

(N) 275-278

谐振腔镜对高斯光束远场发散角的影响*

李健 刘杰

(山东师范大学物理系, 250014, 济南; 第一作者 35 岁, 男, 副教授)

0435-2
TN241

摘要 利用变换矩阵和 ABCD 定律讨论了激光谐振腔对高斯光束的变换, 推导出了高斯光束参数(光斑尺寸、波面曲率半径)通过光腔输出镜的变换公式, 并对热透镜腔、光束远场发散角等问题进行了讨论。

关键词 高斯光束; 远场发散角; 变换矩阵

分类号 O 435.2

谐振腔镜

当讨论由光学谐振腔输出激光束的特性时, 一般均不考虑谐振腔镜对激光束的透射变换问题, 而实际上这一变换对激光束的各项参数却有着比较明显的影响. 例如图 1 所示的简单两镜稳定谐振腔, 设激光由腔镜 M_2 输出, 则基模高斯光束远场发散角 θ_0 可表示为

$$\theta_0 = \lambda / \pi \omega_0, \quad (1)$$

式中 ω_0 为腰斑半径, λ 为激光波长. (1) 式实际上是腰斑半径为 ω_0 的高斯光束在自由空间中传播的远场发散角公式. 因此当我们使用 (1) 式时就意味着已经忽略了输出镜 M_2 对激光束参数的影响, 或者说在图 1 中的参考面 P_2 和 P'_2 处的激光束参数(光斑半径、等相面曲率半径)已经被认为是相等的, 这一结论是否正确, 文中将利用矩阵变换、ABCD 定律对此加以讨论.

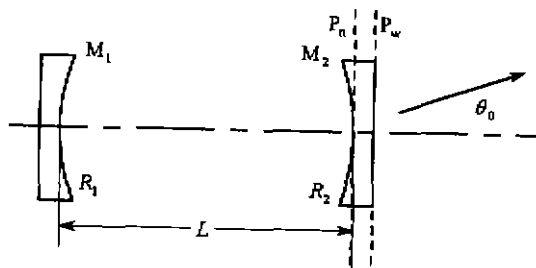


图1 两镜稳定腔

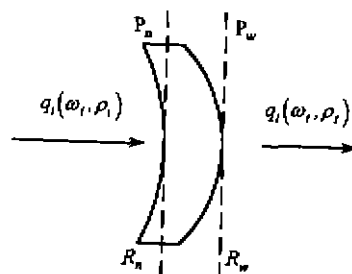


图2 谐振腔输出镜

1 谐振腔镜对激光束的透射变换

如图 2 所示, 设谐振腔输出镜(部分反射镜)置于空气中, 其内、外曲率半径分别为 R_n 、 R_w , 腔镜基片折射率为 n , 反射镜厚度 d 忽略, 高斯光束在参考面 P_n 处入射, 在 P_w 处出射, 则部分反射镜的透射变换矩阵为^[1]

$$M_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{R_w} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{nR_n} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} (d \rightarrow 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (n-1)\left(\frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_w}\right) & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

按 ABCD 定律, 入射高斯光束复参数 q_i 与透射高斯光束复参数 q_t 之间的关系为

* 山东省科委基金资助项目
收稿日期: 1998-02-29

$$\frac{1}{q_i} = (n-1)\left(\frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_w}\right) + \frac{1}{q_i}, \quad (3)$$

又

$$\frac{1}{q_{i(t)}} = \frac{1}{\rho_{i(t)}} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_{i(t)}^2}. \quad (4)$$

式中的 $\rho_{i(t)}$ 、 $\omega_{i(t)}$ 分别为在参考面 P_n 处入射(在 P_w 处透射)的高斯光束的等相面曲率半径和光斑半径. 将(4)式代入(3)式, 得

$$\omega_i = \omega_t, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho_i} = (n-1)\left(\frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_w}\right) + \frac{1}{R_n}. \quad (6)$$

在上述推导中我们使用了公式 $\rho_i = R_n$, 这是稳定无源两镜腔的一个结果. 由(5)、(6)两式可知, 当激光输出镜的厚度可以忽略时, 经输出镜出射的高斯光束的光斑半径与入射高斯光束光斑半径相等, 但等相面曲率半径却应按(6)式进行变换. (5)、(6)两式为谐振腔镜对高斯光束透射变换的一般计算公式, 利用它可以处理与激光腔输出激光束参数有关的问题. 下面讨论几个典型问题.

1.1 热透镜腔

目前大多数的激光谐振腔是热透镜腔, 许多文献对热透镜腔已经作了详细的讨论. 而我们的兴趣只是讨论热透镜腔的基模高斯光束远场发散角 θ_{02} 公式. 如图3所示, 设在激光腔内距腔镜 M_1 、 M_2 分别为 d_1 、 d_2 处存在一焦距为 f 的热透镜, 全反射镜 M_1 的曲率半径为 R_1 [2] 输出镜(部分反射镜) M_2 的内、外曲率半径分别为 R_2 和 R_3 , 腔镜基片的折射率为 n . 按照文献, 要求输出镜的内、外曲率半径“匹配”, 即 R_2 、 R_3 应满足以下关系

$$R_3 = \left(1 - \frac{1}{n}\right)R_2, \quad (7)$$

将(7)式代入(2)、(6)两式, 即可得到

$$M_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\rho_{2t} \rightarrow \infty, \quad (9)$$

即在腔镜 M_2 处输出的高斯光束等相面为平面, 因此远场发散角 θ_{02} (即外发散角) 为

$$\theta_{02} = \frac{\lambda}{\pi \omega_2}. \quad (10)$$

在一般情况下, 腔镜 M_2 处的光斑半径 ω_2 并不等于腔内相邻的腰斑半径 ω_0 , 只有在特殊情况(如输出镜为平面镜)时, 两者才有可能相等.

下面我们再对公式(2)、(6)的应用作进一步的讨论

1) $R_3 \rightarrow \infty$, 这是常用的平凹球面镜或平凸球面镜的情况;

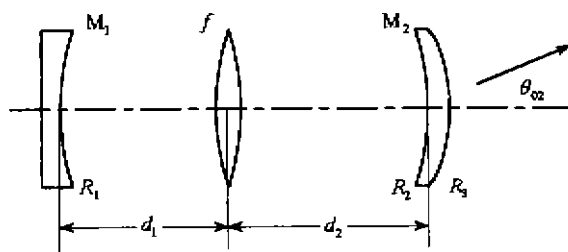


图3 热透镜腔

$$M_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{R_2} & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\rho_{2t} = \frac{R_2}{n} = \frac{\rho_{2i}}{n}. \quad (12)$$

2) $R_2 = R_3$, 反射镜的内外曲率半径相等;

$$M_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\rho_{2t} = R_2 = \rho_{2i}. \quad (14)$$

3) $R_2 = R_3 \rightarrow \infty$, 对应平行平面输出镜;

$$M_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\rho_{2t} = \rho_{2i} \rightarrow \infty \quad (16)$$

由以上分析我们可以看到,只有在特殊情况(2)、(3)时,才可以不考虑谐振腔输出镜对激光束参数的透射变换的影响.当使用平凹或平凸形输出镜时,激光束等相面曲率半径应按(12)式变化,由此则会引起远场发散角的变化.

1.2 远场发散角 稳定谐振腔高斯光束远场发散角的一般公式由文献[4]给出.但讨论有光腔输出高斯光束远场发散角,即外发散角问题时,则应考虑输出镜对高斯光束的变换.

1) 对图1所示的两镜稳定腔情况,设激光由腔镜 M_2 输出,则外发散角 $\theta_{02,w}$ 为

$$\theta_{02,w}^2 = \frac{\lambda}{\pi L} \cdot \frac{n^2 g_1 (1 - g_2)^2 + g_2 (1 - g_1 g_2)}{\sqrt{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}}, \quad (17)$$

对内发散角 $\theta_{02,n}$, 其 ω_0 可由下式给出

$$\omega_0^2 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{L \sqrt{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2}, \quad (18)$$

按(1)式可写成

$$\theta_{02,n}^2 = \frac{\lambda^2}{\pi^2 \omega_0^2} = \frac{\lambda}{\pi L} \cdot \frac{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2}{\sqrt{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}} \quad (19)$$

式中 $g_i = 1 - (L/R_i)$, ($i=1,2$) 为光腔 g 参数, L 为腔长.

通过比较可以发现,考虑谐振腔镜对高斯光束的变换以后,输出激光的远场发散角与不考虑腔镜影响时有明显的不同,只在谐振腔镜为特殊形状时才可以忽略其影响.

2) 对图2所示热透镜腔,也可以写出类似但更为复杂的公式.这里我们不再给出更复杂的公式,只给出最后的结论.

对热透镜腔来说,一般地 $\theta_{02,n}$ 和 $\theta_{02,w}$ 是不相等的,在某些情况下,两者的差别还相当大.当对激光腔输出激光特性作理论分析与实验进行比较时,这是一个值得特别注意的问题.

2 结 语

1) 激光器输出镜(部分反射镜)对高斯光束的透射变换是应当考虑的.当反射镜的厚度可以忽略时,它只引起入射高斯光束的等相面曲率半径的变化,而光斑尺寸保持不变.



2) 一般情况下,用公式(1)计算得出的是高斯光束的内发散角,它并不等于由激光腔输出的高斯光束的远场发散角(外发散角).只有在某些特殊情况下,例如输出镜为平面反射镜或输出镜的内、外曲率半径相等时,内、外发散角才相等.

3 参考文献

- 1 卢亚雄,吕百达.矩阵光学.大连:大连理工大学出版社,1989.96
- 2 Steffen J. Fundamental Mode Radiation with Solid-state Lasers. IEEE J Quant Electron, 1972, 8(2): 239~245
- 3 方洪烈.光学谐振腔理论.北京:科学出版社,1981.98
- 4 吕百达, Weber H. 稳定光学谐振腔高斯光束的发散角理论. 中国激光, 1987, 14(8): 449~459

THE INFLUENCES OF RESONATOR MIRROR ON GAUSSIAN BEAM DIVERGENCE ANGLES

Li Jian Liu Jie

(Department of Physics, Shandong Normal University, 250014, Jinan, PRC)

Abstract By using transfer matrix and ABCD law, the transformation formulas for Gaussian beam parameters (spot size and radius of curvature of wave front) through resonator output mirror are derived. The related problems such as these of the resonator with a thermal lens, the beam divergence angles, are discussed.

Keywords Gaussian beam; divergence angles; transfer matrix

