

# 柱面镜-光栅谐振腔模式与频率选择特性

彭先兆 吴 谨 万重怡

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘 要** 用福克-李(Fock-Li)的数值迭代法对柱面镜-光栅谐振腔在中心波长为  $10.6 \mu\text{m}$  处进行了理论分析, 给出了近场和远场的模式分布以及频率选择损耗函数。

**关键词** 光栅谐振腔, 柱面镜, 模式, 频率选择损耗函数。

## 1 引 言

在连续调谐高压  $\text{CO}_2$  激光器的设计中, 常常使用光栅作为频率调谐元件。尽管有多种多样的变化, 这种光栅谐振腔的基本结构, 是由一块凹球面反射镜与一块平面反射光栅构成, 利用光栅的自准直级衍射实现激光振荡, 从部分透射的球面反射镜或光栅的零级耦合输出激光<sup>[1]</sup>。研究表明, 上述光栅谐振腔远场模式与一个几何参数相同的平凹腔的远场模式相同<sup>[2]</sup>; 其频率选择特性与光栅周期、入射角、光腔的  $Q$  参数、腔内激光媒质的增益特性等有着密切的关系。此外, 凹球面反射镜的曲率半径也对频率选择函数产生直接的影响<sup>[3]</sup>, 一般说来, 凹球面反射镜曲率半径越大, 频率选择函数越尖锐, 激光输出的线宽亦愈窄。

为了获得更好的频率选择特性, 可以增大凹面反射镜的曲率半径; 但是, 如果曲率半径很大, 比如采用平面镜, 又会给谐振腔的调节带来很大的困难。为此, 可以考虑以一块柱面反射镜来代替传统的球面反射镜, 与平面光栅构成谐振腔, 如图 1 所示。

本文对这种柱面镜-光栅谐振腔的模式及频率选择特性作一个细致的分析。

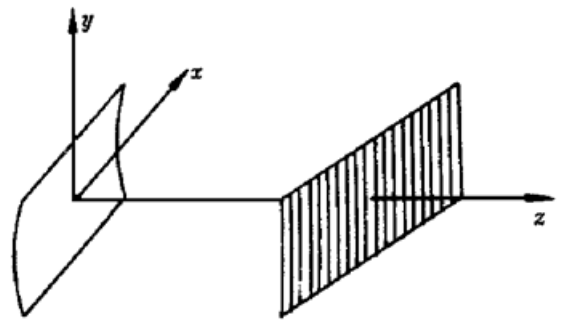


Fig. 1 Resonator composed of a cylindrical mirror and a diffraction grating

## 2 柱面镜-光栅谐振腔模式

假定光栅与反射镜均为方形, 如图 1 放置, 使光栅刻槽方向与柱面镜轴向垂直, 柱面镜中心与光栅中心的连线垂直于柱面镜中心的切平面, 光栅法线与光轴的夹角  $i_0$  使波长满足利特罗(Littrow)条件:

$$2d \sin i_0 = n\lambda_0 \quad (1)$$

式中  $d$  为光栅周期,  $\lambda_0$  为中心波长,  $n$  为整数。选择坐标原点位于柱面镜中心,  $y$  轴沿光栅刻槽方向,  $x$  轴沿柱面镜轴向。在傍轴近似下, 求解腔内模式的问题可以分离变量, 化为  $x$ 、 $y$  方向上的两个一维问题。在  $y$  方向上, 分离变量后的方程等同于一平凹腔的问题, 其解在准几何近似下为厄米-高斯模; 在  $x$  方向上, 衍射积分方程可写为

$$y_1 f_1(x_1) = \int_c^c K(x_1, x_2) f_2(x_2) dx_2 \quad (2)$$

$$y_2 f_2(x_2) = \int_{-a}^a K(x_1, x_2) f_1(x_1) dx_1 \quad (3)$$

其中, 积分核

$$K(x_1, x_2) = \sqrt{\frac{i}{\lambda b(x_2)}} \exp \left\{ -ik \left[ b(x_2) + \frac{(x_1 - x_2)^2}{2b(x_2)} \right] \right\} \quad (4)$$

式中  $b(x_2)$  为光栅平面上一点  $x_2$  到平面镜中心的距离在光轴上的投影。

衍射积分方程(2)、(3)相当于一个一维光栅和一维平面镜构成的谐振腔。(2)式右边的积分是沿一维光栅表面的线积分。谐振腔的衍射损耗系数由下式给出<sup>[4]</sup>:

$$\alpha = 1 - |y_1 y_2|^2 \quad (5)$$

这个方程组可以用福克-李的数值迭代法<sup>[5]</sup>得到数值解。

Hardy 和 Treves<sup>[2]</sup>通过数值迭代的方法说明, 一个凹球面镜和一个反射光栅构成的谐振腔的远场模式, 等效于一个平面腔; 文献[6]也证明, 厄米-高斯光束经光栅衍射后在夫琅和费区的光强分布仍为厄米-高斯光束。据此可以推论, 平面镜-光栅谐振腔的远场模式将等效于一个平行平面镜腔。本方将用数值分析表明, 平面镜与平面光栅组成的谐振腔腔内模式与相应的平面平行镜腔完全相同, 它们的衍射损耗系数也相等。

下面用福克-李的数值迭代法来研究方程(2)、(3)的解。

计算所使用的具体参数为中心波长  $\lambda_0 = 10.6 \mu\text{m}$ , 腔长  $L = 2.0 \text{ m}$ , 平面镜大小  $2a = 10 \text{ mm}$ , 菲涅耳数  $N = 1.18$ , 光栅周期  $d = 8.333 \mu\text{m}$  (即  $120 \text{ l/mm}$ ), 系统工作于利特罗条件, 一级衍射线沿光轴方向; 并且, 由于  $\lambda > d > 0.5\lambda$ , 所以除了自准直级衍射和零级衍射外没有其他级衍射线<sup>[1, 7]</sup>。

图 2(a)、图 2(b) 表示基模的镜面场及远场(距输出镜或光栅 200 m)的振幅分布。作为比较, 图中还给出了具有相同腔参数的一维平行平面镜腔的模式。可以看出, 两条曲线几乎完全重合, 两种腔的衍射损耗系数也几乎相同, 光栅腔  $\alpha_{10} = 0.1188$ , 平面平行镜腔  $\alpha_{20} = 0.1187$ 。这说明, 一维平面光栅谐振腔与其相应的平面平行镜腔有完全相同的模式。



Fig. 2 Amplitude distribution of the lowest-order mode. (a) On the total reflector of each resonator; (b) At a 200 m distance from the grating or output mirror. 1: a plane mirror-grating resonator; 2: a parallel plane mirror resonator

图 3(a)、图 3(b) 分别表示一阶模在反射镜上及远场(距输出镜或光栅 200 m) 的振幅分布。与基模的情形类似, 两条曲线也几乎是重合的。两种腔的衍射损耗系数也相同, 光栅腔  $\alpha_{11} = 0.4212$ , 平面平行镜腔  $\alpha_{21} = 0.4218$ 。

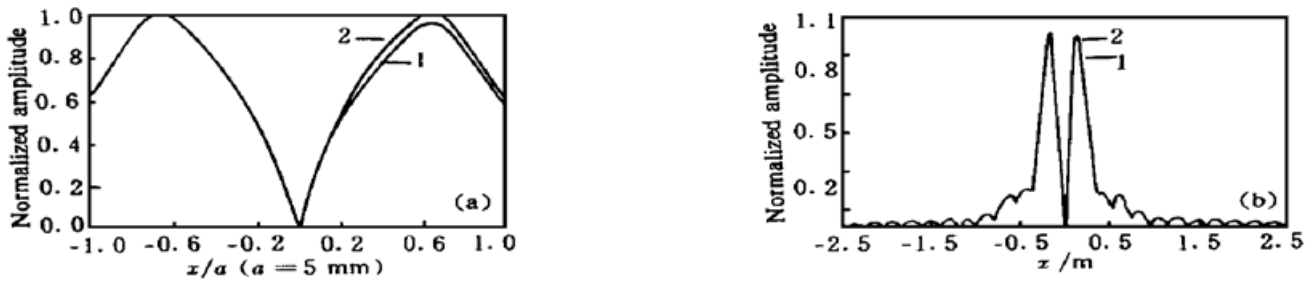


Fig. 3 Amplitude distribution of the first order mode in the resonator. (a) On the total reflector of each resonator; (b) At a 200 m distance from the grating or output mirror

上述结果证明, 平面镜-光栅衍射腔等效于相应的平行平面镜腔, 对平面镜-光栅腔的分析只需研究相应的平行平面镜腔即可。

为了获得柱面镜-光栅谐振腔的模式, 只需要把上述模式分布乘以平凹腔相应阶次的厄米-高斯模即可。

### 3 波长偏离利特罗波长时的模式

在波长偏离利特罗波长时, 谐振腔内的模式会发生畸变, 新的自准直级方向与原来的光轴有夹角  $\delta\theta$ , 可进一步认为, 腔内模式应等同于一个失调的平行平面腔, 失调的平面镜法线沿新的自准直方向, 失调角  $\delta\theta$  满足

$$\delta\theta = \frac{n\delta\lambda}{2d \cos i_0} \tag{6}$$

两种腔的衍射损耗系数也应近似相等。

仍然用数值迭代方法对上述情况进行研究。图 4 中, 曲线(1)为波长取  $1.00025\lambda_0$  (即  $10.60265 \mu\text{m}$ ) 时平面镜-光栅谐振腔平面镜上的基模光场分布, 曲线(2)为失调角  $\delta\theta$  等于  $4.25''$  时的失调平面平行镜腔在非失调平面镜上的场分布。由图可以看出, 两条曲线几乎完全重合; 两种情况下的衍射损耗系数也相同: 光栅腔  $\alpha_{1m} = 0.1220$ , 失调平面平行镜腔  $\alpha_{2m} = 0.1220$ 。可见, 波长偏离利特罗波长的平面镜光栅谐振腔在一级近似下(即  $\delta\lambda/\lambda \ll 1$ ) 完全等效于相应的平行平面镜失调腔, 失调角由(6)式给出。

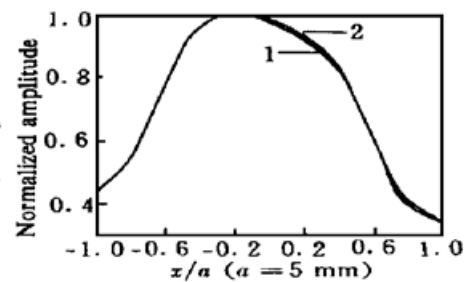


Fig. 4 Amplitude distribution of the lowest-order mode on the total reflectors

### 4 频率选择特性

上节已计算了腔内激光波长偏离利特罗波长为  $0.00025\lambda_0$  时衍射损耗系数。通过计算不同波长下的衍射损耗系数, 即可得到柱面镜-光栅谐振腔的频率选择特性。计算结果如图 5 所示。作为对比, 在图 5 中, 还给出了具有相同腔参数的凹球面镜-光栅腔的频率选择特性, 由图可见, 柱面镜光栅谐振腔具有更好的频率选择特性。在高压  $\text{CO}_2$  激光器中, 可以利用这种谐振腔实现连续调谐的窄线宽激光输出。

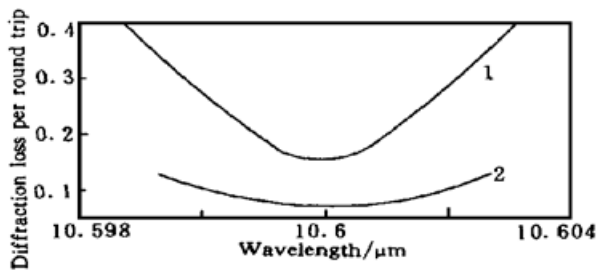


Fig. 5 Diffraction losses versus wavelengths.

1: a cylindrical mirror-grating resonator; 2: a  $R = 8$  m concave mirror-grating resonator

**结 论** 本文用福克-李的数值迭代法计算了柱面镜-光栅谐振腔工作于利特罗波长为  $10.6 \mu\text{m}$  时的模式和频率选择特性。在垂直于光栅刻槽方向上,腔内以及远场的模式与其相应的平面平行镜腔相同;偏离利特罗波长时,该谐振腔在这个方向上在一级近似下等效于一个失调平面平行镜腔。计算表明,柱面镜光栅谐振腔比通常采用的球面镜-光栅谐振腔有更好的频率选择特性。同时,这种谐振腔避免了调节上的困难,因此对于研制窄线宽的高功率可调谐  $\text{CO}_2$  激光器具有实际意义。

### 参 考 文 献

- [1] Hard T M. Laser wavelength selection and output coupling by a grating. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(8) : 1825~ 1830
- [2] Hardy A, Treves D. Modes of a diffraction grating optical resonator. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(3) : 589 ~ 594
- [3] 万重怡, 睿庄华, 夏生芹等. 紫外预电离高压可调谐  $\text{CO}_2$  激光器. 电子学报, 1978, **1**(1) : 42~ 48
- [4] 邹英华, 孙陶亨. 激光物理. 北京: 北京大学出版社, 1991. 66
- [5] Fox A G, Li T. Resonator modes in a maser interferometer. *Bell Syst. Tech. J.*, 1961, **40**(2) : 453~ 488
- [6] 郑 辉. 闪耀光栅对厄米-高斯光束的衍射. 中国激光, 1983, **10**(1) : 1~ 7
- [7] Kanstad S O, Wang G. Laser resonators folded by diffraction grating. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(1) : 87 ~ 90

## Transverse Modes and Frequency Selective Loss Function of a Resonator Composed of a Cylindrical Mirror and a Diffraction Grating

Peng Xianzhao Wu Jin Wan Chongyi

(Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 31 January 1998; revised 31 August 1998)

**Abstract** An open resonator composed of a cylindrical mirror and a diffraction grating centering at the wavelength of  $10.6 \mu\text{m}$  is investigated by utilizing the Fox-Li iterative method. The near and far field distributions of the eigenmodes and frequency selective loss function are calculated numerically.

**Key words** grating resonator, cylindrical mirror, mode, frequency selective loss function.