

2. Экспериментальное исследование спектральных и энергетических характеристик решеток лазерных диодов в температурном диапазоне  $\Delta T > 100$  °C.

3. Численное и экспериментальное определение распределения инверсной населенности в поперечном сечении активного элемента при различной геометрии поперечной накачки в температурном диапазоне от -50 до +50 °C.

4. Расчет тепловыделения квантрона с кондуктивным охлаждением активного элемента при работе с различной частотой следования импульсов.

5. Численное и экспериментальное определение параметров усилителей и импульсных лазеров на основе твердотельных Nd<sup>3+</sup>:YAG квантронов с кондуктивным охлаждением активного элемента.

6. Экспериментальное исследование работоспособности компактного  $Nd^{3+}$ : YAG лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности в температурном диапазоне от -50 до +50 °C без активной системы термостабилизации.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложена комплексная математическая модель для описания Nd<sup>3+</sup>:YAG квантрона с поперечной лазерной диодной накачкой, позволяющая выбирать оптимальную геометрию накачки активного элемента, осуществлять термодинамический расчет квантрона, а также подбирать оптимальные параметры лазерного резонатора.

2. Впервые предложен метод математического моделирования лазеров с диодной накачкой, отличающийся использованием множителей Лагранжа для нахождения условного экстремума решений трансцендентных уравнений, описывающих процессы генерации, и позволяющий оптимизировать параметры резонаторов с пассивной модуляцией добротности для получения максимальной выходной энергии лазерного излучения.

3. Впервые экспериментально проведены исследования спектральных и энергетических параметров лазерных диодных решеток в температурном диапазоне  $\Delta T > 100$  °C. Установлено, что во всем рассмотренном температурном диапазоне смещение длины волны излучения лазерных диодных решеток составляет 0,28 нм/ °C, что хорошо согласуется с теорией.

4. Предложена и теоретически обоснована схема поперечной накачки цилиндрического  $Nd^{3+}$ : YAG кристалла решетками лазерных диодов, формирующая в поперечном сечении активного элемента распределение инверсной населенности, профиль которой практически инвариантен к изменению температуры в диапазоне от – 50 до + 50 °C.

5. Впервые численно рассчитана и экспериментально подтверждена геометрия фокусировки излучения лазерных диодных решеток, расположенных с пяти сторон вокруг кристалла Nd<sup>3+</sup>:YAG диаметром 5 мм, единой цилиндрической лейкосапфировой линзой диаметром 50 мм, которая обеспечивает однородность пространственного распределения

инверсной населенности более 90 % в поперечном сечении лазерного кристалла, что позволяет усиливать лазерные импульсы без искажения профиля пучка.

6. Предложено кондуктивное охлаждение активного элемента при помощи лейкосапфировой линзы без жидкого хладагента внутри квантрона, обеспечивающее стабильную работу квантрона с пиковой мощностью лазерной диодной накачки до 20 кВт при частоте повторения 50 Гц.

7. Впервые экспериментально подтверждена работоспособность  $Nd^{3+}$ : YAG лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности, генерирующего наносекундные лазерные импульсы со стабильностью выходной энергии не менее 70 % в температурном диапазоне от – 50 до + 50 °C без активной системы термостабилизации.

# Практическая ценность работы

1. Использование предложенной комплексной математической модели квантрона с поперечной диодной накачкой позволяет значительно сократить время и повысить качество разработки лазеров и усилителей с заданными параметрами выходного излучения. Данная модель использовалась при создании квантронов в рамках НИОКР ФГУП «ВНИИА» и «ИОФ РАН».

2. Предложенная автором схема поперечной диодной накачки  $Nd^{3+}$ : YAG кристалла квантрона с применением одной фокусирующей цилиндрической линзы позволяет получать в поперечном сечении кристалла устойчивое пространственное распределение инверсной населенности заданного профиля. Это может быть использовано для компактных твердотельных лазеров и усилителей различного назначения, работающих в температурном диапазоне от – 50 до + 50 °C без активной системы термостабилизации в режиме мгновенной готовности.

3. Предложенный способ кондуктивного охлаждения активного элемента квантрона при помощи цилиндрической лейкосапфировой линзы, в качестве теплоотвода, позволяет отказаться от жидкого хладагента внутри корпуса.

#### Положения, выносимые на защиту

1. Модель математического моделирования твердотельных лазеров с диодной накачкой, отличающаяся использованием множителей Лагранжа для нахождения условного экстремума решений трансцендентных уравнений, описывающих процессы генерации, позволяет оптимизировать параметры резонаторов с пассивной модуляцией добротности, выбирать эффективную геометрию накачки активного элемента, осуществлять термодинамический расчет.

2. Схема поперечной диодной накачки Nd<sup>3+</sup>:YAG кристалла квантрона, отличающаяся применением одной фокусирующей цилиндрической линзы, обеспечивает либо однородность

пространственного распределения инверсной населенности более 90 % в поперечном сечении кристалла, что позволяет усиливать лазерные импульсы без искажения профиля пучка, либо формирование устойчивого параболического профиля инверсной населенности. что Nd<sup>3+</sup>:YAG работоспособность обеспечивает лазера температурном в диапазоне от -50 до +50 °C без активной термостабилизации.

3. Способ кондуктивного охлаждения активного элемента квантрона, отличающийся использованием цилиндрической линзы из лейкосапфира, в качестве теплоотвода, обеспечивает стабильную работу Nd<sup>3+</sup>:YAG квантрона с пиковой мощностью лазерной диодной накачки до 20 кВт и частоте повторения до 50 Гц без использования жидкого хладагента внутри корпуса.

**Объектом исследования** является система диодной накачки твердотельных Nd<sup>3+</sup>:YAG квантронов, работающих в широком температурном диапазоне без жидкостного охлаждения источников накачки и активного элемента для лазеров и усилителей ближнего ИК-диапазона.

Методы исследования. При решении задач диссертационной работы были использованы методы математического моделирования. Методом геометрической оптики было реализовано численное моделирование процесса накачки активного элемента квантрона с помощью трассировки лучей в программе ZEMAX. Расчет тепловой модели проводился численно в среде Comsol Multiphysics (раздел «Heat Transfer in a Solid») методом конечных элементов. Для численного моделирования процесса генерации наносекундных импульсов в лазерах с пассивной модуляцией добротности был создан программный пакет в среде разработки MATLAB. Программа осуществляет численное интегрирование дифференциальной системы балансных уравнений.

Методы экспериментального исследования основывались на анализе спектральных и энергетических характеристик лазерных диодных решеток, генерационных характеристик созданных в работе квантронов, и параметров распределения инверсной населенности в поперечном сечении активного элемента. Исследования проводились в широком температурном диапазоне от -50 до +50 °C.

**Личный вклад автора.** Автор непосредственно участвовал в постановке задач; определении способов их решения; проведении математического моделирования и экспериментов; обработке, анализе и интерпретации полученных данных; написании работ и апробации материала. Все результаты, предоставленные в диссертационной работе, получены **автором лично** либо при его решающем участии.

Достоверность 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.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на: XV научно-технической конференции «ВНИИА-2021» (Россия, Москва, 2021 г.); XIV Международной конференции по импульсным лазерам и применениям лазеров «АМРL-2019» (Россия, Томск, 2019 г.); 18<sup>th</sup> International Conference «Laser Optics 2018» (Россия, Санкт-Петербург, 2018 г.); XI Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Россия, Саров, 2017 г.); X Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Россия, Саров, 2017 г.); X Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Россия, Саров, 2016 г.); X научно-технической конференции «ВНИИА-2016» (Россия, Москва, 2016 г.); International Conference «Laser System and Materials» (Беларусь, Минск, 2016 г.); 15-ой научно-технической конференции «Молодежь в науке» (Россия, Саров, 2016 г.).

**Публикации.** Основные результаты, изложенные в работе, опубликованы в 10 научных работах, из них 3 статьи, включенные в перечень рецензированных научных изданий ВАК. Список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата.

#### Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материал изложен на 114 страницах, содержит 73 иллюстрации и 6 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 131 ссылку.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы, а также приведены данные о структуре и объеме диссертации.

**Первая глава** посвящена подробному обзору и анализу состояния на текущий момент исследований в области твердотельных лазеров с модуляцией добротности на основе Nd<sup>3+</sup>:YAG квантронов с поперечной диодной накачкой по материалам открытых публикаций.

В главе рассматриваются виды импульсных лазерных диодов и существующие на их основе типы конструкций лазерных диодных решеток (ЛДР) для накачки активной среды твердотельных лазеров. Из открытых печатных источников представлены основные характеристики ЛДР наиболее известных производителей. Анализируются современные твердотельные лазеры с диодной накачкой, в частности, работающие в широком температурном диапазоне. Рассматриваются оптические системы подвода излучения накачки, современные усилители на основе квантронов с диодной накачкой. Также проведен обзор существующих математических моделей расчета квантронов с диодной накачкой.

Обзор и анализ опубликованных работ показали, что актуальной и важной научнотехнической задачей является разработка квантрона средней и высокой мощности, являющегося основой ТТЛ и лазерных усилителей ближнего ИК – диапазона, с устойчивым распределением инверсной населенности в поперечном сечении активного элемента, нечувствительного к изменению температуры в диапазоне от – 50 до + 50 °C и работающего в режиме мгновенной готовности.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке комплексной математической модели Nd<sup>3+</sup>:YAG квантронов и наносекундных ТТЛ лазеров на их основе с поперечной лазерной диодной накачкой. Модель позволяет рассчитывать распределение инверсной населенности в поперечном сечении АЭ при заданной геометрии накачки, выбирать оптимальную геометрию накачки АЭ, осуществлять термодинамический расчет квантрона, формировать требования к оптимальным параметрам лазерного резонатора, а так же описывать динамику генерации наносекундных импульсов в Nd<sup>3+</sup>:YAG лазерах с пассивной модуляцией добротности.

В главе приведен метод расчета и оптимизации системы оптической накачки АЭ квантрона в программном пакете ZEMAX. Для определения максимальной эффективности поглощения излучения накачки в зависимости от температуры ЛДР, с помощью трассировки лучей по методу Монте-Карло, было рассчитано расположение ЛДР вокруг боковой поверхности, а также вдоль активного элемента. Также был произведен расчет фокусирующей оптики с целью оптимизации распределения поглощенной энергии накачки для достижения однородного распределения энергии по сечению активной среды.

При проектировании квантронов высокой и средней мощности важной задачей является исследование тепловой нагруженности элементов квантрона, а именно ЛДР и АЭ. Расчет проводился численно в среде Comsol Multiphysics (раздел «Heat Transfer in a Solid») методом конечных элементов. В данном приближении теплопередача происходит только за счет теплопроводности. Поэтому численно решается уравнение теплопроводности с граничными условиями второго рода. В случае, когда внешняя поверхность корпуса квантрона омывается хладагентом, температура корпуса считается постоянной. Результатом расчета в пакете Comsol Multiphysics является динамическая картина распределения температуры в элементах квантрона в зависимости от средней мощности ЛДР накачки и конфигурации системы охлаждения.

Третьим этапом математического моделирования был расчет оптимальных параметров лазерного резонатора. Для численного моделирования процесса генерации наносекундных импульсов в лазерах с пассивной модуляцией добротности был создан программный пакет в среде разработки MATLAB. Программа осуществляет численное интегрирование дифференциальной системы скоростных уравнений. Созданный программный пакет позволяет

быстро оценивать выходные характеристики лазерного излучения при заданных параметрах лазера, находить оптимальные конфигурации резонаторов и формулировать необходимые требования к системам накачки.

На основе аналитического решения системы уравнений баланса показано, что в случае режима пассивной модуляции добротности для заданной мощности оптической накачки существует пара значений начального пропускания насыщающегося поглотителя  $T_{ini}^{opt}$  и выходного зеркала  $R_{out}^{opt}$  оптического резонатора, при которых энергия выходного лазерного импульса является максимальной. Оптимальное значение коэффициента начального пропускания  $T_{ini}^{opt}$  насыщающегося поглотителя равно:

$$T_{ini}^{opt} = G_0^{-\frac{\phi_{opt}}{1-\delta}}, \quad \phi_{opt} = \frac{\left(1 - e^{-\rho_{opt}}\right)\frac{1}{\rho_{opt}} - 1}{\left(1 - e^{-\alpha\rho_{opt}}\right)\frac{1}{\alpha\rho_{opt}} - 1}, \quad \alpha \equiv \frac{M\sigma_{SA}^{gs}}{\beta\sigma_{GM}}.$$
(1)

Выражение для оптимального коэффициента отражения  $R_{out}^{opt}$  выходного зеркала имеет вид:

$$R_{ini}^{opt} = G_0^{-\psi_{opt}}, \qquad \psi_{opt} = 2 \left[ 1 - \frac{\gamma_1}{2 \ln G_0} - \frac{\phi_{opt}}{1 - \delta} \right], \tag{2}$$

где *G*<sub>0</sub> — начальный или пороговый коэффициент усиления активной среды;

 $\delta$  — отношение сечений поглощения насыщающегося поглотителя в возбужденном и основном состоянии на длине волны лазерного излучения;

 $\rho_{opt}$ — логарифм отношения инверсной населенности  $\tilde{N}_{tr}$ , запасенной в среде до начала генерации импульса, и остаточной инверсной населенности  $N_f$  после выхода импульса из резонатора;

М — отношение эффективных площадей моды в активном элементе и поглотителе;

*β* — коэффициент, описывающий изменение разности заселенностей рабочих уровней при излучении одного фотона;

σ<sub>GM</sub> — поперечное сечение переходов между рабочими уровнями;

 $\sigma_{SA}^{gs}$  — поперечное сечение поглощения в основном состоянии;

γ<sub>1</sub> — коэффициент, который характеризует потери в резонаторе без учета выходного зеркала и насыщающегося поглотителя.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования спектральных и энергетических характеристик излучения ЛДР в температурном диапазоне  $\Delta T > 100^{\circ}$ С. Рассматривались пять ЛДР СЛМ-3 (ООО НПП «Инжект», Россия) с длиной волны около 807 нм при T = 24 °С. Суммарная мощность излучения каждой ЛДР СЛМ-3 составляет не менее 1,25 кВт при токе электрической накачки 28 А и напряжении питания 110 В [П2, П8, П9, П11].

Установлено, что зависимость центральной длинны волны излучения ЛДР от температуры является линейной во всем рассмотренном диапазоне. Измеренное смещение

длины волны излучения лазерных диодов в рассмотренном температурном диапазоне составляет 0,28 нм/ °С (Рис.1 а), что хорошо согласуется с расчетным значением  $d\lambda/dT$ . При этом ширина и форма спектра излучения остаются неизменными.

На Рис. 1 (б) представлено изменение мощности излучения ЛДР, измеренное в режиме стабилизации амплитуды тока (28,0 ± 0,2 Å). С ростом температуры происходит уменьшение мощности излучения, которое при нагреве до 70 °C достигает 25 % от номинального значения при T=25 °C.



Рис. 1. Зависимость от температуры центральной длины волны спектра излучения (а) и мощности (б) ЛДР СЛМ-3

Проведена теоретическая оценка длины поглощения  $l_{abs}$  в лазерном кристалле Nd<sup>3+</sup>:YAG излучения ЛДР СЛМ-3 с центральной длиной волны равной 811 нм (при температуре T = 24 °C) и шириной спектра 2 нм при изменении температуры в диапазоне  $\Delta T > 100$ °C. В рассмотренном диапазоне величина  $l_{abs}$  изменяется от 2 до 12 мм (Рис. 2 сплошная линия). Увеличение ширины спектра излучения ЛДР до 10 нм позволяет сократить в два раза изменение  $l_{abs}$ , по сравнению с узкополосной накачкой (Рис. 2 пунктирная линия), что приводит к уменьшению температурной зависимости эффективности поглощения накачки в лазерном кристалле.



Рис. 2. Длина поглощения  $l_{abs}$  излучения ЛДР СЛМ-3 в кристалле Nd<sup>3+</sup>:YAG 1 % ат.

Таким образом, использование накачки с центральной длиной волны 811 нм при 24 °C, (808,9 нм при 17 °C) и шириной спектра излучения от 2 нм и более, позволит обеспечить

эффективную работоспособность Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера в широком температурном диапазоне без предварительной термостабилизации ЛДР.

**Четвертая глава** посвящена исследованию возможности создания  $Nd^{3+}$ : YAG квантрона с диодной накачкой и кондуктивным охлаждением АЭ, работающего в температурном диапазоне от – 50 до + 50 °C без активной системы термостабилизации, на основе комплексного математического моделирования.

В главе представлены различные схемы боковой накачки активного элемента: трехсторонняя, пятисторонняя (Рис. 3) и девятисторонняя. Конструктивный принцип построения данных схем заключается в том, что АЭ вклеивается в цилиндрическую фокусирующую линзу, представляющую собой полированный цилиндр из лейкосапфира с коэффициентом преломления n = 1,76. Лейкосапфир имеет большую теплопроводность (k = 25,2 Вт/м·К при 26 °C) и эффективно отводит тепло от АЭ, что позволяет обеспечить работу без жидкостного хладагента. В этом случае выделяемое тепло от кристалла через линзу и медный отражатель передается на боковую поверхность корпуса квантрона, откуда при высоких частотах повторения следования импульса снимается жидким хладагентом. Данная схема «сухого» квантрона обеспечивает отсутствие жидкости внутри корпуса, что обеспечивает надежность, простоту изготовления и обслуживание устройства (Рис. 4).





Рис. 3 Схема «сухого» квантрона при пятисторонней поперечной диодной накачке с одной фокусирующей линзой

Рис. 4. Фотография действующего макета «сухого» квантрона с пятисторонней накачкой

Экспериментальная регистрация распределения люминесценции в поперечном сечении АЭ при различной температуре ЛДР СЛМ-3 с центральной длиной волны 808,9 нм при 20 °C проводилась по схеме (Рис. 5). Спонтанная люминесценция, интенсивность которой пропорциональна инверсной населенности, регистрировалась ССD камерой Ophir SP620U через объектив Jupiter с фокусным расстоянием 85 мм и светосилой 1/2. На камеру фокусировали картину распределения люминесценции в середине АЭ и снимали через 20 мкс после включения накачки (Рис. 6 а). Для нагрева квантрон был обмотан токопроводящей проволокой с суммарным сопротивлением 1 Ом, через которую пропускали ток величиной 4 – 5 А. Температура ЛДР СЛМ-3 определялась по показаниям терморезистора, закрепленного на теплоотводе диодной решетки.



1 — квантрон; 2 — объектив; 3 — ССД камера Ophir SP620U.
 Рис. 5. Схема экспериментальной регистрации распределения спонтанной люминесценции в поперечном сечении активного элемента

Методами геометрической оптики в пакете ZEMAX было реализовано численное моделирование процесса накачки АЭ квантрона и построена картина распределения поглощенного излучения накачки в поперечном сечении АЭ (Рис. 6 б).



Рис. 6. Экспериментальная картина распределения спонтанной люминесценции с соответствующим диаметральным профилем накачки (а) и расчетная картина поглощения излучения (б) в поперечном сечении активного элемента при пятисторонней накачке, *T*=20 °C

Пиковая интенсивность люминесценции (зеленые точки) соответствует максимумам распределения инверсной населенности (синяя линия) с изменением температуры (Рис. 7). Яркость пятна накачки увеличивается с увеличением интенсивности люминесценции. Численное моделирование и экспериментальные исследования хорошо согласуются между собой и показывают, что реализованная схема поперечной накачки решетками лазерных диодов, расположенных с пяти сторон вокруг кристалла Nd<sup>3+</sup>:YAG диаметром 5 мм и сфокусированных одной цилиндрической лейкосапфировой линзой диаметром 20 мм, формирует максимум инверсной населенности (люминесценции в случае эксперимента) в центре кристалла, то есть профиль имеет параболический вид и практически не меняется для продольной координаты (Рис. 6). В случае использования квантрона в составе лазерного

излучателя такое пятно накачки в сечении АЭ является удовлетворительным, так как согласуется с модой оптического резонатора.



Рис. 7. Пиковая интенсивность люминесценции активного элемента (зеленые точки) и теоретическая зависимость максимума инверсной населенности (синяя кривая)

Необходимым условием при использовании квантронов в качестве лазерных усилителей является однородность распределения поглощенной накачки, а, следовательно, инверсной населенности и коэффициента усиления в сечении лазерного кристалла, что контролируется по однородности интенсивности люминесценции. Для формирования однородного профиля поглощенной накачки численно было предложено несколько моделей квантрона с усовершенствованной геометрией накачки активного элемента.

Оптимизация системы накачки в ZEMAX показала, что увеличение диаметра центральной цилиндрической лейкосапфировой линзы до 50 мм позволяет получить однородное распределение плотности поглощенной энергии излучения накачки в сечении АЭ (Puc.8).



Рис. 8 Расчетное распределение плотности поглощенной энергии излучения накачки (а) и экспериментальное распределение люминесценции (б) в плоскости поперечного сечения АЭ с соответствующим диаметральным профилем при  $l_{abs}$  = 3,5 мм для квантрона с 5-ти сторонней накачкой и фокусирующей линзой диаметром 50 мм

Степень однородности  $\Delta$  распределения поглощенной накачки определяется как усредненное отношения разницы максимального и минимального значений к среднему

значению интенсивности поглощенного излучения (люминесценции в случае эксперимента) в рабочем диапазоне, составляющем 80% от поперечного сечения АЭ, и имеет вид:

$$\Delta = 1 - \left\langle \frac{2(I_{\text{max}} - I_{\text{min}})}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \right\rangle$$
(3)

Степень однородности пятна поглощенной накачки в поперечном сечении АЭ для расчета и эксперимента хорошо согласуются. При длине поглощения накачки  $l_{abs} = 10$  мм составляет 60 %, а при  $l_{abs} = 3,5$  мм около 90%.

Экспериментальные результаты хорошо совпадают с теоретическими расчетами и показывают, что для квантрона с пятисторонней диодной накачкой АЭ диаметром 5 мм и фокусировке излучения лейкосапфировой цилиндрической линзой диаметром 50 мм, однородность пространственного распределения инверсной населенности в поперечном сечении активного элемента составляет 90 %, что позволяет усиливать лазерные импульсы без искажения профиля пучка.

Для оценки эффективности теплоотвода у «сухого» квантрона был произведен термодинамический расчет Nd<sup>3+</sup>:YAG квантрона в среде Comsol Multiphysics методом конечных элементов. Рассматривался квантрон с пятисторонней диодной накачкой в два кольца, с общей пиковой мощностью накачки более 20 кВт. При работе квантрона на частоте 25 Гц с длительностью импульсов накачки 250 мкс средняя мощность тепла, выделяемого 10-ю ЛДР СЛМ-3, и средняя световая мощность излучения накачки, поглощаемая АЭ, составляет около 125 Вт. Тепловыделение в кристалле Nd:YAG составляет около 40%, поэтому в наших условиях тепловыделение в АЭ составило около 50 Вт, а полное – около 175 Вт.

На Рис. 9 представлено рассчитанное распределение температуры вдоль сечения квантрона для различных моментов времени. При работе квантрона на частоте 25 Гц происходит выход на стационарную температуру 39 °C у АЭ за 200 с, у ЛДР на 28 °C за 4 с (Рис. 9 а).

Для определения ограничения по средней мощности учитывается длина поглощения  $l_{abs}$  излучения ЛДР СЛМ-3 в кристалле Nd<sup>3+</sup>:YAG (Рис. 2) и световая мощность ЛДР в широком температурном диапазоне (Рис.1 б). При f = 50 Гц ЛДР нагревается до 36.5 °C, а АЭ до 82 °C, квантрон еще находится в зоне предельных допустимых температурных значений (Рис. 9 б). А уже при f = 100 Гц температура ЛДР достигает 50 °C, что приводит к падению эффективности квантрона.

Таким образом, применение кондуктивного охлаждения АЭ при помощи окружающей его лейкосапфировой цилиндрической линзы обеспечивает стабильную работу Nd<sup>3+</sup>:YAG квантрона с пиковой мощностью лазерной диодной накачки до 20 кВт при частоте повторения

50 Гц и средней мощности тепловыделения около 350 Вт без использования жидкого хладагента внутри корпуса.



Рис. 9. Температура элементов квантрона при частоте следования импульсов накачки 25 Гц (а) и 50 Гц (б)

В пятой главе рассматривается возможность использования твердотельного  $Nd^{3+}$ : YAG квантрона с лазерной диодной накачкой в качестве импульсного усилителя слабого сигнала и лазера с модуляцией добротности, генерирующего импульсы наносекундной длительности. Измерены коэффициенты усиления, подобраны оптимальные параметры лазерного резонатора и продемонстрирована работоспособность  $Nd^{3+}$ : YAG лазера с пассивной модуляцией добротности в температурном диапазоне от – 50 до + 50 °C без активной термостабилизации [П6, П7].

Для экспериментального исследования параметров усилителя слабого сигнала на базе «сухого» квантрона был изготовлен действующий макет, состоящий из 10-ти матриц СЛМ-3 ООО «НПП «Инжект» пиковой мощностью 2 кВт каждая. Центральная длина волны излучения ЛДР составляла 808,1 нм при температуре теплоотвода 24 °C, ширина спектра по полувысоте около 5 нм. ЛДР располагались с пяти сторон в два кольца вокруг лазерного кристалла Nd<sup>3+</sup>:YAG 1% ат. размером Ø5×100 мм. Торцы кристалла имели просветляющее покрытие на длине волны 1064 нм. Для получения однородного профиля коэффициента усиления кристалл вклеивался в центр цилиндрической линзы из лейкосапфира диаметром 50 мм.

Для оценки эффективности рассматриваемого квантрона производились измерения выходной энергии лазерных импульсов в режиме свободной генерации при установки его в оптический резонатор (Рис. 10), образованный плоскими зеркалами с коэффициентами отражения 99,6 % (глухое зеркало) и 50 % (выходное зеркало) на длине волны 1064 нм.



1 — глухое зеркало, R = 99,5 %; 2 — квантрон; 3 — выходное зеркало, R = 50 %; 4 — пироэлектрический измеритель энергии Ophir PE25-DIF-C

Рис. 10. Схема измерения выходной энергии лазерных импульсов квантрона, которая проводилась в режиме свободной генерации

Зависимость выходной энергии лазерных импульсов  $E_{out}$  от суммарной энергии накачки  $E_{in}$ , представлена на Рис. 11 для различной длительности импульса тока питания (100, 200, 300 мкс). Максимальное значение  $E_{out} = 1,9$  Дж достигается при амплитуде и длительности тока питания 55 А и 300 мкс, соответственно. При этом дифференциальный КПД равен 42 %, а полный коэффициент оптической конверсии составлял около 30 %.

Коэффициент усиления квантрона определялся при пропускании через него одиночного зондирующего лазерного импульса длительностью 200 пс на длине волны 1064 нм. Энергия зондирующего импульса составляла 2,5, 18 и 300 мкДж в зависимости от установленного ослабляющего фильтра. Длительность импульса накачки квантрона до прихода зондирующего импульса составляла 200 мкс.





Рис. 11. Выходная энергия импульсов квантрона в режиме свободной генерации

Рис. 12. Коэффициент усиления квантрона от тока питания

Зависимость измеренного коэффициента усиления от амплитуды тока питания матриц лазерных диодов квантрона представлена на Рис. 12. Максимальный коэффициент усиления в случае малой энергии зондирующего импульса (2,5 и 18 мкДж) составил K = 165, при амплитуде тока питания I = 50 A, что соответствует суммарной энергии оптической накачки  $E_{in} = 4$  Дж. При дальнейшем увеличении тока питания в АЭ происходит развитие паразитной генерации и коэффициент усиления падает. В случае энергии зондирующего импульса

300 мкДж происходит насыщение усиления и максимальный коэффициент усиления не превышает 65.

Для экспериментальных исследований генератора лазерных импульсов на базе «сухого» квантрона был изготовлен действующий макет лазера с пассивной модуляцией добротности (Рис. 4). Макет состоял из 5-ти матриц СЛМ-З ООО «НПП «Инжект» пиковой мощностью 1,25 кВт каждая. Центральная длина волны излучения ЛДР составляла 811 нм при температуре теплоотвода 24 °C, ширина спектра по полувысоте — около 5 нм. ЛДР располагались с пяти сторон в виде кольца вокруг АЭ Nd<sup>3+</sup>:YAG 1% ат. размером Ø5×50 мм [П4].

Излучение пяти ЛДР фокусировалось в лазерный кристалл лейкосапфировой цилиндрической линзой диаметром 20 мм. При этом, как было показано в главе 4, в диапазоне температур от – 50 до + 50 °C профиль инверсной населенности в поперечном сечении кристалла имеет параболический вид (Рис. 6).

Суммарная максимальная мощность лазерной диодной накачки в макете составляла 6,25 кВт при длительности тока накачки 250 мкс. При этом соответствующая энергия импульса накачки при максимальной амплитуде тока накачки 55 А составляла более 1,5 Дж.

Для определения параметров  $T_{ini}$  и  $R_{out}$  используемого лазерного кристалла были произведены расчеты в соответствии с главой 2. На Рис. 13 представлено тоновое изображение зависимости выходной энергии  $E_{out}(T_{ini}, R_{out})$  лазера. Видно, что энергия импульсов возрастает с уменьшением значений  $T_{ini}$  и  $R_{out}$ .



Рис. 13. Тоновые изображения зависимости выходной энергии  $E_{out}(T_{ini}, R_{out})$  от начального коэффициента пропускания насыщающегося поглотителя  $T_{ini}$  и коэффициента отражения выходного зеркала резонатора  $R_{out}$  для Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера, при радиусе пучка накачки (генерации)  $r_{mod} = 2$ мм. Пунктирными кривыми изображены семейства точек { $T_{ini}$ ,  $R_{out}$ }, соответствующие фиксированным значениям  $\tilde{N}_{tr}$ . Сплошная линия определяет оптимальные значения ( $T_{ini}^{opt}, R_{out}^{opt}$ ), при которых выходная энергия  $E_{out}^{opt} = E_{out}(T_{ini}^{opt}, R_{out}^{opt})$  максимальна

При  $T_{ini} = R_{out} = 20\%$  расчетная выходная энергия лазерного импульса составляет 130 мДж, время накачки, необходимое для генерации лазерного импульса, равняется 97 мкс. Расчетная длительность лазерного импульса — 2,5 нс.

Для экспериментальных исследований был заказан композитный лазерный кристалл с рассчитанными параметрами  $T_{ini} = R_{out} = 20$  % в компании ООО «Лазерные компоненты» и установлен в квантрон. При комнатной температуре  $T = 24^{\circ}$ С была получена лазерная генерация на длине волны 1,06 мкм при частоте повторения до 25 Гц со следующими параметрами: энергия в импульсе  $E_{out} = 135 \pm 2$  мДж (Рис. 16 а). Временной профиль импульса P(t) представлен на Рис. 14. Длительность импульса по полувысоте амплитуды составляет  $\tau_{out} = 3,5 \pm 0,2$  нс (полная ширина по полувысоте). Пиковая мощность импульса достигает значения  $P_{max} = 40 \pm 2,5$  МВт. Распределение интенсивности в плоскости поперечного сечения пучка, зарегистрированное на ССD камеру в ближней зоне, представлено на Рис. 15. Время накачки, необходимое для генерации лазерного импульса, составило 250 мкс. Эффективность оптической конверсии при этом достигает 25 %. Экспериментально полученные параметры лазерной генерации хорошо соответствуют численному моделированию.



Рис. 14. Временной профиль лазерного импульса



Рис. 15. Распределение интенсивности в плоскости поперечного сечения пучка

Для исследования влияния температуры в диапазоне от -50 до +50 °C на параметры излучения лазера, он был помещен в термостатическую камеру, температура в которой изменялась в диапазоне от -55 до +55 °C. На Рис. 16 а приведена зависимость энергии  $E_{out}$  лазерных импульсов от температуры. Видно, что минимальное значение энергии  $E_{out} = 100 \pm 2$  мДж достигается при температуре  $T \approx -50$  °C, когда длина волны излучения ЛДР выходит за спектр поглощения лазерного кристалла [П3, П10]. В точках  $T \approx -26$  и -12 °C наблюдаются локальные минимумы зависимости выходной энергии от температуры, так как длина волны ЛДР накачки близка к значениям  $\lambda_P = 798$  и 802 нм, соответствующим провалам в спектре поглощения кристалла Nd<sup>3+</sup>:YAG. При температуре  $T \approx 17$  °C длина волны излучения ЛДР составляет  $\lambda_P = 808,9$  нм и попадает в пик поглощения АЭ. В этом случае выходная

энергия лазерных импульсов становится максимальной и составляет  $E_{out} = 141 \pm 2$  мДж. Следует отметить, что во всем рассмотренном температурном диапазоне относительное изменение энергии импульсов не превышает 30 %.

На Рис. 16 б приведена зависимость времени выхода  $t_{gen}$  лазерных импульсов при различной температуре лазерного излучателя. Видно, что максимальное значение  $t_{gen} > 150$  мкс достигается при  $T \approx -8$  °C и при приближении к границам рассматриваемого температурного диапазона. Увеличение времени выхода связано с уменьшением эффективности поглощения излучения накачки в лазерном кристалле. Рост времени выхода при значительном нагреве ЛДР так же связан со снижением КПД полупроводникового излучателя и, как следствие, с падением излучаемой световой мощности ЛДР. Области минимальных значений  $t_{gen} \approx 80$  мкс соответствуют температурам ЛДР, при которых длина волны накачки наиболее эффективно поглощается в лазерном кристалле.

Эффективность оптической конверсии  $\eta_{opt}$  в температурном диапазоне от -50 до +50 °C варьируется от 10 до 25 % (Рис. 16 в).



Рис. 16. Зависимость энергии  $E_{out}$  (а), времени выхода  $t_{gen}$  (б), эффективности оптической конверсии  $\eta_{opt}$  (в) лазерных импульсов от температуры

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Созданная модель математического моделирования твердотельных лазеров с диодной накачкой, отличающаяся использованием множителей Лагранжа для нахождения условного экстремума решений трансцендентных уравнений, описывающих процессы генерации, позволяет оптимизировать параметры резонаторов с пассивной модуляцией добротности, выбирать эффективную геометрию накачки активного элемента, осуществлять термодинамический расчет.

2. Впервые выполнены экспериментальные исследования спектральных и энергетических параметров ЛДР СЛМ-3 в температурном диапазоне  $\Delta T > 100$  °C. Установлено, что измеренное смещение длины волны излучения лазерных диодов в рассмотренном температурном диапазоне составляет 0,28 нм/ °C. При этом ширина и форма спектра излучения остаются неизменными, а эффективность ЛДР падает с ростом температуры.

3. Реализованная схема поперечной накачки решетками лазерных диодов, расположенных с пяти сторон вокруг кристалла Nd<sup>3+</sup>:YAG диаметром 5 мм и сфокусированных одной цилиндрической лейкосапфировой линзой диаметром 20 мм, формирует устойчивый параболический профиль инверсной населенности при изменении температуры от -50 до +50 °C, что обеспечивает работоспособность Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера с пассивной модуляцией добротности в указанном температурном диапазоне без активной термостабилизации.

4. Реализованная схема поперечной накачки решетками лазерных диодов, расположенных с пяти сторон вокруг кристалла Nd<sup>3+</sup>:YAG диаметром 5 мм и сфокусированных одной цилиндрической лейкосапфировой линзой диаметром 50 мм, обеспечивает однородность пространственного распределения инверсной населенности более 90 % в поперечном сечении лазерного кристалла, что позволяет усиливать лазерные импульсы без искажения профиля пучка.

5. Реализованный способ кондуктивного охлаждения активного элемента квантрона, отличающийся использованием цилиндрической линзы на базе лейкосапфира в качестве теплоотвода, обеспечивает стабильную работу Nd<sup>3+</sup>:YAG квантрона с пиковой мощностью лазерной диодной накачки до 20 кВт и частоте повторения до 50 Гц без использования жидкого хладагента внутри корпуса.

6. Экспериментально продемонстрировано, что  $Nd^{3+}$ : YAG лазер с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности генерирует импульсное лазерное излучение с практически неизменной модовой структурой и стабильностью выходной энергии не менее 70 % в температурном диапазоне от -50 до + 50 °C без активной системы термостабилизации.

#### Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, включенные в перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

- [Π1] Lednev V.N., Dormidonov A.E., Sdvizhenskii P.A., Grishin M.Ya, Fedorov A.N., Savvin A.D., Safronova E.S., and Pershin S.M. Compact diode-pumped Nd<sup>3+</sup>:YAG laser for remote analysis of low-alloy steels by laser-induced breakdown spectroscopy // Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2018, 33, № 2 p.294 303.
- [П2] Травина Е.С., Дормидонов А.Е., Лазерные диодные решетки высокой плотности мощности для накачки твердотельных лазеров в широком температурном диапазоне // Краткие сообщения по физике ФИАН, - 2021, 48, №4, С.36 – 41.
- [П3] Dormidonov A.E., Savvin A.D., Safronova E.S., Shaulskii D.V. Wide temperature range diode pumped Nd<sup>3+</sup>:YAG laser without active thermal stabilization // Журнал прикладной спектроскопии, - 2016, 83, № 6 – 16, с.481 – 482. В других изданиях:
- [II4] Mitrokhin V.P., Dormidonov A.E., Savvin A.D., Safronova E.S., Sirotkin A.A., Firsov K.N., Compact diode-pumped NIR and MIR lasers for nonlaboratory applications// IEEE 2018 International Conference Laser Optics (ICLO) – 2018, - p.68
- [П5] Травина Е. С., Твердотельные квантроны с диодной накачкой для каскада усилителей задающего генератора лазерной установки мегаджоульного уровня, Сборник тезисов-XV научно-технической конференции «ВНИИА-2021», (ВНИИА, Москва) - 2021, - с.41.
- [Π6] **E.S. Safronova**, A.E. Dormidonov, *Nanosecond diode pumped near infrared and mid infrared lasers for outdoor applications// Pulsed Lasers and Laser Applications –«AMPL» -2019*, -p.20.
- [П7] Сафронова Е.С., Дормидонов А.Е. Nd:YAG лазер с диодной накачкой, работающий в широком температурном диапазоне без активной термостабилизации // XI Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям – 2018, - с.303 – 305.
- [П8] Сафронова Е.С., Дормидонов А.Е. Лазерная диодная решетка высокой плотности мощности для оптической накачки активного кристалла в широком температурном диапазоне // Х Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям -2017, - с.235 – 238.
- [П9] Сафронова Е. С., Дормидонов А.Е., Лазерные диодные решетки высокой плотности мощности для оптической накачки кристалла Nd:YAG в широком температурном диапазоне, Сборник тезисов-Х научно-технической конференции «ВНИИА-2016», (ВНИИА, Москва) - 2016, - с.7.
- [П10] Сафронова Е.С., Дормидонов А.Е., Эффективная диодная накачка лазерного квантрона в широком температурном диапазоне// Сборник докладов 15-й научно - техниченской конференции «Молодежь в науке» - 2016, - с.250 – 252.