

一种适用于同轴放电环形增益区的 的多光程谐振腔

程 兆 谷

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

H. J. J. Seguin

(Department of Electrical Engineering, University of Alberta, Canada)

提 要

本文给出了由两块环形球面镜组成的适用于同轴放电环形增益区的多光程振荡器的设计及光束特性。在该类型的多光程谐振腔中,在环形球面镜表面的不同转折点上,光束尺寸量周期性地变化。如果这种类型的多光程谐振腔与假设所有转折镜都为平面镜的情况比较,前者的激活体积比后者要小得多。因此,该类型多光程谐振腔更加适用于具有较小电极间隙的同轴放电激光器。

关键词: 环形增益区, 多光程谐振腔。

一、引 言

近年来,具有环形增益区的同轴放电激光器有较大的发展^[1~2]。尽管它具有结构简单,放电体积大等优点,但在激光能量提取方面却带来麻烦。如果环形增益区的半径足够大,采用特大口径腔镜、窗口的单程腔来提取激光能量几乎是不可能的。采用多块平面镜组成的

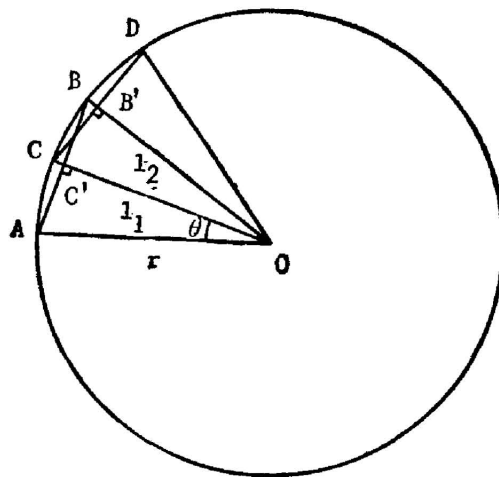


Fig. 1 Sketch design of the multipasses resonator (radial view). Suppose $R_1=R_2$, $r_1=r_2=r$

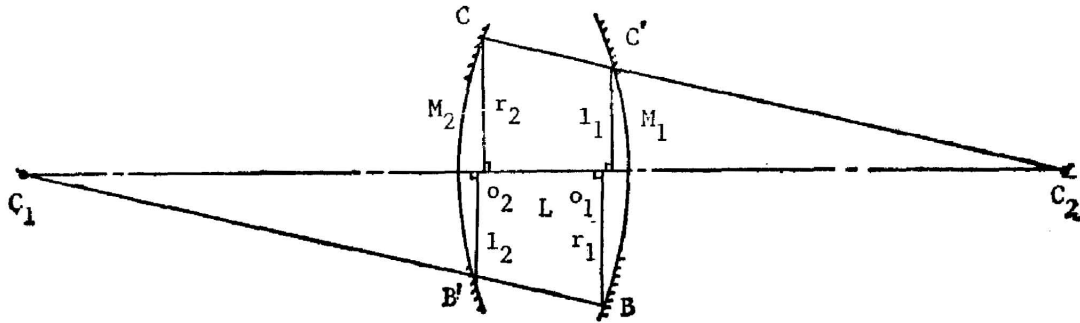


Fig. 2 Sketch design of the resonator (axial view)

多折叠圆筒式环形增益腔,因为具有多个转折镜,其结构、调整较为复杂,而且其折叠次数与转折镜个数密切相关。

本文给出了只带两块环形球面镜组成的多光程谐振腔的设计及光束特性。对于同轴放电环形增益区的激光器而言,只需要改变叠块球面镜之曲率半径及光束与镜面相交角度,可方便地获得任意折叠次数的多光程谐振腔。

二、作图设计

这类谐振腔设计的一种非常简单的方法是作图法。如图1、图2所示,环形增益区之轴线位置是半径为 r 的圆。二环形球面镜平行,二者之间距离为 L 。如果一束光经过一端的凹面环形镜 M_1 反射,从点 A 到达另一端的凹面环形镜 M_2 之表面一点 C ;然后,这束光经 M_2 反射到达 M_1 之表面一点 B ,再经 M_1 反射到达 M_2 之表面一点 D 。光点 A 、 B 位于 M_1 之表面,光点 C 、 D 位于 M_2 之表面。

激光束绕圆柱形侧表面作 N 次折叠,光点在二端环形球面镜之表面呈圆形分布。我们可以认为激光束这样传播,在环形球面镜之表面的光点位置由两部分位移矢量合成来决定,沿切向位移由合适的入射角度决定,沿径向位移由环形球面镜的曲率半径引起。如图2所示,设 C_2 点是凹面镜 M_2 之曲率中心,直线 C_2C 交于凹面镜 M_1 之一点 C' 。按照简单的几何关系,由近轴光线近似,如图1、图2所示, M_2 镜面上的半径 r_2 和 M_1 镜面上的截距 l_1 之关系为,

$$\frac{l_1}{r_2} = \frac{R_2 - L}{R_2} \quad (1)$$

式中, R_2 为环形凹面镜 M_2 之曲率半径, L 为二环形球面镜之间距。

同理,可以求得。

$$\frac{l_2}{r_1} = \frac{R_1 - L}{R_1} \quad (2)$$

式中, R_1 为环形凹面镜 M_1 之曲率半径, l_2 为镜面 M_2 上之截距, r_1 为镜面 M_1 上之半径(如图1、图2)。显然,若 $R_1 = R_2 = R$,则 $r_1 = r_2 = r$ 。

利用球面镜表面的光线反射定律,很易理解, CD 垂直于径向直线 OB' ,并且 $OB' = B'D$ 。

(如图 1)。同理, AB 垂直于 OC' , 并且 $AC' = C'B$ 。由二直角三角形 $OB'O$ 和 $OC'B$, 我们得到,

$$l_1 = r_1 \cos \theta_0 \quad (3)$$

$$l_2 = r_2 \cos \theta_0 \quad (4)$$

式中, θ 为激光束在两块环形球面反射镜上之相邻两点(例如 A, O')之间的相对空间夹角,

$$\theta = 360^\circ / N \quad (5)$$

式中, N 为激光束经过多次折叠在两端环形球面镜表面形成完整的圆之后激光束在两块环形球面镜之间的折叠总数。

由方程(1)、(2)、(3)和(4)我们可以求得,

$$\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) = \cos^2 \theta_0 \quad (6)$$

如果两块环形球面镜的曲率半径相等, 即 $R_1 = R_2 = R$, 方程(6)变为,

$$1 - \frac{L}{R} = \cos \theta_0 \quad (7)$$

由两块环形球面镜组成的同轴放电多光程谐振腔之折叠次数由公式(6)或(7)确定。

三 环形增益多光程谐振腔

如图 3、图 4 所示, 作为例子, 我们讨论带有两块环形球面镜组成的 19 折叠多光程谐振腔之特性。设 R'_1 为输出耦合镜之曲率半径, R'_2 为另一端腔镜之曲率半径。作为一般情况,

设二环形球面镜之曲率半径分别为 R_1 和 R_2 。该 19 折叠多光程谐振腔之往返矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 为^[3],

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R'_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}^9 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R'_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix}^9 \quad (8)$$

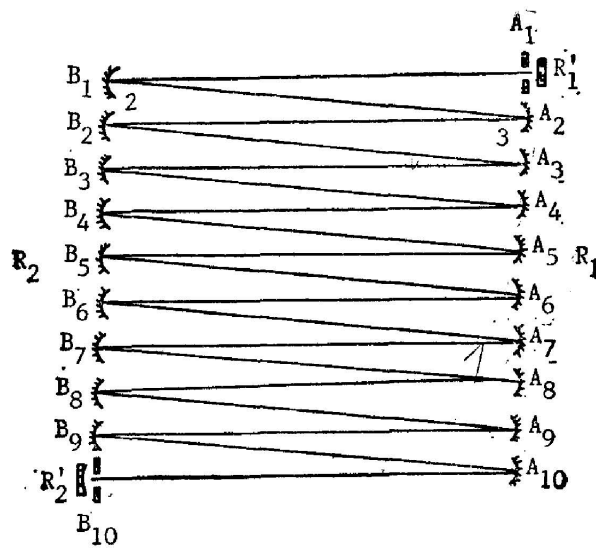


Fig. 3 The 19 passes resonator (open view)

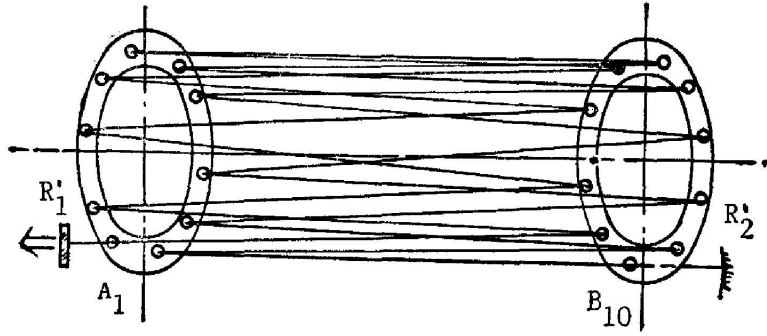


Fig. 4 The 19 passes resonator (stereoscope view)

式中, 矩阵 $\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix}$ 分别为,

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L' \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L' \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

上式中, L' 很易从图 1 中求得,

$$L'^2 = L^2 + AC^2, \quad (11)$$

$$AC^2 = CC'^2 + AC'^2. \quad (12)$$

如果 $R_1 = R_2 = R$, $r_1 = r_2 = r$, 则 $CC' = r(1 - \cos \theta)$, $AC' = r \sin \theta$, 很易求得,

$$L'^2 = L^2 + 2r^2(1 - \cos \theta). \quad (13)$$

位于输出耦合镜 R_1' 上的 TEM₀₀ 模(以下同)光斑尺寸 W_1 可表达为,

$$W_1^2 = \frac{2\lambda B}{\pi} / \sqrt{4 - (A+D)^2}. \quad (14)$$

式中, A 、 B 和 D 由方程(8)确定, λ 为波长。

由三镜腔理论^[4], 可以写出下列 18 对方程,

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_2'} = \frac{1}{R_2}, & (15) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{\lambda \rho_2}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{R_1' - L'}{\rho_2 - L'} \cdot \frac{L'}{R_1' + \rho_2 - L'} = \left(\frac{\lambda \rho_2'}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{\rho_3 - L'}{\rho_2' - L'} \cdot \frac{L'}{\rho_2' + \rho_3 - L'}, & (16) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho_3} + \frac{1}{\rho_3'} = \frac{1}{R_1}, & (17) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{\lambda \rho_3}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{\rho_2' - L'}{\rho_3 - L'} \cdot \frac{L'}{\rho_2' + \rho_3 - L'} = \left(\frac{\lambda \rho_3'}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{\rho_4 - L'}{\rho_3' - L'} \cdot \frac{L'}{\rho_3' + \rho_4 - L'}, & (18) \end{cases}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho_{19}} + \frac{1}{\rho_{19}'} = \frac{1}{R_{10}'}, & (19) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{\lambda \rho_{19}}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{\rho_{18}' - L'}{\rho_{19} - L'} \cdot \frac{L'}{\rho_{18}' + \rho_{19} - L'} = \left(\frac{\lambda \rho_{19}'}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{R_2' - L'}{\rho_{19}' - L'} \cdot \frac{L'}{\rho_{19}' + R_2' - L'}. & (20) \end{cases}$$

上述各式中, $\rho_2, \rho_2', \rho_3, \rho_3', \dots, \rho_{19}, \rho_{19}'$ 分别为转折点 B_1, A_2, \dots, A_{10} 处(图 3)一对等相面之曲率半径。

通常,选择输出耦合镜为平镜,即令 $R'_1 = \infty$,其出口处之光斑尺寸 W_1 为

$$W_1^2 = \frac{\lambda L'}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2 - L'}{L'}} \quad (21)$$

由方程(14)和(21),可以求出第一个等相面曲率半径 ρ_2 的值。然后,由方程(15)到(20),可求出其余的等相面曲率半径。这样,就得到了由 R'_1 、 L' 和 ρ_2 ; ρ'_2 、 L' 和 ρ_3 ; \dots ; ρ'_{10} 、 L' 和 R'_2 (如图3)组成的19个等效二镜腔。

这类由两块环形球面镜组成的多光程谐振腔之稳定条件是^[3],

$$|A+D| \leq 2 \quad (22)$$

式中, A 和 D 由方程(8)确定。

在该多光程谐振腔中,整个 TEM_{00} 模之激活体积 V_{00} 可用下式近似表达

$$V_{00} = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\sigma}{3} \cdot L' \cdot (W_{i1}^2 + W_{i2}^2 + W_{i1} \cdot W_{i2}) \quad (23)$$

式中, N 由方程(5)确定。 W_{i1} 和 W_{i2} 为第 i 个等效二镜腔之两端腔镜上的 TEM_{00} 模之光斑尺寸。这里,对于高斯光束而言,圆台近似是适合的。

假定该19折叠多光程谐振腔之参量为, $L=111.4\text{ cm}$, $R_1=R_2=2276.6\text{ cm}$, 输出耦合镜为平镜($R'_1=\infty$),由方程(8)和(22)可知,稳腔条件为 $R'_2 \geq 540\text{ cm}$ 。若假设所有转折镜为平镜,则稳腔条件变为 $R'_2 \geq 211.7\text{ cm}$ 。

概括起来,带有两块环形球面镜组成的多光程谐振腔的主要特点如下:

1. 如图5所示,该类型多光程谐振腔中,在环形球面镜表面各转折点,光束尺寸是周期性变化的。这种周期性,当保持输出镜 R'_1 为平镜,而另一端腔镜 $R'_2=540\text{ cm}$ (处于稳腔之临界点)更为明显(见图5实线)。图5虚线表示当 $R'_2=3000\text{ cm}$ 时(其余参数同上),该多光程谐振腔之腔内光束变化特性。

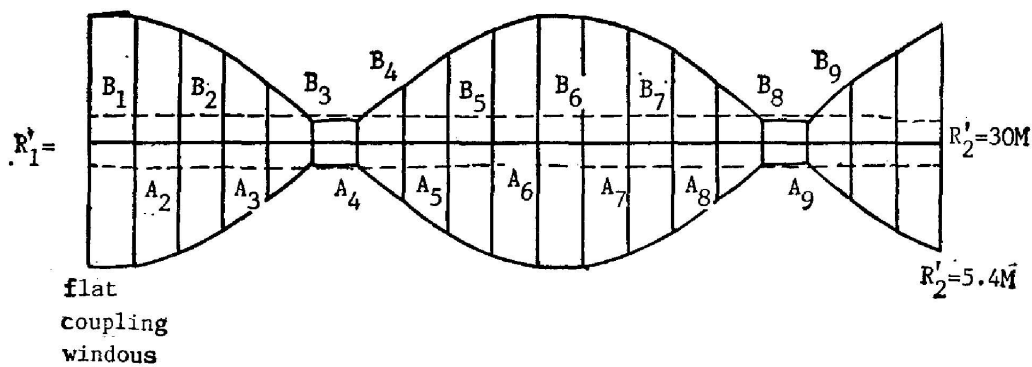


Fig. 5 Periodical distribution of the beams in the 19 passes resonator

2. 在上述参量条件下,当输出耦合镜为平镜,图6给出了该19折叠多光程谐振腔中, TEM_{00} 模总模体积随另一端腔镜之曲率半径 R'_2 变化曲线。其中,带有两块环形球面镜的19折叠多光程谐振腔之结果示于图6下曲线。而假定所有转折镜为平镜时,其结果示于图6上曲线。

由图6可知,对带有两块环形球面镜组成的多光程谐振腔,除了其腔型处于接近稳腔边缘的临界点外,其 TEM_{00} 模总模体积明显减小,并随 R'_2 增大而剧烈下降,很快趋于稳定

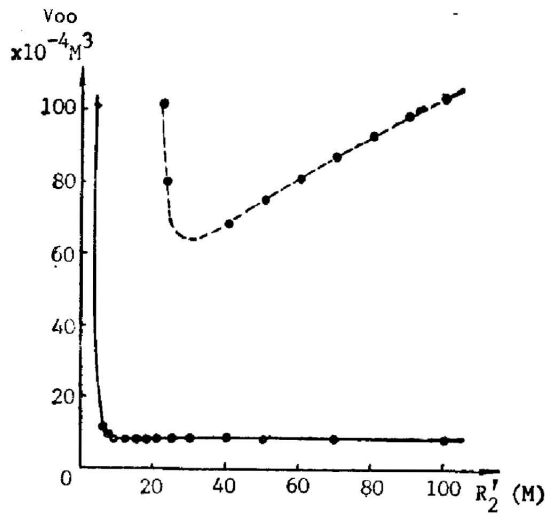


Fig. 6 Change curves of TEM_{00} mode volumes in the resonator

值。而假定所有转折镜为平镜时, V_{00} 随 R_2' 增大而线性增大。

3. 多光程谐振腔的 TEM_{00} 模发散角 θ_{00} 由输出端的第一个等效二镜腔确定, 即

$$\theta_{00} = \lambda / \pi W_{10} \quad (24)$$

式中, W_1 由方程(21)确定。

举例, 在上述参数下, 如果选择参量 $R_2' = 540 \text{ cm}$ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$), $W_1 = 18.3 \text{ mm}$, 则 $\theta_{00} = 0.18 \text{ mrad}$ 。可见, 工作在临界点的该类型多光程谐振腔具有极好的光束方向性。

综上所述, 带有两块环形球面镜的多光程谐振腔可用于同轴放电环形增益区情况, 具有结构简单、折叠次数可任意选择等优点。

该类型多光程谐振腔腔内光束具有明显的周期性。如果与假定所有转折镜为平面镜的情况相比较, 该类型多光程谐振腔之激活体积明显减小。

作者认为, 带有两块环形球面镜组成的多光程谐振腔更加适合于较小放电间隔的同轴放电情况。

参 考 文 献

- [1] K. T. K. Cheng, L. W. Casperson; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 13 (Jul), 2130.
- [2] V. A. Seguin *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**, No. 9 (Nov), 3088.
- [3] H. Kogelnik, T. Li; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 10 (Oct), 1550.
- [4] C. P. Wang, R. L. Sandstrom; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 6 (Jun), 1235.

Multipasses resonator suitable for a coaxial discharge laser with annular gain regions

CHENG SHAOGU

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

H. J. J. SEGUIN

(Department of Electrical Engineering, University of Alberta, Canada)

(Received 12 August 1987; revised 12 May 1988)

Abstract

The design and characteristics of the multipasses resonator with two annular spherical mirrors are described in this paper. The sizes of the beams at different folding points on the annular mirrors surfaces are periodical changed. The active volumes of the resonator are much smaller compared with the case in which all the folding mirrors are flat. So for a coaxial discharge laser with annular gain regions, this kind of resonator is more suitable for the case of small discharge gap.

Key words: annular gain region; multipasses resonator