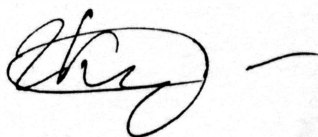


Кириллов Иван Михайлович

**ЭЛЕКТРОННОЕ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ CO₂-ЛАЗЕРОВ
С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Воронежском государственном техническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Юдин Владимир Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Карасик Валерий Ефимович
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

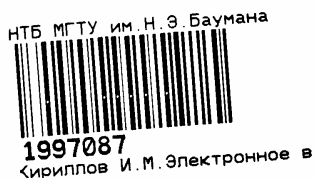
кандидат технических наук
Ерофеев Андрей Николаевич
Военный авиационный инженерный
университет, Воронеж

Ведущая организация: Институт лазерной физики
сибирского отделения РАН, Новосибирск.

Защита диссертации состоится 27 июня 2012 года в 10:00 часов
на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государст-
венном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005,
г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «23» мая 2012 г.



Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

Бурый Е.В.

088
2481

Актуальность темы

Среди газовых лазеров наиболее широкое практическое применение нашли CO_2 -лазеры. Являясь молекулярными лазерами, работающими на колебательно-вращательных переходах молекулы углекислого газа, CO_2 -лазеры характеризуются высокой эффективностью преобразования энергии накачки в энергию когерентного оптического излучения. Характерная длина волны излучения CO_2 -лазеров ($10,6 \cdot 10^{-6}$ м) позволяет использовать их для обработки материалов, в медицине, в научных исследованиях, для решения задач газоанализа, а так же оборонных задач.

Перспективными приложениями CO_2 -лазеров являются системы открытой атмосферной оптической связи и оптической локации. Важным требованием к когерентным излучателям в таких системах является возможность электронного управления диаграммой направленности в широком секторе азимутальной плоскости.

Задача повышения выходной мощности CO_2 -лазеров за счёт увеличения объёма активной среды осложняется тем, что один из размеров области разряда в рабочей смеси газов должен быть небольшим, что необходимо для эффективного возбуждения плазмы активной среды и её охлаждения.

Работы в указанных областях ведутся во многих научно-технических центрах: в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН (Москва), НПО «Плазма» (Рязань), ГОИ им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург), Институте лазерной физики СОРАН (Новосибирск), НКТБ «Феррит» (Воронеж), United Technologies Corporation (США), Universal Laser Systems (США), Synrad, Inc (США). Широко известны работы Ю. А. Ананьева, Е. Ф. Ищенко, В. П. Быкова, Н. Н. Елкина, А. П. Напартовича, В. Виттемана, Г. Сегьюна, Д. Холла.

Однако, существующих математических моделей и методов расчёта оптических резонаторов не достаточно для инженерной разработки и проектирования CO_2 -лазеров новых типов. В частности, известные квазистойчивые оптические резонаторы в CO_2 -лазерах позволяют осуществить поперечное к оптической оси секционирование объёма активной среды, что обеспечивает возможность наращивания выходной мощности с сохранением энергетических, массогабаритных и других характеристик CO_2 -лазеров, но, вместе с тем, приводит к сверхбольшим значениям числа Френеля оптических резонаторов отдельных секций. Практические методы расчёта таких резонаторов с учётом дифракционных эффектов в настоящее время развиты крайне слабо.

Один из эффективных методов электронного внутрирезонаторного управления характеристиками излучения CO_2 -лазера, зарекомендовавший себя при создании CO_2 -лазеров с электронной перестройкой длины волны излучения, основан на комбинированном воздействии на активную среду высокочастотного электромагнитного поля возбуждения и управляющего электрического поля. При этом управление спектральными характеристиками индуцированного излучения CO_2 -лазера достигается при помощи изменения пространственного распределения усилительных свойств активной среды. Очевидно, что при расчёте и проектировании подобных CO_2 -лазеров необходимо учитывать взаимодействие индуцированного оптического излучения и насыщающейся активной

среды, то есть пространственные и энергетические характеристики индуцированного излучения необходимо вычислять совместно.

С учётом сказанного, тема диссертационной работы представляется важной и актуальной.

Цель работы

Цель работы – разработка и обоснование технических путей построения дисковых CO_2 -лазеров с высокочастотным электромагнитным возбуждением и внутрирезонаторным электронным управлением пространственными и энергетическими характеристиками индуцированного излучения.

Объект исследования – пространственные и энергетические характеристики индуцированного излучения цельнометаллических дисковых CO_2 -лазеров с высокочастотным электромагнитным возбуждением активной среды.

Предмет исследования – методы совместного расчёта пространственных и энергетических характеристик индуцированного излучения CO_2 -лазеров.

Основные задачи

- разработать технические пути построения цельнометаллических дисковых CO_2 -лазеров с внутрирезонаторным электронным управлением параметрами индуцированного излучения;

- разработать метод расчёта пустых оптических резонаторов с большим значением числа Френеля без использования параксиального приближения;

- разработать метод расчёта оптических резонаторов, заполненных поперечно-неоднородной насыщающейся активной средой, обеспечивающий совместный анализ пространственных и энергетических характеристик индуцированного лазерного излучения.

Методы исследования

При выполнении работы использованы скалярная теория дифракции, теория оптических резонаторов, теория плазмы высокочастотного газового разряда, теория интегральных уравнений.

Научная новизна

1. Предложен и апробирован метод электронного внутрирезонаторного управления диаграммой направленности индуцированного излучения CO_2 -лазеров с высокочастотным возбуждением, основанный на применении комбинированного воздействия на активную среду высокочастотного поля возбуждения и управляющего электрического поля.

2. Предложена и аналитически обоснована модифицированная запись дифракционного интеграла Зоммерфельда, обеспечивающая возможность учёта плавной поперечной неоднородности среды и дифракции излучения на большие углы.

3. Предложен метод расчёта лазерных резонаторов, позволяющий во взаимосвязи рассчитывать пространственные и энергетические характеристики индуцированного излучения CO_2 -лазеров с электромагнитным возбуждением.

Практическая ценность работы

1. Предложенный технический принцип построения CO_2 -лазеров с комбинированным воздействием на активную среду позволяет осуществить внутрирезонаторное электронное управление пространственными и энергетическими

ми характеристиками лазерного излучения, включая формирование круговых, одно- и многолепестковых диаграмм направленности с возможностью независимого управления отдельными лепестками. Лазеры с указанными свойствами могут быть использованы в системах атмосферной оптической связи, в том числе мобильных системах, в оптической локации и навигации, а также для управления и противодействия высокоточному оружию.

2. Модифицированная запись дифракционного интеграла Зоммерфельда может быть использована в расчётах при анализе и разработке оптических усилителей и других оптических систем, характеризующихся плавной поперечной оптической неоднородностью среды.

3. Предложенный метод расчёта лазерных резонаторов с учётом поперечной неоднородности активной среды, позволяет совместно вычислять пространственные и энергетические характеристики индуцированного излучения СО₂-лазеров с высокочастотным возбуждением и, тем самым, усовершенствовать процесс их проектирования.

4. Разработанный алгоритм расчёта пустых оптических резонаторов, характеризующихся большим числом Френеля, позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на вычисления при разработке дисковых СО₂-лазеров.

5. В результате численного исследования квазиустойчивого резонатора обоснованы общие требования к конфигурации его зеркал, выполнение которых позволит обеспечить одномодовый режим генерации и высокий КПД.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель, основанная на модифицированной записи дифракционного интеграла Зоммерфельда и шеститемпературной квантово-кинетики модели активной среды СО₂-лазера, позволяет совместно вычислять пространственные и энергетические характеристики индуцированного лазерного излучения.

2. Комбинированное воздействие на активную среду СО₂-лазера высокочастотного электромагнитного поля возбуждения и постоянного управляющего электрического поля с использованием многослойного электрода, позволяет осуществлять электронное внутрирезонаторное управление диаграммой направленности выходного излучения.

3. Угловой диапазон изменения диаграммы направленности при электронном внутрирезонаторном управлении комбинированным воздействием на активную среду двух полей ограничивается апертурой зеркал резонатора и достигает 180° при использовании зеркал кольцевой формы.

Внедрение результатов работы

Результаты работы использованы в НИР «Лазер» и «Антитеррор», выполненных по заказу ОАО «Концерн «Созвездие», а также в учебном процессе кафедры «Радиоэлектронные устройства и системы» Воронежского государственного технического университета.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на четырёх международных научно-технических конференциях, а также

на научных семинарах кафедры «Радиоэлектронные устройства и системы» Воронежского государственного технического университета.

Публикации

Результаты работы опубликованы в трёх статьях в журналах, входящих в перечень ВАК. Получены два патента РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографического списка литературы из 86 наименований. Работа изложена на 126 страницах и содержит 76 рисунков.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе выполнен обзор известных схем построения газовых лазеров. Сделан вывод о том, что для повышения выходной мощности CO_2 -лазеров с сохранением высокого качества выходного излучения применяются, во-первых, нетрадиционные оптические резонаторы, во-вторых, увеличение объёма активной среды за счёт секционирования с использованием классических резонаторов и многопроходowych оптических схем, в-третьих – секционирование активной среды с использованием оптически связанных резонаторов. Применение квазиустойчивых резонаторов позволяет объединить указанные методы. На рис. 1 показана схема одиночного квазиустойчивого резонатора, а на рис. 2 – схема системы связанных квазиустойчивых резонаторов:

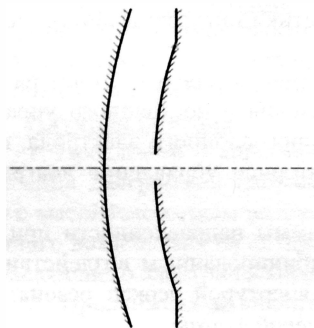


Рис. 1. Схема квазиустойчивого резонатора

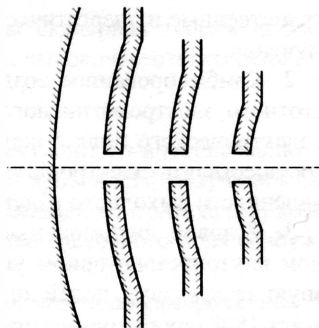


Рис. 2. Схема системы связанных квазиустойчивых резонаторов

В квазиустойчивом резонаторе радиусы кривизны левого сферического зеркала и сферической части правого составного зеркала отличаются на удвоенное расстояние между зеркалами, так что фокусы зеркал совпадают. Вывод индуцированного излучения из резонатора осуществляется через окно в центре составного зеркала. Металлические зеркала оптического резонатора одновре-

менно являются высокочастотными электродами системы возбуждения активной среды.

Использование связанных квазиустойчивых резонаторов позволяет наращивать мощность CO_2 -лазеров с сохранением эффективного охлаждения и возбуждения рабочей смеси, а также компактности излучателя. Для оптимального проектирования таких систем требуется эффективный метод расчёта свойств отдельно взятого квазиустойчивого резонатора. При этом основными особенностями, затрудняющими его расчёт, являются большое значение числа Френеля и сложная конфигурация выходного зеркала.

В результате рассмотрения методов расчета пустых оптических резонаторов, в первой главе сделан вывод о том, что наиболее подходящим применительно к дисковым CO_2 -лазерам является метод интегральных уравнений. Одна из эффективных методик его использования нуждается в модификации, которая позволила бы повысить универсальность применения и снизить вычислительные затраты.

Известно, что эффективным методом управления характеристиками излучения CO_2 -лазера является комбинированное воздействие на активную среду высокочастотного возбуждающего и статического управляющего полей. В частности, с использованием комбинированного воздействия двух полей на активную среду CO_2 -лазера достигнута немеханическая внутрирезонаторная перестройка длины волны индуцированного излучения. Управление характеристиками излучения CO_2 -лазера с использованием комбинированного воздействия на активную среду двух полей осуществляется при помощи изменения пространственного распределения усилительных свойств активной среды. Это приводит к необходимости учёта взаимного влияния активной среды и индуцированного излучения при разработке таких конструкций.

Из рассмотрения известных методов расчёта свойств активной среды CO_2 -лазера, сделан вывод о том, что наиболее отвечающей практическим целям является квантово-кинетическая модель, учитывающая основные энергетические процессы, протекающие в активной среде CO_2 -лазера.

Для совместного вычисления пространственных и энергетических характеристик индуцированного излучения CO_2 -лазера необходимо объединение метода интегральных уравнений и квантово-кинетической модели активной среды.

Во второй главе предложены модификации алгоритмов расчёта пустых оптических резонаторов с большими числами Френеля и резонаторов, заполненных поперечно-неоднородной активной средой.

Для составления системы интегральных уравнений зеркала квазиустойчивого резонатора математически описаны с помощью корректирующих функций, отображающих влияние зеркал на амплитудно-фазовое распределение оптического поля. После преобразований полученная система интегральных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} v(t_2) = \frac{2L}{i\lambda} \int_0^1 u(t_1) F_1(t_1) t_1 K(t_1, t_2) dt_1, \\ \chi u(t_1) = \frac{2L}{i\lambda} \int_0^1 v(t_2) F_2(t_2) t_2 K(t_1, t_2) dt_2; \end{cases} \quad (1)$$

где

$$K(t_1, t_2) = \int_0^\pi \frac{\text{Exp}\{ika\sqrt{d^2 + t_1^2 + t_2^2 - 2t_1t_2 \cos(\varphi)}\}}{d^2 + t_1^2 + t_2^2 - 2t_1t_2 \cos(\varphi)} d\varphi; \quad (2)$$

$u(t)$ и $v(t)$ – амплитудно-азовые распределения поля соответственно на левом и правом зеркалах; χ – собственное значение; L – длина резонатора; λ – длина волны; t_1, t_2 – нормированные радиальные координаты в плоскости соответственно левого и правого зеркал; $F_1(t)$ и $F_2(t)$ – корректирующие функции, соответствующие сферическому и составному зеркалам; a – радиус апертуры зеркала; k – волновое число; φ – угловая координата; $d = L/a$. Корректирующие функции $F_1(t)$ и $F_2(t)$ имеют следующий вид. Для сферического зеркала:

$$F_1(t) = e^{-\frac{ik(at)^2}{R_1}}, \quad (3)$$

где R_1 – радиус кривизны сферического зеркала; для составного –

$$F_2(t) = F_a(t)F_p(t), \quad (4)$$

$$F_a(t) = 1 - \sqrt{\Gamma} \exp\left[-\left(\frac{t}{k_0}\right)^{2\mu}\right], \quad (5)$$

$$F_p(t) = \exp\left\{-ik\left[\frac{(at)^2}{R_2} - \frac{R_s}{k} \cdot \ln\left(1 + \exp\left\{\frac{k}{R_s}\left(\frac{(at)^2}{R_2} - \frac{(ak_1)^2}{R_2}\right)\right\}\right)\right]\right\}, \quad (6)$$

где Γ – коэффициент пропускания материала окна для вывода излучения; k_0 – радиус окна, нормированный к радиусу апертуры зеркала; μ – параметр, определяющий степень «сглаживания» края окна для вывода излучения; R_2 – радиус кривизны сферической части составного зеркала; R_s – параметр, определяющий радиус сопряжения сферической и плоской частей составного зеркала; k_1 – радиус апертуры сферической части, нормированный к радиусу апертуры зеркала. Таким образом, корректирующая функция для составного зеркала учитывает наличие выходного окна, «сглаживание» краёв окна с помощью квазиганссовой функции, наличие сферической и плоской частей, а также конечный радиус сопряжения между ними.

Интеграл по угловой координате (2) вычислялся при значениях параметров t_1 и t_2 соответствующим узлам интегрирования в (1) следующим образом.

Аналитически получено выражение для числа осцилляций подынтегральной функции в зависимости от величин t_1 и t_2 :

$$N_{осч} = 2 + floor\left(\frac{ka}{\pi} \sqrt{d^2 + (t_1 + t_2)^2}\right) - floor\left(\frac{ka}{\pi} \sqrt{d^2 + (t_1 - t_2)^2}\right), \quad (7)$$

где $floor(a)$ – целая часть числа a .

Согласно выражению (7) вычислялось количество осцилляций при текущем значении нормированных радиальных координат. Если это число оказывалось меньше заданного значения, интегрирование производилось методом Уэдля, в противном случае – методом стационарной фазы. Результаты расчёта интеграла по угловой координате, полученные методом Уэдля, сохранялись в постоянной памяти компьютера и использовались при решении системы интегральных уравнений (1) методом итераций. Таким образом достигнуто снижение объёма необходимых вычислений. Значительно снизить объём вычислений позволил также симметричный характер подынтегральной функции относительно параметров t_1 и t_2 .

Показано, что математическое описание зеркал с помощью корректирующих функций позволяет решить задачу расчёта связанных резонаторов. В этом случае связь между резонаторами формально отображается с помощью корректирующей функции, описывающей отражение и пропускание промежуточного зеркала. Система интегральных уравнений имеет вид, аналогичный (1), поэтому при переходе к расчёту связанных резонаторов целесообразно использовать значения (2), полученные для одиночного резонатора, что уменьшает временные затраты.

Приведены результаты компьютерных исследований квазиустойчивого резонатора. В том числе, проведено исследование зависимости распределения поля от относительного диаметра сферической части составного зеркала k_l , и коэффициента увеличения M , показавшее, что одномодовый режим работы резонатора возможен в том случае, если величина k_l превышает значение, соответствующее равноугольной конфигурации. Под равноугольной конфигурацией понимается такое соотношение параметров зеркал, при котором край сферического зеркала и край сферической части составного зеркала видны из общего фокуса под одним углом. Если величина k_l меньше величины, соответствующей равноугольной конфигурации, резонатор приближается к устойчивому, при этом потери для высших поперечных мод малы вследствие большого значения числа Френеля.

Проведённые численные исследования показали, что диаметр окна для вывода излучения в центре составного зеркала сильно влияет на равномерность внутрирезонаторного поля. При увеличении диаметра окна потери увеличиваются немонотонно. Зависимости величины потерь и коэффициента равномерности распределения поля $K_{исп}$, определяемого как площадь под графиком нормированного распределения интенсивности, от относительного диаметра окна для вывода излучения k_0 показаны на рис. 3:

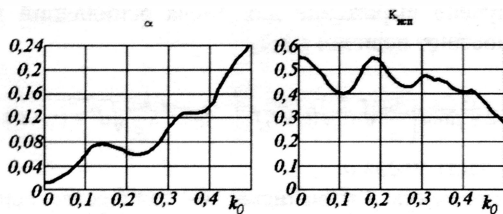


Рис. 3. Зависимость α и $K_{сн}$ от k_0

При увеличении коэффициента пропускания материала окна для вывода излучения Γ , до значения $\Gamma = 0,2$ потери увеличиваются монотонно до 0,12. Коэффициент равномерности распределения поля при этом изменяется менее, чем на 10 %.

Амплитудные распределения излучения в дальней зоне при радиусе выходного окна, составляющем 30 % от радиуса зеркала, показаны на рис. 4. Левый график соответствует полностью прозрачному выходному окну ($\Gamma = 1$), правый график – $\Gamma = 0,2$. Угол расходимости излучения составляет порядка 5 мрад в обоих случаях.

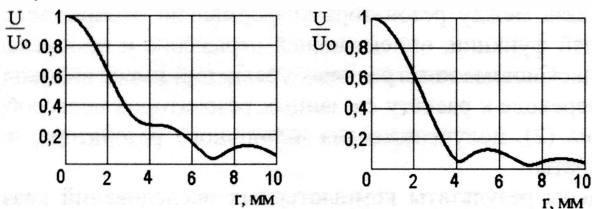


Рис. 4. Амплитудные распределения излучения в дальней зоне

Учитывая, что при изменении диаметра выходного окна сильно изменяется профиль внутрирезонаторного индуцированного излучения и угол расходимости, а величина потерь изменяется немонотонно, на практике целесообразно регулировать величину потерь на вывод излучения изменением коэффициента пропускания выходного окна, а не его диаметром.

При изменении параметра R_s , определяющего в выражении (6) радиус сопряжения сферической и плоской частей составного зеркала в пределах от 0 до 0,3 (что соответствует изменению радиуса сопряжения от 0 до 0,9 м) коэффициент равномерности распределения и потери поля изменяются не более чем на 5%.

Для решения задачи совместного вычисления пространственных и энергетических характеристик индуцированного излучения CO_2 -лазеров предложена запись дифракционного интеграла Зоммерфельда для сред, характеризующихся плавной поперечной неоднородностью комплексного показателя преломления. При выводе дифракционного интеграла использована функция излучения элементарного источника Гюйгенса, записанная в виде произведения двух функций, одна из которых является искомой:

$$G = \frac{e^{ikR}}{R} w(R). \quad (8)$$

R – расстояние от элементарного источника Гюйгенса в плоскости экрана до точки наблюдения, w – искомая функция.

Подстановкой (8) в уравнение Гельмгольца с учётом показателя преломления n и выписыванием явного вида частных производных, получено уравнение для функции $w(R)$:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial R^2} + 2ik \frac{\partial w}{\partial R} + k^2(n^2 - 1)w = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) решено с предположением о выполнении условия (10)

$$\left| \frac{\partial^2 w}{\partial R^2} \right| \ll \left| 2ik \frac{\partial w}{\partial R} \right|, \quad (10)$$

решение имеет вид:

$$w = \exp \left\{ -\frac{ikR}{2} + \frac{ik}{2} \int n^2 dR \right\} \quad (11)$$

Интеграл в показателе экспоненты вычислялся вдоль прямой, соединяющей элементарный источник Гюйгенса и точку наблюдения. Затем, формальным повтором вывода Зоммерфельда получено выражение дифракционного интеграла:

$$V(x, y) = \frac{(1+n^2)L}{2i\lambda} \int_{S'} U(x', y') \frac{e^{ikR \frac{Q+1}{2}}}{R^2} dS', \quad (12)$$

где x, y – декартовы координаты в плоскости наблюдения, x', y' – декартовы координаты в плоскости отверстия в экране;

$$Q = \int_0^1 n^2(x' + (x-x')t; y' + (y-y')t) dt. \quad (13)$$

Вычисление мнимой части комплексного показателя преломления производилось с использованием известной квантово-кинетической модели активной среды CO_2 -лазера. Использовалось локальное описание активной среды, то есть усилительные свойства активной среды в некоторой точке полагались зависящими от параметров самой среды и интенсивности оптического излучения только в этой точке. Это позволило совместное вычисление пространственных и энергетических характеристик индуцированного излучения CO_2 -лазера разделить на два этапа. На первом этапе определялась зависимость усиления активной среды от интенсивности оптического излучения при различных значениях параметров активной среды, таких как температура и давление. На рис. 5 кривыми показана рассчитанная зависимость усиления активной среды CO_2 -лазера

от интенсивности излучения при давлении 2700 Торр и температуре 300 К. На том же рисунке сплошной линией показан график аналогичной зависимости, рассчитанный по формуле Ригрода, при этом малосигнальное усиление g_0 и интенсивность насыщения I_S подбирались так, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение.

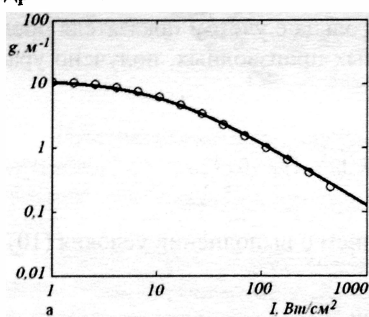


Рис. 5. Зависимости усиления от интенсивности излучения при $p = 2700$ Па и $T = 300$ К

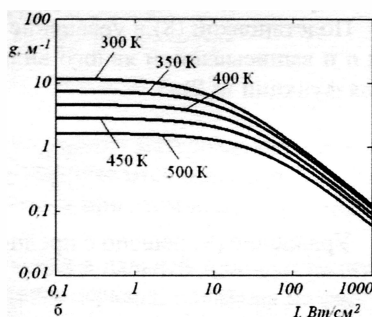


Рис. 6. Зависимости усиления от интенсивности излучения при $p = 2700$ Па

Расчёт показал хорошее совпадение двух моделей, относительная погрешность не превышала 5% при использованных предположениях и допущениях. Аналогичный вид имели зависимости усиления от интенсивности и при других температурах активной среды (рис. 6). Полученные результаты позволяют применять значения параметров малосигнального усиления и интенсивности насыщения, полученные как из других физических соображений, так и в результате непосредственных измерений, что значительно расширяет область применения разработанной модели.

С использованием предложенной записи дифракционного интеграла проведены расчёты внутрирезонаторного оптического поля в плоскопараллельном резонаторе. В том числе, для расчётов использовались различные поперечные распределения усиления активной среды (рис. 7), в том числе равномерное распределение усиления (сплошная), убывающее от оси к краю (пунктир), возрастающее от оси к краю (штрих-пунктир):

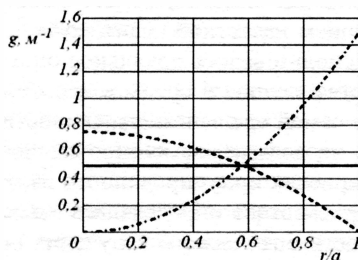


Рис. 7. Профили усиления, использовавшиеся при расчётах

В двух первых случаях нормированное поперечное распределение интенсивности внутрирезонаторного оптического излучения не более чем на 15% отличалось от соответствующего распределения в пустом резонаторе. В случае распределения усиления, возрастающего от оси к краю, на краю зеркал отличие достигало 45%. Заметному возмущению подверглось также распределение фаз. Графики зависимостей интенсивностей и фаз поля в случае возрастающего от оси к краю усиления показаны на рис. 8, круги соответствуют распределениям в пустом резонаторе.

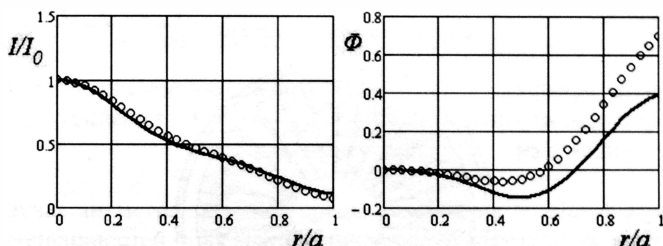


Рис. 8. Поперечные распределения интенсивностей и фаз поля при усилении, возрастающем от оси к краю

На рис. 9 показаны зависимости интенсивности оптического поля на оси резонатора от номера итерации, левый график – равномерное распределение, средний график – убывающее от оси к краю распределение, правый график – возрастающее от оси к краю распределение:

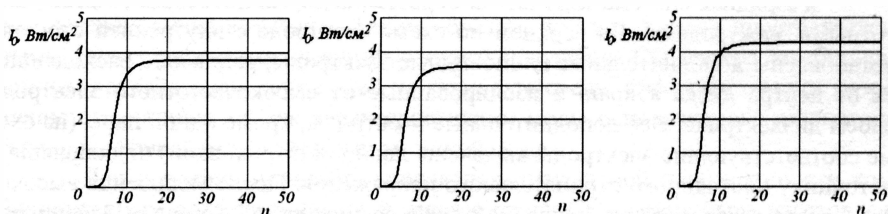


Рис. 9. Зависимости интенсивности оптического поля на оси от номера итерации при различных профилях распределения усиления

Таким образом, математическая модель, основанная на модифицированной записи дифракционного интеграла Зоммерфельда и квантово-кинетической модели активной среды CO_2 -лазера, позволяет совместно вычислять пространственные и энергетические характеристики индуцированного излучения CO_2 -лазеров.

Третья глава посвящена исследованию CO_2 -лазера с электронным внутрирезонаторным управлением диаграммой направленности при комбинированном воздействии на активную среду возбуждающего и управляющего полей.

Для решения задачи управления диаграммой направленности излучения CO_2 -лазера в угловом секторе 180° в азимутальной плоскости с возможностью формирования многолепестковой диаграммы направленности и независимого управления отдельными лепестками, предложена схема построения CO_2 -лазера с резонатором, образованным кольцевым зеркалом и с комбинированным воздействием на активную среду двух полей (рис. 10).

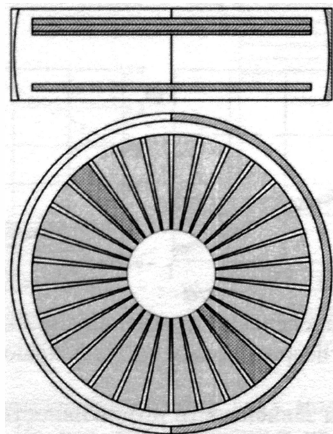


Рис. 10. Схема лазера с электронным внутрирезонаторным формированием диаграммы направленности

Разрядная система излучателя образована двумя дисковыми высокочастотными электродами. На верхнем по схеме электроде с внутренней стороны установлены дополнительные клиновидные электроды, радиально расходящиеся от центра диска к краю и изолированные от высокочастотного электрода слоем диэлектрика. Все дополнительные электроды, кроме одной пары (на схеме соответствующие электроды выделены двойной штриховкой) подключены к источнику постоянного отрицательного напряжения. После включения высокочастотного генератора возбуждения разряд возникает только над выделенными дополнительными электродами, на которых гасящее отрицательное напряжение отсутствует. Кольцевое зеркало оптического резонатора состоит из двух частей. В секторе 180 градусов зеркало является полностью отражающим, в противоположном секторе — частично пропускающим. Таким образом, диаметрально противоположные области кольцевого зеркала представляют собой концентрический резонатор. Генерация индуцированного оптического излучения происходит в направлении, соответствующем ориентации дополнительных электродов, на которых отсутствует гасящее отрицательное напряжение. Переключением гасящего напряжения на другие пары клиновидных электродов осуществляется изменение ориентации диаграммы направленности в азимутальной плоскости.

Для оценки влияния поперечного размера области, занятой активной средой, проведены расчёты внутрирезонаторного оптического поля в концен-

трическом резонаторе. Диаметр зеркал полагался равным $35 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр активной среды варьировался (рис. 11):

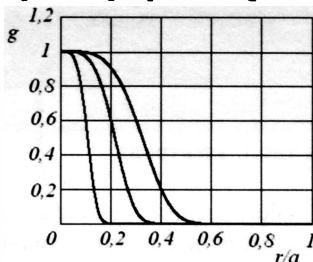


Рис. 11. Радиальные распределения усиления

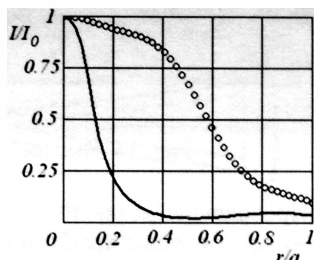


Рис. 12. Радиальные распределения интенсивности индуцированного излучения

В случае диаметра активной среды, близкого к диаметру зеркал, распределения интенсивностей поля мало отличаются от соответствующего распределения в пустом резонаторе (рис. 12, круги). При уменьшении диаметра активной среды для компенсации потерь в резонаторе приходится увеличивать усиление активной среды на оси. Распределение интенсивностей при этом претерпевает изменения, а именно, в области, соответствующей активной среде, интенсивность начинает увеличиваться. На рис. 12 сплошной линией показан график распределения интенсивности при диаметре активной среды $6 \cdot 10^{-3}$ м.

Минимально допустимый диаметр активной области определяется степенью превышения имеющегося усиления над пороговым значением, при котором генерация ещё возможна. Таким образом, при управлении пространственными характеристиками индуцированного излучения CO_2 -лазера комбинированным воздействием двух полей на активную среду, пространственное разрешение ограничивается как характеристиками моды используемого резонатора, так и усилительными свойствами активной среды.

Для проверки принципа управления диаграммой направленности комбинированным воздействием на активную среду CO_2 -лазера была изготовлена натурная модель с управляющим электродом, схема и внешний вид которого показаны на рис. 13 и рис. 14 соответственно:

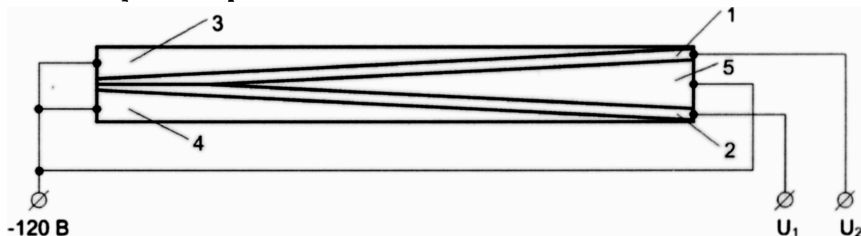


Рис. 13. Схема применённого электрода

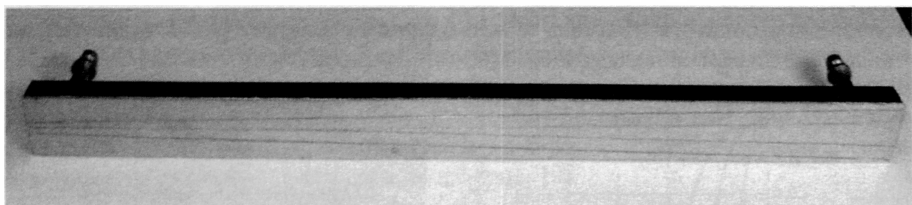


Рис. 14. Внешний вид применного электрода

Проводящие металлические дорожки, обозначенные на схеме цифрами 1 и 2, соответствующие крайним положениям плазменного пучка, имели ширину 6 мм и подключались к выходу высоковольтного усилителя. Площадки 3, 4 и 5 соединялись между собой и подключались к отрицательному полюсу источника напряжения, что соответствовало постоянному подавлению разряда над указанными площадками. Таким образом использованная натурная модель является фрагментом (угловым сектором) реальной структуры. Разрядная система, состоящая из двух полых электродов, к одному из которых с помощью теплопроводящего клея приклеен управляющий электрод, помещалась в трубу из нержавеющей стали, служащую корпусом модели. Для охлаждения разрядной области через электроды прокачивалась вода. Торцевые части корпуса с помощью герметизирующих фланцев закрывались прозрачными окнами для визуального наблюдения разряда. Излучатель заполнялся смесью газов $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$ с добавкой 5% Xe до полного давления 3200 Па.

На рис. 15 показаны фотографии разряда в межэлектродном зазоре при различных значениях напряжения на токопроводящих дорожках:

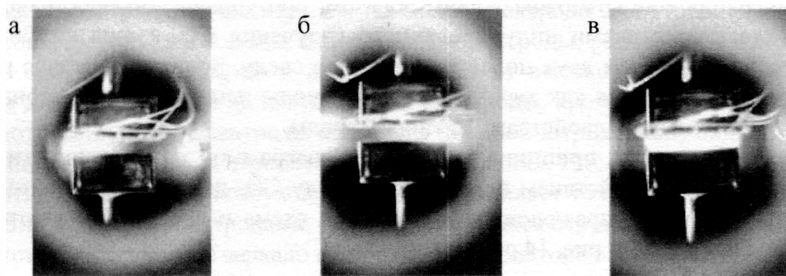


Рис. 15. Вид разрядной области при $U_1 = 0$, $U_2 = -120$ (а);
 $U_1 = -120$, $U_2 = 0$ (б); $U_1 = U_2 = 0$ (в)

Величина напряжения, необходимого для гашения разряда, в сильной степени зависит от вкладываемой в разряд мощности возбуждения. Для мощности 60...70 Вт устойчивое однонаправленное возбуждение активной среды достигается при напряжениях порядка -90 В, с ростом мощности возбуждения величина необходимого напряжения понижается и составляет -120...-140 В при вкладываемой мощности более 100 Вт.

Для получения генерации к торцевым фланцам корпуса крепились система юстировки и зеркала концентрического резонатора. На рис. 16 показана схема натурной модели:

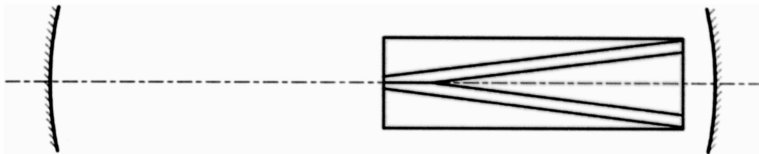


Рис. 16. Схема натурной модели

На рис. 17 показан внешний вид собранной конструкции:

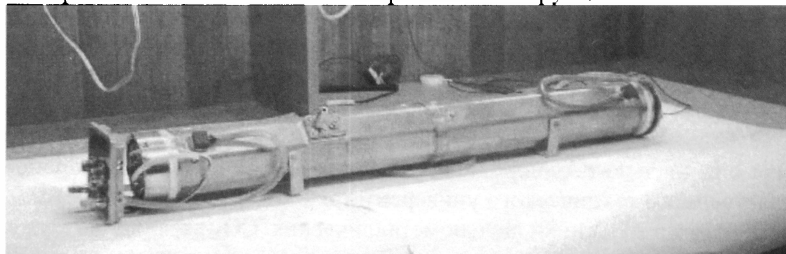


Рис. 17. Внешний вид натурной модели

Мощность однонаправленного излучения составила 2,4 Вт. Проведенные исследования показали, что при низких частотах переключения форма импульсов излучения повторяет форму прямоугольных управляющих импульсов. С повышением частоты переключения до значения порядка 1000 Гц форма оптических импульсов изменяется, заметную часть составляют фронт и спад, и при более высоких частотах переключения амплитуда импульсов оптического излучения уменьшается. Поэтому время порядка 10^{-3} с определяет быстрдействие предложенного метода.

В заключении сделаны следующие выводы:

1. Предложены технические пути построения CO_2 -лазеров с комбинированным воздействием на активную среду высокочастотного электромагнитного поля возбуждения и постоянного управляющего электрического поля, позволяющие осуществлять внутрирезонаторное электронное управление пространственными и энергетическими параметрами выходного излучения.

2. Разработан алгоритм расчёта пустых оптических резонаторов, характеризующихся большим числом Френеля, позволяющий отказаться от параксиального приближения при анализе резонаторов дисковых CO_2 -лазеров.

3. В результате численного исследования квазиустойчивого резонатора обоснованы общие требования к его зеркалам, выполнение которых обеспечивает одномодовый режим генерации и высокую равномерность внутрирезонаторного излучения.

Рис. 18
Схема резонатора

4. Предложена и аналитически обоснована модифицированная запись дифракционного интеграла Зоммерфельда, обеспечивающая учёт плавной поперечной неоднородности среды и дифракции излучения на большие углы.

5. Предложен метод расчёта лазерных резонаторов, позволяющий во взаимосвязи рассчитывать пространственные и энергетические характеристики индуцированного излучения CO_2 -лазеров с электромагнитным возбуждением.

6. Результаты экспериментальных исследований макета лазера с электронным внутрирезонаторным управлением направленными свойствами излучения подтверждают возможность электронного внутрирезонаторного управления диаграммой направленности, при этом основным фактором, ограничивающим угловой диапазон, является апертура зеркал.

Основные результаты диссертации представлены в работах:

1. Кириллов И. М., Юдин В. И. Алгоритм расчёта амплитудно-фазового распределения оптического поля в гибридном неустойчиво-устойчивом лазерном резонаторе // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 4, № 3. С. 37-39.

2. Кириллов И. М., Юдин В. И. Применение дифракционного интеграла в задачах о радиально-неоднородных активных средах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 1. С. 10 – 12.

3. Развитие техники цельнометаллических CO_2 -лазеров, возбуждаемых электромагнитным полем, с внутрирезонаторным управлением параметрами излучения / И. К. Архипов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 1. С. 211-213.

4. Газовый лазер с высокочастотным электромагнитным возбуждением. Патент РФ № 2345458 / И. К. Архипов, И. М. Кириллов, В. И. Юдин. Заявл. 19.11.2007; опубл. 27.01.2009. Изобретения. Полезные модели: офиц. бюл. № 3.

5. Газовый лазер с внутрирезонаторным сканированием излучения. Патент РФ № 2359380 / И. К. Архипов, И. М. Кириллов, В. И. Юдин. Заявл. 11.02.2008; опубл. 20.06.2009. Изобретения. Полезные модели: офиц. бюл. № 17.

6. Кириллов И. М. Алгоритм расчёта амплитудно-фазового распределения поля в лазерных резонаторах с большими числами Френеля // Радиолокация, навигация, связь: Сб. докл. междунар. конф. – Воронеж, 2007. Т. 3. С. 2216-2223.

7. Кириллов И. М., Юдин В. И. Расчёт амплитудно-фазового распределения оптического поля в гибридном неустойчиво-устойчивом лазерном резонаторе // Лазеры в науке, технике, медицине: Сб. докл. междунар. конф. – Адлер, 2007. Т. 18. С. 22-25.

8. Кириллов И. М., Юдин В. И. Применение дифракционного интеграла в задачах о радиально-неоднородных нелинейных активных средах // Радиолокация, навигация, связь: Сб. докл. междунар. конф. – Воронеж, 2009. Т. 1. С. 562-566.

9. Кириллов И. М., Юдин В. И. Исследование амплитудно-фазового распределения оптического поля в неустойчиво-устойчивом лазерном резонаторе // Радиолокация, навигация, связь: Сб. докл. междунар. конф. – Воронеж, 2010. Т. 1. С. 717-725.

Формат бумаги А4, цифровая печать
Тираж – 100 экз.
Отпечатано в «ФотоЭлемент»
Москва, ул. Фридриха Энгельса д.3-5 стр.2