

高功率激光器用的折迭式共振腔

雷仕湛 周忠益

(中国科学院上海光机所)

提要: 利用光束传输矩阵方法, 计算了折迭式激光器共振腔内光束半径分布和模体积与转折反射镜曲率半径、气体负透镜参数 α 的关系。结果表明, 由于气体负透镜效应, 放电长度较长的气体激光器, 采用折迭式腔结构, 不仅缩短了空间长度, 而且对保证共振腔工作在低损耗区域, 从而获得稳定高功率输出是具有重要意义的。

Folded resonator for high power lasers

Lei Shezhan Zhou Zhongyi

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

Abstract: Using ray transfer matrix, we have computed beam radii and mode volumes in the folded resonator and the dependence on mirror curvature of resonator and the parameter α of the gas plasma negative lens. Results indicate that folded resonator configuration used in a laser with longer plasma length, not only reduces space length of the device, but also possesses significance for obtaining stable high power output taking into account of the effect of negative plasma lens.

一些高功率激光器, 如气动激光器、化学激光器、高速流动气体激光器、染料激光器和封离式高功率 CO_2 分子激光器, 常常都用折迭式共振腔结构, 特别是对于 CO_2 分子激光器, 采用折迭腔不仅减小器件空间长度, 而且器件的输出功率还可做到比不用折迭结构时高。文献 [1] 讨论了由三块反射镜组成的共振腔特性, 但是没有考虑工作物质的透镜效应, 而这恰好是十分重要的因素。对于高功率激光器来说, 在激光发射过程中, 总是有部分激发态能量要转变成热能, 使工作物质的温度升高。腔内光束强度的高斯分布, 激光工作物质往往表现出负透镜性质。由 [2, 3] 的分析表明, 封离式 CO_2 激光器中出现的气体透镜效应是相当严重的。10 米左右放电长度所产生的负气体透镜就足以使共振腔由

球面腔变为实际上是平面共振腔结构, 甚至变成了非稳定腔结构, 共振腔的功率损失大大增加。放电长度较长的激光共振腔应如何设计, 转折反射镜是球面的还是平面的, 曲率半径选多少为宜等问题, 从事高功率气体激光方面研究的同志自然是很关心的。

我们以三折封离式 CO_2 分子激光器为例, 利用光线传输矩阵, 并用电子数字计算机作了数值计算, 讨论了其共振腔的某些特征。

图 1 是三折封离式 CO_2 分子激光器的共振腔, R_1 是球面反射镜; R_4 是平面反射镜; R_2 、 R_3 是转折光路用的, 叫转折反射镜; l_1 、 l_2 、 l_3 分别是三折放电管的长度。根据光线传输矩阵, 光线在这样安排的共振腔内来回一次的 $ABCD$ 矩阵为:

收稿日期: 1980 年 4 月 7 日。

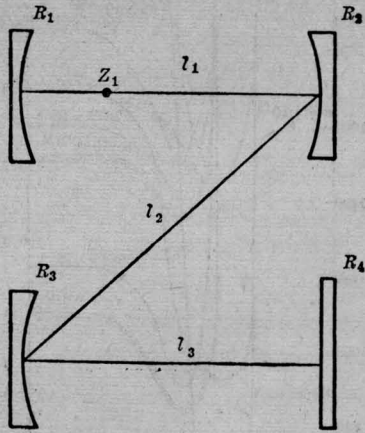


图1 折迭腔结构

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = T_{11} \cdot T_{12} \cdot T_{13} \cdot T_{14} \cdot T_{15} \cdot T_{16} \cdot T_{15} \\ \cdot T_{14} \cdot T_{13} \cdot T_{12} \cdot T_{17} \cdot T_{18} \cdot T_{19}$$

式中

$$T_{11} = \begin{pmatrix} \cosh[\alpha(l_1 - z_1)], & \alpha^{-1} \sinh[\alpha(l_1 - z_1)] \\ \alpha \sinh[\alpha(l_1 - z_1)], & \cosh[\alpha(l_1 - z_1)] \end{pmatrix};$$

$$T_{12} = \begin{pmatrix} 1, & 0 \\ -2/R_2, & 1 \end{pmatrix};$$

$$T_{13} = \begin{pmatrix} \cosh(\alpha l_2), & \alpha^{-1} \sinh(\alpha l_2) \\ \alpha \sinh(\alpha l_2), & \cosh(\alpha l_2) \end{pmatrix};$$

$$T_{14} = \begin{pmatrix} 1, & 0 \\ -2/R_3, & 1 \end{pmatrix};$$

$$T_{15} = \begin{pmatrix} \cosh(\alpha l_3), & \alpha^{-1} \sinh(\alpha l_3) \\ \alpha \sinh(\alpha l_3), & \cosh(\alpha l_3) \end{pmatrix}$$

$$T_{16} = \begin{pmatrix} 1, & 0 \\ -2/R_4, & 1 \end{pmatrix};$$

$$T_{17} = \begin{pmatrix} \cosh(\alpha l_1), & \alpha^{-1} \sinh(\alpha l_1) \\ \alpha \sinh(\alpha l_1), & \cosh(\alpha l_1) \end{pmatrix};$$

$$T_{18} = \begin{pmatrix} 1, & 0 \\ -2/R_1, & 1 \end{pmatrix};$$

$$T_{19} = \begin{pmatrix} \cosh(\alpha z_1), & \alpha^{-1} \sinh(\alpha z_1) \\ \alpha \sinh(\alpha z_1), & \cosh(\alpha z_1) \end{pmatrix}。$$

腔内光束的光斑半径 ω 为:

$$\omega^2 = \frac{2\lambda B}{\pi} \sqrt{4 - (A + D)^2}$$

激光模体积为:

$$V = \pi \int_0^l \omega^2(z) dz$$

其中 λ 是波长; α 是反映折射率径向分布的参数 ($\alpha = \sqrt{n_2/n_0}$, 折射率 n 的径向分布取 $n = n_0 + \frac{1}{2} n_2 r^2$ 的形式)。利用 TQ-16 电子计算机进行数值计算。

图2是对不同的 α 值, 腔内光束半径 ω 沿腔长的变化与转折反射镜曲率半径的关系, 为了与不采用折迭式时相比较, 图中同时给出两块镜子组成的共振腔的结果。从图2的结果可以看出, 转折反射镜采用球面镜时, 腔内的光束呈现“波浪”式。当转折反射镜的曲率半径增大时“波浪”趋于平缓, 在反射镜上的光斑半径也随之增大, 而在 R_1 和 R_4 镜子上的光斑半径数值相差也较大。当转折镜是用平面反射镜时, 光束形状和用两块镜子构成的腔相同。

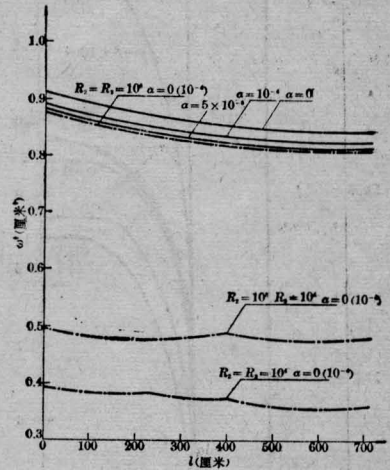


图2 折迭腔内光斑半径沿腔长的分布

—— 为不折迭; - - - 为折迭

图3~5是取不同的 α 值, 激光模体积 V 以及在反射镜上的光束半径与转折镜曲率半径的关系。图3和图4是固定 $R_2 = 10^4$ 和 10^8 厘米, $l_1 = 235$ 厘米, $l_2 = 240$ 厘米, $l_3 = 236$ 厘米时, 模体积 V 、光斑半径 ω 随 R_3 的曲率半径变化的情形。

显然, 它们的形状是相同的, 在 $R_3 = 10^8$

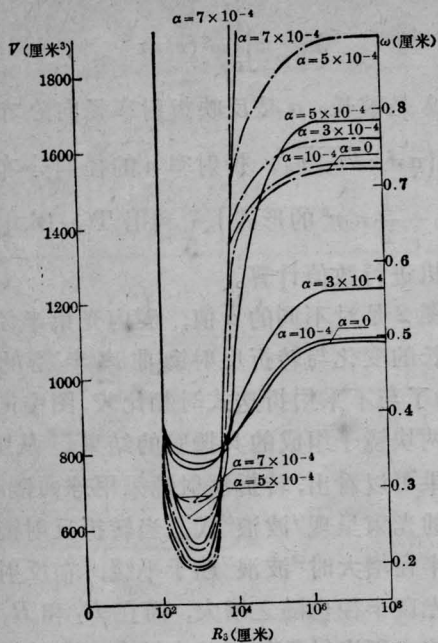


图3 光斑半径和模体积与 R_3 的关系
($R_2=10^4$ 厘米)

$R_3 \sim V$ ——; $R_3 \sim \omega$ - - -

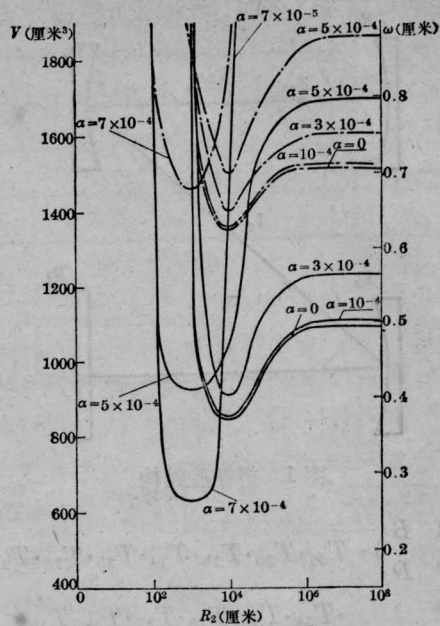


图5 光斑半径和模体积与 R_2 的关系
($R_3=10^4$ 厘米)

$R_2 \sim V$ ——; $R_2 \sim \omega$ - - -

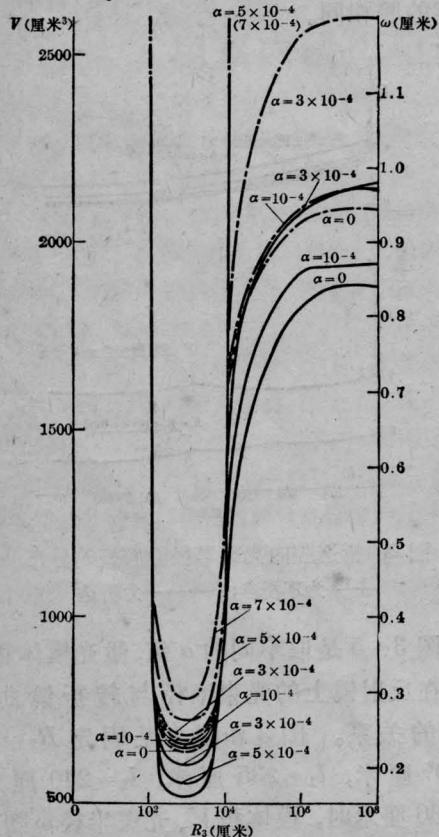


图4 光斑半径和模体积与 R_3 的关系
($R_2=10^8$ 厘米)

$R_3 \sim V$ ——; $R_3 \sim \omega$ - - -

厘米处其模体积为极小。在 R_3 的数值相同的条件下, $R_2=10^8$ 厘米时的模体积比 $R_2=10^4$ 厘米时大。但是, 在 α 值比较大 ($\alpha \geq 5 \times 10^{-4}$) 时, $R_2=10^8$ 厘米比 10^4 厘米更容易导致共振腔的模体积趋于无穷大, 亦即过渡到光功率高损耗的区域。根据图3和图4给出的结果, 在 $R_2=10^4$ 、 $\alpha \leq 5 \times 10^{-4}$ 时, R_3 的数值即使大到 10^8 厘米, 共振腔还是在低损耗区域, 而当 $R_2=10^8$ 厘米时, R_3 则仅限于取 10^4 厘米附近的数值, 腔的光功率损耗才比较低。从图5进一步可以看到, 在 R_3 取 10^4 厘米时, R_2 从 10^5 变到 10^8 厘米, 模体积变化并不大。但是, 大曲率半径反射镜位置的稳定性要求更加高, 共振腔反射镜稍有振动很容易造成失调。由图也可以看到, 转折反射镜 R_2 取值的范围比 R_3 可以宽一些。

从图2至图5的结果我们看到, 在共振腔两端的反射镜曲率半径相同的条件下, 折迭腔的模体积是要比非折迭腔小的, 从这一点来看, 采用折迭式共振腔结构不利于提高激光器的输出功率。然而, 由于激光器工作

物质存在负透镜效应,不采用折迭腔结构,则由于光斑尺寸扩展太大,导致激光器腔内光功率损耗很大,器件的功率实际上还是被限制在较低水平,以此来降低负透镜效应(即减小 α 的数值)。从图2的结果我们看出,采用球面转折镜的折迭腔,光束在腔内经过扩张、收缩的过程,虽然腔内存在负透镜,光束还是不致扩散得太大,使腔内光束功率损失维持在较低水平。所以,采用折迭式共振腔,以及转折反射镜采用球面反射镜,激光器能够输出较高的激光功率,主要不是提高模的体积,而是降低了共振腔内的光束功率损耗。

实验结果也证实了这一点。下表为三折共振腔取不同的曲率半径时得到的输出功率。

R_1 (厘米)	1.8×10^4	1.8×10^4	1.25×10^4
R_2 (厘米)	∞	10^4	∞
R_3 (厘米)	∞	10^4	10^4
R_4 (厘米)	∞	∞	∞
输出功率(瓦)	80	50	250~300

共振腔采用第一组的数据时,其模体积要比第三组来得大,但是,用第三组数据时所得到的功率却比第一组大得多。根据图5列的计算结果来看,第一组数据的共振腔,模体积太大,即损失太大;而第二组所对应的模体积太小,也不适宜,因而激光器的输出功率也是最小的。

图6是光束光斑半径、模体积与激光工作物质 α 值的关系。从图中可以看到,转折反射镜曲率半径越大, α 值允许的范围就更小。但 α 值是激光器工作状况所决定的,输出功率越大的器件, α 值越高。能选择的只有改变转折反射镜的曲率半径,以适合使用。

所以在设计共振腔时宜选择球面反射镜做转折镜,至于 R_2 、 R_3 的取值则与每折迭单元的长度有关。利用本文的光线传输矩阵及其标准计算程序,对比计算得出的模体积和腔内的损耗,就可以选出合适的数值。

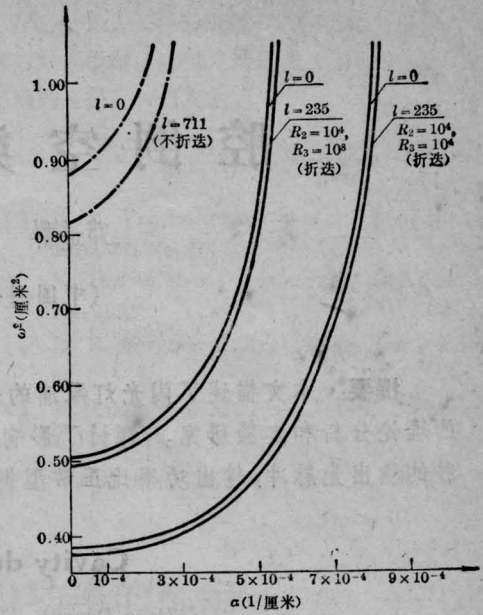


图6(a) 光斑半径与 α 的关系

(图中 $l=0$ 的曲线和 $l=711$ 、 235 的曲线分别代表在反射镜 R_1 的光斑半径和离开反射镜 R_1 为711、235厘米处的光斑数值)

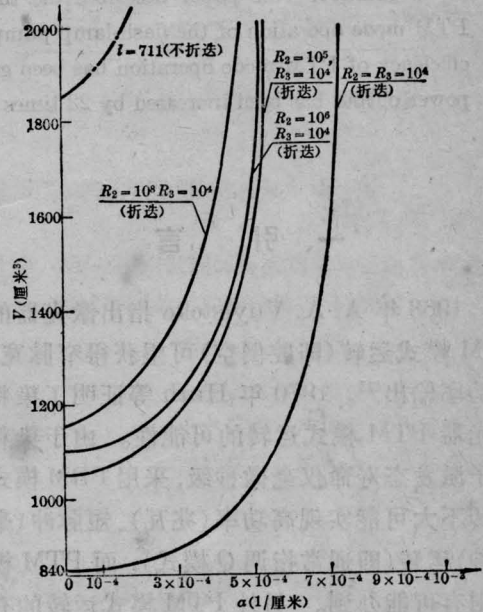


图6(b) 模体积与 α 的关系

参 考 文 献

- [1] C. P. Wany, R. L. Sandstron; *Appl. Opt.*, 1975, 14, 1285.
- [2] H. K. V. Latsch et al.; *Appl. Opt.*, 1970, 9, 2725.
- [3] 张瑞林;《物理学报》, 1974, 23, 437.