

Особенности формирования излучения в резонаторах с перфорированными зеркалами

А.С.Борейшо, А.Ф.Леонов, С.Ю.Страхов, А.В.Трилис

Обсуждаются возможности использования перфорированных выходных зеркал для устойчивых резонаторов непрерывных СО₂-лазеров. Рассматриваются основные составляющие внутрирезонаторных потерь, в том числе – связанные с дифракцией излучения на отверстиях зеркала. Результаты экспериментального исследования 100-киловаттного СО₂-газодинамического лазера на продуктах сгорания с устойчивым и неустойчивым резонаторами и выходными зеркалами различных типов сравниваются с результатами численного моделирования. Выполненное расчетно-экспериментальное исследование в широком диапазоне параметров позволило объяснить некоторые особенности процесса формирования излучения в резонаторах с перфорированными зеркалами. Сформулированы практические рекомендации для выбора параметров таких зеркал.

Ключевые слова: перфорированные зеркала, оптический резонатор, дифракционные потери.

Для вывода излучения из плоскопараллельных и устойчивых резонаторов вместо традиционных полупрозрачных зеркал иногда применяют перфорированные зеркала (ПЗ) [1]. В работах [2, 3] обсуждаются вопросы модовой структуры резонаторов с такими зеркалами. К достоинствам ПЗ можно отнести относительную простоту изготовления, низкую по сравнению, например, с кристаллическими полупрозрачными зеркалами из ZnSe или Ge стоимость, высокую прочность и высокую лучевую стойкость. Основными недостатками ПЗ являются относительно сложная юстировка резонатора с ПЗ по сравнению с резонатором, имеющим полупрозрачное выходное зеркало; высокая угловая расходимость излучения после резонатора с ПЗ (фактически она равна $\sim \lambda/d_0$, где d_0 – диаметр отверстий в ПЗ, λ – длина волны излучения) и большие внутрирезонаторные потери.

Перечисленные преимущества и недостатки ПЗ позволяют рекомендовать их для использования на стадии отладки лазера при поиске оптимальных режимов работы, определении энергетических характеристик лазера, а также в ситуациях, когда повышенная лучевая нагрузка не позволяет применять полупрозрачные зеркала.

В резонаторе с ПЗ заполнение отверстий излучением обеспечивается дифракцией световой волны на их краях. Следовательно, диаметр отверстий должен быть небольшим, чтобы заполнение было полным и отверстия не вносили искажений в распределение интенсивности внутри резонатора. Для этого число Френеля каждого отверстия N_0 должно быть достаточно малым. Обычно полагают [1], что $N_0 = d_0^2/(4\lambda L) \leq 1$, т. е.

$$d_0 \leq 2\sqrt{\lambda L}, \quad (1)$$

Институт лазерной техники и технологий Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф.Устинова, Россия, 198005 С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1; e-mail: Strakhov@Lsystems.ru

Поступила в редакцию 19 апреля 2002 г., после доработки – 14 августа 2002 г.

где L – длина резонатора. Коэффициент пропускания ПЗ

$$t = \frac{nS_0}{S}, \quad (2)$$

где n – число отверстий; $S_0 = \pi d_0^2/4$ – площадь одного отверстия; S – суммарная площадь зеркала.

Рассмотрим основные составляющие потерь в резонаторах. При расчете вредных потерь в традиционных устойчивых резонаторах с полупрозрачными выходными зеркалами (например, из ZnSe) необходимо учитывать:

1. Дифракционные потери. В устойчивых резонаторах с достаточно большим числом Френеля $N_F > 10$ при $|g_1 g_2| \leq 0.9$ ($g_1 = 1 - L/R_1$, $g_2 = 1 - L/R_2$ – параметры устойчивости резонатора; $R_{1,2}$ – радиусы кривизны зеркал) они не превышают 1%.

2. Собственные потери на зеркалах, обусловленные частичным поглощением и рассеянием падающего на зеркало излучения. Для медных зеркал, например, они составляют 1–3%.

3. Потери на поглощение в активной среде, которые обычно не очень велики и которыми можно пренебречь по сравнению с потерями на зеркалах.

В резонаторах с ПЗ к указанным составляющим потерь добавятся еще две:

4. Потери из-за дифракции излучения на малых «апертурах», которые образуются между отверстиями. Эти потери могут значительно превышать дифракционные в традиционных резонаторах.

5. Потери на рассеяние и поглощение излучения на краях отверстий, связанные с тем, что, как показывает практика, на них даже при хорошем качестве изготовления зеркал образуются завалы отражающей поверхности, маленькие фаски и т. д. Характерная ширина этих неблагоприятных зон составляет порядка десятых долей миллиметра. Однако при большом числе отверстий их суммарная площадь не столь уж мала.

В дальнейшем будем обозначать указанные составляющие потерь β_{1-5} соответственно.

Потери β_4 , свойственные ПЗ, зависят от размеров и числа отверстий. Расстояние между отверстиями равно \sqrt{S}/\sqrt{n} , а расстояние между их кромками

$$A = d_0 \left(0.5 \sqrt{\frac{\pi}{t}} - 1 \right). \quad (3)$$

Потери β_4 будут возрастать с уменьшением A (а значит, и d_0), т. к. дифракционное рассеяние излучения на поверхности зеркала между отверстиями пропорционально λ/A . Очевидно также, что потери β_4 будут расти с уменьшением числа Френеля резонатора N_F . Кроме того, на них будут оказывать влияние параметры устойчивости резонатора g_1, g_2 или их произведение $g_1 g_2$.

Исходя из достаточно очевидных соображений, можно предположить, что условием эквивалентности двух резонаторов I и II с ПЗ по дифракционным потерям $\beta_1 + \beta_4$ будет выполнение следующих равенств:

$$\begin{aligned} N_F^I &= N_F^{II}, \\ g_1^I g_2^I &= g_1^{II} g_2^{II}, \\ N_0^I &= N_0^{II}, \\ t^I &= t^{II}. \end{aligned} \quad (4)$$

Первые два равенства фактически определяют условия эквивалентности традиционных устойчивых резонаторов с полупрозрачными выходными зеркалами, вторые два – обеспечивают равенство дифракционных потерь в резонаторах с ПЗ, обусловленных дифракцией на кромках отверстий.

Потери β_5 также определяются размером отверстий и их числом. Будем считать эти потери пропорциональными площади неблагоприятных зон на кромках отверстий, т. е. $\beta_5 = \pi d_0 n h / S$, где h – средняя ширина неблагоприятной зоны. Воспользовавшись (2), можно записать

$$\beta_5 = \frac{4ht}{d_0}. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что потери β_5 , как и β_4 , возрастают с уменьшением диаметра отверстий d_0 .

Из сказанного следует, что значительное уменьшение диаметра отверстий по сравнению с его верхним пределом, определяемым соотношением (1), с целью уменьшения влияния отверстий на структуру моды может привести к сильному возрастанию внутрирезонаторных потерь, падению мощности излучения и снижению общей эффективности лазера.

Для анализа влияния на величину β_4 основных параметров резонатора была проведена серия расчетов устойчивого резонатора в дифракционном приближении итерационным методом. Резонатор разбивался на отдельные зоны с характерным размером. Число зон соответствовало числу проходов излучения между зеркалами на пути от выходного к концевому зеркалу (в двухзеркальном резонаторе – одна зона, в Z-образном – три). Сферические зеркала заменялись квадратичными фазовыми экранами, сосредоточенными в конце соответствующих зон. Распространение света между экранами описывалось параболическим волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

где k – волновое число; u – комплексная амплитуда поля.

Решение уравнения (6) проводилось спектральным методом с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Спектральный метод и особенности его применения для резонаторных задач подробно описаны в [4]. В этом методе волновая функция (комплексная амплитуда поля) на границе очередной зоны раскладывается в ряд Фурье на пространственно-частотные компоненты v_x, v_y (спектр), имеющие смысл плоских волн с единичной амплитудой [5]. Умножая каждую такую компоненту на экспоненциальный множитель $\exp[i\pi L \lambda (v_x^2 + v_y^2)]$, получаем новый пространственно-частотный спектр. Эта операция умножения описывает распространение единичных световых волн через рассматриваемую зону к следующему экрану. Далее от нового пространственно-частотного спектра берется обратное преобразование Фурье и таким образом рассчитывается комплексная амплитуда поля после прохождения света через зону.

При достижении световой волной ПЗ комплексная амплитуда поля этой волны умножалась на амплитудный множитель $A(x, y)$, имеющий вид

$$A(x, y) = \begin{cases} u(x, y) & \text{при } x, y \notin \Omega, \\ 0 & \text{при } x, y \in \Omega, \end{cases}$$

где Ω – множество точек зеркала, приходящихся на отверстие.

Комплексная световая волна распространяется по резонатору в прямом и обратном направлении до получения квазиустановившегося уровня дифракционных потерь. В результате численного моделирования, в частности, подтвердилось предположение о справедливости условия эквивалентности (4) резонаторов с ПЗ. Следствием этого явилось уменьшение числа независимых параметров и существенное упрощение дальнейшего анализа. В соответствии с (4) значимыми факторами, влияющими на дифракционные потери, являются параметры g_1, g_2 , число Френеля резонатора N_F , число Френеля отверстия N_0 и коэффициент пропускания ПЗ t . При моделировании, кроме отдельно оговоренных случаев, рассматривались устойчивые двухзеркальные резонаторы с плоским ПЗ и сферическим вогнутым концевым (глухим) зеркалом. Апертура зеркал полагалась квадратной, а отверстия на зеркале располагались равномерно в шахматном порядке.

На рис.1 показаны зависимости потерь β_4 от параметра g_2 ($g_1 = 1$) при различных N_0 и $t = 0.3$, $N_F = 20$. Видно, что потери снижаются с уменьшением g_2 , т. е. с уменьшением радиуса R_2 . Этот результат качественно понятен: с уменьшением R_2 зеркало сильнее фокусирует излучение и удерживает моду внутри резонатора, снижая тем самым дифракционные потери. Кроме того, видно, что с уменьшением N_0 (в данном случае – с уменьшением d_0) потери β_4 растут, что, в принципе, подтверждает сделанные выше предположения (см. (3)).

На рис.2 показана зависимость потерь β_4 от числа Френеля резонатора N_F : с ростом N_F они падают, что также является вполне понятным результатом. На рис.3 представлена зависимость β_4 от пропускания выходного ПЗ (пропускание варьировалось путем изменения расстояния между отверстиями при сохранении всех осталь-

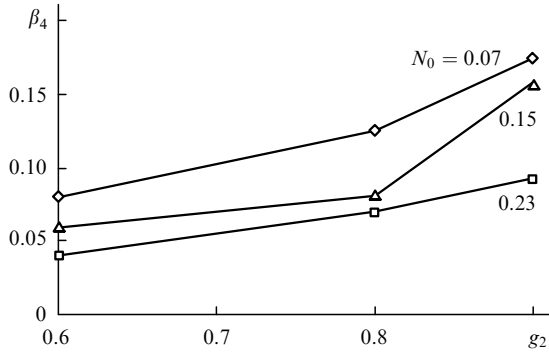


Рис.1. Зависимости составляющей внутрирезонаторных потерь β_4 от параметра g_2 при различных N_0 ; $t = 0.3$ и $N_F = 20$.

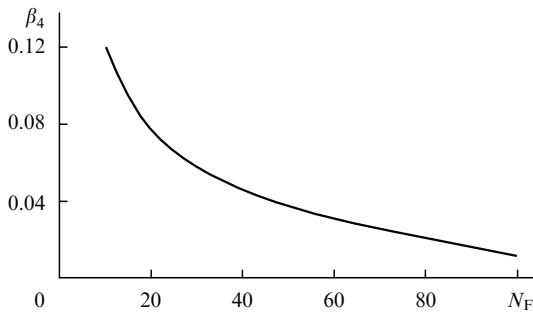


Рис.2. Зависимость составляющей внутрирезонаторных потерь β_4 от числа Френеля резонатора N_F при $N_0 = 0.2$, $t = 0.25$, $g_2 = 0.9$ и $g_1 = 1$.

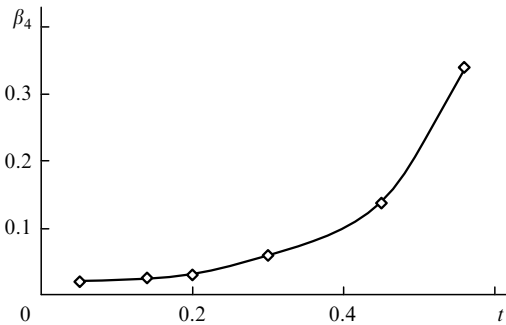


Рис.3. Зависимость составляющей внутрирезонаторных потерь β_4 от пропускания выходного зеркала резонатора t при $N_F = 20$, $N_0 = 0.15$, $g_1 = 1$ и $g_2 = 0.6$.

ных параметров). С увеличением пропускания потери растут, что также подтверждает наши предварительные предположения (см. (3)).

В результате расчетов построена номограмма (рис.4), по которой можно определить параметры устойчивого резонатора с ПЗ, при которых потери β_4 будут равны 5 и 10 %. Номограмма построена для $N_0 = 0.2$ и $g_2 = 0.9$ и 0.8. Она может быть полезной при выборе конкретных параметров устойчивого резонатора с ПЗ.

Результаты численного моделирования проверялись экспериментально на мощном газодинамическом CO_2 -лазере на продуктах сгорания [6]. Активная среда лазера формировалась при прохождении продуктов сгорания толуола в воздухе через блок плоских сопел. Суммарный расход продуктов сгорания составлял 16 кг/с, размер критического сечения сопла – 0.35 мм, степень расширения – 32. Вывод рабочего тела осуществлялся через прямоугольный диффузор в атмосферу. Лазер имел трехпроходную Z-образную схему резонатора, показанную на рис.5. Исследовался как устойчивый, так и неустойчивый резонатор.

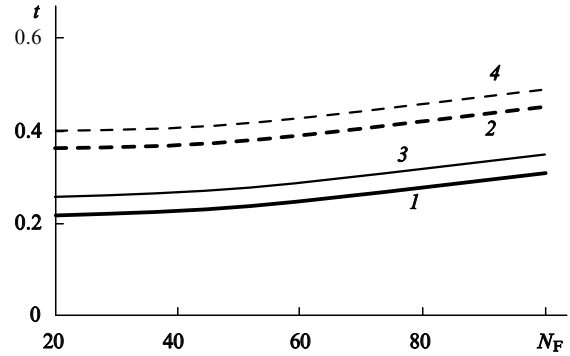


Рис.4. Номограмма для определения параметров резонатора с ПЗ при $N_0 = 0.2$, $g_1 = 1$, $g_2 = 0.9$ (1, 2) и 0.8 (3, 4), $\beta_4 = 5$ (1, 3) и 10 % (2, 4).

В экспериментах с помощью водоохлаждаемого калориметра определялась средняя в течение пуска мощность излучения при различных модификациях резонатора. Продолжительность пуска составляла 2–4 с. Коэффициент усиления слабого сигнала измерялся в нескольких точках активной среды, и затем определялось его среднее по объему активной среды значение. Измерения коэффициента усиления слабого сигнала проводились посредством зондирования активной среды излучением вспомогательного электроразрядного CO_2 -лазера и измерения интенсивности излучения до и после активной среды.

Для каждого типа резонатора, используемого в эксперименте, были проведены расчеты внутрирезонаторных потерь β_4 и β_5 (потери β_2 для используемых в резонаторах зеркал были известны, а потери β_1 и β_3 – пренебрежимо малы). Расчет β_5 проводился по формуле (5) при $h = 0.2$ мм.

Расчетная мощность излучения определялась по соотношению [1]

$$P = \frac{I_s t S}{2} \frac{2k_0 L_0 + \ln(1 - t - \beta)}{-\ln(1 - t - \beta)}, \quad (7)$$

где L_0 – протяженность активной среды вдоль оси резонатора (в нашем случае $L_0 \sim 3$ м); k_0 – средний по объему среды коэффициент усиления слабого сигнала (в нашем случае $k_0 \sim 0.5 \text{ м}^{-1}$); $\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5$ – суммарные потери в резонаторе; I_s – интенсивность насыщения. Последняя определялась из соотношения (7) по данным эксперимента с выходным зеркалом из ZnSe.

Экспериментальные (P_{exp}) и расчетные (P_{calc}) мощности излучения даны в табл.1. Там же приведены основные параметры резонаторов и рассчитанные для них потери. На рис.6 представлены расчетные и экспериментальные зависимости мощности исследуемого лазера от

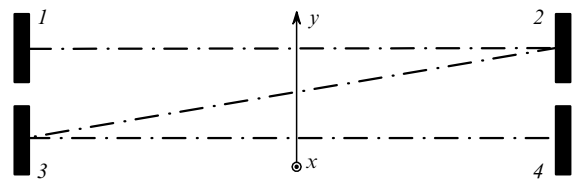
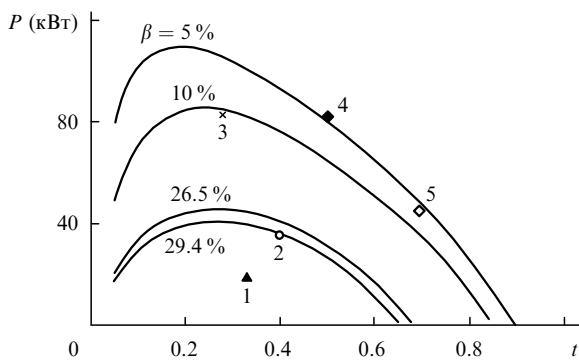


Рис.5. Схема резонатора: 1 – выходное зеркало; 2, 3 – поворотные зеркала; 4 – глухое зеркало; поток активной среды направлен вдоль оси x.

Табл.1. Расчетные и экспериментальные характеристики CO₂-лазера с ПЗ.

Номер варианта	Характеристики выходного зеркала	Характеристики резонатора (см. рис.5)	Составляющие потери β_{1-5} (%) и суммарные потери β (%)	P_{exp} (кВт)	P_{calc} (кВт)
1	ПЗ: плоское, $d_0 = 3$ мм, $n = 337$, $S = 110 \times 60$ мм, $t = 33\%$	1, 2, 3 – плоские зеркала; 4 – вогнутое сферическое зеркало с $R = 25$ м; $L = 5$ м	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 5$ $\beta_3 = 0$ $\beta_4 = 15.6$ $\beta_5 = 8.8$ $\beta = 29.4$	19	38
2	ПЗ: плоское, $d_0 = 4$ мм, $n = 240$, $S = 110 \times 60$ мм, $t = 40\%$	1, 3, 4 – плоские зеркала; 2 – вогнутое сферическое зеркало с $R = 25$ м; $L = 5$ м	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 5$ $\beta_3 = 0$ $\beta_4 = 13.5$ $\beta_5 = 8$ $\beta = 26.5$	35	38
3	ПЗ: плоское, $d_0 = 8$ мм, $n = 37$, $S = 110 \times 60$ мм, $t = 25\%$	1, 2, 3 – плоские зеркала; 4 – вогнутое сферическое зеркало с $L = 5$ м; $R = 25$ м	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 5$ $\beta_3 = 0$ $\beta_4 = 2.2$ $\beta_5 = 2.8$ $\beta = 10$	–	84
4	ZnSe: плоское, $S = 110 \times 60$ мм, $t = 50\%$	1, 2, 3 – плоские зеркала; 4 – вогнутое сферическое зеркало с $L = 5$ м; $R = 25$ м	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 5$ $\beta_3 = 0$ $\beta_4 = 0$ $\beta_5 = 0$ $\beta = 5$	82	82
5	$t = 70\%$ (увеличение резонатора 1.8)	Неустойчивый Z-образный резонатор с переворотом поля: 1 – выпуклое зеркало; 2 – плоское зеркало; 3 – вогнутое сферическое зеркало; 4 – уголкового отражатель	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 5$ $\beta_3 = 0$ $\beta_4 = 0$ $\beta_5 = 0$ $\beta = 5$	45	49

Рис.6. Расчетные (кривые) и экспериментальные (точки) зависимости мощности лазера от коэффициента пропускания ПЗ для различных конфигураций резонатора и разных потерь β . Номера точек соответствуют номерам вариантов в табл.1.

коэффициента пропускания ПЗ. Эти зависимости построены по формуле (7) для коэффициентов суммарных потерь β резонаторов, используемых в экспериментах.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что численное моделирование достаточно хорошо отражает реальную ситуацию. Некоторое расхождение данных очевидно обусловлено такими факторами, как дополнительные потери за счет термической деформации зеркал, неточность измерения выходной мощности лазера с ПЗ из-за дифракционного ухода части из-

лучения из апертуры calorиметра, неточность определения h .

В заключение сформулируем основные выводы работы:

1. Использование ПЗ приводит к появлению в резонаторе дополнительных потерь $\beta_4 + \beta_5$.

2. Составляющая β_5 обусловлена плохим качеством поверхности зеркала вблизи кромки отверстия; ее можно оценить из выражения (5).

3. Составляющая β_4 связана с дифракцией излучения на поверхности ПЗ. Ее величину в зависимости от основных параметров резонатора можно определить из рис.1–4.

4. Дополнительные потери внутри резонатора приводят к потерям мощности излучения лазера, которые можно оценить по соотношению (7).

1. Лосев С.А. *Газодинамические лазеры* (М.: Наука, 1977, с. 336).
2. Аблеков В.К., Беляев В.С. *ЖПС*, **23**, 1110 (1975).
3. Аблеков В.К., Беляев В.С., Васильев В.П., Головастиков А.Н., Давыдов В.М., Савельев В.Г. *ЖПС*, **28**, 57 (1978).
4. Sigman A.E., Sziklas E.A. *Appl. Opt.*, **14**, 1874 (1975).
5. Гудмен Дж. *Введение в фурье-оптику* (М.: Мир, 1970, с. 364).
6. Борейшо А.С., Трофимович А.Г., Мальков В.М., Трилис А.В., Леонов А.Ф., Страхов С.Ю. и др. В сб. *Тезисы докл. Междунар. конф. «IV Харитоновские тематические научные чтения: Физика лазеров. Взаимодействие излучения с веществом»* (Саров, 2002, с. 114).