

同轴环形螺旋谐振腔设计分析

王又青 吴龟灵 安承武 王秋良 陈清明
(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 提出了一种适用于同轴环形放电结构气体激光器的环形螺旋谐振腔, 并给出了理论分析。该谐振腔由一螺旋面反射镜和一球面反射镜构成, 可充分提取激活区的能量并输出单束激光。该结构易于实现同轴环形放电激活区中的功率萃取。

关键词: 同轴环形螺旋谐振腔 螺旋面反射镜 球面反射镜

Design of a helical resonator with coaxial ring structure

Wang Youqing, Wu Guilin, An Chengwu, Wang Qiuliang, Chen Qingming
(National Lab. of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: For gas lasers a helical resonator with coaxial ring discharge structure is proposed, and the theoretical analysis is given. This resonator is composed of a helical reflecting mirror and a spherical reflecting mirror. The single laser beam can be effectively extracted. This resonator can be easily adjusted and is suitable for energy extraction from active-medium.

Key words: helical resonator with coaxial ring structure helical reflecting mirror spherical reflecting mirror

引 言

自 K. M. Abramski^[1]和 J. G. Xin^[2]等提出大面积扩散冷却技术以来, 紧凑型射频激励 CO₂ 激光器得到了飞速发展。其结构有板条和环形两种形式。对于环形结构, 关键问题是如何有效地耦合出激光, 即要研究与放电空间结构相适应的激光谐振腔。当前, 国外提出了几种谐振腔: 一是用多次折叠腔在同轴圆筒间隙中诱导振荡^[2, 3], 这种腔除了调整困难外, 也不能充分利用激活增益区, 限制了激光效率; 另一种腔就是旋转棱镜构成的稳定腔^[4], 它在实用上比前者有优越性, 但在提高光束质量方面不尽人意。近期又提出了将一端面反射镜斜成一小倾角构成非稳腔的结构^[5], 虽使激光功率大大提高, 但所输出的激光束中包含两束光, 给应用带来不便。本文针对同轴圆筒放电结构提出了一种新的螺旋非稳谐振腔设想, 可使输出的激光中只含一束光, 这就提高了这类激光器的应用性能。

一、设计分析

由于同轴圆筒间隙是放电激活区, 横截面是一个圆环, 因而要求谐振腔诱导的振荡光在腔内的每次反射所产生位移的传输轨迹其横截面上也应为圆环, 这样才能充分利用同轴圆筒间隙中的激活介质, 并在输出窗口耦合出高功率的优质单束激光。利用环形螺旋谐振腔可达此目的。

本文所提出谐振腔由一个环形螺旋平面全反镜和一个球面全反镜构成(图1)。为了稳定工作, 在工作环面上沿径向必须是稳腔, 而在环行方向必须是非稳腔。工作时光束来回反射沿环面绕行一周后, 即可从全透窗口输出。下面分析该腔的特性。

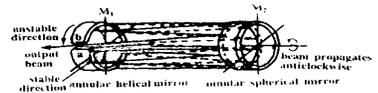


Fig. 1 The structural diagram of an annular helical resonator
a—initial position b—output position

1. 光束沿环行方向的传播

谐振腔沿环行方向为非稳腔, 可用几何光学的方法进行分析^[7]。为简单起见, 可将图1中谐振腔环向展开, 等效成图2的板条腔结构。若环形放电间隙为自由传输空间, 且以 M₁ 为参考面, 光束在激活区域内环绕传输时, 从图2看出。

$$\theta_i = \theta_{i-1} + 2\beta$$
$$r_i = r_{i-1} + L \tan[2(\theta_{i-1} + 2\beta)] \approx r_{i-1} + 2(\theta_{i-1} + 2\beta)L \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n, \theta_0 = 0, r_0 = 0) \quad (1)$$

式中, L 是中心半径为 R 的环形镜的平均周长。第 $i-1$ 次传输到第 i 次传输的变换矩阵即为^[6,9,10]:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} r_i \\ \theta_i \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_{i-1} & B_{i-1} \\ C_{i-1} & D_{i-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{i-1} \\ \theta_{i-1} + 2\beta \end{pmatrix} \quad \text{气体} \quad it \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{i-1} \\ \theta_{i-1} + 2\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{i-1} \\ \theta_{i-1} + 2\beta \end{pmatrix} \quad \text{in} \end{aligned} \quad (2)$$

显然, 当光束环形一周时, 有 $r_n = 2\pi R$ (3)

式中, n 为光束沿中心半径为 R 的圆环绕行一周时来回反射的次数。

从图 2 可知, 随着 N 的增加, 反射角及相邻两反射点之间的距离越来越大。为了充分利用放电激活区, 相邻两反射点之间的距离应满足一定的条件。

从图 3 看出, 随着螺旋镜螺距的不同(或其等效镜倾角 β 的不同), 螺旋镜上相邻两个半径 r_i 的圆形小反射区重迭

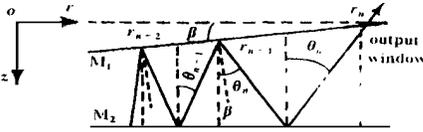


Fig. 2 The equivalent resonator of the annular helical resonator

程度就不一样。图 3a 因螺旋镜螺距(或等效镜倾角 β)太大, 相邻两个小反射区不重迭, 即 $r_i - r_{i-1} > 2r$, 激活区没有充分利用; 图 3c 表示螺距很小, 相邻两个小反射区大部分重迭, 即 $r_i - r_{i-1} < r$, 放电激活区虽得

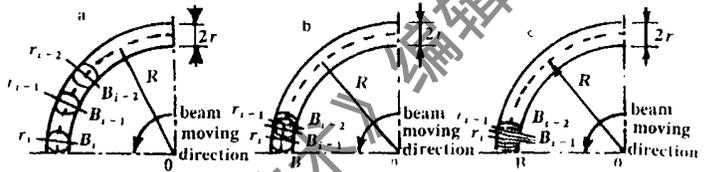


Fig. 3 The diagram of the azimuthal propagation on the annular helical mirror

到充分利用, 但实验表明, 在射频气体放电中, 靠电极附近有一层暗区(电流密度大时, 又呈现为一层极亮区), 其厚度 d 随射频频率的增加而减小^[7,8], 在这一区域没有激光增益, 所以螺旋镜螺距过小也不好。图 3b 表示激光输出前最后相邻两个小反射区间的距离为 $r_n - r_{n-1} = r$ 时的情况。这种情况下的激活区利用率如下所述。

先分析相邻两个小反射区间的距离均为 $r_n - r_{n-1} = r$, 且两腔镜上的小反射区一一对应(光程不环行)时的情况(图 4)。此时在弧度 φ 内相邻两个小反射区重迭的面积和该弧度内的环面积分别为:

$$\begin{aligned} S_{\text{active}} &= (3/2 + \pi/3)r^2 \quad (4) \\ S_{\varphi} &= 2\varphi Rr \end{aligned}$$

那么, 激活空间的利用率为:

$$\eta' = \frac{S_{\text{active}}}{S_{\varphi}} = \frac{(3/2 + \pi/3)r^2}{2\varphi Rr} = \frac{1}{2} \frac{3 + \pi}{2 + \pi} \quad (5)$$

显然, 在图 3b 情况下(光程环行), 来回光程重迭, 其激活空间的利用率将大于图 4 相应状态。即激活空间利用率为:

$$\eta > \eta' = \frac{S_{\text{active}}}{S_{\varphi}} = \frac{(3/2 + \pi/3)r^2}{2\varphi Rr} = \frac{1}{2} \frac{3 + \pi}{2 + \pi} \quad (6)$$

考虑到无增益区因素, 应有 $S'_{\varphi} = [\varphi/(2\pi)][\pi(R+r-d)^2 - \pi(R-r+d)^2] = 2\varphi R(r-d)$ (7)

那么, 此时的激活空间利用率为: $\eta > \eta' = S_{\text{active}}/S'_{\varphi} = (1/2)(3/2 + \pi/3) \cdot r/(r-d)$ (8)

实验表明, 当频率为 $f = 27.12\text{MHz}$, $r = 5\text{mm}$, $R = 50\text{mm}$ 时, $d < 0.5\text{mm}$, 由(8)式得: $\eta \rightarrow 1$, 这表明放电激活空间几乎得到了完全利用。

因此当

$$r_n - r_{n-1} = r \quad (9)$$

时, 图 1 中的环形螺旋谐振腔比较好。其等效镜倾角 β 和环向双光程次数 n 可由方程(1), (3)和(9)式联立求解。该方程组式是一个迭代过程, 因此用计算机很容易求解。环形螺旋反射镜的螺距为:

$$\Delta z = r_n \tan \beta \quad (10)$$

2. 径向传播分析

若 M_2 为平面镜, 图 5a 中中心为 c 的小区出来的光到 M_2 反射后, 将回到中心为 a 的小区, 随着反射次数增多, 光线将以渐开线规律沿环线向外发散。反射次数为 i 时, 小区中心离开圆环中心的偏移量为:

$$\Delta S_i = \Delta S_{i-1} + (r_i - r_{i-1})^2 / (2R) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n, \Delta S_0 = 0, r_0 = 0) \quad (11)$$

$i = n$ 时渐开线环形一周, 最大偏移量为:

$$\Delta S_n = \sum_{i=1}^n \frac{(r_i - r_{i-1})^2}{2R} \quad (12)$$

若要修正这种偏移, 则要求 M_2 是一变曲率半径的凹面镜, 使得每次经 M_2 反射后光线到达以 b 为中心的小区 (b, c 均在圆环中心线上)。从图 5b 得到变曲率半径为(其中 L 为腔长):

$$R_2 = (L \cdot R) / (\Delta S_i) \quad (13)$$

由于变曲率半径凹球面镜实际上难加工。下面分析用定曲率半径凹球面镜代替的可行性。

由定曲率半径为 R_2 的凹球面镜每次反射造成的

的向心偏移量为:

$$\Delta S'_i = i \cdot (L \cdot R) / R_2 \quad (14)$$

考虑向心偏移和发散偏移的综合影响后, 得合成偏移量为:

$$\Delta S''_i = \Delta S'_i - \Delta S_i = i \cdot (L \cdot R) / R_2 - \Delta S_i \quad (15)$$

$i = n$ 时有最大合成偏移量(图 6):

$$\Delta S''_n = n(L \cdot R) / R_2 - \Delta S_n = -\Delta S_n / 2 \quad (16)$$

从而得到:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(r_i - r_{i-1})^2}{2R} = 2n \frac{LR}{R_2} \quad (17)$$

即可用计算机获得曲率半径 R_2 的数值解。

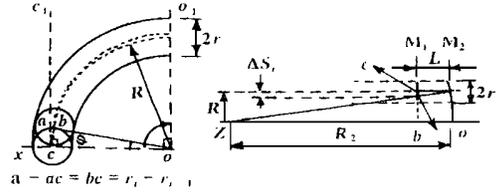


Fig. 5 a—when M_2 is planar reflector, the azimuthal movement will result in a radial walk-out due to the centrifugal forces. b—in order to center the ray trajectory within the annular gap, a mirror with an appropriate bank of the curve can be used to compensate the outward shift

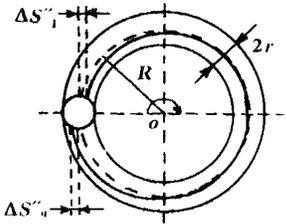


Fig. 6 The cross-section diagram of the annular helical resonator with a spherical mirror M_2 with constant radii instead of that with varying radii

二、讨 论

1. 从传输矩阵方程可知, 环形螺旋谐振腔的光束特性与半径为 r 的单程腔的光束特性基本一致。TEM₀₀模激活体积 V_{00} 为单程腔的 n 倍以上。

2. 由于起振角是任意的, 因此可存在无穷多腔, 如果最后稳定下来的腔相应于损耗最小的腔, 腔内传播光束仍是由有限均匀反射面衍射损耗和腔参数所确定的基模高斯光束。

3. 本文设计方法使得环形螺旋谐振腔的制作难度降低, 与文献[11]相比, 使优质激光束的提取变得更简便。

参 考 文 献

- 1 Abramski K M, Cooley A D, Baker H J *et al.* A P L, 1989; 54(19): 1833
- 2 Xin J G, Hall D R. A P L, 1987; 51(7): 469
- 3 Habich U. SPIE, 1990; 1397: 383~ 386
- 4 Ehrlichmann D. J Phys D, 1993; 26(2): 183~ 191
- 5 Loosen P. SPIE, 1992; 1810: 28~ 33
- 6 周炳琨. 激光技术. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 7 He D, Hall D R. A P L, 1983; 43(8)
- 8 辛建国, 魏光辉. 中国激光, 1994; A21(4)
- 9 李育德. 中国激光, 1992; 19(10)
- 10 程兆谷, Seguin H J J. 光学学报, 1989; 19(2)
- 11 Ehrlichmann D, Habich U *et al.* IEEE J Q E, 1994; 30(6)