

ВОЛНОВОДНЫЙ CO₂ ЛАЗЕР С ДВУМЯ ОПТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМИ
КАНАЛАМИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ВЧ ВОЗБУЖДЕНИИ
WAVEGUIDE CO₂ LASER WITH TWO OPTICALLY COUPLED CHANNELS AT
TRANSVERSAL HF EXCITATION

ТУУРАСЫНАН ЖОГОРКУ ЖЫШТЫКТУУ РАЗРЯД МЕНЕН ДҮҮЛҮКТҮРҮЛГӨН
ЭКИ КАНАЛЫ ОПТИКАЛЫК БИР-БИРИ МЕНЕН БАЙЛАНЫШКАН CO₂ ЛАЗЕРИ

*Иманкулов З.И. ф.-м.и.к., доцент, Кыргызстан, Жалал-Абад ш.
e-mail: imankulovz@bk.ru*

Аннотация: В работе экспериментально исследованы характеристики излучения волноводного CO₂ лазера с двумя оптически связанными каналами. Подтверждено возможность устойчивой работы такого лазера в режиме синхронизированных пучков.

Аннотация: Эки каналы оптикалык бир-бири менен байланышкан CO₂ лазеринин нурун мүнөздөөчү чоңдуктар эксперименталдык жол менен изилденген. Жогорудагы лазердин нурулары синхронизацияланган режимде турактуу иштейи далилденген.

Annotation: In this paper done an experimental investigation of radiation characteristics of a waveguide CO₂ laser with two optically coupled channels. Confirmed that a stable operation of the laser in the synchronized beams.

Ачык сөздөр: эки каналдуу, лазер, жогорку жыштыктагы разряд

Ключевые слова: Волноводный, двухканальный, лазер, ВЧ разряд,

Keywords: Waveguide, two channels, laser, HF digit.

В последние годы в связи с необходимостью повышения мощности лазерного излучения, а также улучшения частотных характеристик особым интересом стали пользоваться многоканальные конструкции лазеров [1-3]. Основное внимание уделяется здесь влиянию характера связи между каналами, способной синхронизовать излучения отдельных каналов, на динамику излучения конструкции в целом.

В связи с этим было проведено экспериментальное исследование двухканального CO₂ лазера с поперечным ВЧ разрядом и теоретические расчеты распределения интенсивности излучения в дальней зоне.

Нами был собран двухканальный волноводный CO₂-лазер оригинальной конструкции, обеспечивающий пару оптически связанных керамических волноводных канала с высокоэффективной системой накачки. Оптимизированы основные параметры и дополнительно исследованы его выходные характеристики: структура распределения в ближней и дальней зоне, спектральные характеристики излучения.

Волноводные каналы имели квадратное поперечное сечение, а между ними существовал зазор. Поперечное сечение активного элемента представлено на рисунке 1. Как видно из рисунка, каналы лазера сформированы из керамических пластин 1, которые были изготовлены из BeO и хорошо отполированы. Кроме того, они располагались с некоторым смещением относительно друг друга, что обеспечивало за счет щели между ними взаимное перекрытие волн, распространяющихся в каждом отдельном канале. Для возбуждения ВЧ разряда в каналах использовался транзисторный ВЧ автогенератор мощностью 150 Вт на частоте 80,0 МГц, а для трансформации энергии ВЧ поля в разряд - "гребенка", изготовленная из медной фольги 2. ВЧ энергия подводилась к "гребенке" через вводы 4, которые размещались по длине резонатора попарно (всего 3 пары) в центре и на краях разрядной структуры, где, кроме того, располагались корректирующие индуктивности, обеспечивающие равномерность разряда по длине. Согласование ВЧ автогенератора накачки с разрядом достигалось использованием ВЧ трансформатора. Поперечные размеры каналов 2,0 x 2,0 мм, ширина зазора между ними - 1мм, длина разрядных каналов - 290 мм. Охлаждение активной среды производилось водой, протекающей через дополнительные полости 3, плотно прилегающие к внешним

пластинам структуры разрядного канала. Вся структура активного элемента помещалась в вакуумную оболочку 5. На торцах оболочки, изготовленной из кварцевого стекла, установлены фланцы, к которым крепились юстировочные узлы.

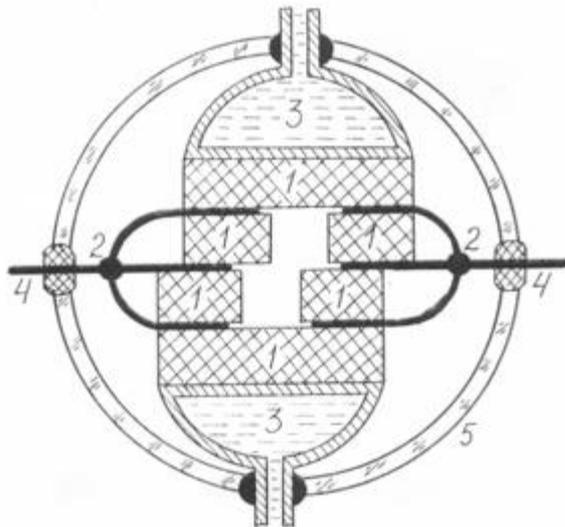


Рис.1. Поперечное сечение активного элемента двухканального CO_2 – лазера с ВЧ возбуждением. 1 - керамическая пластина, 2 - ВЧ электроды, 3 -холодильник, 4 - ввод ВЧ энергии, 5 - оболочка.

Конструкция юстировочных узлов позволила собирать резонатор с внутренними зеркалами. Глухое зеркало с коэффициентом отражения 99,5% было изготовлено из германия с золотым покрытием, а выходное - 96% из ZnSe с диэлектрическим напылением.

Оба зеркала плоские и располагались на расстоянии 5 мм от торцов разрядного канала.

Рабочей средой лазера являлась смесь CO_2 :

$\text{N}_2\text{:He:Xe} = 1:1:4:0,2$ с давлением более 100 мм рт. ст.(13,3 кПа)

Рассмотренная конструкция активного элемента позволила получить лазерную генерацию на длине волны 10,59 мкм с суммарной максимальной мощностью $W_H = 6,5$ Вт при $P_{\text{opt}} = 70$ мм рт.ст.(9,3 кПа) и мощности накачки $W_H = 100$ Вт.

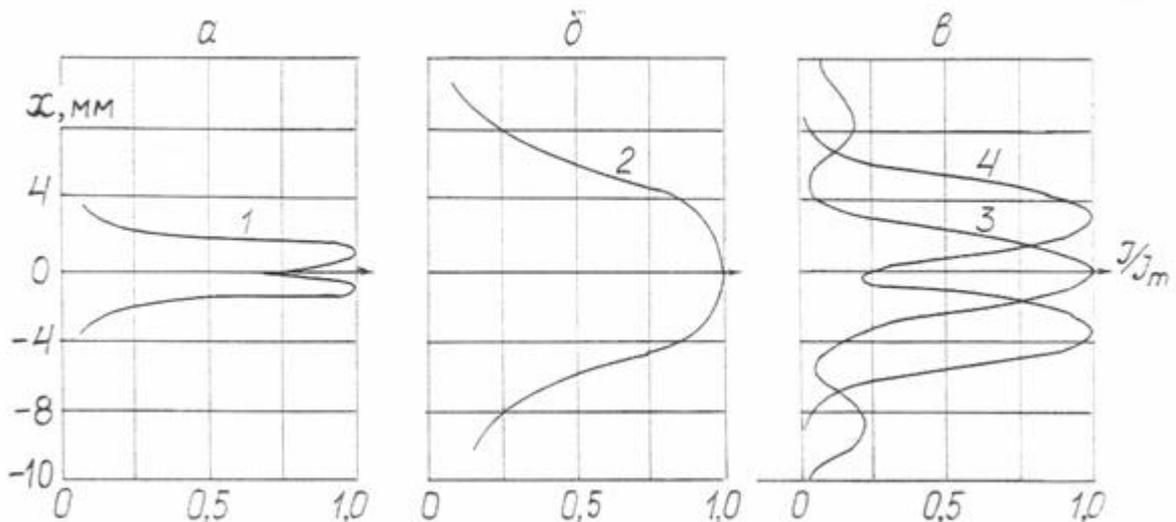


Рис.2. Нормированное распределение излучения по поперечному сечению пучка двухканального CO_2 лазера. а - в ближней зоне ($l = 80$ мм); б,в - в дальней зоне ($l = 1900$ мм): б - некогерентное сложение пучков, в - когерентное сложение пучков ($\omega_1 = \omega_2$; $I_{1\text{max}} = 2,1$ отн.ед.; $I_{2\text{max}} = 3,0$; $I_{3\text{max}} = 10$; $I_{4\text{max}} = 5$, 1) 3 - $\Delta\varphi = 0$; 4 - $\Delta\varphi = \pi$.

В ближней зоне излучение лазера представляло собой два незначительно перекрывающихся «гауссовских» пучка – рис.2а. В дальней зоне характер распределения интенсивности излучения существенно зависел от ориентации зеркал резонатора относительно друг друга. При этом для различных юстировок зеркал возможны несколько вариантов, например, некогерентное сложение пучков–рис.2б, для которого при распространении имело место простое уширение пучков с увеличением расходимости по сравнению с одним пучком приблизительно в 1,5 раза. Другие варианты распределений, полученные нами экспериментально, имели вид интерференционных картин – рис.2в. Нам представляется, что такие картины могут быть реализованы при когерентном сложении пучков излучения, когда два связанных канала работали на одной фиксированной длине волны или в режиме синхронизации мод. Для них характерно появление

интерференционных полос в дальней зоне, положение которых зависело от разности фаз интерферирующих пучков. В отдельных случаях наблюдался неустойчивый режим, который практически мгновенно переходил в режим с заметной перекачкой оптической мощности из одного канала в другой.

Для проверки этих выводов нами были выполнены расчет распределения плотности мощности в сечении при когерентном сложении пучков излучения и проведены дополнительные исследования спектральных характеристик двухканального лазера. Расчеты некогерентного сложения пучков вследствие своей тривиальности интереса не представляли.

Работая в симметричном режиме, каналы дают интерференционную картину выходного излучения, вид которой зависит от разности фаз между волнами в каждом из них. Мы смоделировали интерференционную картину, полагая, что пучки имели гауссовский вид, и что в волноводе квадратного сечения распространяется лишь ТН₀₀-мода. Ее можно наилучшим образом аппроксимировать ТЕМ₀₀-модой, если взять в качестве размера ее сечения $(\omega_0 = 0,7a$, где a - полуширина канала. Предполагая, что частоты генерации в каждом канале одинаковы и, проведя усреднение по времени, т.е. опуская осциллирующий множитель $\exp(i\omega t)$, легко получить значение скалярной амплитуды напряженности электрического поля для каждого из пучков, которое имеет вид [4,5]:

$$E_1 = E_{oi} \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{\omega(z)^2}\right) \exp\left(-j \frac{k(x_1^2 + y_1^2)}{2R(z)}\right) \cdot \exp\left(-jkz + j \cdot \arctg\left(\frac{z}{z_R}\right)\right) \exp\left(i\varphi_0\right) \quad (1)$$

где $\omega^2(z) = \omega_0^2 + \left(\frac{\pi}{\omega_0}\right)^2 \cdot z^2$ - размер сечения пучка, $R(z) = z + z_R^2/z$ - кривизна волнового фронта, $z_R = \pi\omega_0^2/\lambda$, φ_0 - начальная фаза. В нашем случае величина $a = 1$ мм, $\lambda = 10,59$ мкм, $i = 1,2$. Аналогичное распределение имело место и в случае взаимной синхронизации одной или нескольких мод, генерируемых в отдельных, но связанных каналах.

Координатная система для расчетов выбиралась так, что ее начало находилось в центре поперечного сечения, как это показано на рис.3а. Тогда распределение интенсивности в интерференционной картине от сложения двух связанных пучков на расстоянии z от выходного зеркала равно:

$$I = |E_1 + E_2|^2 = E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega^2(z)} \exp\left(-2\frac{x^2 + y^2}{\omega(z)^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{h_x^2 + h_y^2}{\omega(z)^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-2\frac{xh_x + yh_y}{\omega^2(z)}\right) + \exp\left(2\frac{xh_x + yh_y}{\omega^2(z)}\right) + 2\cos\left(\frac{xh_x + yh_y}{R(z)} + \Delta\varphi_0\right) \right],$$

$$x_1 = x - h_x/2, \quad x_2 = x + h_x/2, \quad y_1 = y - h_y/2, \quad y_2 = y + h_y/2 \quad (2)$$

где h_x и h_y - расстояния между центрами волноводных каналов по оси x и y , соответственно. При этом предполагалось, что амплитуды полей обоих волноводов равны, т.е. $E_1 = E_2 = E_0$.

Результаты расчетов распределения интенсивности в интерференционной картине представлены на рис.3 в,г для разностей фаз близких к 0 или π . Из рассмотрения расчетных картин интерференции и сравнения их с наблюдаемыми экспериментально можно заключить, что в эксперименте были зафиксированы разности фаз синхронизованных пучков излучения каналов, близкие к 0 и π . В случае, когда юстировка зеркал лазера приводила к нарушению симметрии пучков или к смещению области их периодичности от центра к периферии одного из каналов возможно рассогласование канала, частичная перекачка мощности из одного канала в другой и резкая дестабилизация режима генерации за счет их конкуренции.

Для проверки возможности работы двухканального лазера со связанными каналами в одночастотном режиме и режиме синхронизации нами был поставлен специальный

эксперимент, в котором излучение созданного двухканального лазера сбивалось с излучением опорного лазера [6,7]. При этом на экране анализатора спектра наблюдались биения, как между отдельными частотами в каждом канале (при их наличии), так и между частотами двухканального и опорного лазеров при последовательном перекрытии пучков. Исследования спектральных характеристик двухканального лазера показали, что наиболее устойчивым режимом его работы являлся режим, при котором одновременно генерировали две частоты, разность которых менялась при разюстировке зеркал от 4,0 до 30 МГц. При этом на экране анализатора спектра С4-45 наблюдался один сигнал биений на разностной частоте $\Delta f = f_1 - f_2$ при закрытом пучке эталонного лазера, как для каждого из пучков, так и для обоих вместе. Во втором случае интенсивность сигнала биений увеличивалась вдвое.

При открытом пучке излучения эталонного лазера на экране анализатора спектра наблюдалось три интенсивных сигнала биений на частотах Δf , $\Delta f_1 = f_1 - f_{ЭТ}$ (~ 6 МГц), $\Delta f_2 = f_2 - f_{ЭТ}$ (~ 18 МГц). Измерения кратковременной нестабильности частоты двухканального лазера, работающего в 2-х частотном режиме для различных времен усреднения ($\tau = 10^{-4}$, 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} с) показали, что величина относительной нестабильности частоты в каждом канале монотонно падает с увеличением времени усреднения от 10^{-8} до 10^{-9} . Это свидетельствует об отсутствии долговременного дрейфа частот и подтверждается возможностью синхронизации частот в обоих каналах. Другим устойчивым режимом работы двухканального лазера, был случай, когда в одном из каналов генерировало две частоты, отстоящие друг от друга на $\Delta f = f_1 - f_2$ ($\sim 4 - \sim 5$ МГц), а во втором канале три частоты, отстоящие на $\Delta f = f_1 - f_2$ ($\sim 4 - \sim 5$ МГц) и $\Delta f' = f_1 - f_3$ ($\sim 18 - \sim 20$ МГц). В этом случае первые две частоты были жестко связаны с аналогичными частотами во втором канале и на экране анализатора спектра наблюдались стабильные хорошо воспроизводимые биения трех частот Δf и $\Delta f'$ (без эталонного лазера) и биения на трех частотах с открытым пучком эталонного лазера.

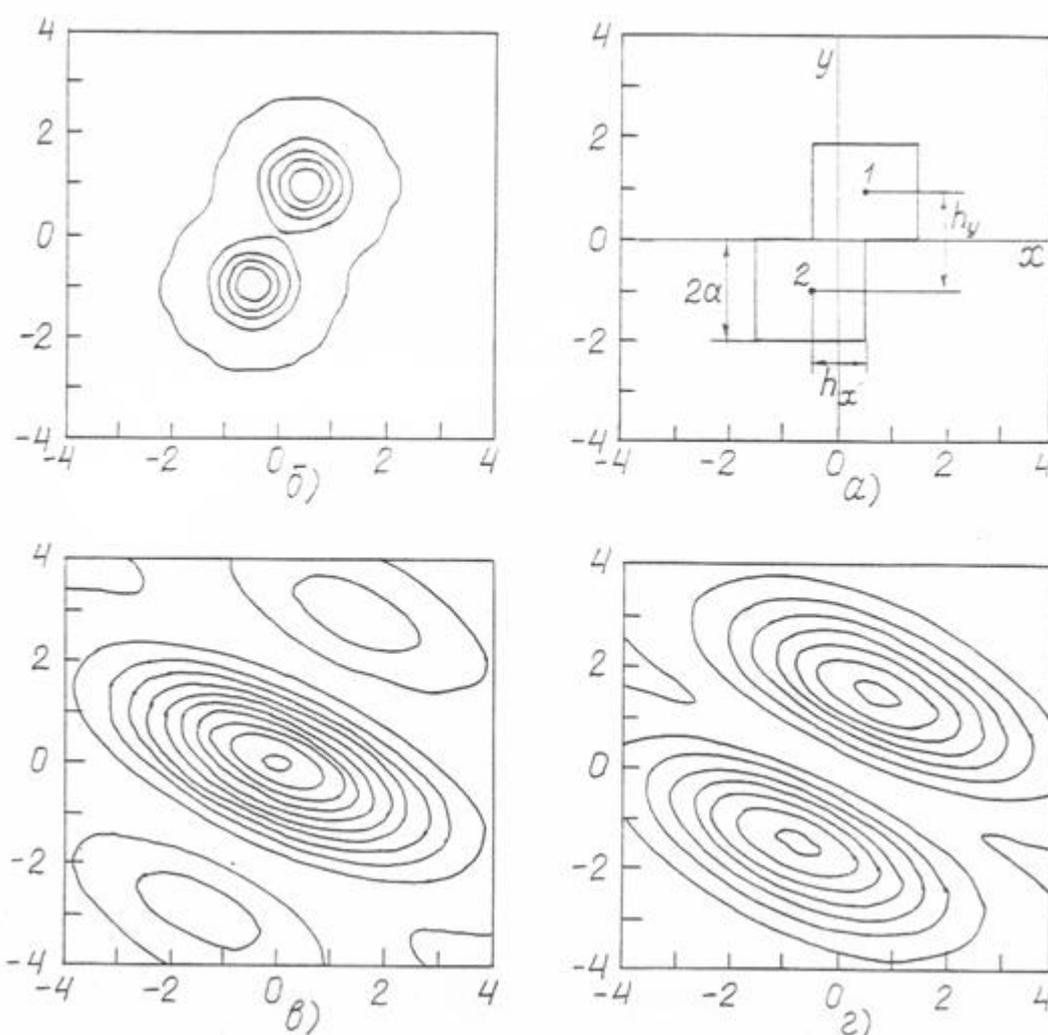


Рис.3. Интерференционная картина распределения интенсивности.

а - координатная система топографии распределения интенсивностей излучения по поперечному сечению пучка двухканального лазера в синхронном режиме; б - в ближней зоне ($l = 80$ мм), в, г - в дальней зоне ($l = 800$ мм) с $\Delta\varphi = 0,2\pi$ и $0,8\pi$, соответственно.

При разъюстировке зеркал резонатора и смещении разностной частоты к нулю биения между частотами кратковременно пропадали, но в дальнейшем самопроизвольно появлялись, и вновь устанавливался ранее рассмотренный режим двухчастотной генерации с синхронизованными пучками. Вероятно, в этом случае кратковременно лазер работал в одночастотных режимах в каждом канале, но этот режим был крайне неустойчив.

Экспериментальные исследования спектральных и поляризационных характеристик излучения двухканального CO_2 лазера путем прямых наблюдений спектра генерации с помощью панорамного спектр анализатора и поляризатора МЛР показали, что двух пучковый лазера мог работать и в режиме многоволновой генерации, когда генерация в каждом канале имела место на нескольких линиях одновременно (10,57; 10,59; 10,61 мкм). А также, что поляризация каждого пучка была линейной и совпадала с направлением вектора электрической напряженности ВЧ поля, возбуждающего лазера.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований характеристик излучения волноводного CO_2 лазера с двумя оптически связанными каналами подтвердили возможность устойчивой работы такого лазера в режиме синхронизованных пучков, что качественно объясняло результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов распределения интенсивности излучения в дальней зоне.

Литература:

1. Лиханский В.В., Напартович А.П. Излучение оптически связанных лазеров // УФН. - 1988.- т.160. -вып.3. -с.101-143.
2. Neuman L.A., Haart R.A. Recent and advances in sealed off CO₂ lasers: Laser Focus// Electro- Optics.-1987.-v.23.-№6.-р.80-83.
3. Яценко Н.А. Газовые лазеры с высокочастотным возбуждением. //Препринт ИПМ АН СССР; N 38а, -М,: 1989. -34с.).
4. Маркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. -М.: Наука, 1987. -304с.
5. Youmans D.S. Phase locking of adjacent channel leaky waveguide CO₂ lasers // Appl.Phys.Lett.1984, v.44, №4, p.365-367.
6. Иманкулов З.И., Доноев Т.А., Миринояттов М.М. Одночастотный волноводный CO₂ - лазер с поперечным ВЧ разрядом.//Вестник ЖАГУ, №1, 2008, стр.91-94.
7. Иманкулов З.И. Двухканальный волноводный CO₂ лазер с поперечным ВЧ разрядом // Вестник Южного отделения Национальной Академии наук Кыргызской Республики, 2013, №1, стр.29-35