

方向稳定 He-Ne 激光器谐振腔的设计*

陆治国 顾 樵 杨采华
(西北大学物理系)

提 要

本文从谐振腔的角度研究 He-Ne 激光的方向稳定性问题。首先求出共焦腔在反射镜对称倾斜时的本征模式, 由此讨论其输出激光的方向飘移。然后借助共焦腔与平凹腔的等价关系从理论上求得方向稳定的平凹腔的凹面镜曲率半径与腔长的比值 β 应等于 1。综合考虑平凹腔的稳定工作区域和强度稳定性的要求, β 值应大一些。试制了 $\beta=1.2$ 的 He-Ne 激光器测量结果表明方向稳定性明显提高。

一、失调共焦腔的本征模式

图 1 是一个调准的共焦腔, 腔长为 L , 反射镜曲率半径为 R , $R=L$, 腔轴为 z 轴。这种腔的反射镜倾斜时, 总可以把倾斜归结为在一个方向上发生。因此从理论上只需要讨论一个二维谐振腔就可以说明问题了。反射镜倾斜的二维共焦腔如图 2 所示, a 是反射镜的半宽度。假定某个瞬时两个镜的倾斜归结为在 x 方向发生, 而且每个镜对于图 1 的调准位置都向里倾斜角度 θ 。下面计算这个瞬时失调腔的横向本征模式。这时的横向本征模式所满足的积分方程与调准时横向本征模式的积分方程^[1]相比要附加一个倾斜相因子 $e^{iK\theta(x_1+x_2)}$, 即

$$\gamma E(x_2) = \left(\frac{i}{\lambda L} e^{-i\kappa L}\right)^{1/2} \int_{-a}^a E(x_1) \exp\left\{iK \left[\frac{x_1 x_2}{L} + \theta(x_1 + x_2)\right]\right\} dx, \quad (1)$$

其中 λ 、 K 分别为激光的波长和波数, γ 是方程(1)的本征值。为解方程(1), 引入下面的变换 $X_1 = \frac{\sqrt{N}}{a} x_1$, $X_2 = \frac{\sqrt{N}}{a} x_2$,

其中

$$N = \frac{K a^3}{L} \quad (2)$$

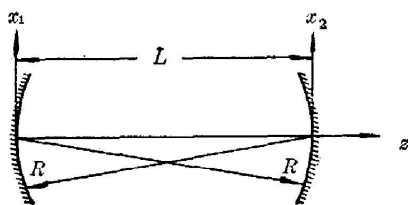


图 1 调准的共焦腔

Fig. 1 The aligned confocal cavity

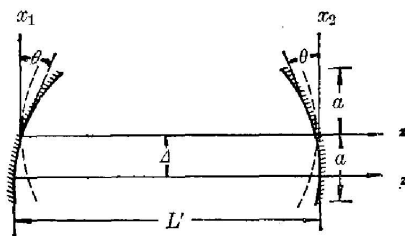


图 2 对称倾斜的共振腔

Fig. 2 The symmetrically tilted confocal cavity

收稿日期: 1983年11月16日

* 本文曾在“1983年全国激光工业应用技术交流会”上报告。

是调准腔的非涅耳数。这时(1)式变为

$$\gamma E(X_2) = \left(\frac{ie^{-iKL}}{2\pi}\right)^{1/2} \int_{-\sqrt{N}}^{\sqrt{N}} E(x_1) \exp\left\{i\left[x_1x_2 + \frac{Ka\theta}{\sqrt{N}}(x_1+x_2)\right]\right\} dx_1 \quad (3)$$

下面要消去上式被积函数中的倾斜相因子。在图2中,设两镜面曲率中心所确定的直线为 z' 轴, z' 轴被两镜面所截的长度为 L' , z' 轴与 z 轴的间距为 Δ 。倾斜不严重时,即

$$\Delta \ll a \quad (4)$$

的条件下有

$$L' \approx L, \quad (5)$$

而 Δ 可以写为 $\Delta = L\theta$ 。对于失调腔中位于 z' 轴上下的两个部分,可以形式地定义两个非涅耳数,即

$$N_\alpha = \frac{K(a-\Delta)^2}{L'}, \quad (6a)$$

$$N_\beta = \frac{K(a+\Delta)^2}{L'}. \quad (6b)$$

注意到(5)式以后,上面二式可以近似表示为

$$N_\alpha = N\left(1 - \frac{\Delta}{a}\right)^2, \quad (7a)$$

$$N_\beta = N\left(1 + \frac{\Delta}{a}\right)^2. \quad (7b)$$

再引入变量代换: $U_1 = X_1 + \frac{\Delta}{a}\sqrt{N}$, $U_2 = X_2 + \frac{\Delta}{a}\sqrt{N}$, (3)式可变为

$$\gamma E(U_2) = \left(\frac{ie^{-iKL}}{2\pi}\right)^{1/2} e^{-iN\left(\frac{\Delta}{a}\right)^2} \int_{-\sqrt{N_\alpha}}^{\sqrt{N_\beta}} E(U_1) e^{iU_1U_2} dU_1. \quad (8)$$

上式表明已消去了倾斜相因子,但积分限变为不对称的了。(8)式可以写成两项之和,即

$$\gamma E(U_2) = \left\{ \int_{-\sqrt{N_\alpha}}^{\sqrt{N_\alpha}} + \int_{-\sqrt{N_\beta}}^{\sqrt{N_\beta}} \right\} K(U_1, U_2) E(U_1) dU_1, \quad (9)$$

其中

$$K(U_1, U_2) = \left(\frac{ie^{-iKL}}{2\pi}\right)^{1/2} e^{-iN\left(\frac{\Delta}{a}\right)^2} e^{iU_1U_2}. \quad (10)$$

考察(9)的两项积分的区间,第一个积分的区间是

$$m_1 = \sqrt{N_\alpha} - (-\sqrt{N_\alpha}) = 2\sqrt{N_\alpha} = 2\sqrt{N}\left(1 - \frac{\Delta}{a}\right),$$

第二个积分的区间是

$$m_2 = \sqrt{N_\beta} - \sqrt{N_\alpha} = 2\sqrt{N} \frac{\Delta}{a}.$$

考虑到失调不严重的条件(5)有 $m_2 \ll m_1$,因此(9)式中的第二个积分可以忽略,从而变成

$$\gamma E(U_2) = \int_{-\sqrt{N_\alpha}}^{\sqrt{N_\alpha}} K(U_1, U_2) e^{iU_1U_2} dU_1. \quad (11)$$

从形式上看,(11)式正是我们熟知的以 N_α 为非涅耳数的二维共焦腔的积分方程,在镜面中心区域,它的解为厄密-高斯函数,即

$$E_m(U_2) = A_m H_m(U_2) e^{-\frac{1}{2}U_2^2}, \quad (12)$$

其中 A_m 为常数, H_m 为 m 阶厄密多项式。化成以 x_2 为变量的函数后得到

$$E_m(x_2) = A_m H_m \left[\frac{\sqrt{c}}{a} (x_2 + \Delta) \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{N}{a^2} (x_2 + \Delta)^2 \right], \quad (13)$$

这就是二维谐振腔在图 2 失调情况下的横向本征模式。

二、激光方向的飘移和平面腔的设计

1. 失调共焦腔激光方向的飘移

由(12)式中厄密多项式的宗量可以看出,在共焦腔反射镜对称倾斜时,光束的输出方向不再是 z 轴而是距它为 Δ 的 z' 轴。这一点从物理上也是容易理解的, z' 轴与倾斜的两个镜面都正交,因此沿 z' 轴方向容易形成稳定的激光振荡。如果两个镜面固定在图 2 的位置不动,这样尽管光束对 z 轴有一段平移量 $\Delta = L\theta$,但其方向总是稳定在 z' 轴方向。问题是两个镜面在图 2 的位置附近不断地振动, θ 角不断变化,于是输出光束对 z 轴的平移量就不断变化。

如果两个镜面的倾斜是反对称的,即如图 3 所示,左侧的反射镜向里倾斜 θ 角,右侧反射镜向外倾斜 θ 角。设这时两镜面曲率中心所确定的直线为 z'' 轴,显然 z'' 轴与 z 轴的夹角为 2θ ,这时输出光束的方向是与两个镜面都正交的 z'' 轴方向。当两个镜面在图 3 的位置附近不断振动时,输出光束的方向在 2θ 附近不断变化。

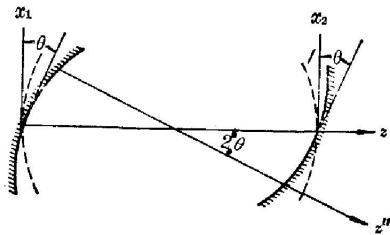


图 3 反对称倾斜的共焦腔

Fig. 3 The antisymmetrically tilted confocal cavity

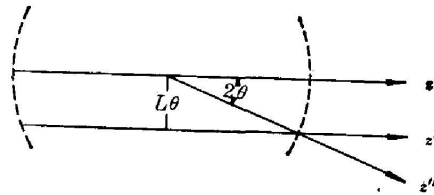


图 4 两种倾斜输出光束方向比较

Fig. 4 Comparison of laser beams direction for different conditions

下面对这两种失调情况下光束横向飘移量进行比较。对称失调时,每个镜面的倾斜角为 θ ,则输出光束对 z 轴的平移量为 $L\theta$;反对称失调时,若每个镜面的倾斜角仍为 θ ,则输出光束对 z 轴的旋转角为 2θ 。由图 4 可以看出对称失调时,输出激光横向飘移量 $L\theta$ 不随纵向距离变化;而反对称失调时,输出激光横向飘移量随着纵向距离的增大而线性地增大。可见,就光束方向稳定性而言,反对称失调比对称失调的危害大得多。

2. 具有稳定光束方向的平凹腔设计

设计方向稳定谐振腔是出于这样的考虑:对于共焦腔来说,宁可让反射镜在图 2 的位置附近振动,而不能按图 3 的情况振动。在这个前提下,进一步考虑能否选取恰当的谐振腔参数,使得镜面在图 2 的位置附近振动时,虽然 θ 不断变化,而 Δ 却能保持不变,即光束方向不变。这就是要求 $d\Delta/d\theta = L = 0$,对于共焦腔来说,这个条件是没有意义的。但我们知道 He-Ne 激光器常用平凹腔,它的腔长 L ,凹面镜曲率半径 R 与等价共焦腔的腔长 $L_{\text{等价}}$ 有下面的关系^[2]: $L_{\text{等价}} = 2\sqrt{L(R-L)}$,根据这个关系可知,凹面镜曲率半径和腔长相等的平凹腔等价于腔长为零的共焦腔。因此,对于平凹腔,从理论上说当 $\beta \equiv R/L = 1$ 时,输出激光的方向稳定性最好。

但是 $\beta=1$ 的平凹腔是临介腔, 为使腔工作在稳定区, 同时兼顾强度的稳定性, β 值应取得大一些^[3, 4]。我们在实验中按 $\beta=1.2$ 作成了 He-Ne 激光器。下面是有关的测试结果。

三、测试结果

图 5 是记录激光方向飘移的实验装置图。发自 He-Ne 激光器的激光进入目标(四块光电池)后, 光束在水平和垂直两个方向的飘移量被转变成两组电信号输入 JZF-1 型激光放大器, 经放大后再输入到双向记录仪上, 记录纸上直接描出光束在水平和垂直两个方向上飘移量随时间变化的两组曲线。采用如下办法来标定飘移量: 以水平方向为例, 在光束方向比较稳定的时机, 人为地将目标在 x 方向移动, 这相当于光束向相反方向飘移, 测出

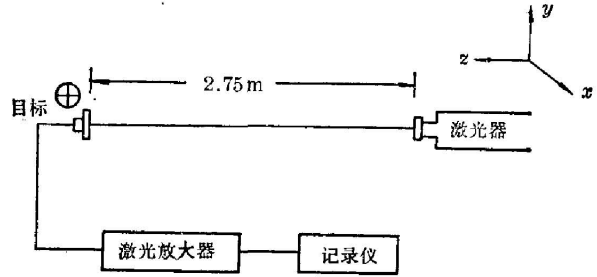


图 5 实验装置

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental set-up

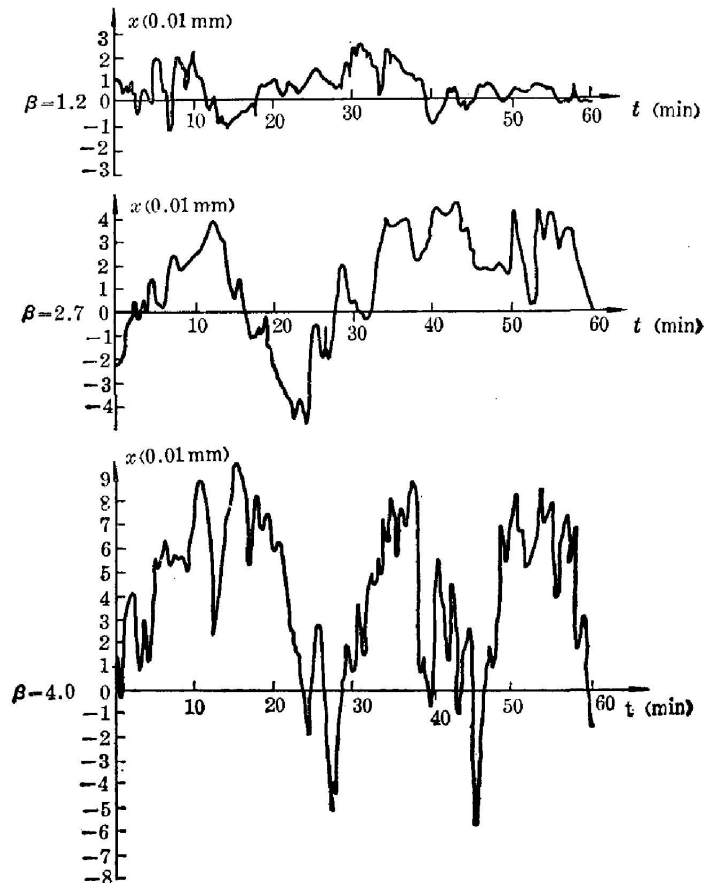


图 6 三种 β 值谐振腔激光方向飘移比较

Fig. 6 Comparison of the shift of the laser direction different conditions

目标平移 0.01 mm (目标的平移量用百分表控制)所对应的记录针偏离的毫米数,从而得到单位为丝/毫米的定标因子。

我们试制了 β 值分别为 1.2, 2.7, 4.0 的三只 He-Ne 激光管(其腔长近似相等),对它们的输出光束飘移进行了测量。图 6 是开机四小时后激光束在 x 方向飘移量随时间变化的曲线。由图中可以明显看出,就光束方向稳定性而言, β 值为 2.7 的管子比 4.0 的好,而 β 值为 1.2 的管子是三只中最好的。

参 考 文 献

- [1] G. D. Boyd, J. P. Gordon; *Bell. Sys. Tech. J.*, 1960, **40**, No. 2 (Mar), 489.
- [2] 周炳昆等;《激光原理》, (国防工业出版社, 1980), 336.
- [3] 陆治国;《西北大学学报》, 1979, No. 1, 72.
- [4] 陆治国;《激光》, 1978, No. 5~6, 65.

Resonator design of He-Ne laser with stabilized beam direction

LU ZHIGUO GU QIAO AND YANG CAIHUA
(Department of Physics, Northwest University)

(Received 16 November 1983)

Abstract

Unstable beam direction of the laser is caused by many factors. The important one is that the tilt of reflector in resonator is not stable. This article studied the way to stabilize the beam direction of a He-Ne laser by stabilizing the angle of the resonator. First the eigen-modes of confocal cavity in which the reflector is symmetrically tilted have been calculated, and the shift of the laser beam in direction for this cavity has been discussed. For the flat-concave cavity with stabilized beam direction, $R/L=1$ has been found out theoretically by means of equivalence of confocal and flat-concave cavity. In consideration of the stable region for the flat-concave cavity and the stability of laser intensity should be larger. The He-Ne laser of $\beta=1.2$ has been made, for which the directional stability is evidently better.