

谐振腔光学参数的测量

刘 杰 李 健 于全训

(山东师范大学物理系 济南 250014)

提要 由光学谐振腔的透射谱、反射谱特性定义了透射-反射比值谱函数, 通过对其精细度的测量, 可精确求出谐振腔的光学参数, 并通过实验测定了简单光学谐振腔的光学参数。

关键词 光学谐振腔, 透射-反射比值谱, 精细度

1 引 言

光学谐振腔理论是激光技术理论中的一个重要组成部分, 在非线性光学、光谱学、量子光学乃至激光测量中都有很重要的应用。然而不同的光学谐振腔的光学参数是不同的。无论是改变元器件, 还是改变谐振腔的几何构造, 甚至是很轻微的调整, 都将对其参数产生很大的影响, 因而实际测量其光学参量就显得极其重要了。利用光学谐振腔的各种性质, 如通过测量谐振腔的衰减时间来确定谐振腔镜反射率的衰减时间法^[1~3], 以光学谐振腔为基础的利用光延迟线的测量法^[4], 利用光学谐振腔透射谱线的精细度或极大、极小值测镜反射率的方法^[5], 只能求出组成光学谐振腔的腔镜的反射率, 而不能将腔内的损耗、输出和构成谐振腔的腔镜的吸收损耗区别开来, 因而无法了解谐振腔的性质。我们利用光学谐振腔的透射谱、反射谱及其精细度的性质, 构造出一个新的函数: 透射-反射比值谱函数。该函数具有同透射谱、反射谱相似的性质, 可同样计算出相应的精细度, 利用这三个精细度即可求出光学谐振腔的耦合输出、腔内损耗等光学参数。

2 测量原理

对于任意一个典型的光学谐振腔, 均可将其简化为由两个镀有高反射膜的反射镜组成的简单等效谐振腔(图 1)。定义 r_1, r_2 为两腔镜的振幅反射系数, t_1, t_2 为相应的振幅透射系数, s_1, s_2 为相应的吸收损耗系数。若谐振腔内还含有其它介质, 其损耗为 a , 则可以将它的损耗折算到 r_2 中, 即将 r_2 变为 $(1 - a)r_2$, 其余的计算不变。

实验中要注意调节谐振腔与入射光束以及匹配透镜的位置, 使入射光学谐振腔的光场与



图 1 等效简单谐振腔示意图

Fig. 1 The setup of the typical optical resonator with two mirrors

谐振腔的模式完全匹配^[6]。若注入光场与谐振腔的模式不完全匹配时,还需要在光场强度中引入匹配函数,使计算更为复杂。

设入射波的电场强度为 \tilde{E}_0 , 则透射波与反射波的电场强度分别为

$$\tilde{E}_t = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1 r_2 e^{i\delta}} \tilde{E}_0 \quad (1)$$

$$\tilde{E}_r = - \frac{r_1 - r_2(r_1^2 + t_1^2) e^{i\delta}}{1 - r_1 r_2 e^{i\delta}} \tilde{E}_0 \quad (2)$$

其中 δ 是位相差, 其值为

$$\delta = \frac{\omega L}{c} + \phi_x + \phi_y \quad (3)$$

其中 L 为光波往返一周的等效光程, ω 为光波的频率, c 为光速, 附加相位 ϕ_x, ϕ_y 取决于横模的几何性质, 即取决于腔的几何性质。

则透射光强和反射光强分别为

$$I_t = \frac{t_1^2 t_2^2}{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos\delta} I_0 \quad (4)$$

$$I_r = \frac{r_1^2 + r_2^2(r_1^2 + t_1^2)^2 - 2r_1 r_2(r_1^2 + t_1^2) \cos\delta}{1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos\delta} I_0 \quad (5)$$

注意到透射光强和反射光强的分母相同, 而且反射波光强的分子为相位的函数, 因此利用透射光强与反射光强之比定义一个新的函数: 透射-反射比值谱函数:

$$I_{t-r} = \frac{I_t}{I_r} = \frac{t_1^2 t_2^2}{r_1^2 + r_2^2(r_1^2 + t_1^2)^2 - 2r_1 r_2(r_1^2 + t_1^2) \cos\delta} \quad (6)$$

可见透射-反射比值谱函数同透射谱函数具有相同的形式, 特别是均在 $\delta = 2k\pi$ 时取极大值, 而反射谱均在 $\delta = (2k+1)\pi$ 时取极大值, 在 $\delta = 2k\pi$ 时取极小值, 其尖锐峰值出现在极小值处。透射谱、反射谱和透射-反射比值谱的函数曲线如图 2 所示。

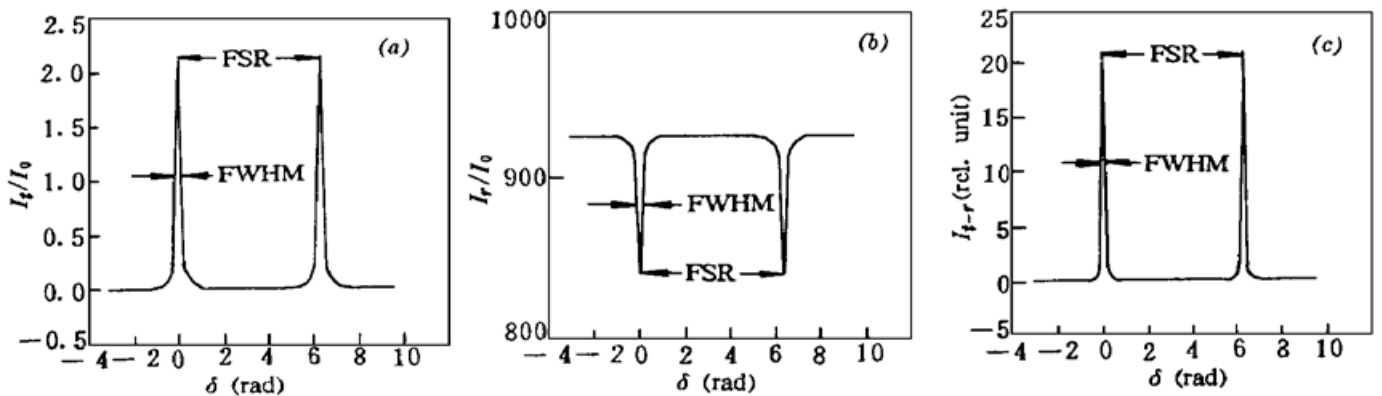


图 2 谱函数曲线: (a) 透射谱; (b) 反射谱; (c) 透射-反射比值谱

Fig. 2 (a) The transmission spectrum; (b) The reflection spectrum; (c) The transmission-reflection ratio spectrum

谱线的精细度定义为

$$F = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} \quad (7)$$

其中 FSR 为自由光谱区, FWHM 为峰值半宽度。

由峰值半宽度定义法可求得各谱线的精细度为

$$F_t = \frac{\pi \sqrt{r_1 r_2}}{1 - r_1 r_2} \quad F_r = \frac{\pi \sqrt{1 + r_1^2 r_2^2}}{\sqrt{2} (1 - r_1 r_2)} \quad F_{t-r} = \frac{\pi \sqrt{r_1 r_2 (t_1^2 + r_1^2)}}{r_1 - r_2 (t_1^2 + r_1^2)} \quad (8)$$

只要测得三个谱线的精细度, 就可求出相应的 r_1, r_2 和 t_1 。再利用 $r_1^2 + t_1^2 + s_1^2 = 1$, 即可求出 s_1 。将以上装置倒转, 即将谐振腔的前后腔镜变换位置, 同样可以求得 r_1', r_2' 和 t_1', s_1' 。若谐振腔内有其它介质损耗 a , r_1, r_2 与 r_1' 和 r_2' 的关系为

$$(1 - a)r_1 = r_2' \quad r_2 = (1 - a)r_1' \quad (9)$$

显然通过简单的计算即可求出光学谐振腔的介质损耗 a 、输出耦合率、谐振腔的 Q 值等光学参数。

3 实验及结果分析

实验装置如图 3 所示, 图中 Laser 为单纵模线偏振 He-Ne 激光器, f_1, f_2 为匹配透镜, f_3, f_4 为会聚透镜; G 为格兰棱镜, F-R 为法拉第旋光隔离器; M_1, M_2 为镀有高反射膜的镜片组成的谐振腔, PZT 为压电陶瓷, SW 为锯齿波发生器, 加 200 Hz 锯齿电压调控谐振腔的腔长, 以改变谐振腔中的光程, 探测器 D_1, D_2 为型号是 2CU 3C 的光电二极管。除法器由变跨导高精度集成乘法器构成, 精度可达 0.5%。

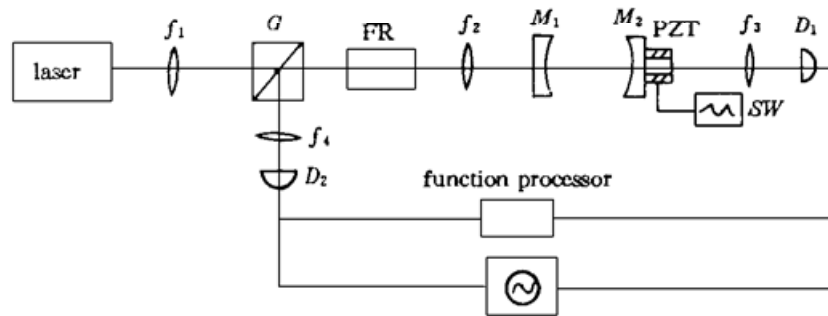


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of the fineness measuring system

我们测量了由两个曲率半径为 100 mm 的镀有 632.8 nm 高反射膜的镜片组成的无源共焦谐振腔的透射、反射和透射-反射比值谱的精细度。两个反射镜片由中国科学院光电所测定的参数为 $R_1 = 99.41\%$, $T_1 = 0.39\%$, $S_1 = 0.20\%$, $R_2 = 98.95\%$, $T_2 = 0.40\%$, $S_2 = 0.65\%$, 并由此算出了组成谐振腔的镜片的反射率、透射率和吸收率, 以及结果的误差, 并也不难算出谐振腔的其他光学参数, 如谐振腔的 Q 值、输出耦合率、吸收损耗、衰减时间等。

实验结果如表 1, 带有上角标的数值为将谐振腔倒转后所测的值。从实验结果可看出, 反射率的百分误差较小, 可达 10^{-4} 量级, 而透射率和吸收率的百分误差则较大, 这是由于对高反射率镜片来说, 很小的绝对误差即可导致较大的百分误差。

图 4 为拍得的反射谱与透射-反射比值谱的照片。

误差主要来源于共焦腔的离焦量带来的模式不匹配对测量精度的影响, 发现反射谱、透射-反射比值谱对模式匹配的微小失调有更灵敏的影响^[7], 可用来判断模式匹配的情况。为取得较高的测量精度, 应避免光学平台和镜架高于 200 Hz 的振动。

表 1 实验数据及计算结果

Table 1 Calculation results and experimental data

Data	FSR (ms)	FWHM (μ s)	F	FSR' (ms)	FWHM' (μ s)	F'
Tran	8.20	20.90	392.3	8.20	20.8	394.2
Refl	8.20	21.0	390.5	8.20	21.2	386.8
Tran-Refl	8.20	10.8	759.3	8.20	11.0	736.5
	r_1	t_1	s_1	r_2	t_2	s_2
Result	0.997	0.062	0.046	0.995	0.061	0.079
Real	0.99705	0.06245	0.04472	0.99474	0.06325	0.08062
Error	5.02×10^{-5}	7.26×10^{-3}	2.78×10^{-2}	2.65×10^{-4}	3.69×10^{-2}	2.05×10^{-2}

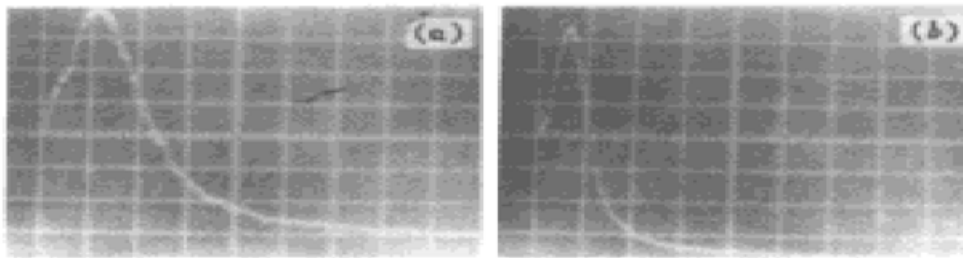


图 4 (a) 反射谱的照片;(b) 透射-反射比值谱照片

Fig. 4 (a) Photo of the reflection spectrum. Sweep rate 10μ s/cm;(b) Photo of the transmission-reflection ratio spectrum. Sweep rate 10μ s/cm

本实验设备简单,测量精度高,适用于各种不同类型的光学谐振腔。可广泛用于光学谐振腔参数的实际测量。

参 考 文 献

- 1 D. Z. Anderson, J. C. Frisch, C. S. Masser. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8) : 1238
- 2 G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble *et al.*. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(5) : 363
- 3 胡晓东,周九林. 高反射率测量中的腔参数优化. *光学学报*, 1994, **14**(2) : 173
- 4 黄永楷,庄大奎. 一种测量高反膜绝对反射率的新方法. *光学学报*, 1982, **2**(1) : 67
- 5 李 健,卓 壮,吴令安. 高反膜绝对反射率的精确测量. *光电子. 激光*, 1995, **6**(6) : 359
- 6 李 健,刘 杰. 高反射率测量中的模式匹配与谐振腔设计. *山东师范大学学报*, 1996, **11**(1) : 20
- 7 王 海,郜江瑞. 共焦腔模失配对腔内功率和腔精细常数的影响. *激光杂志*, 1994, **15**(3) : 117

Measurement of the Optical Parameters of the Resonator

Liu Jie Li Jian Yu Quanxun

(Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014)

Abstract A transmission-reflection ratio spectrum function deduced from the transmission-reflection spectrum was defined. The optical parameters of the resonator were calculated by measuring the fineness of the transmission, reflection and transmission-reflection ratio spectra.

Key words optical resonator, transmission-reflection ratio spectrum, fineness