

Глухих Игорь Васильевич

***ФОРМИРОВАНИЕ УЗКОНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ
ИНФРАКРАСНОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН***

01.04.21- Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в Федеральном Государственном Унитарном Предприятии «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова», г. Санкт-Петербург

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук

Гарнов Сергей Владимирович,

доктор физико-математических

Туманов Игорь Алексеевич,

доктор физико-математических наук

профессор

Сидоров Александр Иванович

Ведущая организация: Российский Федеральный Ядерный Центр Всероссийский Научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г.Саров.

Защита состоится 22 марта 2012 г. на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», по адресу: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, II уч. корпус, ауд. 470

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “ 13 ” января 2012г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.229.01 д.т.н., профессор _____ Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С момента открытия лазеров проблема формирования узконаправленного лазерного излучения всегда была самостоятельной и актуальной задачей. В большинстве фундаментальных задач взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, проблем лазерного термоядерного синтеза, специальных или технологических применений лазеров требуется либо доставка излучения на значительные расстояния, либо его фокусировка в пятно минимальных размеров. Для этого необходимо обеспечить максимальную яркость лазерного излучения, которая прямо пропорциональна мощности и обратно пропорциональна квадрату расходимости лазерного излучения.

Электроионизационные (ЭИ) CO_2 -лазеры импульсно-периодического действия являются наиболее распространенными среди мощных лазерных источников среднего ИК диапазона. Современные ЭИ CO_2 -лазеры имеют объем активной среды (АС), достигающий нескольких сот литров, а поперечные размеры лазерного пучка - нескольких десятков сантиметров. При длительности импульса генерации $\tau_{\text{имп}} \approx 10 \div 40 \text{ мкс}$ энергия импульса излучения таких лазеров может достигать нескольких килоджоулей, а пиковая мощность - сотен мегаватт при КПД до 20%. Одной из важнейших характеристик лазерного пучка является расходимость излучения, на величину которой оказывают влияние тип и параметры применяемого в лазере резонатора и оптические неоднородности АС.

В настоящее время в подавляющем большинстве CO_2 -лазеров с большими поперечными размерами АС, в том числе и в ЭИ CO_2 -лазерах, применяются неустойчивые резонаторы (НР), способные в случае оптически однородной АС обеспечить генерацию излучения с предельно малой расходимостью, определяемой дифракцией излучения на выходной апертуре лазера.

Причинами появления оптических неоднородностей в АС ЭИ CO_2 -лазеров могут быть волны сжатия и разрежения, стримеры и токовые шнуры, формирующиеся в приэлектродных областях активной среды, а также газодинамические возмущения в объеме АС. В проточных импульсно-периодических ЭИ CO_2 -лазерах существенную роль могут играть акустические колебания резонансного характера, возникающие в газовом тракте при периодическом вкладе энергии и турбулентность газового потока.

С помощью современных технических средств эти возмущения могут быть значительно снижены, так что их влияние на качество выходного пучка будет незначительным. Например, для проточных лазеров однородность плотности газового потока $\Delta\rho/\rho$ удалось уменьшить до величины $\sim 10^{-3} \%$.

Однако расходимость излучения ЭИ CO_2 -лазеров оказалась далека от предельно достижимой даже при импульсном режиме работы, когда активная среда в исходном состоянии не имеет оптических неоднородностей. Одной из причин ухудшения расходимости излучения ЭИ CO_2 -лазера являются оптические неоднородности самовоздействия, вызванные зависимостью скорости V-T

релаксации возбужденных молекул CO_2 от локальной интенсивности светового поля. Поскольку причиной возникновения неоднородностей самовоздействия является само излучение, уменьшить его влияние на расходимость лазерного пучка техническими средствами не представлялось возможным. Поэтому потребовались систематические экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик лазерного излучения в условиях, характерных для мощных ЭИ CO_2 -лазеров, которые влияют на развитие эффекта самовоздействия в АС.

Мощные твердотельные лазеры (ТТЛ) могут рассматриваться как альтернатива CO_2 -лазерам в различных технологических процессах вследствие компактности и надежности конструкции, стабильности параметров и возможности применения гибких волокон для доставки излучения до объекта воздействия. Однако традиционные ТТЛ с ламповой накачкой обладают низкой эффективностью, а расходимость излучения таких лазеров в $20\div 100$ раз превышает дифракционный предел. Это обстоятельство не позволяет в полной мере реализовать преимущества технологических операций, требующих высокой степени концентрации излучения. В то же время лазеры ближнего ИК диапазона представляют значительный интерес в связи с более высоким поглощением лазерного излучения большинством материалов, применяемых в промышленности.

Использование диодной накачки решает многие проблемы при разработке мощных ТТЛ, позволяя создавать более эффективные лазерные комплексы. Для достижения мощности генерации киловаттного уровня используются различные оптические схемы накачки, в том числе поперечная накачка цилиндрического активного элемента сборками лазерных диодов. Однако возникновение тепловой линзы и наведенного двулучепреломления в активном элементе является препятствием при создании мощных ТТЛ с высоким качеством лазерного излучения. Кроме того, при использовании плоского резонатора генерация происходит на нескольких поперечных модах и расходимость излучения существенно превышает дифракционный предел.

Проблема уменьшения расходимости излучения также актуальна при создании эксимерных лазеров, которые применяются в качестве источника ультрафиолетового излучения для литографии, в установках модификации поверхности, микрообработки материалов и для научных исследований. Средняя мощность эксимерных лазеров лежит в диапазоне от единиц до нескольких сот ватт. Энергия в импульсе изменяется от единиц миллиджоулей до нескольких джоулей при длительности импульсов $10\div 300$ нс и частоте следования от десятка до сотен герц.

Максимальные мощности излучения эксимерных лазеров обеспечивают плоские резонаторы. Однако при этом расходимость излучения составляет для сантиметровых апертур несколько миллирадиан, что почти на два порядка превышает дифракционный предел и не позволяет сфокусировать лазерный луч в пятно размерами в несколько микрон. Это обстоятельство является принципиальным ограничением в ряде задач микроэлектроники и требует проведения исследований.

Таким образом, для мощных газовых и твердотельных лазеров инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) диапазона длин волн задача достижения расходимости излучения, близкой к дифракционному пределу, является актуальной.

Помимо энергетических и пространственных характеристик лазерного излучения эффективность использования лазеров в таких областях, как лазерная химия, лазерный термоядерный

синтез, нелинейная оптика и других, определяется спектральной шириной линии генерации и возможностью перестраивать длину волны излучения. Кроме того, спектральный состав линии генерации лазера имеет значение при прохождении лазерного луча через протяженные трассы в атмосфере. Поэтому также актуальной является задача управления спектром излучения ЭИ СО₂-лазера с длительностью импульса накачки $\tau_n=10\div 30$ мкс.

Применение полупроводниковых излучателей, вместо ламп накачки, излучающих в широком спектральном диапазоне и имеющих низкую надежность, позволяет создавать мощные, малогабаритные и надежные лазеры и лазерные системы с хорошим качеством излучения и высоким к.п.д. Для эффективной диодной накачки активных сред твердотельных лазеров требуется согласование спектра излучения лазерных диодов и спектра поглощения активной среды.

Если накачиваемая среда имеет узкую полосу поглощения, то на эффективность накачки существенное влияние оказывают ширина огибающей спектра излучения и положение ее максимума. Поэтому исследование спектрального состава излучения мощных лазерных диодов является актуальной задачей.

Согласование спектра излучения диодной накачки и спектра поглощения активной среды особенно важно для лазеров на парах щелочных металлов. Если для накачки твердотельных лазеров ширина спектральной линии излучения современных мощных диодных лазеров ($\Delta\lambda\sim 3$ нм) сравнима с шириной спектральной линии поглощения активного элемента, то для газовых лазеров на парах щелочных металлов ширина линии поглощения (D_2) меньше более чем на порядок. Поэтому, непосредственное использование для накачки активных сред на парах щелочных металлов излучения традиционных мощных линеек и матриц диодных лазеров оказывается недостаточно эффективным. Создание диодных лазеров с более узкой шириной спектра генерации является также актуальной задачей.

Цель и задачи работы

Основной целью данной работы является обоснование физических принципов формирования лазерного излучения высокой направленности мощных лазеров и разработка методов достижения максимальной яркости излучения мощных лазеров ИК и УФ диапазонов длин волн - СО₂, твердотельных и эксимерных лазеров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- Разработать методики исследования энергетических, пространственных и спектральных характеристик лазерного излучения ИК и УФ диапазонов длин волн
- Исследовать механизмы, влияющие на расходимость излучения лазеров ИК и УФ диапазонов длин волн
- Оптимизировать состав активной среды мощных электроразрядных СО₂ – лазеров для подавления влияния эффекта самовоздействия на расходимость излучения
- Исследовать динамику формирования спектрального состава излучения СО₂ – лазеров для различных изотопов молекулы СО₂

- Провести расчеты, разработать и изготовить мощные модули диодной накачки для ТТЛ на основе теплоотводов с повышенной эффективностью отвода тепла на уровне $1\text{кВт}/\text{см}^2$
- Разработать конструкцию и изготовить излучатели для ТТЛ мощностью $100\div 1000\text{Вт}$
- Провести расчеты и экспериментально исследовать оптические схемы резонаторов ТТЛ и эксимерных лазеров для формирования излучения с предельно малой расходимостью

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые для ЭИ CO_2 -лазеров атмосферного давления проведена оптимизация состава смеси АС и экспериментально показано, что для характерных условий накачки ненасыщенный коэффициент усиления, который обеспечивают “легкие” смеси типа $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:6$, на 20% выше, чем традиционные смеси 1:2:3, 1:5:2 или 1:6:3. Представлены экспериментальные результаты измерения распределения ненасыщенного коэффициента усиления по сечению АС, как для традиционных смесей, так и для смесей, содержащих добавки водорода и аргона.

2. Разработаны методики исследования энергетических и пространственных характеристик излучения мощных CO_2 , твердотельных и эксимерных лазеров для длин волн - 10мкм, 1064нм и 248нм.

3. Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования зависимости расходимости излучения мощного импульсного ЭИ CO_2 -лазера атмосферного давления от мощности и длительности накачки, интенсивности вынужденного излучения, состава смеси и параметров резонатора, в том числе:

- Проведено сравнение влияния на расходимость излучения катодной и анодной волн плотности и волны плотности, возникающей на границе лазерного пучка вследствие эффекта теплового самовоздействия. Показано, что только из-за эффекта самовоздействия расходимость излучения более чем в три раза превышает дифракционный предел.

Получена зависимость углового распределения интенсивности излучения мощного ЭИ CO_2 -лазера в течение импульса генерации, и показано, что при длительности импульса излучения $\leq 30\text{мкс}$ широкие и достаточно интенсивные крылья диаграммы направленности излучения образуются спустя $10\div 15\text{мкс}$ после начала генерации даже при убывающей во времени мощности излучения.

- Теоретически обосновано и экспериментально показано, что при длительности импульса накачки $\tau_n \leq 30\text{мкс}$ наименьшую расходимость излучения обеспечивают смеси с содержанием He на уровне 75% и отношением концентраций $[\text{CO}_2]:[\text{N}_2]=1\div 2$.

4. Экспериментально установлено, что генерация ЭИ CO_2 -лазера атмосферного давления с длительностью импульса накачки 30мкс протекает одновременно на нескольких вращательных переходах $P(14)\div P(20)$ с выделением 70÷90% полной энергии на переходе $P(20)$.

5. Предложена методика расчета неустойчивого резонатора отрицательной ветви диаграммы устойчивости при наличии градиента показателя преломления по радиусу активного элемента. Для ТТЛ с диодной накачкой непрерывного действия экспериментально получена расходимость излучения лишь в 2 раза превышающую дифракционный предел.

Практическая значимость работы

1. Результаты исследования использованы для разработки мощных электроразрядных CO_2 и эксимерных лазеров с высоким качеством выходного излучения.
2. В результате проведенных исследований найдены рабочие смеси, позволяющие получать расходимость излучения ЭИ CO_2 -лазера, близкую к дифракционной, при высоком удельном энергоусе, характерном для традиционно используемых смесей. Для широкоапертурного резонатора с размерами апертуры $10 \times 20 \text{ см}$ в импульсном режиме получена расходимость $(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$ рад по уровню 0,8 полной энергии.
3. Применение редких изотопов CO_2 в АС ЭИ CO_2 -лазера позволило получить генерацию излучения в спектральных диапазонах $9.3 \div 9.6 \text{ мкм}$ и $11.2 \div 11.6 \text{ мкм}$.
4. На основе численных расчетов и экспериментов разработаны эффективные теплоотводы сборок лазерных линеек и матриц для систем накачки мощных твердотельных лазеров. Разработана базовая конструкция и изготовлена серия твердотельных Nd:Yag лазеров с диодной накачкой мощностью излучения 150, 300, 500 и 1000 Вт и однородностью по сечению активного элемента на уровне 10%.
5. Результаты исследования могут быть использованы для разработки мощных ≥ 10 кВт ТТЛ с диодной накачкой с улучшенным качеством излучения ближнего ИК диапазона длин волн.
6. На базе эксимерного KrF-лазера с неустойчивым телескопическим резонатором для микроэлектронной технологии создан лазерный комплекс, позволивший сфокусировать лазерный луч в пятно диаметром 2 мкм.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование газовых смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:6$; $1:1:8$ позволяет получить более высокий (по сравнению с традиционными смесями) ненасыщенный коэффициент усиления АС ЭИ CO_2 -лазера атмосферного давления с длительностью импульса накачки $10 \div 30 \text{ мкс}$.
2. Наименьшую расходимость излучения ЭИ CO_2 -лазера атмосферного давления при длительности импульса накачки $\tau_n \leq 30 \text{ мкс}$ обеспечивают смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ с содержанием He на уровне 75% и отношением $[\text{CO}_2]:[\text{N}_2]=1 \div 2$.
3. Применение широкоапертурного резонатора с размерами апертуры $10 \times 20 \text{ см}$ позволяет в импульсном режиме получить расходимость излучения ЭИ CO_2 -лазера $(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$ рад по уровню 0,8 полной энергии.
4. Генерация ЭИ CO_2 -лазера атмосферного давления с длительностью импульса накачки 30 мкс протекает одновременно на нескольких вращательных переходах $P(14) \div P(20)$ с выделением 70-90% полной энергии на переходе $P(20)$.
5. Использование неустойчивого резонатора отрицательной ветви диаграммы устойчивости для ТТЛ с диодной накачкой непрерывного действия позволяет получить расходимость излучения только в 2 раза превышающую дифракционный предел.
6. Применение неустойчивого телескопического резонатора с большим увеличением $M=10$ для эксимерного KrF-лазера позволяет в 10 раз уменьшить расходимость излучения при незначительной потере выходной мощности.

Результаты выполненной работы представляют собой решение научной проблемы формирования лазерного излучения высокой направленности мощных лазеров ИК и УФ диапазонов длин волн и следующих задач:

1. Подавление влияния эффекта самовоздействия в объеме АС на качество излучения ЭИ СО₂-лазера для достижения минимальной расходимости излучения среднего ИК диапазона (длина волны $\lambda=10\text{мкм}$).
2. Достижение близкой к дифракционной расходимости излучения ближнего ИК диапазона ($\lambda=1,06\text{мкм}$) ТТЛ с диодной накачкой.
3. Уменьшение расходимости излучения УФ диапазона ($\lambda=0,248\text{нм}$) эксимерного KrF-лазера до уровня $(2\div 4)\cdot 10^{-4}$, что позволило сфокусировать лазерный луч в пятно диаметром 2мкм и использовать лазер в микроэлектронной технологии.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в постановке задач, разработке методик и проведении исследований энергетических, спектральных и пространственных характеристик мощных лазеров ИК и УФ диапазонов длин волн. Личное участие автора является определяющим в получении, анализе и представлении экспериментальных результатов исследования расходимости излучения мощных СО₂, твердотельных и эксимерных лазеров.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на 12 международных конференциях “Оптика лазеров 1987, 2000, 2003, 2006, 2008”, CLEO Europe-2005, 2007, Photonics West-2008, Europhoton-2006, ALT-07, Харитоновские чтения-2008, HPLB-2006, 1st Topical Meeting on Lasers-2009.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 43 печатные работы в научных журналах, докладах и тезисах конференций. Из них 19 – в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, содержит 209 страниц машинописного текста, 90 рисунков, 8 таблиц и список литературы, включающий 140 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследований, и кратко описываются проблемы, сформулированные в предшествующих научных работах. Далее приводится описание четырех лазерных установок, на которых проводились экспериментальные исследования.

Основные экспериментальные методики, использованные в данной работе для измерения энергетических и пространственных характеристик лазерного излучения, были отработаны на лазерном стенде “Модуль-2”, представляющем собой импульсный ЭИ СО₂-лазер атмосферного давления с объемом активной среды 10л и межэлектродным расстоянием 10см. Для вывода излучения использовался неустойчивый телескопический резонатор с различными увеличениями $M=1,5\div 3$. Удельная энергия накачки варьировалась в пределах $100\div 300\text{Дж/л}\cdot\text{атм}$ при длительности накачки $10\div 30\text{мкс}$.

Разработанные экспериментальные методики были использованы для исследований характеристик излучения лазеров “Максим” и “Эклиз”. Лазерная установка “Максим” представляет собой импульсный ЭИ CO_2 -лазер квазинепрерывного действия с замкнутым газовым контуром и объемом активной среды 2л. При максимальной скорости протока газа 21м/с и расходе газа 0,8кг/с максимальная частота следования импульсов длительностью 30мкс составляла 200Гц. Для формирования излучения применялся двухпроходный неустойчивый телескопический резонатор. Максимальная средняя мощность генерации установки “Максим” 5кВт.

Установка “Эклиз” представляет собой электроразрядный эксимерный лазер импульсно-периодического действия с замкнутым газовым контуром. Объем активной среды составляет 56см³ при межэлектродном расстоянии 2см. При максимальной частоте следования импульсов 200Гц средняя мощность генерации для KrF-смесей составила 30Вт.

На стенде «Твердотельных Лазеров с диодной накачкой» проводились исследования характеристик излучения созданных в НИИЭФА ТТЛ с диодной накачкой мощностью 150, 300 и 500Вт. В лазерных головках использовались Nd:Yag стержни Ø4÷6мм длиной 80÷100мм с концентрацией Nd 0,6%. Накачка производилась модулями линеек лазерных диодов суммарной мощностью 500, 840 и 1680Вт соответственно.

В первой главе представлены результаты экспериментальных измерений энергетических характеристик и усиления АС ЭИ CO_2 -лазеров “Модуль-2” и “Максим” при длительности импульса накачки 10÷30мкс. Приводятся зависимости удельной энергии генерации от удельной энергии накачки для различных смесей и режимов накачки. Обосновывается возможность достижения высоких удельных энергокладов при использовании в качестве АС смесей с содержанием He более 50%. Описана методика и приведены экспериментальные результаты измерения распределения коэффициента усиления слабого сигнала по сечению АС импульсного ЭИ CO_2 -лазера для набора смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{H}_2:\text{Ar}$ и различных режимов накачки. Для ЭИ CO_2 -лазера “Максим” в импульсно-периодическом режиме работы представлены временные зависимости коэффициента усиления слабого сигнала через 1, 2 и 5 минут работы лазера на частоте 30Гц и средней мощности накачки 10⁴Вт/л. По результатам этих измерений показана целесообразность использования системы регенерации смеси для ЭИ CO_2 -лазеров импульсно-периодического действия.

Вторая глава посвящена комплексному исследованию расходимости излучения импульсного ЭИ CO_2 -лазера “Модуль-2”. Во введении второй главы описан метод фокального пятна, который использовался для измерения расходимости излучения. Как известно, время образования оптических неоднородностей, их пространственный масштаб и степень влияния на расходимость излучения определяются мощностью и длительностью накачки, интенсивностью вынужденного излучения, составом рабочей смеси и параметрами резонатора. В первом параграфе второй главы представлены результаты измерения расходимости излучения, когда в качестве АС лазера используются традиционные смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:2:3$; $1:3:0$ и $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2=1:3:0,12$ при длительностях накачки $\tau_n=15$ и 30мкс. Для вывода излучения использовался неустойчивый телескопический резонатор (НТР) с $M=2$ и апертурой 10x10см². Оказалось, что даже при малом значении энергии накачки $q_n=67$ Дж/л расходимость излучения по уровню 0,8 полной энергии в 4 раза превышает

дифракционный предел. Обусловлено это, главным образом, рефракцией излучения на катодной и анодной волнах плотности, так как ухудшение оптического качества АС из-за самовоздействия при интенсивности излучения $\langle I \rangle = 30 \text{ кВт/см}^2$, усредненной по сечению пучка и за время генерации, еще невелико. С повышением мощности накачки и интенсивности излучения увеличивается влияние граничных волн плотности и мелкомасштабных оптических неоднородностей (МОН), обусловленных самовоздействием, что приводит к еще большему увеличению расходимости излучения.

Сокращение τ_n до 15 мкс при сохранении мощности накачки на том же уровне, что и при $\tau_n = 30 \text{ мкс}$, не сопровождается уменьшением углового распределения энергии. Совпадение двух кривых свидетельствует о том, что при $\tau_n = 30 \text{ мкс}$ расходимость излучения достигает максимума в течение первых 15 мкс, когда мощности накачки и излучения также максимальны и не слишком быстро изменяются во времени. Этот вывод подтверждается распределением интенсивности излучения на развернутой во времени дальнопольной картине: наибольшая ширина крыльев распределения наблюдается спустя 15 мкс после начала генерации.

Во втором параграфе показано влияние на расходимость излучения оптических неоднородностей, образующихся в различных зонах АС.

В силу аксиальной симметрии НТР генерирующую среду можно представить как совокупность четырех секторов, разделенных плоскостями, проходящими через диагонали квадратного вогнутого зеркала. При использовании маски расходимость излучения каждого сектора будет определяться неоднородностями соответствующего участка среды. Сравнение угловых распределений энергии излучения разных зон показывает, что расходимость излучения может быть уменьшена, если предотвратить проникновение катодной и анодной волн в резонаторный объем во время генерации. Это достигается уменьшением апертуры резонатора. Однако такой прием приводит к уменьшению генерирующего объема, поэтому его использование оправдано только при условии, что влияние на расходимость излучения катодной и анодной волн больше, чем волны, возникающей на наружной границе лазерного пучка. Соотношение $c_0 \tau_n < (h/2) - a$, где c_0 – скорость звука, $h = 100 \text{ мм}$ – высота разрядного промежутка, $2a$ – апертура резонатора, заведомо выполняется для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:3$ ($c_0 = 517 \text{ м/с}$ при $T = 400 \text{ К}$), если $\tau_n = 10 \text{ мкс}$ и $2a = 80 \text{ мм}$. Полученная для этих условий расходимость по уровню 0,8 полной энергии более чем в 5 раз превышает дифракционную, причем наблюдавшуюся с НТР при $2a = 100 \text{ мм}$. Существенно, что лучшая расходимость излучения получена с резонатором меньшей апертуры при больших q_n и q_r .

Поскольку расходимость излучения, полученная с НТР малой апертуры, определяется в основном оптическими неоднородностями, возникающими из-за самовоздействия, его подавление или ослабление является условием продвижения к дифракционному пределу. Представлена экспериментальная проверка одной из таких возможностей ослабления самовоздействия, которая заключается в увеличении плотности ρ рабочей смеси в связи с тем, что $c_0 \sim \rho^{-1/2}$. В эксперименте использовалась смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:3$, которая по сравнению со смесью $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:3$ помимо меньшей c_0 имеет большие удельную теплоемкость и время VT-релаксации населенности уровня 01^1O CO_2 . Так как эти свойства способствуют ослаблению и замедлению не только самовоздействия, но и всех волн

плотности, измерения расходимости излучения на смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:3$ были проведены с НТР, апертура которого равнялась высоте разрядного промежутка. Поскольку длительность генерации на данной смеси при $\tau_n = 30\text{мкс}$ не превышала 15мкс , τ_n была уменьшена до 15мкс , а мощность накачки увеличена до предельной величины, при которой возбуждение среды по высоте разрядного промежутка оставалось еще однородным. Несмотря на эти меры, полный энергосъем составил всего 54Дж , а интенсивность $\langle I \rangle \approx 65\text{кВт/см}^2$, что примерно в 5 раз ниже тех же параметров для смеси 1:2:3.

В этих условиях, когда исходный важный для развития самовоздействия параметр-интенсивность излучения оказался малым, расходимость излучения уменьшилась в 2 раза и составила по уровню 0,8 полной энергии 2,5 дифракционной. Принимая во внимание, что при уменьшении апертуры резонатора от 100 до 80мм угловое распределение энергии излучения улучшается в 1,5раза, можно считать, что на смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:3$ с резонатором малой апертуры расходимость излучения будет близкой к дифракционной.

Описывается попытка повысить энергосъем для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:3$, не изменяя ее термодинамических, акустических и оптических свойств, путем небольшой (~3%) добавки H_2 . Однако обеспечиваемый ею почти двукратный выигрыш в энергии оборачивается более чем трехкратным проигрышем в расходимости излучения.

Причиной ухудшения расходимости излучения для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:3$ при добавлении в нее H_2 является усиление самовоздействия. Оценка тепловыделения в областях АС показала, что в водородной смеси оно больше по величине, чем в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:2:3$, что обусловлено большей скоростью расселения обоих лазерных уровней в присутствии даже столь малой добавки H_2 .

В третьем параграфе подробно описана методика и приведены результаты измерения временной зависимости углового распределения интенсивности излучения с применением скоростного фоторегистратора (СФР) и графитизированной фотопленки. Показано (рис. 1), что при длительности импульса излучения 30мкс широкие и достаточно интенсивные крылья диаграммы направленности излучения образуются спустя $\approx 10\div 15\text{мкс}$ после

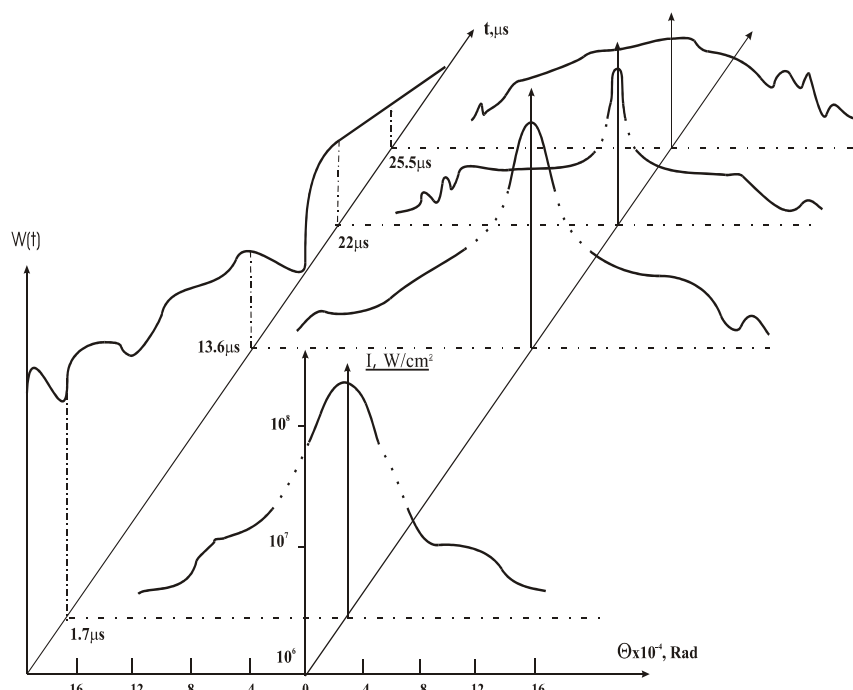


Рис.1 Временная зависимость диаграммы направленности излучения CO₂ ЭИЛ

начала генерации даже при убывающей во времени мощности излучения.

Сделана оценка масштаба неоднородностей, отвечающих за образование крыльев диаграммы направленности излучения. Анализ, проведенный для ряда зависимостей углового распределения энергии, полученных в области удельных энергий накачки 100÷250 Дж/л·атм, удельных съёмов энергий 3÷25 Дж/л·атм, для различных составов рабочей смеси и длительности импульсов 15 и 30 мкс показал, что масштаб неоднородностей, вызывающих рассеяние лазерного излучения и образование крыльев диаграммы направленности, меняется в указанных условиях от 2 до 5 мм.

В четвертом параграфе описана теория эффекта самовоздействия, приводящего к образованию МОН в АС ЭИ CO₂-лазеров, которые в свою очередь приводят к ухудшению расходимости излучения. Показано, что временные изменения МОН отслеживают временные изменения теплового источника, и их амплитуда не зависит от скорости звука в АС. “Силу” взаимодействия света с волнами плотности, обусловленными самовоздействием, определяет параметр B , равный

$$B = (n_0 - 1) \cdot \delta \cdot \gamma^{-1} \cdot \alpha_0 \cdot \tau \cdot (\tau - \tau_0) \cdot \frac{I_0}{(1 + I_0)^2},$$

где n_0 – показатель преломления АС; δ - константа светоиндуцированного нагрева (СИН); γ - показатель адиабаты АС; $\tau = t/\tau_n$ (t -текущее время); τ_0 - относительное время изменения знака СИН; α_0 – коэффициент усиления слабого сигнала АС; I_0 – начальная интенсивность излучения в единицах интенсивности насыщения.

Приводятся результаты расчетов, которые показывают, что для уменьшения эффекта СИН параметр B должен быть отрицательным и наименьшим по абсолютной величине. Первое требование удовлетворяется при $\tau < \tau_0$, т.е. при больших значениях τ_0 , которое пропорционально времени столкновительного распада верхнего лазерного уровня. Среди компонентов рабочей смеси ЭИ CO₂-лазера (CO₂, N₂, He) наименьшей константой расселения верхнего лазерного уровня обладает He. Следовательно, увеличение доли He в составе рабочей смеси за счет остальных компонентов является предпочтительным. Для уменьшения величины B необходимо, чтобы рабочая смесь имела малые значения таких характеристик как $(n_0 - 1)$, δ и большое значение γ . Из всех компонентов рабочей смеси гелий обладает наименьшим значением $(n_0 - 1)$. Константа СИН δ с увеличением в смеси доли гелия также уменьшается. Результаты расчетов параметров δ , t_0 и $B_0 = B_{cp}/\alpha_0$

($B_{cp} = \int_0^{\tau_0} B(\tau) d\tau / \tau_0$) для трех различных смесей приведены в таблице 1.

Таблица 1

CO ₂ :N ₂ :He	δ , см	τ_0 , мкс	$B_0 \cdot 10^4$, см	$\tau_{3\Sigma}$, мкс	τ_{v-T} , мкс	q_r , Дж/л·атм
1:2:3	5,1	20	1.36	10,2	0,68	19

1:1:6	3,0	26	0,51	12,0	0,45	18
1:1:8	2,2	29	0,28	13,6	0,42	16

Значения B_0 , приведенные в таблице, показывают целесообразность использования “легких” смесей 1:1:6 и 1:1:8 для подавления эффекта самовоздействия в АС ЭИ CO_2 -лазеров.

Экспериментальная проверка выводов теории описана в пятом параграфе. Показано, что переход от смеси 1:2:3 к “легким” смесям не сопровождается изменением удельной энергии генерации в области $q_n=100\div 250$ Дж/л. Приводятся энергетические диаграммы расходимости излучения для смесей 1:2:3, 1:1:6 и 1:1:8 при $\tau_n=15$ и 30 мкс, различных увеличениях резонатора M и уровнях накачки q_n , показывающие, что переход от смеси 1:2:3 к “легким” смесям приводит при всех использованных значениях M к улучшению расходимости излучения, которое не изменяется при варьировании q_n в пределах $150\div 250$ Дж/л и уменьшении τ_n от 30 до 15 мкс. Дополнительно уменьшить расходимость излучения удалось при установке в ближней зоне апертурной диафрагмы, обрезающей периферийную область выходного пучка, возмущенную граничными волнами самовоздействия. При этом при использовании “легких” смесей получена расходимость излучения, близкая к дифракционной. Заметим, что на смеси 1:2:3 апертурная диафрагма не улучшала расходимости излучения. Это свидетельствует о том, что МОН в АС, обусловленные СИН, оказывают решающее влияние на расходимость излучения при использовании традиционных смесей. Диаграмма на рис.2 показывает энергию и среднюю силу света для различных смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$. Из диаграммы видно, что “легкие смеси” 1:1:8 обеспечивают близкую к традиционным смесям 1:2:3 энергию и значительно большую среднюю силу света излучения ЭИ- CO_2 лазера. Заслуживает внимания также тот факт, что смесь 1:3:0 хотя и является самой низкоэнергетичной, обеспечивает среднее значение силы света. Диаграмма также показывает, что для эффективного использования лазерного излучения иногда можно пожертвовать энергией ради расходимости излучения.

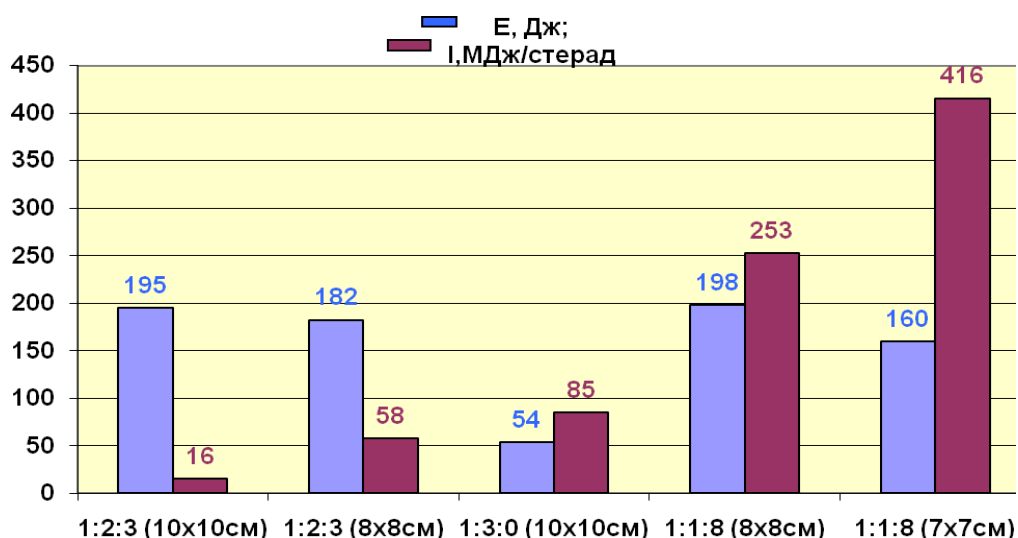


Рис.2 Энергия (E) и средняя сила света (I) излучения CO_2 лазера для смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$

В шестом параграфе описывается серия экспериментов, целью которых была проверка влияния на расходимость излучения ЭИ CO₂-лазера показателя преломления АС. Были исследованы 12 смесей с различными показателями преломления в диапазоне

$(n_0-1)=(0,3\div 3)\cdot 10^{-4}$. При измерениях расходимости излучения энергия генерации для каждой смеси поддерживалась близкой к 180 Дж подбором энергии накачки. Для сравнения угловых распределений энергии излучения использовался угол $\Theta_{0,8}$, в котором содержится 80% полной энергии. Зависимость $\Theta_{0,8}$ от (n_0-1) не является монотонно возрастающей: для некоторых смесей с одинаковыми или близкими значениями (n_0-1) углы $\Theta_{0,8}$ различаются даже с учетом погрешности измерений. Отдельно показано влияние на расходимость таких факторов как α_0 , отношения концентраций CO₂ и N₂, а также концентрации He при [CO₂]/[N₂]=1.

В седьмом параграфе экспериментально показана возможность достижения расходимости излучения ЭИ CO₂-лазера на уровне 10^{-4} рад при использовании “легкой” смеси. Для этого использовался широкоапертурный НТР с увеличением $M=1,7$ и размерами 200x100 мм. В направлении, соответствующем наибольшей ширине выходной апертуры резонатора, измеренное угловое распределение не превышает двух дифракционных и составляет по уровню 0,8 полной энергии величину $(2\div 3)\cdot 10^{-4}$ рад.

В третьей главе представлены методика и экспериментальные результаты измерения спектрального состава и ширины линии генерации излучения ЭИ CO₂-лазера при использовании различных изотопов CO₂. Методика позволяла регистрировать энергию и форму импульсов генерации отдельных вращательных переходов колебательной полосы $00^0_1-(10^0,02^0_0)$ излучения молекулы CO₂. Спектральное разрешение интерферометра Фабри-Перо, который использовался для измерения ширины линии генерации отдельной вращательной компоненты, составляло $\approx 2\cdot 10^{-3}$ см⁻¹. Для смесей с основным изотопом CO₂ показано, что при энергии накачки 150÷250 Дж/л основная доля энергии излучается на вращательных линиях $P(18)$ и $P(20)$. В 20 экспериментах получен баланс энергии $Q_{\text{полн.}}=Q_{P(18)}+Q_{P(20)}$, укладывающийся в погрешность измерения энергии калориметрами ИМО-2Н ($\pm 10\%$).

Показано, что энергия, излучаемая за весь импульс генерации на переходе $P(18)$, существенно меньше, чем на переходе $P(20)$, и изменяется в различных экспериментах в пределах $(0,1\div 0,3)\cdot Q_{\text{полн.}}$. Сопоставление осциллограмм импульсов излучения на переходах $P(18)$ и $P(20)$ с осциллограммой импульса излучения, суммарного по всем переходам, показывает, что генерация на указанных переходах происходит одновременно и различна только по мощности излучения.

Спектральные измерения тонкой структуры отдельного вращательного перехода показали, что ее спектральная ширина не превышает $4,7\cdot 10^{-3}$ см⁻¹.

Показана возможность расширения спектрального интервала генерации излучения ЭИ CO₂-лазера путем применения в АС редких изотопов ¹³C¹⁶O₂ и ¹²C¹⁸O₂. При этом в одинаковых условиях накачки спектр излучения изотопа ¹³C¹⁶O₂ несколько богаче по количеству вращательных линий, чем спектр на смесях с ¹²C¹⁶O₂, а энергия излучения более равномерно распределена между ними. Доминирующим в излучении является переход $P(18)$ полосы $00^0_1-[10^0,02^0_0]_{\text{II}}$. Изменения соотношения

компонентов рабочей смеси (1:2:3, 1:6:3) и длительности импульса накачки (10÷30мкс) проявляются в незначительном перераспределении энергии между устойчиво воспроизводимися линиями. С увеличением удельной энергии накачки в пределах 100÷250Дж/л·атм наблюдается рост интенсивности линий без изменения их числа.

Для различных смесей с этими изотопами представлены зависимости удельной энергии генерации от удельной энергии накачки.

В четвертой главе приведены результаты исследования спектров генерации индивидуальных эмиттеров линейки лазерных диодов (ЛЛД) на основе AlGaAs с использованием монохроматора МДР-23 и автоматизированной системы регистрации на основе пакета программ SpLab. Получены экспериментальные зависимости ширины спектра и модового состава излучения каждого эмиттера ЛЛД от тока. Показано, что в диапазоне изменения тока от порогового значения до $2,5I_{пор.}=15A$ все эмиттеры ЛЛД имеют на полувисоте огибающей значения ширины спектров генерации 1,2 -1,9нм. В указанном диапазоне токов спектры излучения отдельных эмиттеров аномально уширены, в результате чего снижается спектральная яркость генерации. При токе 15А разброс длин волн максимумов линии генерации излучателей достигает 1нм, что приводит к уширению интегрального спектра ЛЛД до 3нм.

Также представлены результаты исследований характеристик мощного диодного лазерного излучателя с уменьшенной шириной спектра излучения, предназначенного для селективной оптической накачки паров Cs, имеющих узкую полосу поглощения. Излучатель, состоящий из 60 отдельных диодных лазеров с составными резонаторами, имеет полуширину спектра менее 2 нм. Мощность оптического излучения на выходе жгута волоконных световодов с диаметром 2,5 мм составила около 100Вт в непрерывном режиме.

В пятой главе представлены результаты исследования энергетических и пространственных характеристик излучения твердотельных лазеров с диодной накачкой непрерывного действия. Приведены расчеты и результаты конструирования модулей диодной накачки с применением оригинальных теплоотводов на основе микроканальных радиаторов. Созданы модули диодной накачки, работающие в непрерывном режиме, мощностью 100, 280 и 760Вт. Данные модули использовались в Nd:Yag излучателях с мощностью генерации 150, 300, 500 и 1000Вт.

Также была разработана конструкция излучателя с поперечной накачкой активного элементами пятью модулями матриц лазерных диодов СЛМ-3 производства ОАО «НПП «Инжект» (г.Саратов). Суммарная импульсная мощность накачки - 20кВт, длительность импульса-250мкс и частота следования импульсов до 100Гц. Энергия импульса накачки и генерации при частоте следования импульсов 30Гц составила 4,5Дж и 1,5Дж соответственно. Оптический КПД = 33%.

Измерения пространственных характеристик проводились на ТТЛ с двумя лазерными головками для устойчивого и неустойчивого вариантов резонатора.

Устойчивый резонатор представляет собой традиционно используемый в технологическом комплексе ЛИТ-100 вариант с ламповой накачкой, состоящий из 2-х плоских зеркал. Расстояния в оптической схеме подобраны так, что каждое зеркало изображается само на себя наведенными в активных элементах термическими линзами. Этот резонатор обладает высокой энергетической эффективностью, но не может обеспечить малую расходимость выходного излучения из-за

многомодового режима генерации. Две лазерные головки по 300Вт каждая в описанном резонаторе обеспечили выходную мощность генерации 500Вт и расходимость излучения по уровню 0,8 полной мощности 11,5мрад. Эта расходимость превышает дифракционный предел в 25 раз.

С другой стороны, известно, что в лазерах с неоднородными средами использование неустойчивых резонаторов отрицательной ветви диаграммы устойчивости приводит к уменьшению угловой расходимости, которое сопровождается лишь небольшим падением энергетической эффективности.

Оптическая схема (Рис.3) неустойчивого резонатора, образованного полностью отражающими плоскими зеркалами и выводным зеркалом с отверстием обратной связи, была использована для ТТЛ с диодной накачкой с теми же двумя лазерными головками.

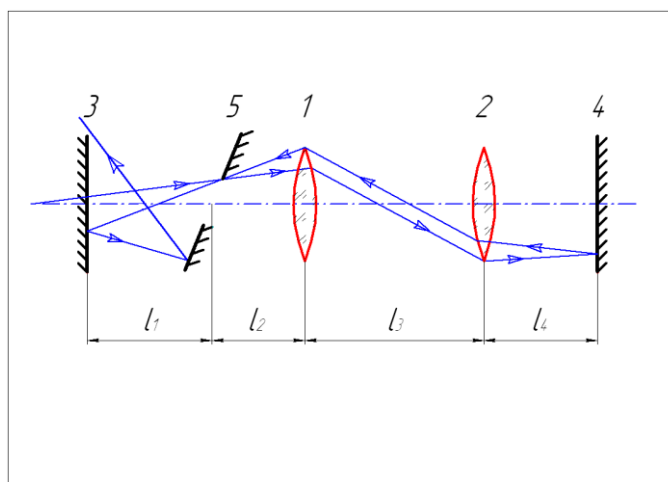


Рис.3 Оптическая схема неустойчивого резонатора

1,2-термолинзы активных элементов, 3,4- отражающие зеркала, 5-выводное зеркало с отверстием

Отверстие выводного зеркала 5 изображается само на себя элементами 1,2 и 4. Выполнение условия самоизображения отверстия ($l_2=f$ и $l_4=f$) позволяет практически без потерь мощности пропустить через него пучок, распространяющийся со стороны активного элемента 1. Диаметр отверстия d не превышает диаметр сечения активных элементов с целью обеспечения оптимального заполнения их объема излучением. Расстояние l_1 выбирается исходя из требуемого уровня расходимости излучения, верхний предел которого равен $d/2l_1$. Необходимое увеличение M при заданном расстоянии l_1 реализуется выбором расстояния l_3 между активными элементами. Для случая одинаковых фокусных расстояний f тепловых линз, что, как правило, реализуется на практике,

$$l_3=2f \cdot f^2(M-1)^2/4M l_1$$

При расстройке от софокусного расположения активных элементов

$\Delta=f^2(M-1)^2/4M l_1 > 0$, ($M < 0$), резонатор эквивалентен резонатору, состоящему из плоского и вогнутого зеркал, расположенных на расстоянии l_1 друг от друга, причем радиус кривизны вогнутого зеркала $R=f^2/\Delta$.

Со стороны левого зеркала 3 в сторону зеркала 5 распространяется расходящаяся сферическая волна. На поверхности зеркала 5 диаметр этой волны в M раз превышает диаметр отверстия, а центр

кривизны ее находится от этого зеркала на расстоянии $2l_1M/(M-1)$. Центральная часть волны проходит через отверстие в зеркале и служит для осуществления обратной связи в резонатор, а остальная часть выходит из резонатора в качестве полезного излучения. При необходимости отражающей поверхности зеркала 5 придается кривизна, компенсирующая сферическую составляющую падающей на него волны.

В эксперименте наилучшие результаты были получены при $d=5\text{мм}$, $l_1=1\text{м}$, $l_3=0,75\text{м}$ и $M=-1,8$.

Мощность излучения уменьшилась до 300Вт, а расходимость составила 1,6мрад, что соответствует лишь 2-х кратному превышению дифракционного предела. Экспериментальные результаты измерения расходимости методом фокального пятна представлены на рис.4.

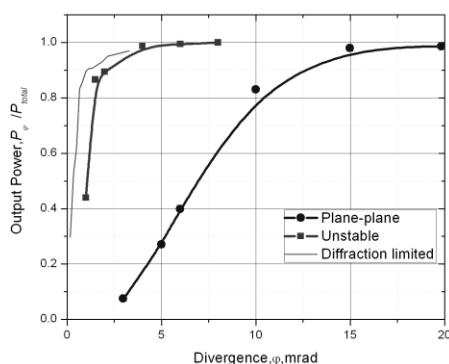


Рис.4 Экспериментальные результаты измерения расходимости излучения ТТЛ

Параметры выходного излучения ТТЛ при токе накачки $I=25\text{А}$ приведены в таблице 3

Таблица 3.

Схема резонатора	Р (Вт)	φ (мрад)	W(МВт/стер)
устойчивый	500	11,5	4,8
неустойчивый	300	1,6	149,2

В таблице указана мощность Р, расходимость φ по уровню $0.86 \times P$ и средняя сила света $W = 4P/\pi\phi^2$.

Из полученных результатов видно, что схема с неустойчивым резонатором позволяет при 40% уменьшении мощности более чем в 30 раз повысить осевую силу света лазерного излучения и рассчитывать на существенное увеличение эффективности применения излучателя в технологических лазерных установках.

В шестой главе представлены расчеты и результаты экспериментальных исследований пространственных и энергетических характеристик излучения KrF эксимерного лазера “Эклаз”.

Результаты численного моделирования электроразрядного эксимерного лазера на смеси He-Kr-F₂ показали, что при оптимальном содержании Kr и F₂ соответственно 130 и 4Тор при общем давлении 2,5атм можно получить в импульсе лазерное излучения длительностью 30нс с энергией 180мДж. В эксперименте была получена максимальная энергия генерации 150мДж. Пиковая интенсивность излучения составила 6МВт; полный к.п.д. лазера, определяемый как отношение энергии, запасенной в конденсаторе, к энергии излучения, равен 1%; к.п.д. вклада электрической энергии в газ 35%; электрооптический к.п.д. 3%.

С целью получения минимальной расходимости излучения были измерены пространственные характеристики излучения лазера с различными типами резонаторов. Поверхности зеркал резонаторов были изготовлены с предельно достижимым качеством полировки и отклонениями формы не хуже $N \leq 0,2$; $\Delta N \leq 0,1$. На первом этапе измерений использовался плоский резонатор, состоящий из «глухого» и полупрозрачного зеркал. Зеркала были изготовлены из полированного кварца с многослойным диэлектрическим покрытием. На длине волны 248нм «глухое» зеркало имело коэффициент отражения $R=99.5\%$. Для оптимизации коэффициента отражения выводного зеркала резонатора использовались полупрозрачные зеркала с $R= 4; 25; 50; 75$ и 85% . Измерение энергии проводилось калориметрическим датчиком с апертурой 40 мм. Лазер работал в импульсном режиме. Максимальная энергия генерации ~ 150 мДж была достигнута при $R=25\%$.

Кроме плоского резонатора, использовался резонатор «плоскость-сфера» с фокусным расстоянием сферического зеркала 5м, менее чувствительный к разъюстировке. С этими резонаторами методом фокального пятна была измерена расходимость излучения лазера. Один из калориметров измерял энергию в отраженном от грани оптического клина опорном луче. Второй калориметр измерял долю энергии луча, прошедшего через калиброванную диафрагму ($\varnothing=1\div 40$ мм), установленную в фокусе линзы с фокусным расстоянием 1 м.

Расходимость излучения по уровню энергии 0,8 ($\varphi_{0,8E}$) составила для обоих резонаторов бмрад, что значительно превышает дифракционную ($\varphi_{\text{диф}} \cong 0.075$ мрад).

Далее были проведены исследования резонатора с пространственной селекцией и неустойчивого телескопического резонатора с коэффициентом увеличения 10 (см.рис.5). В резонаторе с селекцией использовались диафрагмы диаметром $\varnothing=1; 0.5; 0.3$ мм. При значительном падении энергии в импульсе удалось достигнуть минимальной расходимости $\varphi_{0,8E}=0.5$ мрад при $\varnothing=0.3$ мм. Применение резонатора с пространственной селекцией, хотя и приводит к существенной потере энергии, может обеспечить бОльшую силу света выходного излучения. Но наилучшие результаты были получены с неустойчивым телескопическим резонатором. При увеличении $M=10$ была получена расходимость $\theta_{0,8E}=0,4$ мрад, что более чем на порядок лучше расходимости для плоского резонатора.

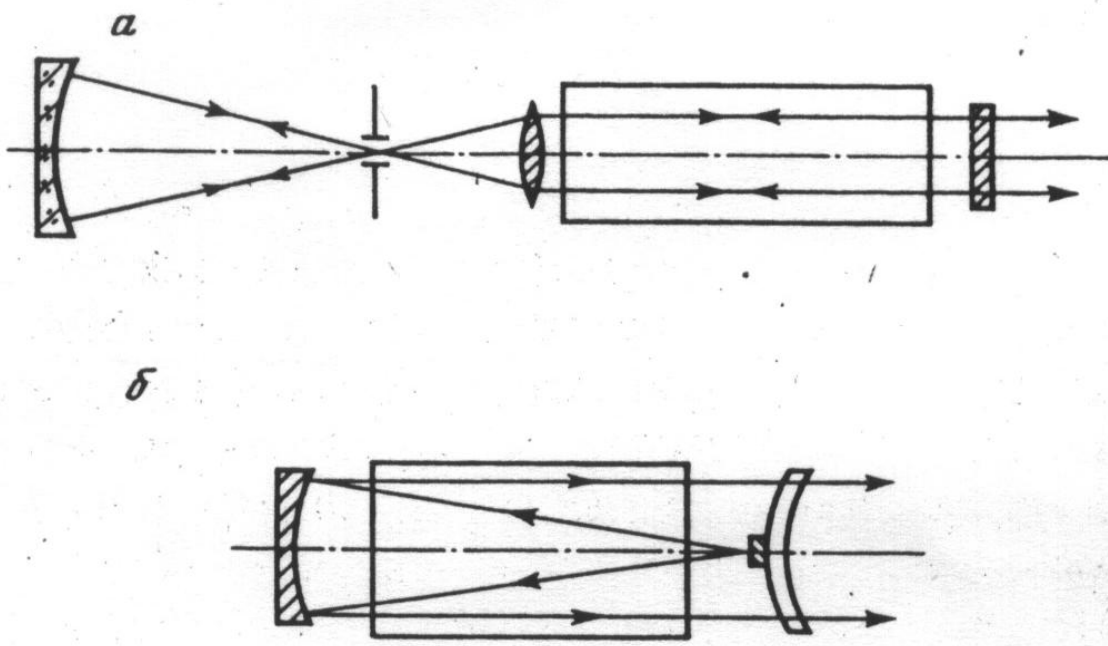


Рис.5 Резонатор с пространственной селекцией (а) и неустойчивый телескопический резонатор (б)

Сравнительные характеристики излучения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры	Плоский резонатор	Селективный р-р с диафрагмой \varnothing			НТР с $M=10$
		1мм	0,5мм	0,3 мм	
Энергия в импульсе, мДж	150	18	5	2	100
Расходимость по уровню энергии 0,8, мрад	6	1,4	1,2	0,5	0,4
Средняя сила света, кДж/стерад	5,3	12	4,4	10	800

Из таблицы видно, что наибольшую энергетическую эффективность лазера обеспечивает плоский резонатор. Неустойчивый и селективный резонатор с диафрагмой $\varnothing 1\text{мм}$ имеют энергетическую эффективность, меньше в 1,5 и 8 раз соответственно. Однако данные резонаторы обеспечивают меньшую расходимость излучения лазера и по силе света селективный резонатор превосходит плоский в 4 раза, а неустойчивый – более, чем на 2 порядка.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработаны методики исследования энергетических и пространственных характеристик излучения мощных CO_2 , твердотельных и эксимерных лазеров для длин волн - 10мкм, 1064нм и 248нм.
2. Для ЭИ CO_2 -лазеров атмосферного давления проведена оптимизация состава смеси АС и экспериментально показано, что для характерных условий накачки ненасыщенный коэффициент

усиления, который обеспечивают “легкие” смеси типа $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:6$, на 20% выше, чем традиционные смеси 1:2:3, 1:5:2 или 1:6:3. Измерения распределения ненасыщенного коэффициента усиления (K_0) по сечению АС как для традиционных смесей, так и для смесей, содержащих добавки водорода и аргона, показали, что величина K_0^{max} практически не изменяется по высоте разрядного промежутка на разных смесях и уменьшается в поперечном направлении на 50% только на расстоянии $\pm 10\text{см}$ от продольной оси разряда.

3. Комплексные экспериментальные исследования зависимости расходимости излучения мощного импульсного ЭИ CO_2 -лазера атмосферного давления от мощности и длительности накачки, интенсивности вынужденного излучения, состава смеси и параметров резонатора показали, что:

- на расходимость излучения импульсного ЭИ CO_2 -лазера существенное влияние оказывают катодная и анодная волны плотности и волны плотности, возникающей на границе лазерного пучка вследствие эффекта теплового самовоздействия. Показано, что только из-за эффекта самовоздействия расходимость излучения более чем в три раза превышает дифракционный предел.

- угловое распределение интенсивности излучения мощного ЭИ CO_2 -лазера в течение импульса генерации при длительности импульса излучения $\leq 30\text{мкс}$ имеет широкие и достаточно интенсивные крылья диаграммы направленности излучения, которые образуются спустя $10\div 15\text{мкс}$ после начала генерации даже при убывающей во времени мощности излучения.

- при длительности импульса накачки $\tau_n \leq 30\text{мкс}$ наименьшую расходимость излучения обеспечивают смеси с содержанием He на уровне 75% и отношением $[\text{CO}_2]:[\text{N}_2]=1\div 2$.

4. В результате проведенных исследований найдены рабочие смеси, позволяющие получать расходимость излучения ЭИ CO_2 -лазера, близкую к дифракционной, при высоком удельном энергоусе, характерном для традиционно используемых смесей. Для широкоапертурного резонатора с размерами апертуры $10\times 20\text{см}$ в импульсном режиме получена расходимость $(2\div 3)\cdot 10^{-4}$ рад по уровню 0,8 полной энергии.

5. Применение редких изотопов CO_2 в АС ЭИ CO_2 -лазера позволило получить генерацию излучения в спектральных диапазонах $9.3\div 9,6\text{мкм}$ и $11.2\div 11,6\text{мкм}$.

6. Экспериментально показано, что оптическая схема с неустойчивым резонатором отрицательной ветви диаграммы устойчивости позволяет более чем в 30 раз повысить осевую яркость излучения ТТЛ с диодной накачкой.

7. Экспериментально показано, что применение неустойчивого телескопического резонатора для эксимерного KrF -лазера позволяет в 10 раз улучшить расходимость его излучения при незначительной потере выходной мощности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Белоусова И.М., Глухих И.В., Дутов А.И., Курзенков В.Н., Чирков В.Н., Ячнев И.Л. Исследование спектра излучения ЭИ CO_2 -лазера // Квантовая Электроника. 1986. Т.13, №2, с.260-265.

2. Белоусова И.М., Глухих И.В., Дутов А.И., Чирков В.Н., Ячнев И.Л.

Спектрально-энергетические характеристики излучения ЭИ СО₂-лазера //Квантовая Электроника. 1987. Т.14, №2, с.378-381.

3.Глухих И.В., Дутов А.И., Чирков В.Н., Ячнев И.Л. Исследование расходимости излучения импульсного СО₂ ЭИЛ //Квантовая Электроника. 1991. Т.18, №2, с.214-218.

4.Глухих И.В., Гордеева М.Н., Дутов А.И., Чирков В.Н., Ячнев И.Л.

Влияние Ag на характеристики излучения СО₂ ЭИЛ //Квантовая Электроника. 1991. Т.18, №11, с.1301-1303.

5.Глухих И.В., Гордеева М.Н., Дутов А.И., Ячнев И.Л. Влияние показателя преломления и состава смеси на расходимость излучения СО₂ ЭИЛ //Квантовая Электроника. 1991. Т.18, №11, с.1299-1301.

6.Глухих И.В., Дутов А.И., Федоров С.В., Чирков В.Н., Юрьев М.С., Ячнев И.Л. Активная среда, обеспечивающая дифракционную расходимость излучения электроионизационного СО₂-лазера //Письма в ЖТФ. 1990. Т.16, №11, с.56-59.

7.Глухих И.В., Горячкин Д.А., Дутов А.И., Калинин В.П., Козловская И.М., Чирков В.Н., Шерстобитов В.Е., Ячнев И.Л. Влияние длины неустойчивого резонатора на расходимость излучения СО₂-лазера атмосферного давления //Письма в ЖТФ. 1987. Т.13, №4, с.240-243.

8.Глухих И.В., Гордеева М.Н., Дутов А.И., Федоров С.В., Чирков В.Н., Ячнев И.Л. Вынужденное рассеяние в активной среде импульсного СО₂-лазера и расходимость лазерного излучения //Известия АН СССР сер.физ. 1991. Т.55, №2, с.389-393.

9.Баландин А.Н., Гаркуша Б.Ф., Глухих И.В., Град А.Г., Жданов И.В., Желтов В.А., Кузнецов В.С., Юдин А.М., Ясевич В.Ю., Яценко Б.П. Эксимерный лазер для микротехнологии //Приборы и техника эксперимента.1994. №5, с.117-125.

10.Глухих И.В., Дутов А.И., Чирков В.Н., Ячнев И.Л. Расходимость излучения импульсного электроионизационного СО₂ - лазера с широкоапертурным резонатором //Препринт НИИЭФА П-0971.- М.:ЦНИИатоминформ, 2002, 7с., с ил.

11.Глухих И.В., Дутов А.И., Чирков В.Н., Ячнев И.Л. Распределение ненасыщенного коэффициента усиления по сечению активной среды ЭИ СО₂ – лазера // Препринт НИИЭФА П-0972.- М.:ЦНИИатоминформ, 2002, 23с., с ил.

12.Белоусова И.М., Глухих И.В., Дутов А.И., Чирков В.Н., Ячнев И.Л.

Влияние изотопического состава двуокиси углерода на параметры излучения ЭИ СО₂-лазера //Оптика лазеров, 1987, Л., Тезисы докладов, с.78

13.Глухих И.В., Кубасов В.А., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Смирнов В.Г., Филимонов М.М. Исследование излучательных характеристик мощных непрерывных инжекционных лазеров спектрального диапазона 798- 820 нм на безалюминиевых структурах InGaAsP. //Международная конференция “Прикладная оптика - 2000”. Сб. трудов, т.1, с. 97-98.

14.Глухих И.В., Кубасов В.А., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Смирнов В.Г., Суровцев В.А., Филимонов М.М. Исследование спектральных характеристик импульсно-периодических линеек лазерных диодов. //Известия Академии наук. Серия физическая. 2001. т. 65, № 6, с. 891-897

15. Глухих И.В., Кубасов В.А., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Смирнов В.Г., Филимонов М.М. Исследование излучательных характеристик мощных непрерывных лазеров спектрального диапазона 790-820 нм на безалюминиевых структурах InGaAsP. // М.: ЦНИИАтоминформ. 2001, 32с. (Препринт НИИЭФА : П-0964).
16. Глухих И.В., Коваль Ю.П., Кубасов В.А., Петровский В.А., Привезенцев В.В., Поликарпов С.С., Филимонов М.М. Непрерывные линейки лазерных диодов мощностью 10Вт с высокоэффективным теплоотводом. // Тез. докл. 4-го Белорусско-Российского семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”, 20-25 мая, 1999, Минск, Беларусь, с. 32-34.
17. Глухих И.В., Кубасов В.А., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Суровцев В.А., Филимонов М.М. Исследование спектров излучения индивидуальных миттеров импульсно-периодических линеек лазерных диодов на основе соединения InGaAsP. // Сб. ВАНТ, Серия электрофизическая аппаратура, вып. 7, 2002, с. 3-9.
- 18. Glukhikh I.V., Kubasov V.A., Kurunov R.F., Polikarpov S.S., Smirnov V.G., Surovtsev V.A., Filimonov M.M. The investigation of the radiation dynamics of QCW laser diode linear array. // X Conference on Laser Optics, St. Petersburg, Russia, June 26- 30, 2000. ThA4- p.13.**
19. Глухих И.В., Коваль Ю.П., Кубасов В.А., Курунов Р.Ф., Привезенцев В.В., Поликарпов С.С., Фролов С.В., Филимонов М.М. Мощные непрерывные линейки лазерных диодов с высокоэффективным теплоотводом для накачки твердотельных лазеров. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: электрофизическая аппаратура, СПб, в.1 (27), 2002, с. 83-87
20. Кононенко В.К., Цвирко В.И., Глухих И.В., Кубасов В.А., Поликарпов С.С., Филимонов М.М. Спектральные характеристики мощных квантоворазмерных лазерных диодных линеек. // Международная конференция “Лазерная физика и применения лазеров” ICPLA – 2003, Минск, 14-16 мая, с.37.
21. Kononenko V.K., Tsvirko V.I., Glukhikh I.V., Kubasov V.A., Polikarpov S.S., Filimonov M.M. Output power and spectral characteristics of quantum – well laser diode bars. // Proc. of Intl. Conf. on Laser Applications and Optical Metrology (ICLAOM-03), December 1-4, 2003, New-Delhi (India), P.259-262
- 22. Kononenko V.K., Tsvirko V.I., Glukhikh I.V., Kubasov V.A., Polikarpov S.S., Filimonov M.M. Spectral characteristics of power quantum- well laser diode bars // XI Conference on Laser Optics, St. – Petersburg, 2003. P. 37**
23. Глухих И.В., Кубасов В.А., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Цвирко В.И. Особенности спектральных лазерных линеек в системе GaAs-AlGaAs. // Материалы V Международной научно-технической конференции “Квантовая электроника”, Минск, 22- 25 ноября 2004 г. с.89.
24. Глухих И.В., Поликарпов С.С., Привезенцев В.В., Степанов А.В., Фролов С.В. 300Вт Nd:YAG лазер с диодной накачкой. // Сборник статей 5-го Белорусско - Российского семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе” Минск, 1-5 июня 2005г., с.148-151
25. Glukhikh I.V., Kononenko V.K., Polikarpov S.S., Privezentsev V.V., Tsvirko V.I. Output performance characteristics of laser diode bars for quantizers // Proc. VIII Scientific Conf. on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE 2004). – Wroclaw, 2004, P.421–424.

26. Глухих И.В., Привезенцев В.В. Расчет предельной мощности линейки диодов, расположенной на модуле с цилиндрическим каналом охлаждения. // Тезисы международной конференции "Лазерная физика и применения лазеров", Минск, Беларусь, 14 – 16 мая 2003 г., 1-14с

27. Glukhikh I.V., Matveentsev A.V., Polikarpov S.S., Sevastianov S.B., Mayorov A.P., Dub A.D., Volkov V.G., Gratsa E.V. 0, 81 μm CW laser bars with hyperthin InGaAs active layers. // XI Conference on Laser Optics, St.- Petersburg, 2003. P.94

28. Глухих И.В., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Фролов С.В. Разработка твердотельных лазеров с диодной накачкой в НИИЭФА им.Д.В.Ефремова. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: электрофизическая аппаратура, СПб, в.3 (29), 2005, с. 84-89

29. Glukhikh I.V., Polikarpov S.S., Privezentsev V.V., Frolov S.V. 320W CW diode-pumped Nd: YAG laser // Technical Program XII Conference on Laser Optics, St. Petersburg, 2006, p.40

30. Glukhikh I.V., Polikarpov S.S., Privezentsev V.V., Frolov S.V. 500W CW diode-pumped Nd:YAG laser // International Conference on High Power Laser Beams HPLB-2006, Нижний Новгород, 2006

31. Глухих И.В., Поликарпов С.С., Привезенцев В.В., Фролов С.В. Модули накачки на основе линейки лазерных диодов Silver Bullet // 6-й Белорусско-Российский Семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе», 4-8 июня 2007 года, Минск (Беларусь), стр. 81-83

32. Glukhikh I.V., Polikarpov S.S., Frolov S.V. Unstable Resonator for Diode Pumped 300W CW Nd:Yag laser // International Conference CLEO/IQEC-2007, Munich-2007. CA-15, P.48

33. Glukhikh I.V., Kurunov R.F., Charukhev A.V., Smirnov V.G. Source of Radiation for Diagnostics of the Divertor Plasma on the ITER Facility // Plasma Devices and Operations, V.16, no.3, Sept.2008, pp.211-222

34. Glukhikh I.V., Frolov S.V., Polikarpov S.S. 300W CW diode pumped Nd:YAG laser with improved divergence of output beam // Technical Program, Photonics West Conference, San Jose, California, USA, 19-24 Jan. 2008, p.308

35. Glukhikh I.V., Kurunov R.F., Polikarpov S.S., Frolov S.V. The development of KW level output power diode pumped solid state lasers in the D.V. Efremov Institute // Сборник тезисов докладов, Международная конференция "Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергий", Саров, 11-14 марта 2008, стр.68-69

36. Глухих И.В., Поликарпов С.С., Фролов С.В. Мощные твердотельные лазеры с диодной накачкой в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова // тезисы 6-ой Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы создания лазерных систем", Владимир, сентябрь 2008, с.8

37. Glukhikh I.V., Polikarpov S.S., Privezentsev V.V., Frolov S.V. Temperature mode of the microchannel heat exchanger for powerful CW laser diode bar // Technical Program, XIII Conference on Laser Optics, St. Petersburg, 2008, p. 68

38. Glukhikh I.V., Polikarpov S.S., Stepanov A.V., Frolov S.V. Diode Pumped Nd:Yag laser with low beam divergence // EPS-QEOD EUROPHOTON Conference on Solid-State and Fiber Coherent Light Sources, Pisa, Italy, 10-15 September 2006, TuC25, P. 24

39. Glukhikh I.V., Polikarpov S.S., Privezentsev V.V., Frolov S.V. High-power CW diode-pumped Nd: YAG rod laser for industrial applications // Материалы шестой Международной конференции "Квантовая Электроника", Минск, 14-17 ноября 2006г., стр.52

40.Буничев А.П.,Глухих И.В.,Микаелян Г.Т.,Панарин В.А., Поликарпов С.С., Соколов С.Н., Фролов С.В. Полупроводниковый излучатель мощностью 100Вт для селективной накачки активной среды на парах Cs // 6-ой Белорусско-Российский семинар “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе“, Минск, 2007г., стр. 77-80

41.Glukhikh I.V., Kurunov R.F., Polikarpov S.S. and Frolov S.V.Intracavity frequency doubling 15W QCW diode pumped Nd:YAG laser // The 15th International Conference on Advanced Laser Technologies ALT-07, September 3 – 7, 2007, Levi, Finland, Conf. Abstracts P. 166

42.Глухих И.В., Поликарпов С.С., Фролов С.В., Волков А.С., Привезенцев В.В. Охлаждение лазерных диодных сборок конструкции Silver Bullet //Журнал технической физики, 2010, том 80, вып. 6, стр. 101-106

43.Глухих И. В., Димаков С.А., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Фролов С.В. Мощные твердотельные лазеры на Nd:YAG с поперечной диодной накачкой и улучшенным качеством излучения // Журнал технической физики, 2011, т.81, вып.8, стр.70-76