

# 谐振腔极低损耗的测量研究

蒋 跃

(空军雷达学院物理教研室, 武汉 430010)

**提要** 介绍了一种通过测量无源谐振腔中光辐射的衰减时间而测得谐振腔总损耗的方法。对极低损耗的测量分辨率可以达到几个 ppm。

**关键词** 测量, 谐振腔, 极低损耗, 衰减时间

## 1 引 言

激光谐振腔极低损耗的测量是一项涉及光机电三方面的综合工程,属于激光陀螺高新技术。陀螺的性能在很大程度上取决于其环形谐振腔的损耗高低。制约陀螺性能进一步提高的主要因素是缺乏测量极低损耗的仪器。本文旨在提供一种通过测量无源谐振腔的衰减时间而测得其极低损耗的方法。限于篇幅这里主要叙述测量原理和装置。

## 2 测量原理

本装置测量操作结果是无源谐振腔中光辐射的衰减时间  $\tau_R$ , 由此可以换算出谐振腔的总损耗  $\delta$ 。原理图中的无源腔即为待测腔。

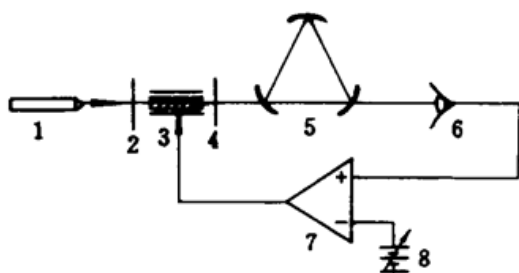


Fig. 1 Schematic diagram of the decay time measuring device

- 1: source laser; 2, 4: polarizers; 3: electro-optic crystal;
- 5: optical cavity; 6: detector; 7: comparator;
- 8: reference voltage

如图 1 所示,当光源激光入射到待测腔中并达到谐振后,关断入射光源,则无源腔内光辐射强度将呈指数衰减,此衰减时间的长短由该腔的总损耗及腔长决定,与入射光强度无关。下面推导此关系。

考虑到待测腔输出场是经多次损耗、多光束干涉、部分输出、部分反馈而逐次衰减等复杂情况,这里从理论上作较严格演算。

用  $E_i$  表示输入空腔 5 的光矢量振幅,忽略相移引起的光频变化,则 5 的输出光场可表示为<sup>[1]</sup>

$$E_0 e^{-i\omega t} = E_i e^{-i\omega t} [C_{mq}(T_i T_0 R_p)^{1/2} (1 - R^{1/2} e^{i4\pi})^{-1}] \quad (1)$$

式中  $C_{mq}$  为激励源与无源腔间的模匹配系数,  $T_i$ ,  $T_0$  分别为输入、输出镜的透射率,  $R_p = R_i R_0$ ,  $R$

$= R_1 R_2 \cdots R_0$ ,  $R$  为反射率,  $\Delta\varphi$  是单程总相移。

若腔耗极低, 则谐振时, (1) 式方括号中因子可简化成

$$H_{mq} = C_{mq} (T_i T_0 R_r)^{1/2} \left[ 1 - R^{1/2} \left( 1 - i \frac{\Delta\omega L'}{c} \right) \right]^{-1} = A_{mq} \frac{c}{L'} (\gamma_c + i\Delta\omega_{mq})^{-1} \quad (2)$$

式中

$$\Delta\omega_{mq} = \Delta\omega = \omega_{mq} - \omega, \quad \frac{L'}{c} \omega_{mq} = 2\pi q + m\varphi_x + n\varphi_y,$$

$$\gamma_c = \frac{c}{L'} (1 - R^{1/2}) R^{-1/2}, \quad A_{mq} = C_{mq} \left( \frac{T_i T_0 R_r}{R} \right)^{1/2}$$

$c$  为光速,  $L'$  为腔的光学长度,  $\varphi_x, \varphi_y$  为附加相移。

记场源关断时刻为  $t = 0$ , 则有

$$\left. \begin{aligned} E_i(t) &= E_s e^{-i\omega_s t} & t < 0 \\ E_i(t) &= E_s e^{-(\gamma_s + i\omega_s)t} & t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

作拉普拉斯变换, 输出场表示为

$$E_0(S) = E_i(S) H(S) \quad (4)$$

考查(1)和(2), 有

$$H(S) = \frac{c}{L'} \sum_{mq} A_{mq} (S + \Omega_{mq})^{-1} \quad (5)$$

$H(S)$  为腔的变换函数,  $S$  为复频参数, 显然  $\Omega_{mq} = \gamma_c + i\omega_{mq}$ 。对输入场作拉氏变换, 有

$$E_i(S) = \int_0^{\infty} E_s e^{i\omega_s t} e^{-st} dt + \int_0^{\infty} E_s e^{-(\gamma_s + i\omega_s)t} e^{-st} dt = -E_s (\Omega_a + \Omega_b) [(S + \Omega_a)(S - \Omega_b)]^{-1} \quad (6)$$

式中  $\Omega_a = \gamma_s + i\omega_s$ ,  $\Omega_b = -i\omega_s$ , 积分收敛域为  $-\gamma_s < \text{Re}\{S\} < 0$ 。

由(5)和(6)得输出场的拉氏变换(记  $\Omega_c = \Omega_{mq}$ )

$$E_0(S) = E_s A_c \frac{c}{L'} [-(\Omega_a + \Omega_b)] [(S + \Omega_a)(S - \Omega_b)(S + \Omega_c)]^{-1} \quad (7)$$

对上式作拉氏反变换, 并用残数法得到输出场强

$$E_0(t) = E_s A_c \frac{c}{L'} (\Omega_b + \Omega_c)^{-1} e^{\Omega_c t} \quad t < 0$$

$$E_0(t) = E_s A_c \frac{c}{L'} [(\Omega_c - \Omega_a)^{-1} e^{-\Omega_c t} + (\Omega_a + \Omega_b)(\Omega_a - \Omega_c)^{-1} (\Omega_c + \Omega_b)^{-1} e^{-\Omega_c t}] \quad t > 0$$

置换  $S$  得

$$E_0(t) = E_s A_c \frac{c/L'}{\gamma_c + i\Delta\omega} e^{-i\omega t} \quad t < 0 \quad (8a)$$

$$E_0(t) = E_s A_c \left[ \frac{c/L'}{\gamma_c - \gamma_s + i\Delta\omega} e^{-(\gamma_s + i\omega_s)t} + \frac{c/L'}{(1 - \frac{\gamma_c}{\gamma_s} - i \frac{\Delta\omega}{\gamma_s})(\gamma_c + i\Delta\omega)} e^{-(\gamma_c + i\omega_c)t} \right] \quad t > 0 \quad (8b)$$

(8a) 表示光源关断前无源腔的稳态响应, (8b) 描述光源关断后腔的衰减情形。如(8b)所示, 若进入 5 的光源关断较慢(即  $\gamma_s \ll \gamma_c$ ), 则第一项起主要作用,  $E_0(t)$  主要表现为光源本身的变化, 若 5 达到谐振后, 以极短时间关断光源(即  $\gamma_s \gg \gamma_c$ ), 则第一项趋于零, 第二项反映无源腔本身的衰减。即

$$E_0(t) = E_s A_c \frac{c/L'}{\gamma_c + i\Delta\omega} e^{-(\gamma_c + i\omega_c)t} \quad t > 0 \quad (9)$$

于是,光源关断后,待测腔输出光强便可表示为

$$I(t) = E_0^*(t)E_0(t) = E_0^2 A^2 \frac{(c/L)^2}{\gamma_c^2 + \Delta\omega^2} e^{-2\gamma_c t} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau_R}} \quad t > 0 \quad (10)$$

其中  $\tau_R = \frac{1}{2\gamma_c} = \frac{L}{c} \cdot \frac{R^{1/2}}{2(1 - R^{1/2})}$ ,  $\tau_R$  即为无源腔的衰减时间常数,记  $\delta = \frac{2(1 - R^{1/2})}{R^{1/2}}$ ,  $\delta$  即为腔的总损耗,则

$$\tau_R = \frac{L}{\delta c} \quad (11)$$

由(11)式知,只要测得腔长  $L$  和衰减时间  $\tau_R$  就可得到待测腔的损耗  $\delta$  (因无源腔内  $n = 1$ , 故  $L' = L$ )。

总衰减时间  $\tau_R$  为各损耗过程所各自决定的衰减时间之和 ( $\tau_R = \sum_i \tau_i = \sum \frac{L}{\delta_i c}$ ), 如果某一种损耗在数量级上比所有其它损耗都高, 则  $\tau_R$  将主要取决于该种损耗的大小, 我们用的镜片膜面  $> \phi 7 \text{ mm}$ , 基模衍射损耗  $\delta_{00}$  与由镜反射不完全引起的损耗  $\delta$ , 相比可忽略, 即  $\tau_R$  取决于吸收、散射和透射损耗的大小, 若腔  $\delta$  由三镜构成, 则  $\delta_r = -\ln R_1 R_2 R_3$  [2], 当  $R$  为  $0.9985 \sim 0.9998$ , 则  $\delta_r$  为  $6 \times 10^{-4} \sim 4.5 \times 10^{-3}$ , 而  $\delta_{00} \sim 10^{-5}$ 。

### 3 实验装置

图 2 为本实验装置简图。其工作过程是, 来自光源的激光射到谐振腔的一个镜上, 透过该

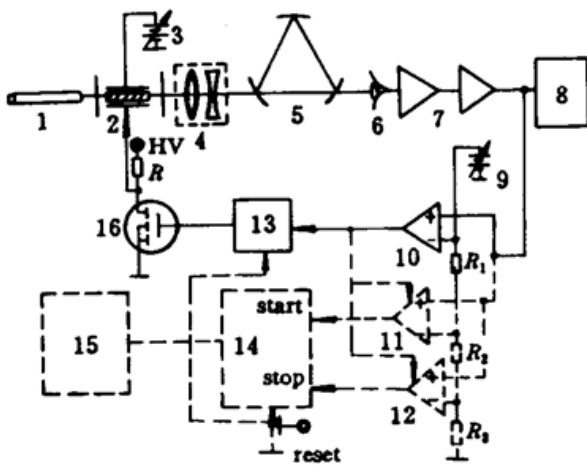


Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus

1; source laser; 2; photoswitch; 3; bias voltage; 4; mode matching lenses; 5; optical cavity; 6; photodetector; 7; low-noise wide-band preamplifiers; 8; storage oscilloscope; 9; reference voltage; 10~12; comparators; 13; bistable triggers; 14; digital counters; 15; display (oscilloscope); 16; MOS FET switch

$$\left( \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \leq 1; \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{1}{e} \right)$$

镜的光将在谐振腔的几个镜面间传输, 如果进入腔内的激光频率处在无源腔的谐振频率上足够长的时间, 则此光将在腔内谐振达到一定强度并透射出腔外, 用探测器接收输出镜的光强, 当透射光强达到比较器的预置阈值电平时, 则由比较器的输出去触发场效应管导通, 从而给电光晶体加上半波电压, 使进入谐振腔的激光立即关断。由探测器监测光的衰减电平并由计时器 (或数字存储示波器) 测量光的强度衰减至关断时强度的  $1/e$  倍所花的时间, 即为操作结果  $\tau_R$ 。

### 4 测量精度估算

为了对电子学系统的响应速度作出恰当的下限要求, 以便选择合适的元器件。下面列表说明本装置可达到的测量精度 (均假定计时精度  $\Delta\tau_R = 0.50 \mu\text{s}$ , 直腔腔长  $l = 1 \text{ m}$ ,  $R$  为腔镜反

射率)。

Table 1 Measurement precision

$R_1 = R_2$	$\delta$ . Cavity loss	$\tau_R$ . Decay time( $\mu\text{s}$ )	$\frac{\Delta\tau_R}{\tau_R} \left( \frac{\Delta\delta}{\delta} \right)$	$\Delta\delta$ . Loss resolution
0.999000	0.10%	3.33	15%	$\pm 150$ ppm
0.999900	0.010%	33.3	1.5%	$\pm 1.5$ ppm
0.999990	0.0010%	333	0.15%	$\pm 0.015$ ppm

由上表可见,只要计时精度优于  $0.50 \mu\text{s}$ ,在腔损耗为  $0.10\%$  时,测量精度虽然只到  $0.015\%$ ,但对于损耗低于  $0.010\%$  的腔,其测量精度即可超过  $0.00015\%$ 。因此,只要能满足该装置的各个元器件的下降时间  $\leq 100 \text{ ns}$ ,全套系统下降时间的总和  $\leq 500 \text{ ns}$ ,便可达到极高的测量精度(对反射率  $R \geq 0.99990$  的腔镜,其精度优于  $\pm 2.000000 \times 10^{-6}$ )。

## 5 主要器件及主要技术参数

5.1 激励光源:要求单频、偏振、功率大。又因该仪器将用于 He-Ne 陀螺研制,故选用上海激光所产 400 型 He-Ne 激光器,横向模式为  $\text{TEM}_{00}$ ,输出功率  $\geq 7 \text{ mW}$ ,偏振态为线偏振,光束直径  $\sim 0.7 \text{ mm}$ ,发散角  $\leq 1 \text{ mrad}$ 。

5.2 无源谐振腔:现用直腔为长  $1 \text{ m}$  的石英管,输入镜为平面镜,输出镜半径为  $2 \text{ m}$ ,均为高反片 ( $R > 0.9985$ )。

5.3 电光开关:电光晶体为铌酸锂,工作频率为  $2.5 \text{ MHz}$ ,工作波长为  $632.8 \text{ nm}$ ,半波电压  $< 450 \text{ V}$ ,光束直径为  $1 \text{ mm}$ ;开关管暂用  $\text{IRF}_{831}$ ,  $V_{(\text{BR})D_{\text{SS}}} > 450 \text{ V}$ ,  $I_{\text{GSSR}} < -100 \text{ nA}$ ,关断延时为  $55 \text{ ns}$ ,下降时间为  $30 \text{ ns}$ 。

5.4 探测器:北京滨松公司产  $\text{R}_{928}$  型光电倍增管(此选择可省去前放),响应范围为  $185 \sim 900 \text{ nm}$ ,峰值波长为  $400 \text{ nm}$ ,阳极灵敏度为  $2000 \text{ A/lm}$ ,响应时间为  $2.2 \text{ ns}$ (上升时间),  $22 \text{ ns}$ (电子渡越时间)。

5.5 比较器:美国产  $\text{LM}_{361}$  型。

5.6 计时和显示:暂用英国产  $\text{DL-912}$  型瞬态波形记录仪,采样时间为  $50 \text{ ns}$ 。

## 6 实验情况简介

整套光路和电路已调通,主要难题是电光晶体的响应远未达到标定值,输出场并非为方程(9)表示的衰减信号,主要是电光开关拖的“尾巴”,即(8b)式第一项,衰减信号被淹没其中,本实验无源腔  $\tau_R: 2 \sim 3 \mu\text{s}$  ( $R: 0.9985 \sim 0.9998$ ),现实测为几十微秒,除主要为电光开关的关断延时,还包括其它光电器件的下降时间,此叠加较复杂,衰减时间难以从中准确取出。

用机械调制器取代电光开关的结果是叠加信号时间约为  $\tau_R$  的 12 倍,用 F-P 标准具取代该开关时,光源脉宽太窄,难以激发被测腔谐振。若能很好解决电光开关的关断速度问题,该仪器是可以研制成功的。但实质问题是先要有极低损耗腔,损耗越低,  $\tau_R$  越长,越易测量,精确度越高,对其它器件的要求也降低。

## 7 结 语

该方法的实现和测量精度主要取决于谐振腔的损耗。腔损耗愈低,测量精度愈高。这是本方法之所以能有效地用于测量极低损耗的原因。其它测量方法的通病在于损耗愈低,误差愈大,对极低损耗的测量无能为力。衰减时间测量法不仅克服了这一弊病,而且将它变为提高测量精度的条件,其可取之处便在于此。目前的主要困难是还没有能用于实际测量的极低损耗腔。这符合检测技术的发展规律,测量方法总是先于待测器件。

### 参 考 文 献

- 1 M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理, 第二版. 北京: 科学出版社, 1985. 424
- 2 周炳琨, 高以智, 陈家骅 等. 激光原理, 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1984. 42

## A Method for Measuring Ultra-low Loss of an Optical Cavity

Jiang Yue

(Teaching and Research Section of Physics, Air Force Radar Academy, Wuhan 430010)

**Abstract** This paper introduces a method for measuring a cavity total loss by measuring the intensity decay time of an optical cavity, and the resolution allows the measurement of up to  $\sim 10^{-6}$  of ultra-low loss.

**Key words** measuring, optical cavity, ultra low-loss, decay time