

用于超高分辨光谱学的红外 环行选支激光腔

黄永楷

(中国科学院上海光机所)

提要: 提出了一种简单方便的选支方法,并且计算了光腔的光束参数。

Branch-selected infrared laser ring cavity for ultra-high resolution spectroscopy

Huang Yongkai

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

Abstract: A simple method for branch-selection is suggested and the beam parameters for the cavity are calculated.

一、引言

获得超窄共振的光谱方法已有多种^[1],但环行腔中的超窄共振却具有自身的特点^[2]。据报导利用这种方法已可得到比均匀线宽小一百倍的谱线宽度^[3],而且也可使激光的频率稳定度达到 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 的量级,而频率的复现已可达到 10^{-14} [4]。

但这一方面的工作主要是在 He-Ne/CH₄ 和 He-Ne/Ne 的原子激光系统上作的。为了要把这种方法推广到谱线十分丰富的红外光谱区,同时用环行分子激光器作光源(如 CO 和 CO₂ 激光器等),这时便会碰到一个问题,即利用什么方法才能方便有效地对激光谱线进行选支,并能保持腔内两个相向行波的强度基本相等,以便对几种竞争效应的应用提供更多的选择余地。

这里提出了一种简单有效的解决方法,同时给出了计算腔内光束参数的公式和腔的稳定性判据。

二 选支方法

利用光栅选支是一种很方便的方法。但有一个问题,即一般的定向光栅,只有在定向角附近才有高的集光效率。因而,也只有在该角处与另一反射镜构成谐振腔才有较高的 Q 值。这一点我们可用图 1 来说明。设 α 为光栅的定向角,光线入射角为 ψ ,衍射角为 φ ,并令 $\psi = \alpha - x$, $\varphi = \alpha + x$,根据光栅公式(入射光与衍射光在光栅法线同侧取 +)

$$\sin \psi + \sin \varphi = 2 \sin \alpha \cos x = \frac{n\lambda}{d} \quad (1)$$

收稿日期: 1981年11月20日。

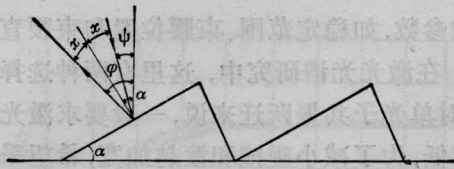


图1 定向光栅

式中 d 为光栅常数; λ 为波长; n 为衍射级次。从能量集中的观点看, 显然, 对某一波长来说, 只有同时满足光栅方程又符合光栅刻槽的镜面反射定律时才有可能。因此, 在这种情况下, 就要求 $\alpha=0$, 即 $\psi=\varphi$, 这时, 光强最集中, 光腔的 Q 值最高。但是用这种布置方式, 一般是驻波腔, 即使采用零级衍射输出来形成环行腔, 也是一种沿两个相反传播方向行波场强不等的环行腔, 故它不能满足两个行波场强相等的要求。

为了克服以上困难, 我们提出如下解决办法。图 2 示出了本方法的光路图。光栅沿 O 轴转动进行选支, 而激光回路则始终处于光栅的一级衍射平面内。无论光栅的转角如何, 激光在光栅上的反射角 θ 永远保持不变, 故这种结构既保证了入射角 ψ 等于衍射角 φ , 可使光腔的 Q 值很高, 同时又保证了两个相反方向传播的行波强度相等的要求, 这就为环行腔中出现窄频宽共振效应创造了条件。激光的耦合输出要视光栅的质量而定。如果光栅的一级衍射的效率很高, 则可采用腔片的透过耦合输出; 但如果光栅的零级衍射耦合较大, 则可采用零级耦合输出。

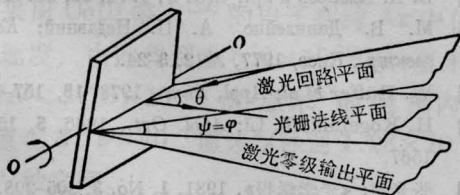


图2 环行腔光栅选支图

三、光腔设计

1. 腔型选择

普通的气体激光环行腔都是采用三角形

或四边形。为了使腔具有较好的稳定性, 腔内通常都采用了一面或几面球面反射镜。由于光线以较大的掠角在球面反射镜上入射和反射, 因而不可避免地出现了象散和彗差, 从而给激光振荡和光束特性带来不利影响。

为了克服这一缺点, 我们可以采用对称 X 形的环行腔结构。这样作的目的, 有利于减小光线在球面镜上的反射角。这不仅可以减小象散的影响, 而且还可以自动补偿彗差^[5]。当然, 又出现了一个新的问题, 即占空比(有增益介质与无增益介质光程之比)相对说来较小, 因而大气对流、环境温度和振动对腔频的影响也就可能增大。此外, 当腔宽 $\Delta\nu_L$ 小于增益线宽 $\Delta\nu_G$, 即

$$\Delta\nu_L = \frac{c}{L} < \Delta\nu_G \text{ (赫)} \quad (2)$$

时, 还将产生多纵模振荡, 式中 L 为腔的周长; c 为光速。但这个问题可以采用一个子腔来加以解决, 如图 3 所示。只要子腔的腔宽 $\Delta\nu_i = \frac{c}{l}$ (l 为子腔周长) 满足以下不等式

$$\Delta\nu_i > \Delta\nu_G > \Delta\nu_L \text{ (赫)} \quad (3)$$

即可获得单纵模振荡。而且, 这时对激光频率的稳定, 亦只需重点考虑子腔的稳频即可。这对大功率环行激光器的稳频来说是有意义的。

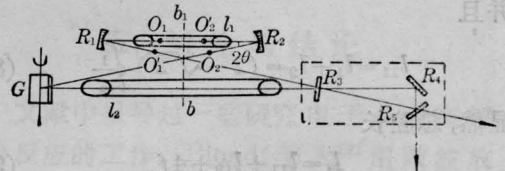


图3 X型环行激光腔

R_1, R_2 —球面反射镜; R_3, R_4, R_5 —平面反射镜;
 G —光栅; l_1 —增益管; l_2 —吸收管

2. X型共振腔的参数计算

用于超高分辨率激光光谱研究的环行激光器, 一般在腔内需要放置增益管和吸光管。因此采用一种如图 3 所示的腔是合适的。这种腔在满足稳定性判据^[6]

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1 \quad (3)$$

的前提下(A, D 为环行腔的 $ABCD$ 光学矩阵的矩阵元),利用[7]中提出的分离参数法,便可以简单方便地确定谐振腔的其余参数。当然,亦可利用 $ABCD$ 矩阵来求出。

例如,我们要设计一种 CO_2 对称X型环行激光腔,这种腔的稳定性判据,由(3)式得

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_1 L_2}{2(L_1 + L_2)} \leq f \leq \frac{L_1}{2} \\ \text{或} \\ f \geq \frac{L_2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

L_1 为两球面反射镜之间的距离; L_2 为其余腔长; $f=f_1=f_2=\frac{R}{2}$ 为球面反射镜焦距。

根据自洽要求,此腔中(见图3)高斯光束的共焦参数^[7],显然有如下关系,即

$$b_1 = b_2 = \sqrt{2} f^2 / l_{12} \quad (5)$$

和

$$l_1 = l_2 = (1 - \sqrt{2} / 2) f^2 / l_{12} \quad (6)$$

式中 l_1 为束腰离 R_1 左焦点 O_1 左边的距离; l_2 为束腰离 R_2 右焦点 O_2 右边的距离; l_{12} 为焦点 O_1 与 O_2 之间的距离。同时该高斯光束在 O_1, O_2 的正中间还有一个束腰,其共焦参数为

$$b = (\sqrt{2} + 1) l_{12} \quad (7)$$

并且

$$l_{11} = l_1 + l_2 = (2 - \sqrt{2}) \frac{f^2}{l_{12}} \quad (8)$$

显然,总腔长

$$L = l_{11} + l_{12} + 4f, \quad (9)$$

而束腰孔径则为

$$2\omega_1 = 2\sqrt{\frac{\lambda b_1}{2\pi}}. \quad (10)$$

利用以上关系式,便可确定谐振腔所需

要的参数,如稳定范围、束腰位置和束腰直径等。在激光光谱研究中,这里有两种选择方式:对单光子共振跃迁来说,一般要求激光功率较低,为了减小碰撞和渡越加宽,希望采用极低的吸收气压和较大的光束孔径。这时,我们可以采用较小的 f 值和较大的 l_{12} 值,吸收管便放在此长臂中,而增益管则放在短臂中;另一方面,对于双光子共振跃迁来说,这时要求有较高的激发功率。因此,可将增益管和吸收管倒过来放置,便可达到这一目的。例如在满足稳定性判据的条件下,我们令 $f=0.3$ 米, $l_{12}=4.0$ 米,由(5)得 $b_1=0.04$ 米,由(10)得 $2\omega_1 \approx 0.5$ 毫米(取 $\lambda=10$ 微米),由(7)式得 $b=9.66$ 米, $2\omega=7.8$ 毫米, $l_{11} \approx 141$ 毫米。总腔长为 $L=5.214$ 米。若增益管为0.6米,可以得到大于5瓦的 CO_2 激光功率。吸收管可作到1.2米长,管径取 $2\omega/0.3=26$ 毫米。对于需要强激发的光谱研究,可以进一步减小 b_1 ,增大 l_{12} ,使短臂光腰处的功率密度达到400瓦/毫米²是不成问题的。但在这种情况下通过荧光检测来收集光谱信息,显然是更为合理的。

参 考 文 献

- [1] Edit. K. Shimoda; "High-Resolution Laser Spectroscopy", Springer-Verlay, New York, 1976.
- [2] М. В. Данилейко, А. П. Недавний; *Кван. электр.*, Киев, 1978, №14, 3-23.
- [3] В. А. Алексев и др.; *ЖЭТФ*, 1974, **66**, 887-893.
- [4] М. В. Данилейко, А. П. Недавний; *Кван. электр.*, Киев, 1977, №12, 3-24.
- [5] W. Hüffer et al.; *Appl. Phys.*, 1978, **15**, 157-161.
- [6] Н. Kogelnik, Т. Li; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, 1550-1567.
- [7] 张光寅; 《光学学报》, 1981, **1**, No. 3, 205-203.