

光泵远红外激光器中的光束匹配

傅恩生 蔡惟泉 王忠志

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文对 CO_2 激光束与开式腔远红外激光器的匹配问题进行了分析, 给出了远红外工作物质对 CO_2 激光的吸收率与耦合孔逸出损失之间的定量关系, 指出对确定的远红外共振腔有一最佳的匹配发散角。在该角度下, 工作物质有最大的激活体积, 并可获得较高的远红外激光输出。

一、引 言

近年来光泵远红外激光器有了很大进展, 已经在许多领域中获得了应用^[1,2]。但是, 更广泛的应用要求进一步提高输出功率和效率, 并已有有人在激光腔结构^[3]、气体成分^[4]、泵浦激光频率与吸收频率匹配等方面作过广泛的研究。本文对 CO_2 激光束与开式腔远红外激光器的匹配问题进行了分析, 给出了工作物质对 CO_2 激光的吸收率与耦合孔逸出损失之间的定量关系, 指出选择 CO_2 激光注入到远红外激光腔中的发散角的原则。理论分析与实验结果比较证明, 合理选择注入 CO_2 激光用的聚焦反射镜的曲率半径, 能够显著提高激光器的输出功率和效率。

二、理论分析

光泵远红外激光器通常用选支 CO_2 激光器泵浦, 其实验装置如图 1 所示。设 CO_2 激光器

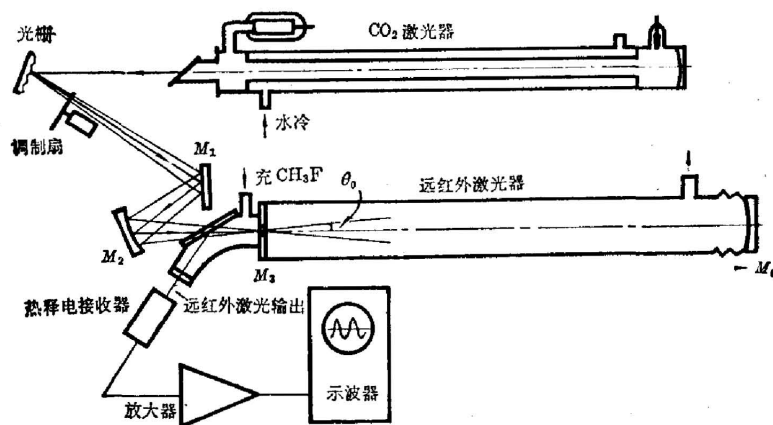


图 1 光泵远红外激光器实验装置

输出光束经平面反射镜 M_1 反射, 由凹面反射镜 M_2 会聚以发散角(半角) θ_0 注入到远红外激光腔中。远红外激光腔由平面反射镜 M_3 和凹面反射镜 M_4 组成, M_3M_4 间距为 d 。 M_3 中心带有半径为 a 的耦合孔, 既供 CO_2 激光束注入, 又供远红外激光输出。 M_4 曲率半径为 R , 焦距为 f 。

在我们的实验条件下, 可以用近轴光线传递矩阵分析 CO_2 注入光束的性质^[5]。注入光束在平面反射镜 M_3 上的位置用坐标 x_0 和 θ_0 表示, 其中 x_0 是光束半径(从耦合孔中心到光场振幅下降到 $1/e$ 点的距离), θ_0 是光束发散角(半角)。 CO_2 激光束经过腔长 d 的距离射到凹面反射镜 M_4 上, 经 M_4 反射又返回到平面反射镜 M_3 。这样往返一次后, 在 M_3 上的光束半径 x_1 和发散角 θ_1 由下式给出^[5],

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} 1-\frac{d}{f} & d\left(2-\frac{d}{f}\right) \\ -\frac{1}{f} & 1-\frac{d}{f} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

设: $A=1-\frac{d}{f}$, $B=d\left(2-\frac{d}{f}\right)$, $C=-\frac{1}{f}$, $D=1-\frac{d}{f}$, 则往返 n 次后, 在 M_3 上的光束参量 x_n, θ_n 为

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} x_n \\ \theta_n \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}^n \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix} \\ &= \frac{1}{\sin \alpha} \begin{vmatrix} A \sin n\alpha - \sin(n-1)\alpha & B \sin n\alpha \\ C \sin n\alpha & D \sin n\alpha - \sin(n-1)\alpha \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 α 值由下式确定

$$\cos \alpha = 1 - \frac{d}{f}. \quad (3)$$

由(2)式可见, 如果

$$n\alpha = 2k\pi, \quad (4)$$

则光束经过 n 次往返后能再现, 其中 n 和 k 为正整数, 且 $0 \leq k \leq n/2$ 。

CO_2 激光束在远红外激光腔内被工作物质吸收、反射镜反射、耦合孔逸出而产生损失。设工作物质吸收系数为 β , 镀金反射镜 M_3 和 M_4 的反射率为 r , 当不计耦合孔逸出损失时, 光束往返 n 次后, 其吸收率为

$$\gamma_0 = (1 - e^{-\beta d})(1 - r^{2n}e^{-2n\beta d}/1 - re^{-\beta d}), \quad (5)$$

反射损失为

$$\rho_0 = (1 - r)e^{-\beta d}(1 - r^{2n}e^{-2n\beta d}/1 - re^{-\beta d}). \quad (6)$$

考虑到耦合孔逸出损失时, 因各次往返的光束半径 x_n 按(2)式改变, 所以逸出损失 δ 是往返次数 n 的函数,

$$\delta_n \equiv 1 - \Delta_n = 1 - e^{-2\left(\frac{a}{x_n}\right)^2}. \quad (7)$$

于是吸收率

$$\gamma = (1 - e^{-\beta d}) \left(1 + e^{-\beta d} r + e^{-2\beta d} r^2 \Delta_1 + e^{-3\beta d} r^3 \Delta_1 + \dots \right. \\ \left. + e^{-2(n-1)\beta d} r^{2(n-1)} \left(\prod_{m=0}^{n-1} \Delta_m \right) + e^{-(2n-1)\beta d} r^{2n-1} \left(\prod_{m=0}^{n-1} \Delta_m \right) + \dots \right), \quad (8)$$

反射损失与逸出损失之和为

$$\rho = e^{-\beta d} (1 - r) + e^{-2\beta d} r (1 - r \Delta_1) + e^{-3\beta d} r^2 \Delta_1 (1 - r) + e^{-4\beta d} r^3 \Delta_1 (1 - r \Delta_2) + \dots \\ + e^{-(2n-1)\beta d} r^{2(n-1)} \left(\prod_{m=0}^{n-1} \Delta_m \right) (1 - r) + e^{-2n\beta d} r^{2n-1} \left(\prod_{m=0}^{n-1} \Delta_m \right) (1 - r \Delta_n) + \dots, \quad (9)$$

其中定义 $\Delta_0 = 1$ 。

由(7)式可见,耦合孔逸出损失 δ_n 与光束半径 x_n 密切相关,按(2)式 x_n 与 n 和 θ_0 有关,所以正确选择 n 和 θ_0 ,能得到较大的吸收率 γ 和较小的损失 ρ ,亦即达到了 CO_2 激光束与远红外激光腔的匹配。

三、典型例子

我们以光泵氟甲烷(CH_3F)远红外激光器为例分析光束匹配条件。首先,要求 CO_2 激光束能被工作物质氟甲烷吸收得足够多,这要求有足够的程长,亦即有足够的往返次数 n 。氟甲烷对 CO_2 $9\text{P}_{(20)}$ 线吸收系数 $\beta = 0.018$ 厘米⁻¹托⁻¹[6],充气压强 $P = 100$ 毫托,共振腔长 $d = 1.2$ 米时,当不计耦合孔逸出损失时,由(5)和(6)得吸收率 γ_0 、反射损失 ρ_0 与往返次数 n 的关系,如图2所示。可见,我们取 $n = 5 \sim 7$ 已经能获得较高的吸收率。

按(3)式,选择腔参量 d 和 f ,使 α 在 $70^\circ \sim 50^\circ$ 之间,可保证 n 在 $5 \sim 7$ 次以上。我们选定 $d = 1.2$ 米, $f = 1.95$ 米,则 $\alpha = 67^\circ 21'$ 。由(2)式得各次往返的光束半径

$$x_n \doteq (B \sin n\alpha) \theta_0 / \sin \alpha, \\ x_{n+0.5} \doteq [(B + Ad) \sin n\alpha - d \sin(n-1)\alpha] \theta_0 / \sin \alpha.$$

用已知数值表示(如表1所示),其中 x_n 表示往返 n 次后在平面反射镜 M_3 上的光束半径, $x_{n+0.5}$ 表示往返 n 次后又经平面镜反射一次在凹面反射镜 M_4 上呈现的光束半径, $x_{0.5}$ 是注入光束首次射到凹面镜 M_4 上的光束半径。要求光束充满反射镜面,又不超出反射镜面,当反射镜半径为 3 厘米时由表1可见,应选

$$\theta_0 = \frac{3.0}{2.12 \times 10^2} = 1.415 \times 10^{-2} \text{ 弧度}.$$

于是得到各次往返的 x_n 值(见表1)。用序列透镜组代替腔反射镜 M_3 、 M_4 的作用,则按表1中的数据,光束在腔中的变化如图3所示。进一步根据(7)式可计算出各次往返的耦合

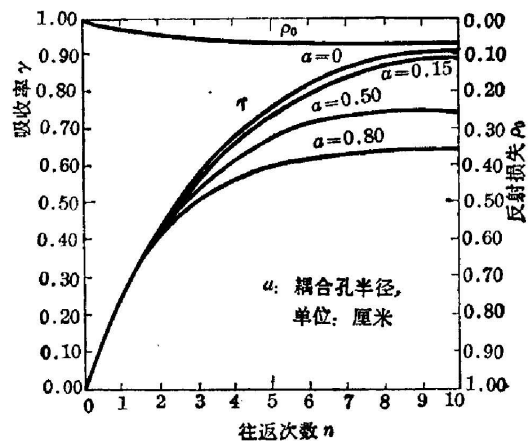


图2 氟甲烷远红外激光器中,吸收率 γ 、反射损失 ρ_0 与往返次数 n 的关系

表 1 往返 n 次后, 在腔端面反射镜 M_3 和 M_4 上的光束半径

n	M_3 上的光束半径 x_n (厘米)		$n+0.5$	M_4 上的光束半径 $x_{n+0.5}$ (厘米)	
	$\theta_0 = \theta_0$	$\theta_0 = 1.415 \times 10^{-2}$		$\theta_0 = \theta_0$	$\theta_0 = 1.415 \times 10^{-2}$
0	$\frac{\lambda}{\pi\theta_0} = 3.18 \times 10^{-4} \theta_0^{-1}$	0.022	0.5	$1.2 \times 10^2 \theta_0$	1.70
1	$1.66 \times 10^2 \theta_0$	2.35	1.5	$2.12 \times 10^2 \theta_0$	3.00
2	$1.28 \times 10^2 \theta_0$	1.81	2.5	$0.44 \times 10^2 \theta_0$	0.62
3	$0.67 \times 10^2 \theta_0$	0.95	3.5	$1.78 \times 10^2 \theta_0$	2.52
4	$1.80 \times 10^2 \theta_0$	2.54	4.5	$1.82 \times 10^2 \theta_0$	2.57
5	$0.73 \times 10^2 \theta_0$	1.04	5.5	$0.45 \times 10^2 \theta_0$	0.63
6	$1.25 \times 10^2 \theta_0$	1.77	6.5	$2.13 \times 10^2 \theta_0$	3.00

孔逸出损失。取耦合孔半径 $a=0, 0.15, 0.5, 0.8$ 厘米, 计算了逸出损失(见表 2)。考虑到

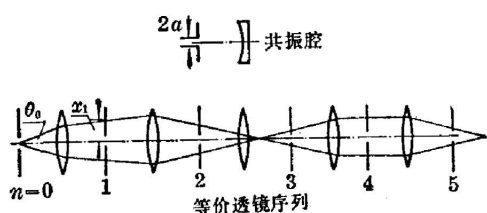


图 3 在共振腔内, 光束半径随往返次数的变化

耦合孔逸出损失后, 按 (8) 式得吸收率与耦合孔径、往返次数的关系, 如图 2 所示。由图 2 可见, 耦合孔大小对吸收率有很大影响, 如果从输出耦合角度看, 需要较大的耦合孔时, 相应地要选择曲率半径较小的 M_4 , 使 d/f 在 $0.6 \sim 0.7$ 左右, 既能有较大的模体积又可得到足够的吸收率。相反, 用较大的曲率半径的 M_4 , 虽然可增加往返次数, 但这对吸收率的增加已经没有多大的好处, 反而限制了模体积, 因为势必用较小的 θ_0 入射, 才能得到较高的往返次数。

表 2 耦合孔逸出损失与往返次数的关系

n	$a=0.15$ 厘米		$a=0.50$ 厘米		$a=0.80$ 厘米	
	$\Delta_n = e^{-(a/x_n)^2}$	$\delta_n = 1 - \Delta_n$	Δ_n	δ	Δ_n	δ
0	1	0	1	0	1	0
1	0.999	0.001	0.914	0.086	0.790	0.210
2	0.986	0.012	0.859	0.141	0.676	0.324
3	0.951	0.049	0.577	0.423	0.242	0.758
4	0.998	0.002	0.925	0.075	0.820	0.180
5	0.959	0.041	0.632	0.368	0.308	0.692

四、聚焦反射镜曲率半径的选择

设已知泵浦用的 CO_2 激光器的光束发散角为 θ_c , 从光束匹配条件得到注入光束的发散角应取 θ_0 , 这样从模匹配理论^[7]很容易求得聚焦反射镜的曲率半径。光束腰半径为

$$\omega = \lambda / \pi \theta, \quad (10)$$

于是得到

$$\omega_c = \lambda / \pi \theta_c,$$

$$\omega_0 = \lambda / \pi \theta_0,$$

其中 ω_c 和 ω_0 分别表示用反射镜 M_2 (见图 1) 变换前的光束腰半径和变换后的光束腰半径。

用 L_c 表示 ω_c 距 M_2 的距离, L_0 表示 ω_0 距 M_2 的距离, 当 M_2 的焦距为 f_2 时, L_c 和 L_0 满足下列关系

$$L_c = f_2 + \frac{\omega_c}{\omega_0} \sqrt{f_2^2 - f_0^2}, \quad (1)$$

$$L_0 = f_2 + \frac{\omega_0}{\omega_c} \sqrt{f_2^2 - f_0^2}, \quad (2)$$

其中 f_0 是特征长度并由下式决定

$$f_0 = \frac{\pi}{\lambda} \omega_c \omega_0. \quad (3)$$

将实验参数代入(10)和(13)中得

$$\omega_c = 1.42 \times 10^{-1} \text{ 厘米},$$

$$\omega_0 = 2.24 \times 10^{-2} \text{ 厘米},$$

$$f_0 = 10 \text{ 厘米}.$$

按(11)和(12)得到 L_c 、 L_0 与 f_2 的关系曲线, 如图 4 所示, 由此可选择匹配条件下的会聚反射镜 M_2 的参量。

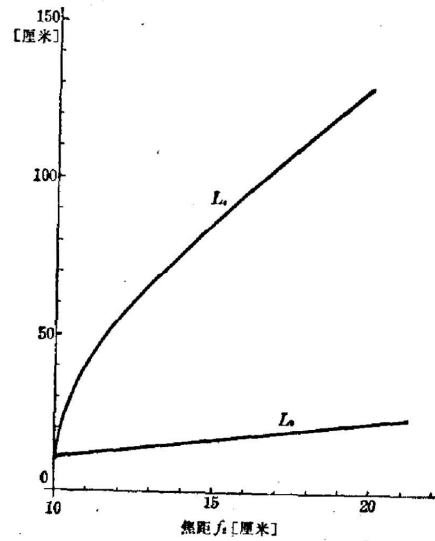


图 4 聚焦前、后, 光束腰与反射镜 M_2 的距离 L_c 、 L_0 与焦距 f_2 的关系

五、理论与实验的比较

在实验中, 为了调节 L_0 的数值, 在光路中加入一块平面反射镜 M_1 , L_0 的数值是 M_2 到 M_1 的距离加上 M_1 到光栅的距离。在以前的工作中^[8], 应用了 $L_c=1$ 米, $L_0=50$ 厘米, $f_2=50$ 厘米的聚焦系统, 相应的 $\theta_0=4.7 \times 10^{-3}$ 弧度, 这与理论计算的 θ_0 取 1.42×10^{-2} 弧度相比, 小了 3 倍, 因此相应的远红外激光器中的激活体积小了 9 倍。我们在 6.6 瓦的 CO_2 激光泵浦功率下, 得到 496 微米的远红外激光 0.1 毫瓦。经过上述计算后, 改进用 $L_c=97$ 厘米, $L_0=13$ 厘米, $f_2=12.5$ 厘米的聚焦系统, 相应的 $\theta_0=1.88 \times 10^{-2}$ 弧度, 与理论计算要求相接近, 用 20 瓦的 CO_2 激光泵浦, 在纯 CH_3F 30 毫托时, 得到 2.5 毫瓦远红外激光输出。在速率方程模型近似的情况下, 远红外激光输出功率与泵浦功率成正比。因此, 考虑到泵浦功率增加 3 倍这一因素, 由于改善光束聚焦系统, 使远红外输出功率增加了约 8 倍, 这与激活体积扩大 9 倍的估计是相接近的。为了进一步提高远红外输出功率, 用 C_6H_{14} 作缓冲气体, 使 CH_3F 充气压强提高到 100 毫托, 远红外激光输出增加到 3.8 毫瓦, 达到了国外同类器件的水平^[9]。因此, 充分注意到 CO_2 激光束与远红外激光器的光束匹配, 可以有效地提高远红外激光器输出功率和效率。

六、结 束 语

光泵远红外激光器的特点是用红外激光注入到远红外共振腔中泵浦远红外工作物质。红外泵浦功率转换成远红外输出功率的效率, 理论极大值是 $\eta = \frac{1}{2} \frac{\nu_F}{\nu_P} \gamma$, 其中 ν_F 是远红外

激光频率, ν_P 是泵浦激光频率, 因此要求尽量提高工作物质的吸收率 γ 。

综上所述, 在本文中: (1) 分析了吸收率与反射损失、耦合孔逸出损失的关系, 指出吸收率随往返次数增加而趋于饱和。耦合孔的孔径越大, 饱和速度越快, 所必须的相应往返次数越少。(2) 指出耦合孔逸出损失与光束注入发散角有关, 对确定的远红外共振腔(开式腔), 有一最佳的匹配发散角, 在该角度下, 工作物质的激活体积最大。(3) 以光泵氟甲烷远红外激光器为例, 计算了不同耦合孔径下的吸收率, 确定了所必须的往返次数, 计算了该激光器应取的匹配发散角, 以及光束腰与聚焦反射镜的距离。(4) 理论与实验结果比较证明, CO_2 激光束以匹配的发散角注入, 能明显地提高远红外激光器的输出功率。

参加本工作的还有刘亚淑同志。

参 考 文 献

- [1] T. Y. Chang; *Nonlinear Infrared Generation*, Ed Y. R. Shen (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1977), 265.
- [2] S. M. Wolf *et al.*; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 11 (Nov), 2645.
- [3] G. A. Koepf; *IEEE J. Q. E.*, 1977, **QE-13**, No. 9 (Sep), 732.
- [4] T. Y. Chang, C. Lin; *J. O. S. A.*, 1976, **66**, No. 4 (Apr), 362.
- [5] H. Kogelnik, T. Li; *Proc. IEEE*, 1966, **54**, No. 10 (Oct), 1312.
- [6] D. T. Hodges, J. R. Tucker; *A. P. L.*, 1975, **27**, No. 12 (15 Dec), 667.
- [7] H. Kogelnik; *Bell Syst. Tech. J.*, 1965, **44**, No. 3 (Mar), 455.
- [8] 傅恩生等;《激光》, 1979, **6**, No. 12 (Dec), 12.
- [9] T. A. DeTemple, E. J. Danielewicz; *IEEE J. Q. E.*, 1976, **QE-12**, No. 1 (Jan), 40.

Beam matching in optically pumped far infrared lasers

FU ENSHENG CAI WEIQUAN AND WANG ZHONGZHI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 20 October 1980)

Abstract

In this paper the question concerning matching of CO_2 laser beam with open resonator of a far infrared laser was analysed, and the quantitative relation between the absorptivity of working material of the far infrared laser and the outgoing loss of coupling hole was given. It was shown that there is an optimal divergent angle for a given resonant cavity of a far infrared laser. At this angle active volume of the working material was maximized, and higher output of the far infrared laser was obtained.