

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**
(ВлГУ)
Институт прикладной математики, физики и информатики
Кафедра физики и прикладной математики

Давыдов Николай Николаевич

Лексин Андрей Юрьевич

Шеин Игорь Петрович

Методические указания
для самостоятельной работы по дисциплине
"Проектирование электронных модулей управления лазерными системами"

для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению
12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии»

Владимир-2016 г.

Содержание

Введение.....	3
ТЕМА 1. Классификация электронных модулей управления. Этапы жизненного цикла и факторы, определяющие проектирование электронных модулей управления лазерных систем.....	6
ТЕМА 2. Компоновка электронных модулей управления лазерных систем. Общие конструктивные и эксплуатационные требования	8
Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 1-2.....	10
ТЕМА 3. Проектирование электронных модулей управления и их схем с печатным монтажом.....	17
ТЕМА 4. Проектирование элементов несущих конструкций.	19
Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 3-4.....	20
Список дополнительной литературы	26

Введение

«Осмелитесь мыслить самостоятельно»

Франсуа-Мари Аруэ (Вольтер)

Уважаемый читатель, методическое пособие в твоих руках содержит материал, выносящийся на самостоятельное изучение при освоении дисциплины " Проектирование электронных модулей управления лазерными системами". Проведение самостоятельной работы необходимо для успешного выполнения практических и лабораторных занятий по курсу.

Настоящее методическое пособие содержит комплекс рекомендаций по изучению дисциплины и дополнительный материал по темам, выходящим за рамки лекционного курса, самостоятельная подготовка студента обеспечивает оптимальное изучение материалов по данной дисциплине. В частности, речь идет об отдельных аспектах применения электронных модулей управления в составе твердотельных квантовых генераторов с полупроводниковой накачкой; коррекции термооптических искажений лазерных пучков в объеме активных лазерных сред и оптическом тракте; выбору конструкционных решений терморегулирующих узлов, оценки оптического качества лазерного излучения; современным программным комплексам проектирования электронных систем и другому. Для полного понимания задач проектирования электронных модулей управления (ЭМУ) лазерными системами, а также принципов работы и возможностей, заложенных в современных твердотельных лазерных излучателях (волоконных, дисковых, на основе «слэбов» монокристаллов и/или лазерной керамики и аналогичных), необходимо владеть знаниями из разных областей физики, химии, математики и техники. Изучение данного материала предусмотрено в рамках самостоятельной работы студентов.

Инженерам-проектировщикам сложных автоматизированных технических систем, к которым относятся лазерные комплексы, необходимо рассчитывать и проводить численное моделирование электромагнитных

процессов в электрических схемах устройств с учетом физики работы электронных компонент (активных и пассивных) в реальных условиях эксплуатации. Кроме этого, учитывать физические (теплофизические, оптические, электрофизические, транспортные) свойства и основы оптико-электронных приборов и активных лазерных сред. Все выше изложенное, лишь малая часть особенностей проектирования лазерных систем и электронных модулей управления ими, и обуславливает повышенную сложность принципиальных схем устройств (в составе систем), математических моделей описания процессов, возникающих при работе лазера.

В широком понимании проектирование электронных модулей управления лазерных систем означает проектирование схем и узлов электронных устройств согласно техническому заданию на проектирование и включает решение задач расчета, анализа, оптимизации и синтеза [1]. Математические модели физических процессов в узлах лазерной системы и электронных схемах управления записываются в виде дифференциальных уравнений для переменных состояния схемы, которые в свою очередь решаются методами численного интегрирования.

Для эффективного использования математического аппарата численного интегрирования, в данном пособии изложены основные особенности работы с подобными методами и функции основных (наиболее распространенных) пакетов программного обеспечения их реализующие (MatLab, SolidWorks, MultiSim.). Студентам рекомендуется ознакомиться с пакетами компьютерного проектирования схем и конструкций электронных модулей управления лазерными системами, такими как AltiumDesigner и КОМПАС-3D. Знакомство с данным материалом является необходимым для понимания проектирования, предусмотренного рабочей программой дисциплины.

Наконец, самостоятельная работа студента подразумевает ознакомление с конспектом лекций, выполнение контроля собственных

знаний по соответствующим контрольным вопросам, изучение дополнительной литературы по теме курса, выполнение домашних заданий к практическим занятиям, оформление отчетов по лабораторным работам.

Благодарим за помощь в теоретических оценках параметров и свойств активных лазерных сред С.Л.Лысенко.

ТЕМА 1. Классификация электронных модулей управления.

Этапы жизненного цикла и факторы, определяющие проектирование электронных модулей управления лазерных систем

Основные вопросы темы: области применения лазерных систем: машиностроение, энергетика, наука, медицина, передача информации через турбулентную атмосферу, локация, дистанционное зондирование поверхности земли. Структурные особенности ЭМУ лазерных систем, учитывающие специфику применения лазерных систем в различных областях промышленности и науки. Структурные компоненты лазерных систем: оптическая накачка (некогерентная и когерентная), квантовый генератор (типы активных лазерных сред, схемы накачки), система вторичного электропитания, система термостабилизации активной лазерной среды и лазерной системы в целом. История развития конструкций ЭМУ. Классификация и разновидности ЭМУ по условиям эксплуатации, назначению и функциональным признакам. Системы с прямым управлением, системы с обратной связью.

Цель и задачи изучения темы. Освоение материала должно способствовать пониманию взаимосвязи между назначением ЭМУ, этапами жизненного цикла проектирования ЭМУ и ее структурой, развитию умений студентов оценивать возможности лазерных систем, исходя из их конструкций, пониманию взаимосвязи основных компонентов ЭМУ и их влияния на работоспособность лазерной системы в целом.

Основной понятийно-терминологический аппарат: системотехническое и схемотехническое проектирование, полная функция управления, устойчивость систем управления, качество и оптимальность управления, системы с прямым управлением, системы с обратной связью, программно-адаптивное управление, автосинхронизация процессов в сложных технических системах, взаимно вложенные системы управления с

виртуальной структурой, активная среда, оптическая накачка, когерентная/некогерентная накачка, эффективность накачки.

Требования к уровню подготовленности студента. Студент должен разбираться в принципах функционирования основных схем, узлов и компонентов лазерных систем и систем управления, их назначении, иметь базовые представления о законах распространения оптических пучков, иметь представления об алгоритмизации. Знать основные определения, законы и понятия теории управления, схемотехники и программирования.

Контрольные вопросы по теме:

1. Перечислите основные функциональные элементы, входящие в состав любой лазерной системы.
2. Опишите структурные и функциональные особенности ЭМУ, реализующих метод прямого управления.
3. Опишите особенности построения ЭМУ замкнутого типа, основанных на принципе обратной связи.
4. Области применения электронных модулей управления.
5. Особенности когерентной и некогерентной накачки твердотельных активных лазерных сред.
6. История развития конструкций ЭМУ.
7. Перечислите и опишите этапы жизненного цикла ЭМУ.
8. Параметры устойчивости систем управления.
9. Принципы автосинхронизации процессов в сложных технических системах.

ТЕМА 2. Компоновка электронных модулей управления лазерных систем. Общие конструктивные и эксплуатационные требования

Основные вопросы темы: общие технические и эксплуатационные требования к ЭМУ, обобщенная системная модель конструкции ЭМУ, разновидности компоновки. Конструкционные решения и конкретные технические примеры ЭМУ лазерных систем. Роль и задачи инженера-конструктора при проектировании ЭМУ лазерных систем. Основные факторы-ограничения при проектировании ЭМУ лазерных систем. Требования, предъявляемые к быстродействию системы управления.

Цель и задачи изучения темы состоят в изучении конкретных способов реализации отдельных узлов и схем ЭМУ, пониманию влияния конструкции приборов на их функциональные характеристики, а также на работоспособность других компонентов ЭМУ, развитию конструкторских навыков, в частности, развитию умения соотносить потребности ЭМУ с возможностями отдельных ее компонентов и трудностями, возникающими при их эксплуатации.

Основной понятийно-терминологический аппарат: модуль ЭМУ, ПИД - регулятор, широтно-импульсная модуляция, аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователь, вторичный источник питания, «драйвер» питания, надёжность, технологичность, преемственность, ремонтпригодность, динамический диапазон управления, удобство эксплуатации, эргономика конструкции, безопасность эксплуатации, электромагнитная совместимость, специальные требования.

Требования к уровню подготовленности студента – студент должен разбираться в функциональном назначении узлов ЭМУ, уметь проводить расчеты электрических схем, описывающих прохождение электрических сигналов в цепях ЭМУ. Знать основные понятия цифровой обработки сигналов, термодинамики и оптики.

Контрольные вопросы по теме:

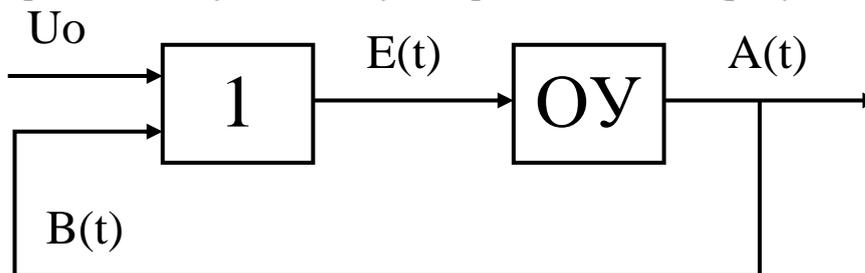
1. Какие факторы задают условия эксплуатации, определяемые стандартами в группы условий эксплуатации?
2. Перечислите уровни модулей ЭМУ, дайте их понятия.
3. Опишите общие конструкторские и эксплуатационные требования, их группы.
4. Что такое надежность ЭМУ, как критерий оценки интенсивности отказов от времени лазерной системы?
5. Дайте определения, технологичности, преемственности, ремонтпригодности и подходы к их повышению.
6. Обеспечение электромагнитной совместимости ЭМУ и выполнение специальных требований к ним.
7. Принципы, используемые в ПИД – регуляторах.
8. Вторичный источник питания (источник тока) в системах полупроводниковой накачки твердотельного лазера.
9. Опишите принципы работы цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования электрических сигналов.
10. Физические принципы и техническая реализация когерентной оптической накачки твердотельных лазерных сред.
11. Нарисуйте схему линейного токового «драйвера» на операционном усилителе для питания линейки лазерных диодов.

Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 1-2.

Устойчивость систем управления

Система находится в состоянии равновесия (устойчива), если при отсутствии воздействия на систему возмущающих факторов (как внешних, так и внутренних) разность между заданным и текущим состоянием системы (ошибка регулирования) стремится к нулю. Устойчивость – это способность динамической системы достигать равновесного состояния при исчезновении действия возмущения, нарушившего равновесие. Система, совершающая колебания с нарастающей амплитудой возле точки равновесия либо удаляющаяся от нее в момент после воздействия возмущения – называется неустойчивой.

Рассмотрим следующую систему с обратной связью (рисунок 1).



Предположим, что в установившемся состоянии равновесия при опорном сигнале U_0 на регуляторе «1» выходное состояние объекта управления ОУ равно $A(t_0)$. Это состояние поддерживается сигналом рассогласования $E_p(t)$, который формируется в регуляторе по разности опорного сигнала и сигнала обратной связи $B(t)$, т.е. $E_p(t) = U_0 - B(t)$. В первый момент включения системы в силу инерционности обратной связи $B(t) = 0$, а, следовательно, $E(t) \gg E_p(t)$, что вызывает нарастание выходной величины $A(t)$, которая будет стремиться к $A(t) \gg A(t_0)$ по крайней мере, до тех пор, пока сигнал обратной связи не начнет уменьшать значение $E(t)$. Однако значительно возросшая величина $A(t)$ через обратную связь передается на вход регулятора системы и может настолько существенно уменьшить значение $E(t)$, что это

может привести к последующему снижению величины выходного сигнала до значений $A(t) \ll A(t_0)$, т.е. к возникновению колебательного процесса относительно равновесного состояния. При неблагоприятном соотношении параметров системы колебательный процесс может быть незатухающим и даже расходящимся, т.е. коэффициент обратной связи становится положительным.

Устойчивость «линейной» системы определяется не характером возмущения, а структурой системы. Говорят, что система устойчива "в малом", если определен факт наличия устойчивости, но не определены ее границы. Система устойчива "в большом", когда определены границы устойчивости и то, что реальные отклонения не выходят за эти границы. Соответственно, и задача исследования систем на устойчивость может быть поставлена двояко:

- 1) устойчива ли система при заданном значении ее параметров;
- 2) в каких диапазонах можно изменять параметры системы, не нарушая ее устойчивости.

Вторая задача исследования имеет место при наладке и эксплуатации систем автоматического управления.

Только устойчивая система является работоспособной. Если система описывается линейным дифференциальным уравнением, то ее устойчивость не зависит от величины возмущения. Линейная система, устойчивая при малых возмущениях, будет устойчива и при больших. Нелинейные системы могут быть устойчивы при малых возмущениях и неустойчивы при больших возмущениях. Поэтому устойчивость систем исследуется отдельно для случая малых и больших возмущений. Проблема устойчивости обычно возникает в замкнутых системах из-за влияния обратной связи.

Качество и оптимальность управления

Требование устойчивости для системы относится к числу необходимых, но не может считаться достаточным. Система может быть устойчивой, но время затухания настолько велико или ошибка в

установившемся режиме настолько большая, что практически данная система не может быть использована. Поэтому система должна быть не только устойчивой, но иметь определенный переходный процесс, а ошибки в установившихся режимах не должны превышать допустимых.

Характер переходного процесса линейной системы в отличие от устойчивости зависит не только от параметров системы, но и от вида возмущающего (задающего) воздействия и начальных условий. Чтобы сравнивать системы по характеру переходного процесса, из возможных воздействий выбирают типовые или наиболее неблагоприятные и определяют кривую переходного процесса при нулевых начальных условиях. В качестве типовых воздействий обычно принимают единичное ступенчатое воздействие, единичный импульс, линейно нарастающее и синусоидальное воздействие. Для большинства систем наиболее неблагоприятным является воздействие вида единичной ступенчатой функции (функция Хевисайда). Реакция системы на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях называется переходной функцией системы. Для следящих систем обычно рассматривают переходную функцию, вызванную изменением задающего единичного ступенчатого воздействия, а для систем стабилизации - переходную функцию, вызванную изменением произвольного возмущающего воздействия.

Точность системы в установившихся режимах оценивается с помощью статических и динамических ошибок. Эти ошибки по аналогии можно назвать показателем качества системы в установившихся режимах. Совокупность показателей качества переходного процесса и установившихся режимов называется показателями качества системы в целом.

Считается, что система обладает требуемым качеством, если ее показатели качества не превышают заданных значений, определенных назначением системы. Для оценки поведения системы в переходном режиме вводятся динамические показатели качества, т. е. численные оценки системы (время переходного процесса, затухание, перерегулирование, и пр.).

Наиболее просто оценить качество переходного режима автономной системы, для которой вынужденная составляющая отсутствует. В установившемся режиме выходная переменная системы в идеальном случае должна быть идентична задающему воздействию, что соответствует нулевому значению установившейся ошибки.

Существует ряд универсальных приемов, позволяющих одновременно оценить динамические и/или точностные показатели системы, к которым относятся методика оценки качества попереходной функции, оценка по интегральным критериям и т. д.

Электромагнитная совместимость

Понятие электромагнитной совместимости (ЭМС) возникло в начале XX века – эры развития и становления радиотехники, обозначая – выбор диапазона рабочих частот. В процессе развития техники это узкое определение расширилось и сейчас ЭМС - это способность радиотехнических систем работать во внешней электромагнитной обстановке без внесения в нее какого-либо недопустимого электромагнитного возмущения.

Условно все помехи можно разделить на два класса: естественного и искусственного происхождения. Помехи искусственного происхождения возникают в процессе человеческой деятельности. Помехи естественного происхождения не связаны с процессами жизнедеятельности человека и существуют, не зависимо от них.

Помехи искусственного происхождения, в свою очередь, делятся на непреднамеренные и организованные. Непреднамеренные помехи возникают в процессе использования человеком различного рода устройств, генерация помех которыми является естественным следствием их функционирования. Организованные помехи создаются искусственно с целью ухудшения функционирования или вывода из строя радиоэлектронных средств (РЭС). Организованные помехи в теории обеспечения требования ЭМС РЭС не рассматриваются. Тем не менее на практике они имеют место, и по характеру

своего воздействия на элементы РЭС во многом идентичны мощным непреднамеренным электромагнитным помехам, особенно с точки зрения влияния на нормальное функционирование РЭС предполагаемой неблагоприятной ЭМС, в которой могут оказаться эти средства. Поэтому, чтобы выдержать основные, сложившиеся в практике обеспечения требований ЭМС РЭС аспекты, в классификации они объединены в единую группу с непреднамеренными помехами.

Основными источниками мощных электромагнитных помех являются: грозовые разряды, радиоэлектронные средства (генераторы высоких частот и импульсных сигналов, мощные радиопередающие средства и радиолокационные станции), высоковольтные линии передачи, контактная сеть железных дорог, а также высоковольтные установки для научных исследований и технологических целей.

Практическое решение проблем ЭМС упрощенно сводится к двум моментам: знанию электромагнитной обстановки и помехоустойчивости оборудования и в приведении их в соответствие друг другу.

Электромагнитная обстановка это совокупность электромагнитных полей (ЭМП) от независимых источников различного рода. На практике при характеристике электромагнитной обстановки используют термины «электрическое поле», «магнитное поле», «электромагнитное поле».

Коротко поясним, что это означает и какая связь существует между ними. Электрическое поле создается зарядами. Магнитное поле создается при движении электрических зарядов по проводнику.

Для характеристики величины электрического поля используется понятие напряженности электрического поля, обозначение E , единица измерения [В/м]. Величина магнитного поля характеризуется напряженностью магнитного поля H , единица [А/м].

Электромагнитное поле – это особая форма материи, посредством которой осуществляется воздействие между электрическими заряженными частицами. Физические причины существования электромагнитного поля

связаны с тем, что изменяющееся во времени электрическое поле E порождает магнитное поле H , а изменяющееся H – вихревое электрическое поле: обе компоненты E и H , непрерывно изменяясь, возбуждают друг друга. Электромагнитное поле (ЭМП) неподвижных или равномерно движущихся заряженных частиц неразрывно связано с этими частицами. При ускоренном движении заряженных частиц ЭМП «отрывается» от них и существует независимо в форме электромагнитных волн, не исчезая с устранением источника (например, радиоволны не исчезают и при отсутствии тока в излучившей их антенне).

Электромагнитные волны характеризуются длиной волны – λ . Источник, генерирующий излучение, а по сути создающий электромагнитные колебания, характеризуется частотой – $f=c/\lambda$.

Важная особенность ЭМП – это деление его на так называемую «ближнюю» и «дальнюю» зоны. В «ближней» зоне, или зоне индукции, на расстоянии от источника $r < \lambda$ ЭМП можно считать квазистатическим. Здесь оно быстро убывает с расстоянием, обратно пропорционально квадрату или кубу расстояния. В «ближней» зоне излучения электромагнитная волна еще не сформирована. Для характеристики ЭМП измерения переменного электрического поля E и переменного магнитного поля H производятся раздельно. Поле в зоне индукции служит для формирования бегущей составляющей полей (электромагнитной волны), ответственных за излучение.

«Дальняя» зона – это зона сформировавшейся электромагнитной волны, начинается с расстояния $r > 3 \lambda$. В «дальней» зоне интенсивность поля убывает обратно пропорционально расстоянию до источника r . В «дальней» зоне излучения есть связь между E и H : $E = 377 H$, где 377 – волновое сопротивление вакуума, Ом. Поэтому измеряется, как правило, только E .

Чувствительными к помехам (приёмниками помех) являются:

- усилители, входные цепи усилителей;

- нагрузка высокочастотных усилителей;
- высокочастотные дроссели, катушки индуктивности.

Для электромагнитной совместимости устройств источников помех и приёмников помех, необходимо ослабить связи между ними до допустимых значений. Помеха может приходиться от источника к приёмнику через следующие виды связи:

- электрическое поле;
- магнитное поле;
- электромагнитное поле;
- через общие цепи, например, цепи питания.

Для электромагнитной совместимости устройства рекомендуется:

1. Пространственное разнесение источников или приёмников помех.
2. Экранирование источников и приёмников помех.
3. Установка фильтров в общие цепи источника, приёмника помех.

Принципиальная электрическая схема узлов и составных частей лазерных систем диктует особенности компоновки и конструирования устройств, которые особо чувствительны к внешним воздействиям и определяют ненадёжность системы в целом.

ТЕМА 3. Проектирование электронных модулей управления и их схем с печатным монтажом

Основные вопросы темы:

Разновидности схем управления лазерными системами. Вольтамперные, ватт-амперные и амплитудно-частотные характеристики электронных компонентов ЭМУ. Определение управляющих напряжений. Передаточная функция системы. Переходная и импульсная характеристики. Энергетические соотношения для активных лазерных элементов. Контур управления. Системы автоматического проектирования (САПР) радиотехнических систем (MatLab, SolidWorks, MultiSim). Система межсоединений. Проектирование печатного монтажа. САПР печатных плат программной среде AltiumDesigner. Волоконно-оптические линии связи.

Цель и задачи изучения темы. Ознакомление с базами электронных компонентов ЭМУ. Студент должен ознакомиться с основными принципами организации управления работой компонентов ЭМУ с учетом функциональных и конструктивных особенностей последних, научиться разбираться в технических аспектах конструирования электронных схем и компонентов ЭМУ.

Основной понятийно-терминологический аппарат: вольтамперные, ватт-амперные и амплитудно-частотные характеристики, САПР, печатный монтаж, трассировка, линию связи, волоконно-оптические линии, ЕСКД.

Требования к уровню подготовленности студента – студент должен иметь базовые представления о принципах схемотехнического проектирования, принципах работы основных компонентов ЭМУ, ориентироваться в основных понятийных аспектах темы, понимать назначение систем управления и основные требования к ним, знать основы автоматического проектирования радиотехнических систем и печатных плат.

Контрольные вопросы по теме:

1. Роль стандартизации в процессе проектирования электронных схем и средств, основные положения ЕСКД.
2. Перечислите основные виды конструкторских документов.
3. Назначение электрической функциональной схемы.
4. Назначение электрической структурной схемы.
5. Опишите модельные и аналитические методы компоновочных работ электронных компонентов и средств ЭМУ, перечислите их достоинства и недостатки.
6. Назовите методы и варианты установки (монтажа) электронных компонент на печатную плату.
7. Требования и правила к размещению функциональных узлов на печатной плате.
8. Перечислите правила проектирования печатных проводников и контактных площадок для внутрисхемного контроля плат с поверхностным монтажом.
9. Способы экранирования печатных проводников.

ТЕМА 4. Проектирование элементов несущих конструкций.

Основные вопросы темы:

Конструкции современных лазерных систем и их ЭМУ. Типы конструкций по их функциональному назначению. Конструктивные особенности систем вторичного электропитания и термостабилизации в мощных лазерных системах.

Цель и задачи изучения темы заключаются в выработке навыков применения полученных знаний при изучении конструкций конкретных приборов. Студент должен научиться оценивать необходимость и целесообразность применения известных принципов и конструкций при разработке мощных лазерных систем.

Основной понятийно-терминологический аппарат: несущий элемент, теплоотводящие системы, повышающий и понижающий преобразователь напряжения, зарядные устройства, литий-ионные аккумуляторы, телескопическая система, лазерный резонатор, тепловое расширение.

Требования к уровню подготовленности студента – студент должен знать устройство и принцип функционирования лазерных систем, знать конструкции основных видов лазерных резонаторов и систем вывода лазерного излучения (телескопов, волоконно-оптических сборок). Владеть математическим аппаратом дифференциального исчисления и численных методов вычисления, иметь навыки работы с программными средами для инженерных вычислений.

Контрольные вопросы по теме:

1. Опишите основные виды несущих элементов ЭМУ, и требования к материалам и методам изготовления несущих конструкций.
2. Проектирование каркасов и теплоотводящих оснований.
3. Особенности конструкций литых и штампованных деталей.

4. Цель и порядок расчета прочности элементов ЭМУ для стационарной аппаратуры и аппаратуры, подвергающейся динамическим нагрузкам.

5. Перечислите процессы внутри лазерного резонатора и в оптическом тракте системы, приводящие к ухудшению выходного лазерного излучения

6. Варианты схем квантовых генераторов с продольной накачкой активного лазерного элемента (конструктивные особенности)

7. Варианты схем квантовых генераторов с поперечной накачки активного лазерного элемента (конструктивные особенности)

8. Опишите известные Вам примеры мощных лазерных систем, а также круг задач, в которых они используются. Какие специфические требования к основным элементам ЭМУ определяются спецификой таких систем

Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 3-4

Накачка активных лазерных сред, на примере градиентного активного элемента

Простейший градиентный активный элемент (АЭ) можно представить себе как АЭ (в форме «слэба», диска, стержня), в котором концентрация ионов активирующей примеси плавно изменяется, точно соответствуя оптимальному профилю мощности накачки.

Известно, что при однородном распределении активатора и, следовательно, постоянном по объему активного лазерного элемента коэффициенту поглощения k поглощаемая плотность мощности накачки P при плотности падающего на активный элемент потока F_0 уменьшается по мере распространения излучения экспоненциальным образом.

$$P(z) = k \cdot F_0 \cdot \exp(-k \cdot z) \quad (1)$$

Коэффициент поглощения накачки определяется концентрацией активирующей примеси. Рассмотрим неоднородное распределение активатора $N(z)$ в активном элементе, например, по закону

$$N(z) = \frac{N_0}{1 - N_0 \cdot k_0 \cdot z}, \quad (2)$$

где N_0 - количество атомарных процентов активатора (молярный вес в соединении) в приповерхностном слое, k_0 - коэффициент поглощения излучения накачки при одном атомарном проценте активатора.

За счет изменения концентрации активатора коэффициент поглощения будет иметь вид:

$$k(z) = \frac{N_0 \cdot k_0}{1 - N_0 \cdot k_0 \cdot z}, \quad (3)$$

Величина плотности потока накачки будет равна

$$F(z) = F_0 \cdot (1 - N_0 \cdot k_0 \cdot z), \quad (4)$$

а плотность поглощенной мощности определится выражением:

$$P(z) = k(z) \cdot F(z) = N_0 \cdot k \cdot F_0 = \text{const}(z). \quad (5)$$

В этом случае поглощаемая мощность накачки будет постоянна в объеме активного элемента. Аналогично можно задать другое распределения активатора и таким образом на основе этого распределения решать задачи о распределении поглощенной мощности излучения, о распределении тепловыделения, о пространственных термических изменениях коэффициента преломления.

Следует отличать композитную керамику и градиентную керамику. Активные лазерные элементы (АЭ), у которых химический состав является переменным по какому-либо направлению, не совсем справедливо называют композитными керамическими элементами. Если следовать этимологии слова «композит», то оно происходит от понятия «составной». Поэтому разумно считать композитными керамическими элементами, те из них, которые составлены из частей имеющих различный химический состав, различную структуру (макро- и микро-), или различные кристаллические

фазы. Ключевым в этом определении является словосочетание «составленные из частей», т.е. наличествует физическая граница между указанными частями.

Композитные АЭ давно и успешно используются в лазерной технике. Например, сваренные кристаллические элементы на основе иттрий-алюминиевого граната ИАГ, склеенные стеклянные АЭ. Известны АЭ ИАГ, в которых части легированные активными ионами соединены с частями нелегированными, или/и частями обладающими нелинейным поглощением, или/и частями гасящими суперлюминесценцию, и т.д.. Очевидно, что все подобные структуры могут и, по мере надобности, должны быть реализованы при использовании керамики в качестве активной лазерной среды. Здесь не видится физических, технологических и иных ограничений, по крайней мере, до тех пор, пока размеры частей не становятся сравнимы с размерами зерен керамики. Подчеркнем еще раз. Композитные керамические АЭ в сути своей ничем не отличаются от кристаллических АЭ и АЭ на основе стекла. В тоже время, для керамических АЭ, существует конструктивная и технологическая ниша, которая не доступна ни для стекла, ни для кристаллов. Эта ниша – градиентные АЭ.

Простейший градиентный АЭ можно представить себе как АЭ, в котором, например, концентрация иона активатора плавно изменяется, точно соответствуя оптимальному профилю мощности накачки. Понятно, что в композитных АЭ ни о каком плавном изменении концентрации иона активатора не может быть речи. Насколько плавно может меняться концентрация в градиентных АЭ? Насколько малую величину градиента можно реализовать в таких структурах?

Базовый принцип технологии керамики это спекание отдельных частиц исходного порошка в некий монолит. Следовательно, минимальная по линейным размерам ступенька в градиенте состава керамики в пределе может достигать размера частицы порошка, т. е. величины менее микрона. Способы формирования градиентных структур в общем виде известны.

Градиенты состава формируют на стадии компактирования. Наиболее часто используемые методы ламинирования лент полученным методом литья на подвижную ленту, послойное прессование, секторальное литье в пористые формы.

Все эти методы применяются в промышленности для различных керамик (не оптических), но исключительно для небольших элементов. Простой перенос такого рода технологий на процесс получения оптических керамик, особенно больших АЭ не возможен. Необходимо исследовать особенности основных методов применительно к получению оптических, лазерных керамик, особенно больших размеров и выработать практические рекомендации по выбору метода для получения тех, или иных градиентных структур и АЭ.

Кинетика лазера на ионах неодима.

Считаем, что нижний лазерный уровень распадается быстро, а потому число таких состояний будем считать равным нулю. В этом случае динамика верхнего уровня будет описываться следующим уравнением:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{\sigma \cdot I}{h\nu} \cdot N_2 - \frac{N_2}{\tau} + \frac{P}{h\nu_n} = -\left(\frac{\sigma \cdot I}{h\nu} + \frac{1}{\tau}\right) \cdot N_2 + \frac{P}{h\nu_n} \quad (1)$$

Первый член в правой части описывает скорость индуцированных переходов, второй - скорость спонтанных переходов, третий - скорость накачки. $N_2, \sigma, h\nu, I, \tau, P, h\nu_n$ - плотность верхнего лазерного уровня, сечение лазерного перехода, энергия кванта излучения, плотность потока излучения, время жизни верхнего уровня, мощность накачки, энергия кванта накачки.

Следующее уравнение описывает динамику числа фотонов в лазерном объеме

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\sigma \cdot I}{h\nu} \cdot V \cdot N_2 - \left(\frac{1}{\tau_\phi} + \kappa \cdot \delta \cdot \frac{c}{n}\right) \cdot q, \quad (2)$$

$q, V, \tau_\phi, c, \kappa, n, \delta$ - число фотонов в объеме резонатора, объем активной среды, время жизни фотона в резонаторе, скорость света в вакууме, коэффициент

поглощения света на длине волны излучения, коэффициент преломления активной среды, доля времени когда фотон находится в активной среде.

Свяжем плотность потока излучения в резонаторе с числом фотонов в резонаторе. Плотность потока вне активной среды:

$$I = \frac{q_1 \cdot c \cdot h\nu}{V_p - V}, \quad (3)$$

где V_p - объем резонатора, q_1 - число фотонов вне активной среды.

Плотность потока в активной среде и вне неё считаем одинаковыми. Плотность потока в активной среде:

$$I = \frac{q_2 \cdot c \cdot h\nu}{n \cdot V}, \quad (4)$$

где q_2 - число фотонов в активной среде.

Приравнивая (3) и (4) и учитывая, что суммарное число фотонов в резонаторе равно q , то

$$\frac{(q - q_1)}{L \cdot n} = \frac{q_1}{L_p - L}, \quad (5)$$

где S, L, L_p - сечение светового пучка, длина активной среды, длина резонатора. Тогда число фотонов вне активной среды

$$q_1 = \frac{q \cdot (L_p - L)}{(L_p + L \cdot (n - 1))}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3) получим уравнение связи общего числа фотонов и плотности потока излучения.

$$I = \frac{q \cdot c \cdot h\nu}{S \cdot (L_p + L \cdot (n - 1))}. \quad (7)$$

Следовательно, в стационарном состоянии, плотность верхнего лазерного уровня равна:

$$N_2 = \left(\frac{1}{\tau_\phi} + \kappa \cdot \delta \cdot \frac{c}{n} \right) \cdot \frac{(L_p + L \cdot (n - 1))}{\sigma \cdot c \cdot L}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (1) и находя его стационарное решение, получим уравнение для плотности потока лазерного излучения.

$$I = \frac{h\nu}{h\nu_n} \cdot \frac{c \cdot L \cdot P}{(L_p + L \cdot (n-1)) \cdot \left(\frac{1}{\tau_\phi} + \kappa \cdot \delta \cdot \frac{c}{n} \right)} - \frac{h\nu}{\sigma \cdot \tau} \quad (9)$$

Время жизни фотона в резонаторе определяется временем пробега фотона по резонатору туда и обратно в случае, когда одно зеркало имеет 100 % отражение, и коэффициентом отражения R второго зеркала.

$$\tau_\phi = 2 \cdot \frac{L_p + (n-1) \cdot L}{c \cdot \ln(1/R)} \quad (10)$$

В конечном итоге плотность потока лазерного излучения будет равна:

$$I = \frac{h\nu}{h\nu_n} \cdot \frac{2 \cdot L \cdot P}{\left(\ln(1/R) + 2 \cdot (L_p + L \cdot (n-1)) \cdot \delta \cdot \frac{\kappa}{n} \right)} - \frac{h\nu}{\sigma \cdot \tau} \quad (11)$$

Пороговую мощность определим из условия, что $I > 0$.

$$P_{II} = \frac{h\nu_n}{\sigma \cdot \tau} \cdot \frac{\ln(1/R) + 2 \cdot (L_p + L \cdot (n-1)) \cdot \frac{\delta \cdot \kappa}{n}}{2 \cdot L}, \quad (12)$$

где $\delta = \frac{L \cdot n}{L_p + (n-1) \cdot L}$.

В итоге получим зависимость потока мощности излучения от потока мощности накачки:

$$I = \frac{h\nu}{h\nu_n} \cdot \frac{2 \cdot L \cdot P}{(\ln(1/R) + 2 \cdot L \cdot \kappa)} - \frac{h\nu}{\sigma \cdot \tau} \quad (13)$$

Список дополнительной литературы

[1] Шеин, А.Б. Методы проектирования электронных устройств [Электронный ресурс] / А. Б. Шеин, Н. М. Лазарева. - М.: Инфра-Инженерия, 2011.- 456 с. – Режим доступа:

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=520288;264> с.

[2] Панков, Л. Н. Основы проектирования электронных средств [Электронный ресурс]: Учеб. пособие / Л. Н. Панков, В. Р. Асланянц, Г. Ф. Долгов, В. В. Евграфов; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 260 с. — Режим доступа:

<http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/1124/3/00537.pdf>.

[3] Борн М. Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. / Под ред. Г.П. Мотулевич. — М.: Наука, 1973. — 720 с.

[4] Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 320 с.

[5] Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990.

[6] Шайдуров, Г. Я. Основы теории и проектирования радиотехнических систем [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Г. Я. Шайдуров. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. - 283 с. – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=441951>.

[7] Основы автоматизированного проектирования: Учебник/Под ред. А.П.Карпенко - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 329 с.: Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=477218>

[8] Малков, Н.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учеб. пособие / Н.А. Малков, А.П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 88 с.