

На правах рукописи

Шарандин Евгений Анатольевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНОГО
МОНОИМПУЛЬСНОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА**

По специальностям: 05.13.18 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ
01.04.05 - Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Гладышев Владимир Олегович

Официальные оппоненты: **Казарян Мишик Айразович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук

Егоров Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук»,

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП»)

Защита состоится «___» _____ 2019 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Аттетков
Александр Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В современных задачах спектроскопии, лазерной локации, мониторинга параметров атмосферы и др. возникает требование создания многокаскадных импульсных лазеров с предельно достижимыми параметрами выходного излучения. Эта проблема может быть решена при создании математических моделей лазерных излучателей, которые учитывают сложные физические процессы, происходящие в активных средах, при взаимодействии излучения со всеми оптическими элементами, а также учитывающие взаимодействие лазерных каскадов. Использование расчетно-программных комплексов, созданных на основе подобных моделей, позволит провести детальный анализ протекающих в лазерах процессов и обеспечит независимость исследователя от наличия сложного оборудования и дорогостоящих комплектующих, необходимых для проведения натуральных экспериментов.

Взаимное влияние лазерных каскадов приводит к изменению кинетики формирования импульса излучения и уменьшению порога возникновения паразитной генерации. В свою очередь, паразитная генерация может привести как к резкому снижению уровня запасенной энергии в активных элементах (АЭ), так и к их разрушению в момент генерации в лазерах с модуляцией добротности. При проведении расчетов для лазерных систем, имеющих в своем составе усилители с большими коэффициентами усиления (~ 100 и более) или обращающие волновой фронт зеркала учет межкаскадных связей особенно важен.

Наличие явления паразитного усиления спонтанных квантов приводит к потерям энергии возбуждения в процессе накачки активной среды. Особенно большие потери характерны для моноимпульсных лазеров, что требует обязательного учета указанного эффекта в математической модели лазерного излучателя.

При анализе процессов усиления и генерации когерентного излучения в лазерах обычно ограничиваются рассмотрением спонтанных и вынужденных переходов в активных средах в трех- или четырехуровневом приближении, что в большинстве случаев обеспечивает хорошее согласие теоретических результатов с экспериментальными данными. В отдельных

случаях наблюдаются значительные расхождения результатов, в частности, для лазеров с активными средами на основе стекла, активированного трехвалентными ионами неодима. Такие расхождения могут быть устранены при использовании более сложной математической модели активной среды, учитывающей конечное время жизни нижнего рабочего лазерного уровня.

Введение при создании активных сред наряду с ионами-активаторами ионов-соактиваторов позволяет увеличить эффективность создания инверсии населенностей как за счет расширения линий поглощения и увеличения их количества, так и за счет увеличения коэффициента поглощения излучения накачки. В ряде случаев такие активные среды, как скандиевые гранаты, активированные ионами Cr^{3+} и Nd^{3+} , удовлетворительно описываются с использованием традиционной четырехуровневой модели. В других случаях для описания процессов взаимодействия активной среды с оптическим излучением требуются более сложные математические модели, например, для активированных ионами Cr^{3+} , Tm^{3+} и Ho^{3+} сред, позволяющих получить лазерную генерацию в диапазоне длин волн 2..3 мкм.

Для проведения расчета отдельных элементов твердотельных лазеров сейчас доступны программы LASCAD, ReZonator, LineRes, SintRes, Fresnel и другие. Однако следует отметить отсутствие программ для расчета лазера в целом, в связи с чем разработчики лазеров пользуются простыми моделями, которые не обеспечивают необходимой точности расчетов. Точные решения могут быть получены при использовании моделей, базирующихся на уравнениях переноса с учетом встречного взаимодействия усиливаемых потоков излучения и развития оптического шумового излучения.

В результате возникает необходимость построения математической модели многокаскадного моноимпульсного твердотельного лазера. Модель должна учитывать встречное взаимодействие усиливаемых потоков излучения, развитие шумов в элементах лазера, взаимное влияние лазерных каскадов, степень согласования спектра излучения источников накачки со спектром поглощения активных элементов, время жизни нижнего рабочего лазерного уровня в четырехуровневых средах и скорости изменения населенностей в активных средах, активированных трехвалентными ионами Cr^{3+} , Tm^{3+} и Ho^{3+} .

Цель проведенных исследований – разработка математических моделей, высокопроизводительных численных алгоритмов и программ для исследования процессов формирования излучения в многокаскадных импульсных твердотельных лазерных излучателях.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение **следующих основных задач:**

1. Разработка математической модели процессов генерации и усиления оптического излучения в многокаскадных твердотельных лазерах с модуляцией добротности и высокопроизводительных расчетных программ на их основе.

2. Численный анализ и экспериментальное исследование процессов формирования энергетических, временных и поляризационных параметров оптического излучения в многокаскадных лазерах при наличии межкаскадных связей.

3. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процессов формирования пространственных характеристик световых пучков в многокаскадных лазерах с неоднородным распределением инверсии населенностей по сечению активных элементов.

Методы исследования. При решении задач, возникших в ходе выполнения диссертационной работы, использовались различные классы математических методов: математического моделирования нелинейных оптических систем, математического программирования, численного анализа и экспериментальные методы исследования процессов формирования излучения в импульсных многокаскадных лазерах.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов гарантируется строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сравнением полученных результатов с экспериментальными данными. Сформулированные в работе допущения обоснованы как путем их содержательного анализа, так и методами математического моделирования.

Научная новизна. В диссертации получены следующие научные результаты:

1. Разработана математическая модель многокаскадного импульсного твердотельного лазера, учитывающая взаимодействие усиливаемых по-

токов излучения, развитие шумов в элементах лазера, взаимное влияние лазерных каскадов, степень согласования спектра излучения источников накачки со спектром поглощения активных элементов, время жизни нижнего рабочего лазерного уровня в четырехуровневых средах и скорости изменения населенностей в активных средах, активированных трехвалентными ионами Cr^{3+} , Tm^{3+} и Ho^{3+} .

2. Проведены численные и экспериментальные исследования процессов формирования временных, энергетических и поляризационных параметров излучения в лазерных системах с многопроходными усилителями.

3. Проведены численные и экспериментальные исследования процессов распространения пучков оптического излучения в многокаскадных лазерах, в том числе дифракционно ограниченных. Проведено исследование влияния распределения инверсии населенностей на пространственные характеристики в различных режимах работы лазера. Предложен метод регулирования пространственных характеристик лазерного излучения, основанный на изменении профиля распределения инверсии населенностей по сечению активных элементов при вариации температуры полупроводниковых излучателей накачки.

Практическая значимость диссертационной работы связана с ее прикладной ориентацией. Полученная математическая модель и результаты исследований могут быть использованы при разработке и создании импульсных твердотельных лазерных излучателей с различными конфигурациями оптических схем на различных типах активных сред.

Полученные результаты исследований позволят определить функциональные возможности формирования различных параметров выходного излучения, сформулировать требования к узлам межкаскадной развязки и разработать предложения по параметрам элементов излучателя и режимам их работы. Предложен комплекс мер, направленный на увеличение эффективности лазеров с активными элементами, активированными ионами Cr^{3+} , Tm^{3+} и Ho^{3+} .

Выявленная связь между распределением инверсии населенностей, формируемой при использовании полупроводниковой накачки, и параметрами выходного излучения позволяет определить требования к квантронам

для различных целевых применений.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Математическая модель и комплекс программ для анализа процессов формирования временных, энергетических и поляризационных характеристик многокаскадных моноимпульсных лазеров, учитывающие взаимное влияние каскадов лазера, взаимодействие встречных усиливаемых потоков излучения, развитие люминесценции и предельные режимы работы оптических элементов лазерных излучателей.

2. Результаты теоретического и экспериментального исследования особенностей формирования оптического излучения в моноимпульсных твердотельных многокаскадных лазерах и способов увеличения их эффективности.

3. Результаты теоретического и экспериментального исследования влияния профиля инверсии населенностей в активных элементах лазера на его пространственные характеристики. Метод управления пространственными характеристиками оптического излучения лазера, основанный на изменении профиля распределения инверсии населенностей по сечению АЭ при вариации температуры полупроводниковых источников накачки.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы представлены в форме научных докладов и обсуждены в ходе международных конференций «Когерентная и Нелинейная Оптика» (Москва, 1998, 2002; Минск, 2001), «Оптика Лазеров» (Санкт-Петербург, 1995, 1998, 2000, 2002), «Physical Interpretation of Relativity Theory» (Лондон, 2006; Москва, 2011)», 17-th congress of ICO'96 Optics for Science and New Technology (Teijon, Korea, 1996), международной выставки «Laser World of Photonics» (Мюнхен, 1999), всероссийской отраслевой научно-технической конференции «Проблемы создания лазерных систем» (ЗАТО, г. Радужный, 2008), научно-технических конференций «Радиооптические технологии в приборостроении» (п. Небуг, Туапсинский район, 2012, 2013, 2014), X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2018 (Санкт-Петербург, 2018), Всероссийских конференциях "Необратимые процессы в природе и технике" (Москва, 2007, 2011, 2018).

Представленные в диссертационной работе результаты использованы

в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, проводимых в МГТУ им. Н.Э. Баумана, грантах РФФИ.

Разработанный комплекс программных средств применяется рядом российских (НПО «Астрофизика»; ЦНИИМаш; НИИ «Полюс»; НПО «Зенит»; Институтом прикладной физики Российской Академии наук, Нижний Новгород; Вологодским оптико-механическим заводом; НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова, Санкт-Петербург и др.), и зарубежных («ЛТ-Пиркал», Армения; «Daimler-Benz», Германия; «Energizer Enterprises Co, Ltd», Тайвань; «Raicol Crystals Ltd», Израиль; KORUS, Корея и др.) предприятий.

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 9 статьях и журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования; получен патент на изобретение.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включен лишь материал, непосредственно полученный соискателем; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 190 страницах, содержит 72 иллюстрации и одну таблицу. Библиографический список включает 125 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** приведено обоснование темы диссертационной работы, сформулированы цель и направление исследований, обоснована актуальность рассматриваемой проблемы в контексте ее научной новизны и практической значимости, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен вывод самосогласованной системы дифференциальных уравнений для напряженности электромагнитного поля и его интенсивности, поляризованности среды, населенностей энергетических уровней и коэффициента усиления активной среды. Проведен анализ сде-

ланных при выводе допущений и определена область применимости полученных уравнений для анализа импульсных твердотельных лазеров. При расчете временных, энергетических и поляризационных параметров многокаскадных лазеров использовались уравнения для интенсивностей лазерного излучения и коэффициента усиления активной среды. Интенсивность лазерного излучения и коэффициент усиления идеальной четырехуровневой активной среды описывались уравнениями следующего вида:

$$(-1)^n \frac{\partial I_n(t, z)}{\partial z} + \frac{1}{V} \frac{\partial I_n(t, z)}{\partial t} = (k(t, z) - \beta) I_n(t, z), \quad (1)$$

$$\frac{dk(t, z)}{dt} = (\aleph - k(t, z)) W_{03}(t, z) - \frac{k(t, z) \sum_n I_n(t, z)}{Q_s} - \frac{k(t, z)}{\tau_{21}}. \quad (2)$$

Здесь $I_n(t, z)$ – интенсивность лазерного излучения; t – текущее время; z – продольная координата вдоль оптической оси активного элемента; $n = 1, 2$ – номер потока лазерного излучения вдоль оси OZ и в противоположном направлении; $k(t, z)$ – коэффициент усиления активной среды; β – коэффициент нерезонансных потерь лазерного излучения; V – скорость света в среде; \aleph – предельный коэффициент усиления; $W_{03}(t, z)$ – скорость накачки; Q_s – плотность энергии насыщения; τ_{21} – среднее время жизни верхнего лазерного уровня.

На основании рассмотрения диаграмм энергетических уровней получены уравнения для населенностей четырехуровневых активных сред, учитывающие конечное время жизни нижнего лазерного уровня, а также уравнения для населенностей уровней в активных средах, активированных атомами Cr, Tm и Ho.

Во второй главе получена математическая модель импульсного твердотельного многокаскадного лазера в плосковолновом приближении, основанная на уравнениях переноса. В модели учитывается взаимодействие всех усиливаемых потоков излучения, межкаскадные связи, развитие шумового излучения, согласование спектра излучения источников накачки со спектрами поглощения активных элементов, поляризационные характеристики излучения.

При построении математической модели многокаскадного моноимпульсного лазера предполагалось, что он состоит из набора независимых оптических элементов. Оптические элементы при моделировании представлялись в виде оптических четырехполюсников (Рис. 1), где I_i^j - интенсивности падающих на них потоков лазерного излучения, I_o^j - интенсивности выходящих из оптического элемента потоков, $j \in (1,2,3,4)$ - номер потока излучения. Каждый поток, в свою очередь, представляет из себя суперпозицию двух электромагнитных волн со взаимно ортогональными поляризациями, обозначаемыми в нижнем индексе буквами "v" или "h". Каждый оптический четырехполюсник преобразует входные потоки в выходные в соответствии со своим алгоритмом.

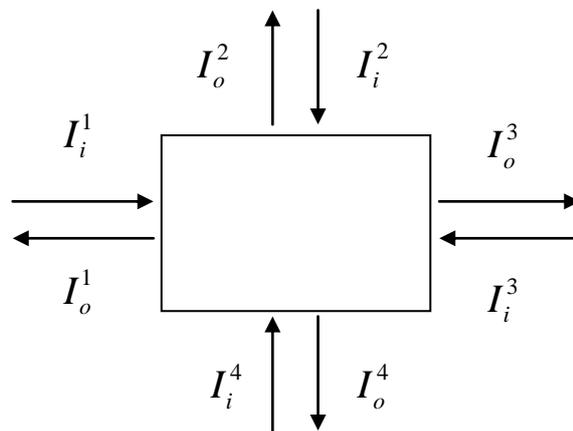


Рис. 1. Оптический четырехполюсник

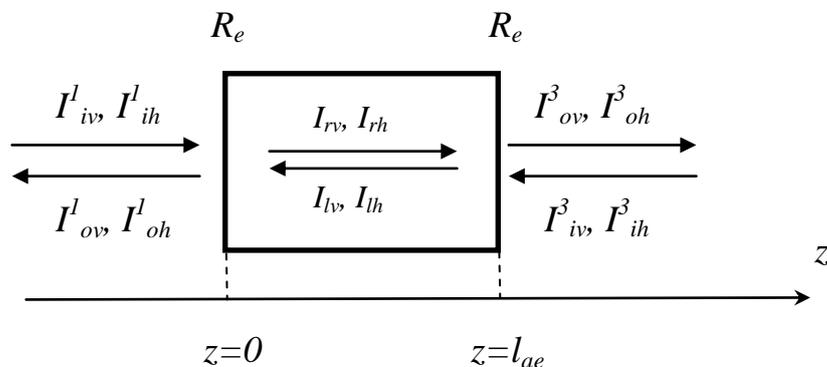


Рис. 2. Активный элемент

Для описания активных элементов необходимо учитывать процессы распространения электромагнитного излучения через них, для чего дополнительно вводятся интенсивности излучения, проходящего внутри активных элементов в направлении оси OZ и в противоположном направлении (Рис. 2). Для расчета интенсивностей распространяющихся через активный элемент потоков лазерного излучения I_{rv} , I_{rh} , I_{lv} , I_{lh} и коэффициента усиления использовалась система дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных:

$$\left\{ \begin{aligned}
& \frac{\partial I_{hr}(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{V} \frac{\partial I_{hr}(z,t)}{\partial t} = (k(z,t,\lambda,\theta) - \beta) (I_{hr}(z,t) + D_{ae} (I_{vr}(z,t) - I_{hr}(z,t))) + \\
& \quad + \frac{k(z,\lambda,\theta)\zeta Q_s(\lambda,\theta)}{\tau_{ef}}, \tag{3} \\
& \frac{\partial I_{vr}(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{V} \frac{\partial I_{vr}(z,t)}{\partial t} = (k(z,t,\lambda,\theta) - \beta) (I_{vr}(z,t) + D_{ae} (I_{hr}(z,t) - I_{vr}(z,t))) + \\
& \quad + \frac{k(z,t,\lambda,\theta+90^\circ)\zeta Q_s(\lambda,\theta+90^\circ)}{\tau_{ef}}, \tag{4} \\
& \frac{\partial I_{hl}(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{V} \frac{\partial I_{hl}(z,t)}{\partial t} = (k(z,t,\lambda,\theta) - \beta) (I_{hl}(z,t) + D_{ae} (I_{vl}(z,t) - I_{hl}(z,t))) + \\
& \quad + \frac{k(z,t,\lambda,\theta)\zeta Q_s(\lambda,\theta)}{\tau_{ef}}, \tag{5} \\
& \frac{\partial I_{vl}(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{V} \frac{\partial I_{vl}(z,t)}{\partial t} = (k(z,t,\lambda,\theta) - \beta) (I_{vl}(z,t) + D_{ae} (I_{hl}(z,t) - I_{vl}(z,t))) + \\
& \quad + \frac{k(z,t,\lambda,\theta+90^\circ)\zeta Q_s(\lambda,\theta+90^\circ)}{\tau_{ef}}, \tag{6} \\
& \frac{\partial k(z,t,\lambda,\theta)}{\partial t} = - \frac{k(z,t,\lambda,\theta) (I_{hr}(z,t) + I_{vr}(z,t) + I_{hl}(z,t) + I_{vl}(z,t))}{Q_s(\lambda,\theta)} + \\
& \quad + P_p(t) G \eta(P_p(t)) (\mathfrak{N}(\lambda,\theta) - k(z,t,\lambda,\theta)) - \frac{k(z,t,\lambda,\theta)}{\tau_{ef} (k(z,t,\lambda,\theta))}. \tag{7}
\end{aligned} \right.$$

Здесь λ – длина волны лазерного излучения; θ – угол ориентации кристаллооптической системы координат активного элемента относительно плоскости поляризации излучения; D_{ae} – погонная величина деполяризации активного элемента; ζ – угловая доля излучения люминесценции активного элемента, идущая на формирование излучения генерации; τ_{ef} – эффективное время жизни верхнего лазерного уровня; $P_p(t)$ – мощность излучения накачки; G – коэффициент связи между скоростью и мощностью накачки; $\eta(P_p(t))$ – эффективность накачки в спектральном интервале поглощения активного элемента.

Решение приведенной системы уравнений производилось со следующими начальными и граничными условиями:

$$I_{rh}(z,0) = 0; \quad I_{rv}(z,0) = 0; \quad I_{lh}(z,0) = 0; \quad I_{lv}(z,0) = 0; \quad k(z,0) = 0. \tag{8}$$

$$\begin{cases}
I_{oh}^1(t) = I_{lh}(z=0, t)(1 - R_e) + I_{ih}^1(t)R_e, \\
I_{ov}^1(t) = I_{lv}(z=0, t)(1 - R_e) + I_{iv}^1(t)R_e, \\
I_{oh}^3(t) = I_{rh}(z=l_{ae}, t)(1 - R_e) + I_{ih}^3(t)R_e, \\
I_{ov}^3(t) = I_{rv}(z=l_{ae}, t)(1 - R_e) + I_{iv}^3(t)R_e, \\
I_{rh}(z=0, t) = I_{ih}^1(t)(1 - R_e) + I_{lh}(z=0, t)R_e, \\
I_{rv}(z=0, t) = I_{iv}^1(t)(1 - R_e) + I_{lv}(z=0, t)R_e, \\
I_{lh}(z=l_{ae}, t) = I_{ih}^3(t)(1 - R_e) + I_{rh}(z=l_{ae}, t)R_e, \\
I_{lv}(z=l_{ae}, t) = I_{iv}^3(t)(1 - R_e) + I_{rv}(z=l_{ae}, t)R_e,
\end{cases} \quad (9)$$

где R_e - коэффициент отражения покрытия на торцах активного элемента, l_{ae} - длина активного элемента. Граничные условия задают изменения интенсивностей всех лазерных потоков излучения на границах активных элементов с учетом коэффициентов отражения их торцев.

Для решения уравнений переноса (3) - (6) системы уравнений (3) - (9) использовалась явная схема бегущего счета первого порядка точности с курантовским временным шагом. Для уравнений (3) и (4) использовалась схема с левой разностью, для уравнений (5) и (6) – с правой. Уравнение для коэффициента усиления (7) решалось методом Эйлера. Решение системы дифференциальных уравнений (3) – (9) осуществлялось с фиксированным, обеспечивающим сходимость, шагом.

Для решения задачи формирования пространственных характеристик световых пучков в многокаскадных лазерах с неоднородным распределением инверсии населенностей по сечению активных элементов математическая модель дополнена дифракционным интегралом Кирхгофа. Решение интеграла позволяет рассчитать амплитудно-фазовое распределение электромагнитного поля лазерного пучка при переходе от одного пространственного слоя к другому:

$$\dot{E}_2(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{i\lambda\Delta z} \iint_A \dot{E}_1(x_1, y_1, z_1) \dot{G}(x_2, y_2, x_1, y_1, \Delta z) dx_1 dy_1, \quad (10)$$

где \dot{E}_1 и \dot{E}_2 - амплитудно-фазовые распределение электромагнитного поля в плоскостях с координатами z_1 и z_2 соответственно; $\dot{G}(x_2, y_2, x_1, y_1, \Delta z)$ - функция Грина для слоя толщиной Δz ; $\Delta z = z_2 - z_1$.

Проведен анализ сходимости и устойчивости решения уравнений (3)-(10), описывающих многокаскадные импульсные твердотельные лазеры.

Контроль устойчивости решения системы уравнений осуществляется на каждом временном шаге интегрирования посредством сравнения расчетного относительного изменения коэффициента усиления среды $\Delta k/k$ с пороговым значением, обеспечивающим достоверность получаемого решения. Также контроль корректности получаемого решения осуществляется с помощью расчета уравнения энергетического баланса.

Время решения системы дифференциальных уравнений при моделировании основных типов многокаскадных импульсных лазеров составляет от долей до нескольких сотен секунд, в зависимости от сложности оптической схемы лазера и его параметров.

Разработанный комплекс программ для проектирования импульсных твердотельных лазерных излучателей написан на языке программирования Паскаль. Отдельные программные модули написаны на C и Fortran. Для реализации вычислений с использованием графического процессора использовались OpenCL и CUDA.

В третьей главе проводится моделирование процессов формирования лазерного излучения в многокаскадных лазерных системах и их сравнение с результатами экспериментальных исследований. Расчеты выполнены с учетом влияния межкаскадных связей и взаимодействия встречных усиливаемых потоков на кинетику развития генерации в многокаскадных моноимпульсных лазерах, влияния шумового потока на порог самовозбуждения лазера и порог возникновения генерации. Проведено исследование факторов, влияющих на эффективность моноимпульсных двухмикронных лазеров с активными элементами, активированными ионами Cr^{3+} , Tm^{3+} и Ho^{3+} и с большой средней выходной мощностью. Исследовано влияние распределения инверсии населенностей по сечению активных элементов на пространственные характеристики излучения лазеров.

Показано, что результаты численного моделирования соответствуют полученным экспериментальным данным с высокой точностью. На Рис. 3

приведены расчетные и экспериментальные зависимости выходной энергии от энергии накачки для лазера с активной модуляцией добротности при помощи затвора, основанного на эффекте нарушения полного внутреннего отражения. В качестве активного элемента использовался кристалл $\text{YSGG:Cr}^{3+}:\text{Nd}^{3+}$ $\varnothing 6 \times 100$ мм.

На Рис.4 приведены аналогичные зависимости для лазера на YAG:Nd^{3+} $\varnothing 6,3 \times 65$ мм с пассивными модуляторами добротности на YAG:Cr^{4+} , имеющими начальное пропускание 23% и 46%. Полученные результаты демонстрируют, что результаты расчетов совпадают с экспериментальными с высокой степенью точности.

Влияние межкаскадных связей, взаимодействия встречных усиливаемых и шумовых потоков на кинетику развития генерации, пороги самовозбуждения и возникновения генерации было исследовано на примере двухкаскадного лазера, в состав которого входили усилители, собранные по одно-, двух- или четырехпроходной схеме с поляризационной развязкой усиливаемых потоков. Было показано, что двухпроходные усилители с поляризационной развязкой усиливаемых потоков особенно сильно влияют на кинетику развития

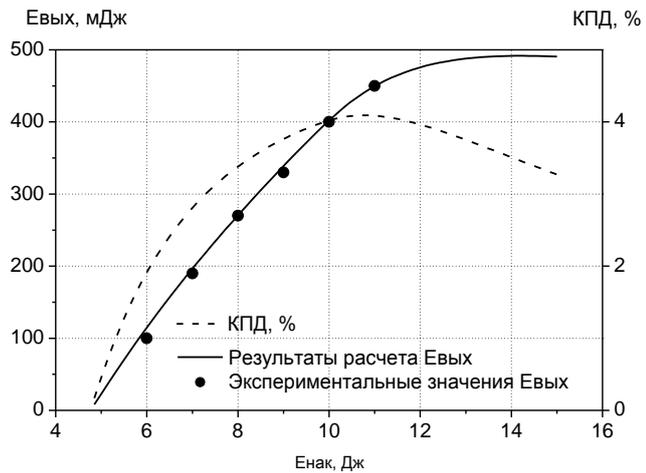


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные значения выходной энергии излучения лазера на YSGG:Nd:Cr .

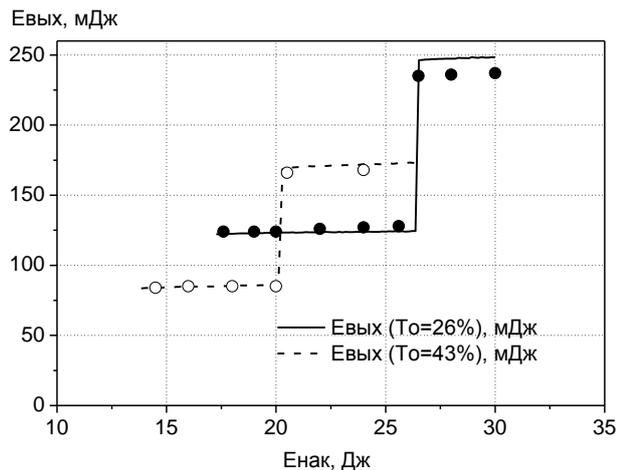


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости выходной энергии лазера на YAG:Nd для двух значений начального пропускание затвора $T_0=23\%$, 46% .

генерации, а лазеры, имеющие их в своем составе, имеют низкий порог самовозбуждения. Изложена методика проектирования многокаскадных лазерных усилителей с большими коэффициентами усиления (10^4 и более) и высоким КПД (до 20% и более при накачке полупроводниковыми диодами).

Моноимпульсные лазеры на активных средах, активированных ионами Cr^{3+} , Tm^{3+} и Ho^{3+} , имеют в разы меньшее значение КПД по сравнению с аналогичными лазерами, работающими в режиме свободной генерации. По результатам численных экспериментов предложен ряд мер, позволяющих увеличить КПД моноимпульсных лазеров с ламповой накачкой на $\text{YSGG}:\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}$ до значений, характерных для режима свободной генерации:

- оптимизация концентраций соактиваторов под режим генерации моноимпульсного излучения,
- реализация режима генерация пачки из двух-трех импульсов за один импульс накачки,
- оптимизация оптической схемы и ее параметров.

Показано, что предложенные оптические схемы двухкаскадных лазеров с ламповой накачкой и рабочие режимы позволяют увеличить КПД моноимпульсных лазеров на $\text{YSGG}:\text{Cr}^{3+}:\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$ до 1% и более при средней выходной мощности ~ 30 Вт и обеспечивают высокорегулярную последовательность выходных импульсов.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований пространственных характеристик оптического излучения многокаскадных лазеров. Показано, что неоднородный по сечению активной среды профиль инверсии населенностей с аксиальной симметрией и перекачкой в центре обеспечивает более гладкое распределение лазерного пучка в ближней зоне, более высокую направленность излучения и, одновременно с этим, лучшие энергетические характеристики. При этом активный элемент лазера в режиме усиления слабого сигнала изменяет распределение интенсивности в дифракционном изображении аналогично мягкой диафрагме с единичной степенью аподизации и контрастом

$$\chi = \exp\left(kL\left(\frac{k_o}{k} - 1\right)\right),$$

где k_o и k - коэффициенты усиления в центре и в районе образующей активного элемента; L - длина активного элемента.

Оптические измерения показали, что изменение коэффициента равномерности лазерного пучка может достигать 1,5 и выше при изменении профиля инверсии населенностей по сечению активного элемента. Результаты моделирования совпали с результатами экспериментальных измерений распределения интенсивности в поперечном сечении пучка.

Увеличение однородности лазерных пучков позволит уменьшить поперечные размеры активных элементов и, как следствие, уменьшить массогабаритные размеры лазеров при одновременном увеличении их энергоэффективности.

Предложен метод управления пространственными характеристиками оптического излучения лазера, основанный на изменении профиля распределения инверсии населенностей по сечению АЭ при вариации температуры полупроводниковых излучателей накачки. При его экспериментальной апробации в лазере на $YAG:Nd^{3+}$ $\varnothing 6,3 \times 40$ мм с плоскопараллельным резонатором длиной 13 см и пассивной модуляцией добротности продемонстрировано изменение направленности выходного излучения в диапазоне 1,2-2,8 мрад. Данный метод может быть использован в лазерных локаторах для оперативного изменения их угловой расходимости с целью увеличения скорости обнаружения и точности определения оптических параметров объектов, при проведении высокоточных измерений характеристик электромагнитного излучения в движущихся средах и др.

Основные результаты диссертационной работы

1. Предложена математическая модель импульсных многокаскадных лазеров, учитывающая взаимное влияние каскадов, взаимодействие встречных усиливаемых потоков излучения, развитие шумов и параметры всех оптических элементов лазера. На базе разработанной математической модели создан высокопроизводительный комплекс программных средств, предназначенный для расчета временных, энергетических, поляризацион-

ных и пространственных характеристик излучения импульсных твердотельных многокаскадных лазеров.

2. Численный анализ и экспериментальные исследования позволили определить влияние межкаскадных связей и шумового потока на порог самовозбуждения лазера, порог возникновения генерации и формирование временных, энергетических и поляризационных характеристик излучения. Показано, что проектирование многокаскадного лазера как единого устройства позволяет достичь предельных параметров лазерного излучения. Показана возможность получения КПД лазеров с большой средней выходной мощностью на YAG:Cr:Tm:Ho и YSGG:Cr:Tm:Ho в режиме модуляции добротности соизмеримого с КПД аналогичных лазеров, но работающего в режиме свободной генерации (до 1,5 % для YSGG и 2% для YAG при ламповой накачке).

3. Исследовано влияние профиля распределения инверсии населенностей по сечению активного элемента на энергетические и пространственные характеристики оптического излучения в многокаскадных лазерах. Предложен способ повышения однородности лазерного пучка на всем протяжении оптической схемы лазера, основанный на использовании активных элементов с «перекачкой» центральной части и метод управления пространственными характеристиками оптического излучения лазера, основанный на изменении профиля распределения инверсии населенностей по сечению АЭ при вариации температуры полупроводниковых излучателей накачки.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Regenerative amplification in four-pass laser amplifier on YAG:Nd with PC-SBS mirror / E.A.Sharandin [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering «Laser Optics '95»: Phase Conjugation and Adaptive Optics. 1996. P. 34-42. (0,8 п.л. / 0,3 п.л.).

2. Grechin S.G., Sharandin E.A., Son J.-Y. Methods and programming facility for investigation and development of solid-state lasers and training professionals // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering «17th Congress of the International Commission for Optics»: Optics for Science and New Technology. 1996. С. 713. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

3. Kinetics of laser processes in the multi-cascade optical schemes / E.A.Sharandin [et al.] // Proceedings of SPIE. 1999. V.3682. P.163-169. (0,7 п.л. / 0,3 п.л.)

4. First Results of Measurements of the Rotation Speed Effect on the Spatial Entrainment of Light in a Rotating Medium / E.A. Sharandin [et al.] // Technical Physics Letters. 2007. V.33, №11, P. 905–908. (0,7 п.л. / 0,1 п.л.).

5. Anisotropy of the Velocity Space of Electromagnetic Radiation in a Moving Medium / E.A. Sharandin [et al.] // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2012. V.57, №11. P. 1519–1528. (0,9 п.л. / 0,1 п.л.).

6. Experimental Studies of Polarization of Laser Radiation in a Rotating Optical Glass heating / E.A. Sharandin [et al.] // Optics and Spectroscopy. 2013. V.115, №3, P. 349–355. (0,7 п.л. / 0,1 п.л.).

7. Functional possibilities for forming different inverse population distributions in diode-side-pumped laser heads / E.A. Sharandin [et al.] // Quantum Electronics. 2014. T. 44, № 10. P. 912-920. (1,2 п.л. / 0,3 п.л.).

8. Variation of optical characteristics of polarized laser radiation in dielectric upon its low-frequency rotation and heating / E.A. Sharandin [et al.] // Optics and Spectroscopy. 2015, V.119, № 2, P. 300-305. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).

9. Sharandin E.A., Gladyshev V.O. Mathematical model of generation and amplification of radiation in multistage laser // Mathematical Models and Computer Simulations, 2019, Vol. 11, № 2. P. 277–286. (1,0 п.л. / 0,9 п.л.).

10. Устройство измерения анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения: Патент на изобретение RU 2498214 / В.О. Гладышев, П.С. Тиунов, А.Д. Леонтьев, Е.А. Шарандин; заявл. 22.03.2012. Бюлл. №31.