

衍射光学元件用于激光谐振腔模式选择的理论研究*

张国平 叶嘉雄 李再光

(华中理工大学光学系, 武汉, 430074)

摘要: 本文介绍了一种用于激光谐振腔模式选择的新方法。采用衍射光学元件替代传统的球面反射镜, 运用衍射的角谱理论, 分析了这种衍射反射镜的模式选择作用。结果表明, 适当选取反射镜的口径及谐振腔的腔长时, 谐振腔对基模和 TEM_{01} 模的衍射损耗之比为 1: 430。

关键词: 模式选择 激光谐振腔 衍射光学元件

Theoretical study of mode selection using diffractive optical element in laser cavity

Zhang Guoping, Ye Jiaxiong, Li Zaiguang

(Department of Optical Engineering, HUST)

Abstract: In conventional mode selection method, the mirrors often used in laser cavity. In this paper, a new method that the diffractive optical elements, such as the diffractive mirrors, are used to substitute the traditional spherical mirrors is introduced. According to spectrum theory, the function of mode selection of diffractive mirrors is analyzed. Experimental results show that the properly selecting the cavity length and the aperture of the diffractive mirrors can obtain the higher diffractive loss ratio of 1: 430 between the fundamental mode and TEM_{01} mode.

Key words: mode selecting laser cavity diffractive optical element

一、引言

激光应用的许多场合常常要求激光束具有尽可能小的光束发散角, 以提高其方向性。例如激光打孔、焊接、切割及划片等微精密加工应用中, 都希望激光器最好能工作在发散角最小的基模状态, 因而需要采取一定的模式选择措施。常用的模式选择方法主要有光阑法和諧振腔参数 g, N 选择法两种。^[1]

近年来随着二元光学技术的发展, 衍射光学元件在越来越多的领域中得到了广泛的应用^[2,3]。这里我们将二元光学技术引入激光谐振腔中, 谐振腔的两个普通球面反射镜被替换成两个衍射光学元件, 它们既具有传统反射镜的使光在谐振腔内来回振荡的作用, 又具有模式选择的功能。

二、理论基础

激光谐振腔由两个相距为 L 的衍射模式选择反射镜 M_1 和 M_2 组成, 如图 1 所示。这两个衍射反射镜的设计必须有利于所需模式的建立。下面我们采用衍射的角谱理论来进行分析。

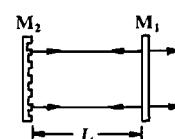


Fig. 1 Geometry of a laser cavity

设输出反射镜 M_1 上的复振幅分布为 $U_1(x_1, y_1)$, 根据角谱理论, $U_1(x_1, y_1)$ 可表示为^[4]

$$U_1(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(u, v) \exp[j 2\pi(x_1 u + y_1 v)] du dv \quad (1)$$

式中, $A(u, v)$ 为 $U_1(x_1, y_1)$ 的角谱, u, v 代表空间频率。

由角谱的传播规律可知, $U_1(x_1, y_1)$ 到达反射镜 M_2 时其场分布变为

$$\begin{aligned} U_2(x_2, y_2) &= \iint_{-\infty}^{\infty} A(u, v) \exp[j k L[1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2]^{1/2}] \\ &\quad \cdot \exp[j 2\pi(x_2 u + y_2 v)] du dv \end{aligned} \quad (2)$$

设 M_2 的反射系数为 $r_2(x_2, y_2)$, 令其为

$$r_2(x_2, y_2) = U_2^*(x_2, y_2) / U_2(x_2, y_2) \quad (3)$$

式中, “*” 表示复共轭, 则从 M_2 反射后的光场分布可写为

$$\begin{aligned} U_2'(x_2, y_2) &= U_2(x_2, y_2) \cdot r_2(x_2, y_2) \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} A^*(u, v) \exp[-j k L[1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2]^{1/2}] \\ &\quad \cdot \exp[-j 2\pi(x_2 u + y_2 v)] du dv \end{aligned} \quad (4)$$

该光场返回到反射镜 M_1 时的场分布为

$$\begin{aligned} U_1'(x_1, y_1) &= \iint_{-\infty}^{\infty} A^*(u, v) \exp[-j 2\pi(x_1 u + y_1 v)] du dv \\ &= U_1^*(x_1, y_1) \end{aligned} \quad (5)$$

假设反射镜 M_1 的反射系数为 $r_1(x_1, y_1)$ 。为了使复函数 $U_1(x_1, y_1)$ 能成为谐振腔的一个传输模式, 经过一次往返渡越后, 它应满足自再现条件。因此, $r_1(x_1, y_1)$ 必须满足

$$r_1(x_1, y_1) = U_1(x_1, y_1) / U_1^*(x_1, y_1) \quad (6)$$

由(3), (6) 式可知, $r_1(x_1, y_1), r_2(x_2, y_2)$ 均为纯位相型的, 其振幅恒定为 1, 因此它们可以采用二元光学技术来制作成衍射光学元件。这里我们希望谐振腔输出为一基模高斯光束, 即

$$U_1(x_1, y_1) = \exp[-(x_1^2 + y_1^2)/w_0^2] \quad (7)$$

式中, w_0 为束腰半径。从(6)式中显然可以得出, 输出反射镜 M_1 为一平面反射镜, 这样, 我们仅需制作一个非平面反射镜, 即 M_2 。 M_2 的位相分布可以通过(1)~(3)式求出, 它在谐振腔的模式选择中起着主要作用。由于这个选模反射镜的位相分布是针对基模高斯光束而求得的, 因此它只对基模的衍射损耗很小, 而对于其它高阶横模衍射损耗则很大, 从而抑制高阶模式的产生, 实现激光器的单横模运行。

根据上面的分析求得的选模反射镜 M_2 的位相分布通常是一个连续函数, 要将其制作成衍射光学元件, 首先需要对这个连续位相函数进行模除 2π 和 N 级量化的操作, 然后再利用二元光学制作技术^[5], 最后镀上反射膜, 即可得到一个 N 位相等级的衍射选模反射镜。

三、结 果 分 析

下面我们分析选模反射镜的位相量化、谐振腔的腔长、两反射镜的口径大小对谐振腔的模式损耗的影响, 分析主要针对 TEM_{00} 模和 TEM_{01} 模。计算中取束斑半径 $w_0 = 0.5\text{mm}$, 波长 λ

$= 1.06\mu\text{m}$ 。

标量衍射理论表明, 衍射光学元件的衍射效率 η 与其离散位相等级数 N 之间的关系为^[3]

$$\eta = N \sin(\pi/N)/\pi^2 \quad (8)$$

当 $N = 16$ 时, $\eta = 0.987$, 由此产生的损耗因子 $\delta = \ln(1/\eta) = 0.013$ 。可见, 只要 N 足够大, 则由位相量化引起的损耗可忽略不计。因此在下面的分析中, 我们假定衍射选模反射镜的位相分布是连续的。

在两反射镜的口径足够大, 如 $\varphi_1 = 1.5\text{mm}$, $\varphi_2 = 10\text{mm}$, 这时整个基模光束几乎被全部反射的情况下, 我们计算了谐振腔腔长的变化对模式损耗的影响。图 2 为 TEM_{01} 模损耗与腔长的关系曲线, 曲线在 $L = 0.74\text{m}$ 附近出现一峰值, 该位置正好为高斯光束的一个 Rayleigh 长度处 $Z = \pi w_0^2/\lambda = 0.74\text{m}$ 。由于对于每一个腔长, 谐振腔针对基模而计算了一个新的选模反射镜, 因而基模的损耗很小, 约 0.3%。由此可见, 谐振腔对于 TEM_{01} 模和基模的损耗比很大, 有利于基模的建立和高阶模的抑制。

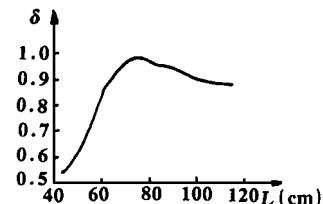


Fig. 2 TEM_{01} mode loss δ as a function of cavity length L

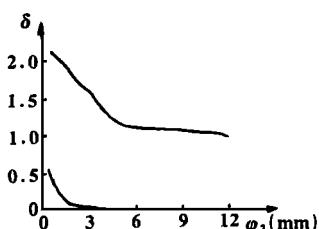


Fig. 3 Effect of mode-selecting mirror size on TEM_{00} and TEM_{01} mode loss

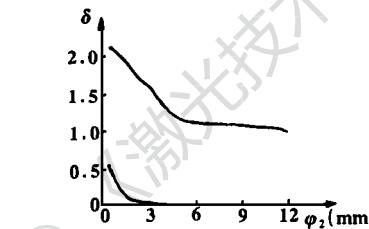


Fig. 4 Effect of output mirror size on TEM_{00} and TEM_{01} mode loss

图 3 和图 4 为腔长 $L = 0.74\text{m}$ 时分别改变选模反射镜和输出平面反射镜的大小时, 对 TEM_{00} 和 TEM_{01} 模式损耗的影响。从图中可知, 当反射镜的口径足够大时, 如 $\varphi_1 > 1.2\text{mm}$, $\varphi_2 > 4\text{mm}$ 时, 基模的损耗已变得很小, 几乎不受反射镜大小的影响。 TEM_{01} 模的损耗很大, 且随反射镜口径的减小而损耗增大。计算还表明, 输出的基模形状在 $\varphi_1 > 1.4\text{mm}$, $\varphi_2 > 10\text{mm}$ 时与理想的高斯分布基本一致; 而当 $\varphi_1 < 1.4\text{mm}$, 或者 $\varphi_2 < 10\text{mm}$ 时, 基模形状与理想的高斯分布则有差异, 且随反射镜口径的减小而差异增大。

综上所述, 合理选择谐振腔的腔长和反射镜的大小, 可以进一步提高高阶模与基模之间的损耗比, 改善基模的模式分布形状, 从而使整个谐振腔的选模能力达到最优。

根据以上分析, 我们选取 $L = 0.74\text{m}$, $\varphi_1 = 2\text{mm}$, $\varphi_2 = 12\text{mm}$, 求得了衍射选模反射镜的位相分布, 并计算出这时的基模损耗为 0.15%, TEM_{01} 模的损耗为 64.5%, 二者之比为 1:430, 这一损耗比足以使激光器在较大的增益范围内只有基模输出, 而抑制高阶模的产生。计算出基模的归一化强度分布如图 5 所示, 这一分布相对于理想的高斯强度分布的均方根误差只有 0.62%。

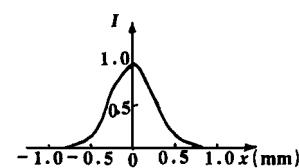


Fig. 5 Calculated fundamental mode intensity profile

并行多通道模式识别系统的研究

聂守平 李爱民 刘峰 卞松玲 陶纯堪

(南京理工大学 432 教研室, 南京, 210014)

摘要: 本文研究了在相干光和非相干光照明下, 微透镜阵列的并行处理特性, 并利用这种特性构造了并行多通道模式识别系统。

关键词: 微透镜阵列 并行处理 模式识别

Study of the parallel multichannel pattern recognition system

Nie Shouping, Li Aimin, Liu Feng, Bian Songling, Tao Chunkan

(No. 432 Teaching and Research Section, Nanjing University of Science and Technology)

Abstract: The parallel processing property of microlens arrays under coherent and incoherent illumination has been studied. Using this kind of property, parallel multichannel pattern recognition system has been structured.

Key words: microlens arrays parallel processing pattern recognition

四、结 论

采用衍射模式选择反射镜代替传统的球面反射镜, 可以使谐振腔具有很强的模式选择能力。通过适当选取腔长和反射镜的大小, 还可使这种选模能力达到最佳。本文着重从理论上分析了该模式选择方法的可行性。

应该指出的是, 由于衍射光学元件的位相分布可以是任意的, 因此该模式选择方法不仅仅只对基模有效, 它可以适用于任何其它模式。也就是说, 所要选择的模式其场分布可以是任意的, 只需将这种场分布函数代入(7)式中就行。这是该模式选择方法的一个显著的优点。

参 考 文 献

- 1 徐启阳. 激光基础. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987: 164
- 2 Veldkamp W B, McHugh T J. Binary Optics. Scientific American, 1992; 266(5): 92
- 3 Feldman M R. Laser Focus World, 1994; 30(10): 143
- 4 Goodman J W. Introduction to Fourier Optics. New York: McGraw-Hill, 1968: 48
- 5 Carts Y A. Laser Focus World, 1992; 28(2): 87

* * *



作者简介: 张国平(附照片), 男, 1969 年 2 月出生。博士研究生。现从事二元光学的理论与应用技术的研究工作。

叶嘉雄, 男, 1936 年 11 月出生。教授。现从事自适应光学与激光技术的研究工作。

李再光, 男, 1929 年出生。教授, 博士生导师。现从事激光技术的研究工作。

收稿日期: 1995-04-22