

## 测量光学参考腔稳定度的偏振法

邵中兴 许凤鸣

(中国科学院长春光机所)

**提要:** 报告一种测量光学参考腔稳定度的偏振方法。以稳定度为  $2 \times 10^{-10}$  (采样时间 0.01s) 的 He-Ne 激光器用该法实际测量了一个参考腔的稳定度为  $1.3 \times 10^{-9}$ 。

### Measuring stability of optical reference cavities by analysing polarization spectrum

Shao Zhongxing, Xu Fengming

(Changchun Institute of Optics & Fine Mechanucs, Academia Sinica, Changchun)

**Abstract:** A polarization method for measuring the stability of optical reference cavities is reported. Measurement with  $I_2$  stabilized He-Ne laser (the stability is less than  $2 \times 10^{-10}$ ) and sampling time of 0.01s confirmed that the stability of a tested cavity was about  $1.3 \times 10^{-9}$ .

高分辨率激光器的应用要求高稳定度的激光输出频率(一般  $< 10^{-8}$ )。但是工作中的激光器受周围环境的影响,很难达到高稳定状态。光学参考腔的结构可做得抗干扰能力强,所以在一些稳频方法中经常采用高稳定度的参考腔来控制激光器共振腔以达到稳频的目的。那么,如何测量参考腔的稳定度,对激光稳频工作来说就是很有意义的了。这里报告一种利用分析被测腔与参考光形成多光束干涉的偏振光谱而得到的信号,定量测量参考腔稳定度的方法。

设强度为  $I_1$ , 它作为测量参考光入射到被测参考腔耦合镜  $M_1$  上, 其透过率为  $T$ 。如图 1 所示, 一部分被直接反射, 一部分透射进腔内。透射光受偏振片  $P$  (其偏振轴与入射面夹角为  $\theta$ ) 作用而旋转了  $\theta$  角, 从腔内出来后与直接反射光相干形成偏振光的多光束干涉。干涉强度与  $M_1$  透射率  $T$ 、偏角  $\theta$  及腔的损

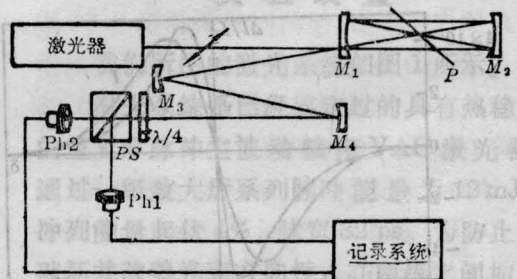


图1 偏振法测量光学参考腔稳定度的实验装置

一束相当稳定的、水平偏振的单频激光,

收稿日期: 1985年10月7日。

耗  $R$  (腔内相邻两个来回的振幅比) 有关, 特别是与被测腔膜和参考光间的位相差  $\delta$  有关。共振时腔内振幅达到最大, 而腔外干涉极小, 因为透射光与直接反射光位相相差  $\pi$ 。而且共振时电矢量呈平面偏振状态, 非共振时呈椭圆偏振态, “椭”的程度随  $\delta$  而变。经过  $\lambda/4$  波片和分光棱镜组成的偏振光分析系统, 分别得到两支 Haidinger 条纹的强度作为  $\delta$  函数的分布曲线  $I_a(\delta)$ 、 $I_b(\delta)$ 。需要指出的是它们对  $\delta$  的分布不是一致的, 比较图 4 中上下两条曲线可以看出, 不仅两条曲线的透过峰的宽度不同, 而且透过峰的位置也不一样。实际上  $\theta$  角的放置总是使得透射光 (转了  $\theta$  角) 的垂直分量 (相当于  $I_b$ ) 是高损耗的, 即它在腔内相邻两个来回的振幅比  $R$  比较大。所以它们的干涉合成振幅与  $\delta$  的相关程度是不一样的, 两条曲线相减, 便会得到“色散型”信号<sup>[1]</sup>。

$$\Delta I = I_a - I_b = I_t \cdot 2 \sin \theta \cdot \cos \theta \times \frac{T \cdot R \cdot \sin \delta}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)} \quad (1)$$

图 2 给出了(1)式两组不同参数的曲线。从曲线可以直观看出, 整个  $\delta$  改变范围几乎都有信号输出, 峰-峰间, 特别是  $\delta = 2k\pi$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) 附近, 同样的  $\delta$  间隔,  $\Delta I$  的改变量最大, 所以测量时应把被测腔长 (或光频) 调到与光频 (或被测腔长) 共振状态。

被测腔膜与参考光间的位相差改变一个

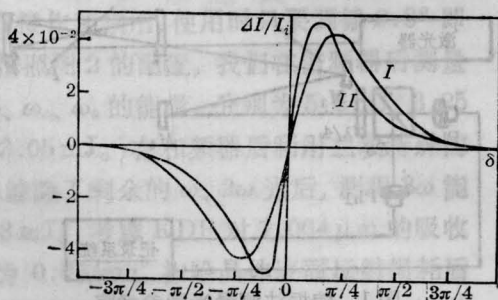


图 2  $\Delta I/I_t$  作为位相差  $\delta$  的函数曲线

I:  $T=0.4, R=0.5, \theta=5^\circ$ ;

II:  $T=0.2, R=0.7, \theta=5^\circ$

周期相当于被测腔长改变了一个自由光谱范围。根据这个对应关系就可以从测得的  $\Delta I$  改变量, 通过 (1) 式计算出对应的  $\delta$  改变量, 然后算出腔的稳定度。例如对于腔镜曲率半径  $r=10$  cm 的共焦参考腔, 其它参数与图 2 所示曲线 I 相同,  $\delta$  变化  $2\pi$ , 相当于腔长改变  $\Delta\nu = c/4r = 750$  MHz。如果测得  $\Delta I$  改变量的峰-峰值等于  $4.8 \times 10^{-2} I_t$  (如图 2 中曲线 I 所示), 位相差  $\delta$  经历了  $2\pi/4.5$  的变化, 相当于腔长改变了  $1/4.5$  个自由光谱范围, 约为 167 MHz。假设参考光频率  $\nu = 5 \times 10^{14}$  Hz, 则其稳定度  $\Delta\nu/\nu \approx 3.3 \times 10^{-7}$ 。

微分 (1) 式得:

$$\frac{d(\Delta I)}{d\delta} = A \cdot R \cdot [(1+R^2) \cos \delta - 2R] / [(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)]^2 \quad (2)$$

式中,  $A = I_t \cdot 2 \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot T$ 。

令  $\delta = 2k\pi$ , (2) 式有最大值:

$$\frac{d(\Delta I)}{d\delta} = A \cdot R / (1-R)^2$$

令  $\delta = (2k+1)\pi$ , 得: (3)

$$\frac{d(\Delta I)}{d\delta} = A \cdot R / (1+R)^2 \quad (4)$$

(3) 式除以 (4) 式, 得到两个特殊点的灵敏度比:

$$(1+R)^2 / (1-R)^2, \text{ 若 } R=0.5$$

则两处相差 9 倍。量  $d(\Delta I)/d\delta$  的两个零点, 如图 3 所示, 就是图 2 曲线中的两个峰值点。

实际扰动腔的因素可分为两类, 温度引起的慢变化和振动产生的快变化。

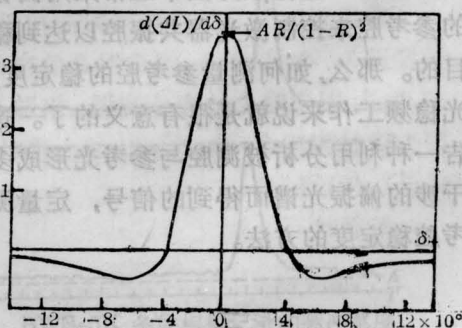


图 3 方程 (2) 的计算曲线

$T=0.4, R=0.5, \theta=5^\circ$

如果被测腔以相对低的频率和较大振幅漂移,一般是环境温度变化所致。记录仪(或示波器)扫描线表现为在  $y$  轴上慢漂。漂移是不均匀的,因  $\delta$  而异。若观测足够长的时间,例如 1 小时,利用前述对应关系,就可以得到被测腔的长期稳定度。

另一种情况是被测腔处在以相对高的频率抖动状态,一般扰动的频率为几至几百 Hz,这是机械振动干扰所致。记录仪(或示波器)的扫描线表现为在  $y$  轴上某一中心位置附近脉动,如前所述,在  $\delta = 2k\pi$  附近脉动幅度最大。反之,根据这一特征,又可以从信号幅度的大小判断出腔模与参考光频率偏离了多少。它给测量带来了很大方便。由于信号是随机扰动的结果,所以遵守正态分布。取确定时间间隔(例如 0.01, 0.1, 1s 等)信号观测值的均方根值,就可以得到被测腔的相应的时间内的短期稳定度。

客观情况是上述两种因素同时起作用,那么观测结果也将是上述两种情况叠加,即信号扫描线抖动的中心位置随时间漂移。

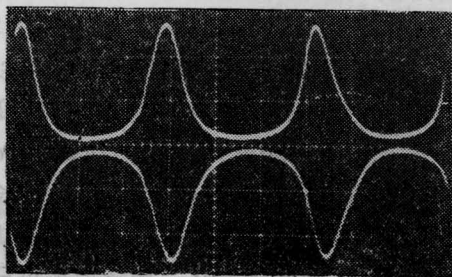


图 4  $I_a, I_b$  的实验曲线

横坐标表示位相差  $\delta$ , 纵坐标表示光强

### 三

被测腔是由两块曲率半径  $r = 10$  cm, 一块镀全反膜, 一块镀透射率  $T = 0.4$  的反射膜, 共焦放置的凹面镜构成。腔内偏振片是一块厚 1 mm 的熔石英片, 先对入射面呈 Brewster 角放置, 然后在垂直入射面方向转  $\theta$  角。为直观起见, 先利用 Lamb 凹陷稳频 He-Ne 激光器(频率稳定度为  $1 \times 10^{-8}$ )测试

了一个利用废 He-Ne 管改制的、全反镜一端粘有压电陶瓷(为扫描腔长用)的腔, 两接收器  $Ph_1, Ph_2$  是经过仔细挑选匹配后使用的。

校准测量系统的过程如下: 调整参考光的入射角, 使从被测腔出射的干涉花样是“零级”, 因为“零级”干涉可使信号幅度达到最大(被测腔是事先已经准直好了的, 可以得到“零级”干涉花样)。经过  $M_3, M_4$  准直后, 入射到棱镜上。先不加  $\lambda/4$  波片, 转动棱镜使透过光最强, 此时棱镜光轴还与出射光偏振面一致。然后加入相应波长的  $\lambda/4$  波片, 使其光轴与棱镜光轴成  $45^\circ$  角。扫描光频率(或腔长)观察  $I_a, I_b$ , 反复调整光路(例如  $\lambda/4$  波片的位置等)使它们在信号峰值附近(图 4 中记号“ $\times$ ”处)相等, 也可以使它们在最大值(图 4 中记号“0”处)相等。比较图 4 和图 5, 明显地只有“ $\times$ ”处和“0”处才对应  $\Delta I = 0$ , 或  $I_a = I_b$ 。而且“ $\times$ ”处附近  $\Delta I$  对  $\delta$  的变化率比“0”处大  $(R+1)^2/(1-R)^2$  倍。由此可以推断“ $\times$ ”处的  $\delta = 2k\pi$ , 而“0”处

$$\delta = (2k+1)\pi。$$

然后再取  $I_a, I_b$  之差, 就得到图 5 中的结果。

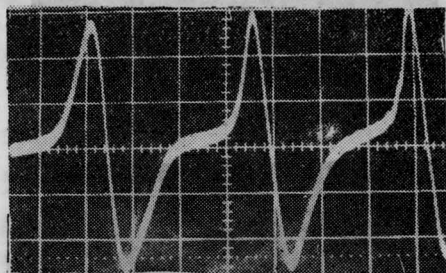


图 5  $\Delta I$  随位相差  $\delta$  变化的实验曲线

横坐标表示位相差  $\delta$ , 纵坐标表示光强差  $\Delta I$

在没有任何防震和控温措施的四楼实验室条件下测量并记录了它的稳定度(见图 6)。

作为这种方法的实际应用, 我们采用带有偏频稳频管的碘稳 He-Ne 激光器(中国计量科学研究院研制, 取样时间为 0.01 s 时阿立方差优于  $2 \times 10^{-10}$ )为参考光源, 测试了一个用石英管做腔长间隔的参考腔(参数同前, 未加恒温、隔热措施)。用 LZ3-200 型函数记录仪记录。鉴于记录仪频率响应低(时间常



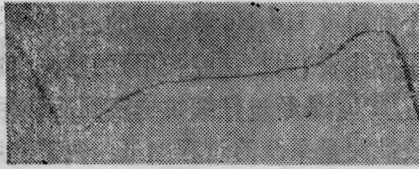


图6 一端粘有压电陶瓷的腔的稳定性测试结果

数为0.4s),不能记录快速抖动,所以采用示波器观测,然后用拍照的办法记录其短期稳定度。图7为扫描被测腔模得到的曲线。图8为腔稳定在图7中 $\delta=2k\pi$ (即过零点)附近的脉动曲线。比较图7、图8可以得到被测腔的脉动幅度为2.7MHz。取点计算其均方差约为600kHz,相当于其短期稳定度为 $1.3 \times 10^{-9}$ (取样时间为0.01s)。

要保证测量结果的可靠性,必须考虑入射光强及频率变化的影响,同时必须考虑接收器和测试电路的输出噪声。

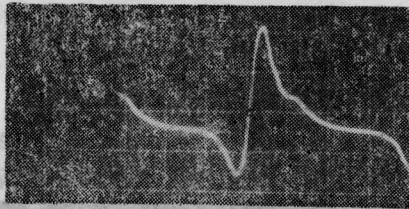


图7 为定量测量短期稳定度而扫描被测腔模得到的信号 $\Delta I$ 的幅度(记号“0”为 $\delta=2k\pi$ 处)



图8 被测腔稳定在图7所示 $\delta=2k\pi$ (即过零点,记号“0”处)的脉动曲线

所用的接收器和测试电路在没有光照情况下,从减法器输出的总噪声小于1mV,比信号幅度小 $10^{-3}$ 量级。根据误差理论:

$$[\Delta(\Delta I)]^2 = [(\partial(\Delta I)/\partial d) \cdot d_0]^2 \cdot (\overline{\Delta d/d_0})^2 + [(\partial(\Delta I)/\partial \nu) \cdot \nu_0]^2 \cdot (\overline{\Delta \nu/\nu_0})^2 + [(\partial(\Delta I)/\partial I_i) \cdot I_{i0}]^2 \cdot (\overline{\Delta I/I_{i0}})^2 \quad (5)$$

式中 $d_0$ :腔长的平均值; $\nu_0$ :入射光频率的平均值; $I_{i0}$ :入射光强的平均值; $(\overline{\Delta d/d_0})^2$ :被测腔长相对变化方差; $(\overline{\Delta \nu/\nu_0})^2$ :入射光频率相对变化方差; $(\overline{\Delta I/I_{i0}})^2$ :光强相对变化方差。

将(1)式代入(5)式中前二项可得:

$$(\partial(\Delta I)/\partial d) \cdot d_0 = (\partial(\Delta I)/\partial \nu) \cdot \nu_0 \quad (6)$$

当 $\delta=2k\pi$ 时有最大值:

$$[(\partial(\Delta I)/\partial d) d_0]_{\max} = 1.1 \times 10^6 I_{i0}$$

(6)式表明腔长变化与光频率变化对信号影响程度是相同的。如果参考光频率稳定度高于被测腔稳定度一个量级,例如所用的碘稳He-Ne激光器(其频率稳定度优于 $2 \times 10^{-10}$ )测量稳定度为 $1 \times 10^{-9}$ 的腔,误差小于2%。若光源的频率稳定度等于或低于被测腔的稳定度,则可以根据方差理论计算出被测腔稳定度,不过误差要大一些。

将(1)式代入(5)式中最后一项可得:

$(\partial(\Delta I)/\partial I_i) \cdot I_{i0}$ 的表达式与(1)式右端几乎一样,只需把 $I_i$ 换成平均值 $I_{i0}$ 即可。 $\delta=2k\pi$ 或 $(2k+1)\pi$ 时有最小值0,就是说在 $\delta=2k\pi$ 附近测量,入射光强 $I_i$ 的起伏对结果的影响近似为零。图8所示的脉动平均值几乎为零,所以,测试结果中 $I_i$ 变化引起的误差可以不计。若使光路调整到偏离零点,例如 $\Delta I$ 变化量的平均值等于 $20\% \cdot \Delta I_{\max}$ , $(\partial(\Delta I)/\partial d) \cdot d_0 = 1.07 \times 10^6 I_{i0}$ 。显然这种情况下对腔长变化的灵敏度影响不大,只下降了3%,即使再加上小于5%的光强变化,测量结果也只有10%的误差。如果光强变化较大,又偏离 $2k\pi$ 处较远,还可以把参考光强和信号同时送到除法器去比,把信号归一化处理,就可以消除强度起伏的影响。

误差分析的结论说明,被测腔短期稳定度,即腔长快速脉动量(方程(5)中的第一项)的测试结果是可信的。

#### 参 考 文 献

- [1] T. W. Hansch, B. Coui Uaud; *Opt. Commun.*, 1980, 35, No. 3, 441.