

离轴光栅腔对线调谐激光器的波长选择性

王裕民 归振兴 张顺怡

(中国科学院上海光机所)

提要: 考虑激光振荡纵模对增益线型的位置、频率牵引效应后, 计算了离轴光栅腔在光栅转动时对 CO 激光器振动-转动跃迁的调谐特性, 发现它比非离轴光栅腔可以选出更多的谱线, 且每支线都可达到使功率最佳。实验证实了这一现象。

Wavelength-selection of off-axial grating cavity for line-tuned lasers

Wang Yumin, Gui Zenxin, Zhang Shunyi

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

Abstract: Considering the effect of the position of the laser axial-modes on the gain shape and the pull-in frequency, we have calculated the wavelength-tuned characteristics of the off-axial grating cavity for vibration-rotation transition in CO laser when rotating the grating. It has been found that more transition lines can be selected by the off-axial grating cavity, and the optimum output can be obtained with the off-axial cavity. The effect has been demonstrated in the experiment.

由反射镜与闪耀光栅组成的激光谐振腔(简称光栅腔), 广泛用于谱线调谐或频率连续调谐的激光器。在文献[1]中曾一般地分析了这种腔对波长的选择性。本文进一步考虑到单纵模激光振荡频率与增益线型的相对位置, 包括活性介质对频率的牵引效应之后所出现的问题。

一、公式及推导

图1是光栅腔调整结构示意图。 M_B 为平面反射镜, 反射率为 r_B , M_g 为平面闪耀光栅(150条/毫米), O 点为光栅转动轴心, 光腔轴与光栅交点离 O 点距离为 b , 光栅转动通过千分测微螺杆调节, 两镜的有效孔径

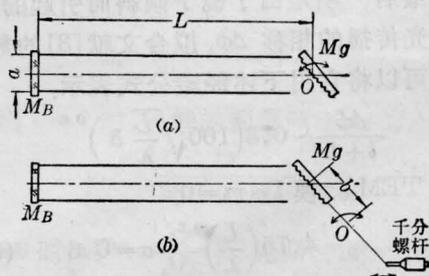


图1 光栅腔调整结构示意图

- (a) 非离轴光栅腔
(b) 离轴光栅腔

$a_B = a_g = a$, 腔长为 L 。由光栅的一级衍射形成振荡, 一级衍射的集光本领为 r_g , 光栅刻槽角为 α , 光栅常数为 d , 对于振荡波长 λ_0

收稿日期: 1982年3月18日。

满足自准光栅方程:

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

i_0 为入射角, 约等于 α 。在 [1] 中证明, 对波长 $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$ 的光, 其共振模式及衍射损失等价于反射镜 M_g 有一小角度倾斜 δ 的平行平面腔,

$$\delta = \frac{\lambda - \lambda_0}{2d \cos i_0} \quad (2)$$

由此, TEM₀₀ 模的单次衍射损失为^[1]:

$$\mathcal{L} = 0.138 N^{-3/2} + 4.83 N^{1/2} \left(\frac{\alpha \delta}{\lambda_0} \right)^2 + \ln \frac{1}{\sqrt{r_B r_g}} \quad (3)$$

对于 $\delta = 0$ 的平行平面腔, TEM_{lmq} 模的共振频率为^[2]:

$$\left. \begin{aligned} \nu_{lmq}^{(0)} &= \frac{C}{2n(\nu^{(0)})L} q' \\ q' &= q + \frac{2\mu_{m,l+1}^2}{\pi} \frac{M(M+2\beta)}{[(M+\beta)^2 + \beta^2]^2} \\ M &= \sqrt{8\pi N}, \quad \beta = 0.824 \\ N &= \frac{a^2}{L\lambda} \text{ 为费涅耳数} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$n(\nu)$ 为介质折射率。

当 $\delta \neq 0$ 时, 共振频率为^[3]:

$$\nu_{lmq} = \frac{C}{2n(\nu)L} (q' - \epsilon_0 |\delta|^\alpha) \quad (5.1)$$

其中最后一项是由于镜子倾斜而引起的。设单程光传播的相移 $\Delta\phi$, 拟合文献 [3] 的数据, 我们可以将它用下述经验公式表示:

$$\frac{\Delta\phi}{l+1} \sim 0.3 \left(100 \sqrt{\frac{L}{\lambda}} \delta \right)^{0.8}$$

对于 TEM₀₀ 模 $l = m = 0$,

$$\epsilon_0 = 4.75 \left(\frac{L}{\lambda} \right)^{0.3}, \quad \alpha = 0.6 \quad (5.2)$$

介质折射率可写为:

$$n(\nu) = 1 + \frac{C}{4\pi\nu} f g(\nu) \quad (6)$$

$$f \equiv \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_H}$$

$\Delta\nu_H$ 为均匀展宽的谱线半宽度; ν_0 为劳伦兹线型的中心频率。对 CO 激光器, 我们的器件气压约 30 托, 可近似为均匀展宽。 $g(\nu)$ 为

饱和增益系数:

$$g(\nu) = \frac{g_0}{1 + f^2 + I/I_s} \quad (7)$$

g_0 为小信号增益系数; I_s 为饱和强度。

激光稳定振荡的条件为:

$$g(\nu)l = \mathcal{L} \quad (8)$$

l 为激活介质长度。当光栅转动时, 腔长的变化为 ΔL :

$$\Delta L = b\delta \quad (9)$$

我们规定逆时针转动时 δ 为正。

假设对应 λ_0 的谱线其频率为:

$$\nu_0 = \frac{C}{2L_0} q' \quad (10)$$

对稍微偏离 ν_0 的频率 ν , 由 (5.1)、(6)、(10)、(9) 及 (8) 式得:

$$\begin{aligned} \nu - \nu_0 &= \frac{C}{2Ln} (q' - \epsilon_0 |\delta|^\alpha) - \frac{C}{2L_0} q' \\ &\approx -\nu_0 \left(\frac{b\delta}{L_0} + \frac{C}{4\pi\nu_0 L_0} \mathcal{L} f \right) - \frac{C\epsilon_0 |\delta|^\alpha}{2L_0} \end{aligned}$$

所以

$$f = \frac{-(\nu_0 b \delta / L_0 + C \epsilon_0 |\delta|^\alpha / 2L_0)}{\Delta\nu_H + \frac{C \mathcal{L}}{4\pi L_0}} \quad (11)$$

又由 (7) 及 (8) 式:

$$I/I_s = G_0 / \mathcal{L} - 1 - f^2 \quad (12)$$

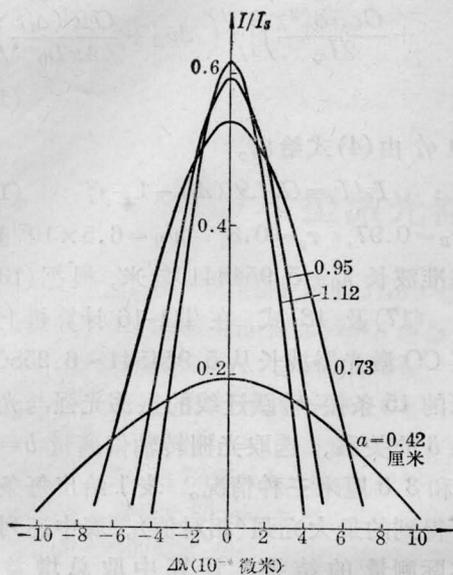
其中 $G_0 = g_0 l$

二、结果及讨论

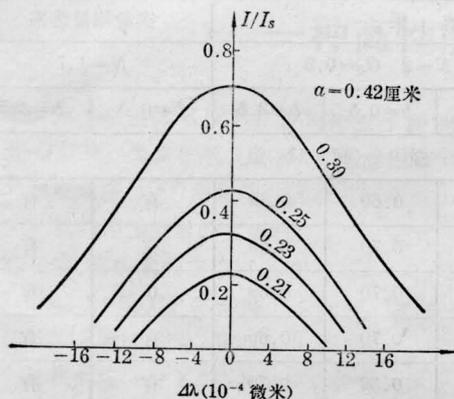
设 λ_0 满足 (1) 式, 下面具体分析腔的色散特性及转动调谐特性。

1. 色散特性

由公式 (12)、(3)、(2) 及 (11), 我们计算了激光振荡相对强度与 $\lambda - \lambda_0$ 的关系。取 $r_B = 0.97$, $r_g = 0.8$, $\Delta\nu_H = 6.5 \times 10^7$ 赫, $L_0 = 150$ 厘米, $\lambda_0 = 5.48960$ 微米。图 2(a) 画出当 $G_0 = 0.21$ 时不同光束截面振荡光的相对强度与 $\lambda - \lambda_0$ 的关系。由图可见, 当平行平



(a) $G_0=0.21$, 腔内光束截面分别为: $a=0.42$, 0.73, 0.95, 1.12 厘米



(b) $a=0.42$ 厘米, G_0 分别为 0.21, 0.23, 0.25, 0.30

图 2 激光振荡相对强度 I/I_s 与 $\lambda-\lambda_0$ 的关系

面光栅腔中光束截面的半径为 0.42 厘米时, 允许振荡的波长范围为 $\pm 10.6 \text{ \AA}$, 而当腔内光束扩大 2.7 倍后, 允许振荡的波长范围为 $\pm 4 \text{ \AA}$ 。可见光束越大, 腔对波长的分辨率越好。图 2(b) 画出对一固定光束截面 $a=0.42$ 厘米, 取不同的增益时, I/I_s 与 $\lambda-\lambda_0$ 的关系。谱线增益越小, 腔对波长的选择性也越好, 这也是容易理解的。

2. 光栅转动时, 各条谱线的调谐特性

图 3 画出了第 i 条线与作为基准的 $i=0$ 的线, 随着 δ 变化其纵模相对于线型位置变化示意图。设第 i 线增益线型中心波长为 λ_{i0} (频率为 ν_{i0}), 第 i 线振荡时的波长为 λ_i (频率为 ν_i)。

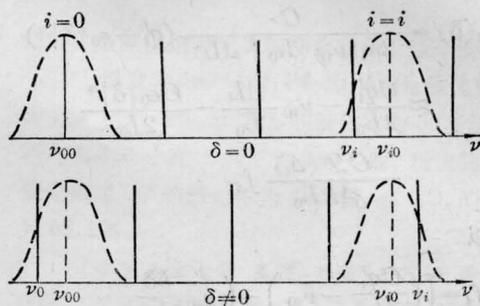


图 3 光栅转动时, 纵模位置的示意图

假设在转角 $\delta=0$ 时, $i=0$ 的线振荡频率正好落在增益线型的中心: $\nu_0=\nu_{00}$ ($\lambda_0=\lambda_{00}$) (参考图 3), 由公式 (2) 及 (3) 可得到光栅转过 δ 后, 第 i 条线的单程 (TEM₀₀ 模) 损失为:

$$\mathcal{L}(\Delta_i) = 0.138 N^{-3/2} + 4.83 N^{1/2} \left(\frac{a \Delta_i}{\lambda_0} \right)^2 + \ln \frac{1}{\sqrt{r_B r_g}} \quad (13)$$

其中

$$\Delta_i = \frac{\lambda_i - \lambda_0}{2d \cos i_0} + \delta \quad (14)$$

当 $\delta=0$ 时, i 线的振荡频率 ν_i 为:

$$\nu_i^{(0)} = \frac{C}{2n_i(\nu_i^{(0)})L_0} q_i' \quad (15.1)$$

当 $i=0$ 时, $\nu_0^{(0)} = \frac{C}{2L_0} q_0'$, 光栅转过一小角度 δ 后, 一方面腔长有一微小变化 (式 (9)), 另一方面又因相移引起频率改变:

$\lambda = \lambda_0$ 时:

$$\nu_0 = \frac{C}{2n_0(\nu_0)L} (q_0' - \epsilon_0 |\delta|^\alpha) \quad (15.2)$$

$\lambda = \lambda_i$ 时:

$$\nu_i = \frac{C}{2n_i(\nu_i)L} (q_i' - \epsilon_0 |\delta|^\alpha) \quad (15.3)$$

折射率:

$$n_{\beta}(\nu_{\beta}(\delta)) = 1 + \frac{C}{4\pi\nu_{\beta}} f_{\beta} \mathcal{L}(\Delta_{\beta}) \quad (16)$$

β 代表 $0, i$ 。

$$f_{\beta} = \frac{\nu_{\beta} - \nu_{\beta 0}}{\Delta\nu_{H}}$$

将 ν_i 围绕 $\delta=0$ 展开:

$$\begin{aligned} \nu_i(\delta) &= \frac{C}{2n_i(\nu_i)(L_0 + \Delta L)} (q'_i - \epsilon_0 |\delta|^{\alpha}) \\ &\approx \frac{Cq'_i}{2L_0} - \nu_{i0} \frac{\Delta L}{L_0} - \frac{C\epsilon_0 |\delta|^{\alpha}}{2L_0} \\ &\quad - \frac{C\mathcal{L}(\Delta_i)}{4\pi L_0} f_i \end{aligned}$$

所以

$$f_i = \left[\left(\frac{Cq'_i}{2L_0} - \nu_{i0} \right) - \left(\nu_{i0} \frac{b\delta}{L_0} \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{C\epsilon_0 |\delta|^{\alpha}}{2L_0} \right) \right] / \left(\Delta\nu_H + \frac{C\mathcal{L}(\Delta_i)}{4\pi L_0} \right) \quad (17)$$

其中 q'_i 由(4)式给出。

$$I_i/I_s = G_0/\mathcal{L}(\Delta_i) - 1 - f_i^2 \quad (18)$$

设 $r_B=0.97$, $r_g=0.8$, $\Delta\nu_H=6.5 \times 10^7$ 赫, 取基准波长 $\lambda_0=5.954841$ 微米, 根据(13)、(14)、(17)及(18)式, 在 TQ-16 计算机上计算了 CO 激光器波长从 $5.954841 \sim 6.258077$ 微米的 15 条振-转跃迁线的振荡光强与光栅转角 δ 的关系。选取光栅转轴偏离量 $b=0, 0.5$ 和 3.5 厘米三种情况。表 1 给出每条谱线可得到的最大光强(相对值)。表中还列出了实际测量的结果。计算中取总增益为

表 1 离轴光栅腔与非离轴光栅腔对谱线调谐的比较

波长(微米)	条 件							
	理 论 计 算 结 果						实 验 测 量 结 果	
	N=2 G ₀ =0.203			N=2 G ₀ =0.3			N=1.7	
	b=0.0	b=0.5	b=3.5	b=0.0	b=0.5	b=3.5	b=0.0	b=3.5
振 荡 光 强 (相 对 值)								
5.9548 P17-16(14)	0.14	0.14	0.14	0.69	0.69	0.69	有	有
5.9634 P16-15(21)	0.14	0.15	0.14	0.69	0.70	0.69	有	有
5.9955 P17-16(17)	0.04	0.15	0.16	0.59	0.70	0.69	0	有
6.0094 P17-16(18)	0	0.15	0.14	0.30	0.70	0.69	有	有
6.0238 P17-16(19)	0.14	0	0.15	0.56	0.39	0.70	有	有
6.0308 P18-17(13)	0	0.15	0.15	0.28	0.70	0.70	有	有
6.0576 P18-17(15)	0	0	0.15	0.54	0.33	0.70	有	有
6.0854 P18-17(17)	0.16	0.15	0.15	0.71	0.71	0.71	有	有
6.0996 P18-17(18)	0.03	0	0.15	0.58	0.51	0.71	0	有
6.1355 P19-18(14)	0.12	0	0.13	0.67	0.37	0.67	有	有
6.1494 P19-18(15)	0.15	0	0.12	0.70	0.39	0.65	有	有
6.1778 P19-18(17)	0	0.13	0.14	0.43	0.69	0.71	有	有
6.1923 P19-18(18)	0	0	0.14	0.37	0.35	0.68	0	有
6.2070 P19-18(19)	0	0	0.14	0.33	0.36	0.61	0	有
6.2581 P20-19(16)	0	0.14	0.14	0.19	0.69	0.69	0	有

* 实验条件: 对弱线 $G_0 \approx 0.2$, 而强线 $G_0 \approx 0.25$, 15 条线的增益皆不同。为了简单未一一计算。

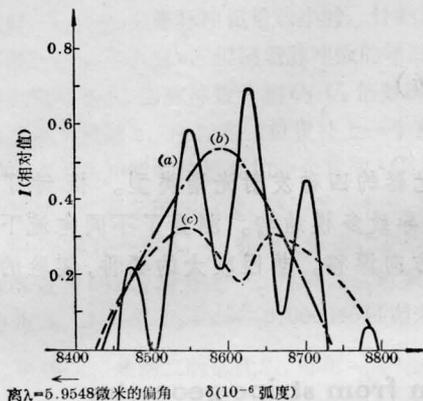
$G_0=0.203$ 。结果表明：用离轴量 $b=3.5$ 厘米的光栅调谐，15 条线全都可以被选出来。但若取 $b=0.5$ 厘米及 0（非离轴光栅腔），各有 7 条谱线被漏掉。实验中用 $b=3.5$ 厘米光栅腔调，15 条线都可被选出，用 $b \approx 0$ 的光栅腔调，有 5 条线漏掉。虽然并未完全达到定量的符合，这一方面是实验条件与计算条件并不完全一致，如 G_0 的大小， b 是否真正

为零。另一方面实验时（对 $b=0$ 的情况）并非 5.954841 微米这条线满足 λ_0 的条件，以及实验中因振动引起的频率抖动。但是实验确实证实了上述现象的存在。

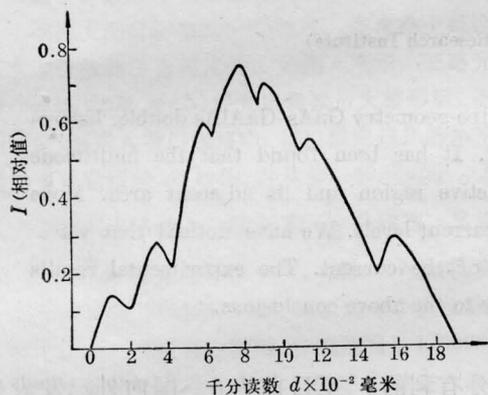
此外从表中还看出用离轴光栅腔每条线的强度都比非离轴情况高。也就是说用离轴光栅腔可以将每条谱线的纵模位置调到接近增益线型中心，获得最佳输出，并且 b 越大，这种调整也越精细。

3. 转动光栅时，每条谱线光强的周期性变化

当采用离轴光栅腔转动光栅时，每条谱线强度都出现周期性起伏，这与 $b=0$ 的情况不同，这显然是因腔长变化的原因。图 4 画出 $\lambda=6.05760$ 微米线， δ 变化时光强变化的情况。图 4(上)是按 $N=2$ ， $G_0=0.3$ ， I/I_s 与 δ 关系的计算结果。图 4(下)是实测结果。



(a) (实线) $b=3.5$; (b) (点划线) $b=0.0$
(c) (虚线) $b=0.5$



(上图) 计算结果; (下图) 实验测量;

图 4 转动光栅对谱线光强的调谐特性

$\lambda=605760$ 微米

三、结 束 语

以上所述都是单纵模激光器为前提的。如果器件比较长，振荡以多纵模运转时，为了使 CO 选支激光器选出更多的谱线，我们曾利用过复合光栅腔办法^[4]，为了防止漏线和增加波长分辨率，还加了压电陶瓷以调节“辅助腔长”，但从本文分析来看，若适当选择参数 b ，也可以不加压电陶瓷达到同样目的。

参 考 文 献

- [1] 王裕民;《激光》,1982,9, No.6, 365.
- [2] 激光物理编写组;《激光物理》,1975年.
- [3] W. H. Wells; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1966, QE-2, No. 5, 94.
- [4] 王裕民等;《科学通报》,1980, No. 24, 1116.