

文章编号: 1001-3806(2004)03-0231-03

探测器孔径大小对衰荡腔测量精度的影响

易亨瑜^{1,2}, 吕百达¹, 彭 勇², 刘盛林²

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究光腔衰荡光谱法的反射率测量精度, 分析了腔长失调对衰荡腔模式影响。在此基础上, 根据高斯光束空间传输表达式, 推导了在一定腔长失调条件下, 探测器孔径与衰荡脉冲信号的关系式。并利用数值模拟, 分析了衰荡腔测量精度与探测器孔径大小的关系。结果表明, 探测器孔径越大, 测量的相对误差越小。

关键词: 反射率; 光腔衰荡; 失调; 孔径

中图分类号: TN248; O484.5 文献标识码: A

Influence of detector's aperture on metrical precision of ring down cavity

YI Heng-yu^{1,2}, LI Bai-da¹, PENG Yong², LIU Sheng-lin²

(1. Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Institute of Applied Electronic, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract In order to study the metrical precision of reflectivity via cavity ring down spectroscopy, first of all, it is investigated that influence of length misadjustment of ring down cavity on its mode coupling. Then, based on propagation of Gaussian beam, it is deduced that relation between detector's aperture and output power of ring down cavity of length misadjustment, and it is also numerically simulated that influence of detector's aperture on metrical precision. Results show that the bigger the detector's aperture is, the lower the metrical relative error is.

Key words: reflectivity; cavity ring down; misadjustment; aperture

引 言

光腔衰荡光谱法是近年来兴起的吸收光谱技术。利用它可以建立直型和折叠型衰荡光腔, 进行高反射率镜片的测定工作^[1,2]。由于它是对腔内指数型衰荡信号进行检测, 摆脱了激光输出功率起伏引起的误差, 所以测量精度高。

在衰荡光腔测量系统中, 常选择基模高斯光束作为测量光束, 共焦腔为测量腔体^[3]。在实际应用中到达探测器上的测量光束非常微弱, 调节极为不便。由于探测器孔径的限制, 加上腔长失调不可避免, 必然影响测量精度。而 ANDERSON 和孙福革等人的精度分析中^[2,3], 没有考虑探测器孔径的影响。根据高斯光束空间传输表达式, 在一定的离焦量下, 讨论了孔径大小对衰荡脉冲输出信号的影响, 并通过数值模拟, 分析了衰荡腔测量精度与孔径大小的关系。

作者简介: 易亨瑜(1969), 男, 高级工程师, 现从事光学检测技术的研究。

E-mail: yihengyu1@sina.com

收稿日期: 2003-07-11; 收到修改稿日期: 2003-08-25

1 理论分析

1.1 光腔衰荡法的测量精度

光腔衰荡测量系统如图 1 所示, 腔镜 M_1 和 M_2 构成直型衰荡腔。当一束脉冲初始光强为 I_0 、波长为 λ 的激光沿着光轴注入到腔内后, 激光脉冲在两个腔镜之间来回反射而形成振荡。由于腔的损耗, 腔内的功率将不断衰减。如果谐振腔损耗 δ 主要是腔镜的不完全反射引起的, 则在腔镜 M_2 后面的光探测器所检测的激光脉冲的功率衰减曲线, 就能够反映出被测镜的反射率。

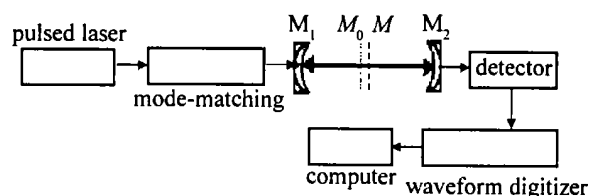


Fig. 1 Schematic illustration of cavity ring down

设腔长为 L , 两腔镜反射率分别为 R_1 和 R_2 , 光速为 c , 则腔内激光脉冲强度的衰减时间 τ 为:

$$\tau = \frac{L}{-c \ln R_1 R_2} \quad (1)$$

通过更换腔镜对可以进行三镜互测。设两腔镜的平均反射率为 R , 由(1)式可得:

$$R = \sqrt{R_1 R_2} = \exp(-L/c\tau) \quad (2)$$

因为 $I_t = I_0 e^{-L/c\tau}$, 所以 $\tau = t / (\ln I_0 - \ln I_t)$, 假设当 $j \geq N+1$ 时, 光信号被探测器的噪声淹没。这样在实验测量中取平均值可得:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=2}^N \tau_j = \frac{1}{N-1} \sum_{j=2}^N \left[\frac{T}{\ln I_{j-1} - \ln I_j} \right] \quad (3)$$

式中, $T = 2L/c$ 是光束在腔内来回一次的周期。

光腔衰荡是一种高反射率的精确测量技术, 根据孙福革等人^[2]的分析, 由(2)式近似可得腔镜反射率的检测精度 $\Delta R = (1-R)(-\Delta L/L + \Delta\tau_0/\tau_0)$ 。一般情况下 $\Delta\tau_0/\tau_0 < 0.001$; 对腔长的测量相对误差通常为 $\Delta L/L < 0.5\%$, 所以 $\Delta R < 0.01(1-R)$ 。如果 $R > 0.999$, 则 $(\Delta R/R) \approx \Delta R < 0.00001$ 。但在实际应用中, 由于测量带宽的要求, 探测器的接收孔径不可能无限大, 从而会限制反射率的测量精度。

1.2 离焦量对基模功率耦合系数的影响

在图1中设共焦腔中心面在 M_0 处。由于后腔镜 M_2 的微小位移使实际衰荡腔的中心面平移到 M 处。衰荡腔的离焦量为 $\Delta = L - \rho$, 取腔镜 M_2 处为参考面, 则其 $ABCD$ 矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 - \frac{2\Delta}{\rho} & -\frac{2\Delta(\Delta + \rho)}{\rho} \\ \frac{4\Delta}{\rho} & -1 + \frac{4\Delta^2 + 2\Delta}{\rho^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由此可得衰荡腔在 M 处本征基模的腰斑半径 w_{01} ^[4]。设入射光束为基模高斯光束, 它是针对理想情况而设计的, 其耦合传输到 M_0 处的腰斑半径应等于理想共焦腔的腰斑半径 w_{00} 。根据 $ABCD$ 定律, 入射光束在 M 面光束复参数 Q_M 、曲率半径 ρ_M 、光斑半径 w_M 分别为:

$$\begin{aligned} Q_M &= \frac{i\pi w_{00}^2}{\lambda} + \frac{\Delta}{2} \\ \rho_M &= \frac{1}{\text{Re}\{1/Q_M\}} \\ w_M &= \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \cdot \text{Im}\{1/Q_M\}}} \end{aligned} \quad (5)$$

衰荡腔离焦使腔本征模 w_{01} 与入射基模 w_M 不严格匹配, 这样在衰荡腔内将激发起多个高阶横模。在腔内被激发的 m 阶模式的功率耦合系数^[5]是:

$$|C_{0m}|^2 = \frac{m!}{2^m (m/2)!} \sqrt{K} (1-K)^{m/2} \quad (6)$$

$$K = (C_{00} C_{00}^*)^2 = \left[\frac{w_{01}/w_M + w_M/w_{01}}{2} + \frac{1}{\rho_M^2} \left(\frac{\pi w_M w_{01}}{\lambda} \right)^2 \right]^2,$$

式中, w_{01}/w_M 表征光束半径的失配, $1/\rho_M$ 表征波前曲率的失配。由于厄米-高斯函数的正交特性, m 取偶数。在讨论衰荡腔测量精度之前, 应先用(6)式分析高阶横模的影响。

1.3 探测器孔径与谐振腔输出功率

则根据 $ABCD$ 定律, 入射基模第 1 次到达腔镜 M_2 处光束复参数 Q_1 、曲率半径 ρ_1 、光斑半径 w_1 为:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{i\pi w_{00}^2}{\lambda} + \Delta + \frac{\rho}{2} \\ \rho_1 &= \frac{1}{\text{Re}\{1/Q_1\}} \\ w_1 &= \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \cdot \text{Im}\{1/Q_1\}}} \end{aligned} \quad (7)$$

同理可得到入射基模第 j 次到达腔镜 M_2 处的曲率半径 ρ_j 、光斑半径 w_j , 再根据高斯基模复振幅表达式得到离焦共焦腔第 j 次的输出脉冲振幅:

$$\begin{aligned} E_j &= \frac{(1-R_1)(1-R_2)R_1^j R_2^j}{w_j} \times \\ &\exp\left[-\frac{r^2}{w_j^2}\right] \exp\left[-\frac{ikr^2}{2\rho_j} - ikz\right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中, R_1^j 表示 R_1 的 j 次方。实验中根据激光脉冲宽度选取适当的衰荡腔长, 以避免光脉冲在腔内形成干涉叠加, 这样探测器接收的衰荡腔第 j 次输出功率为:

$$I_j = \int_0^a |E_j|^2 2\pi r dr \quad (9)$$

式中, a 是探测器的接收半径。对于探测器, 若光敏面大, 则结电容大, 其响应就慢。所以必须依据实际情况选择合适的探测器。根据(9)式可以分析探测器孔径对谐振腔输出信号的影响; 结合(3)式和(2)式可分析孔径大小与反射率测量精度的关系。

2 模拟计算

取共焦腔腔长为 $\rho = 1000\text{mm}$, 腔镜反射率为 $R_1 = R_2 = 99.9\%$, 则由(6)式得到基模的耦合效率如图 2a, 由于腔长失调, 入射基模所激发的 m 阶模式的功率耦合系数如图 2b。在实验中, 腔长调节可以精确控制在 $\pm 10\text{mm}$ 内。当离焦量 $\Delta = \pm 10\text{mm}$ 时, TEM_{00} 模的耦合效率 $K_{0000} = 0.999975$ 。由图 2b 可知, 腔长失调产生的较强的高阶模是 TEM_{02} 模或 TEM_{20} 模, 其耦合效率 $K_{0020} = K_{0200} = C_{02} \cdot C_{00} \leq C_{02} = 1.25005 \times 10^{-5}$ 。这说明 $\pm 10\text{mm}$ 的腔长失调, 对基

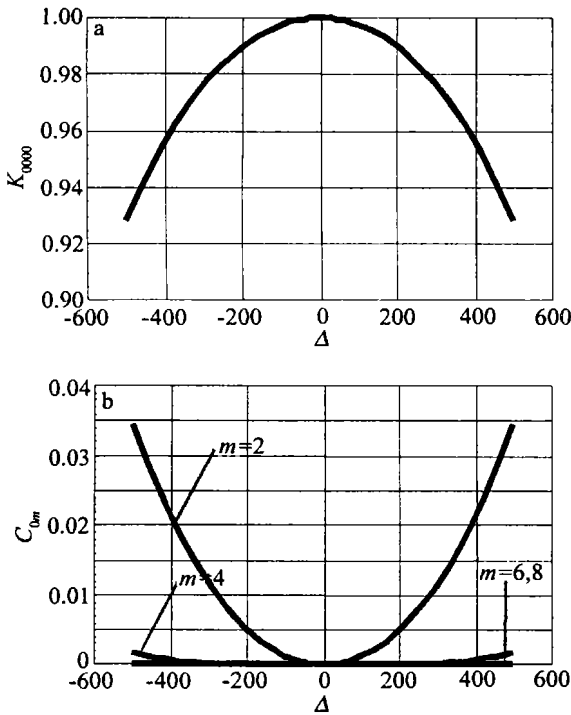


Fig.2 Power coupling coefficient C_{0m} as a function of Δ

模所引起的功率损耗相当小。在以下讨论中,可以忽略高阶模对衰荡腔输出功率的影响。

下面分析在一定的离焦量下,探测器孔径大小对衰荡脉冲输出信号的影响。取激光波长 $\lambda=1.064\mu\text{m}$,并根据 $\Delta L/L < 0.5\%$ 取离焦量 $\Delta=5\text{mm}$,衰荡次数 $N=500$ 次。不考虑腔镜失调,由(10)式得到在探测器孔径 a 分别为 $0.1\text{mm}\sim 2.5\text{mm}$ 和 ∞ 时

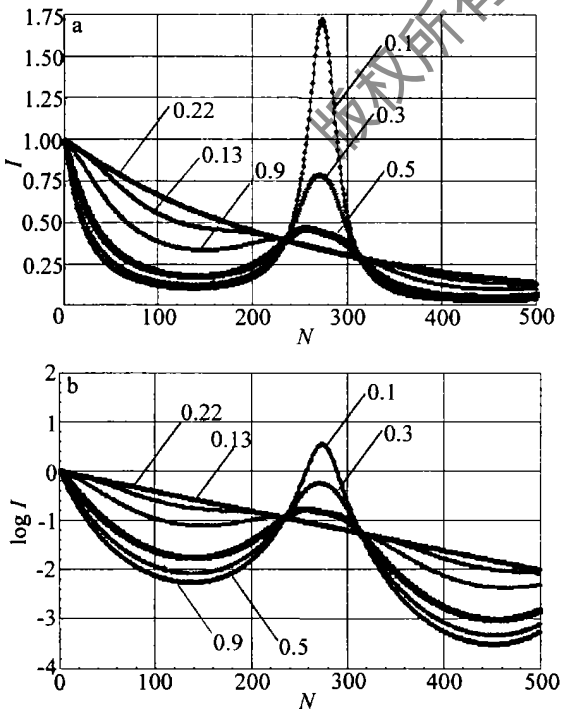


Fig.3 Decay curve of the straight cavity vs aperture of detector

的相对光强的衰荡情况,计算步长为 0.1mm 。图 3a 中给出了部分曲线,当探测孔径大于 0.22mm 后,强度衰荡曲线与孔径为 ∞ 时一致。由图可以看到,探测器孔径越大,衰荡曲线越平滑;反之,衰荡曲线在 $N=270$ 次附近会出现尖峰,而且幅值越来越大。经分析认为,腔长失调使腔内光斑出现大小半径变化,从而改变了探测信号幅值指数下降趋势。为了测量方便,图 3b 中给出了相对光强的对数曲线变化情况,其出现尖峰的时间也同样在 $N=270$ 次附近。

根据(2)式可以计算出不同接收孔径的反射率大小,如图 4a 所示。图 4b 中给出了相应的相对误差曲线。由图可知道,探测器孔径较小时,测量误差较大。增大探测器的接收半径,可以抑制测量误差。当腔长失调量 $\Delta=5\text{mm}$,半径 $a \geq 0.9\text{mm}$,反射率测量的相对误差可以控制在 0.001 内;半径 $a \geq 1.45\text{mm}$,则相对误差小于 0.0001 ;半径 $a \geq 1.8\text{mm}$,则相对误差小于 0.00001 ;半径 $a \geq 2.2\text{mm}$,则相对误差小于 0.000001 ,低于孙福革等人^[2]所分析的 0.999 的测量误差一个量级,故此时的探测器孔径,就不会影响测量精度。

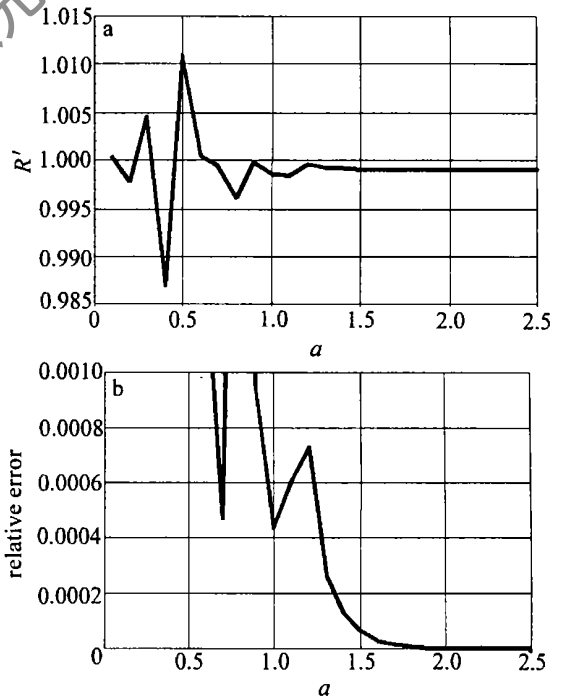


Fig.4 Simulated reflectivity and metrical precision as a function of the detector's aperture a

3 小结

光腔衰荡法是一种反射率测量技术,在只考虑腔长失调下,笔者从理论上模拟了该方法反射率测量过程,分析了探测器孔径大小对测量精度的影响。

(下转第 236 页)

(即 26.34dB)。总的信噪比的改善为 33.47(即信噪比提高了 30dB 以上)。

进一步减小输入的光信号,使输入的信号完全被淹没在噪声中,输出情况如图 4 所示,经过相关处理后仍然能够得到较高的信噪比。

这时,无法正确计算输入信号的信噪比,但仍然可以计算出相关处理后信号的信噪比,相关处理后输出信号中噪声的峰峰值为 20mV,噪声加信号的峰峰值为 318mV。计算得到输出信噪比为 14.9(即 23.46dB),对于大多数使用情况来说,这样,高的信噪比已经可以满足使用要求。

Table 1 F_{SNR} with the different input Y_{SNR}

Y_{SNR} of the input signals	F_{SNR}	Y_{SNR} of the input signals	F_{SNR}		
1	0.25	64.40	6	0.70	20.29
2	0.42	43.07	7	1.09	23.05
3	0.50	45.40	8	1.29	20.28
4	0.54	47.83	9	1.33	20.20
5	0.62	33.47	10	1.67	16.47

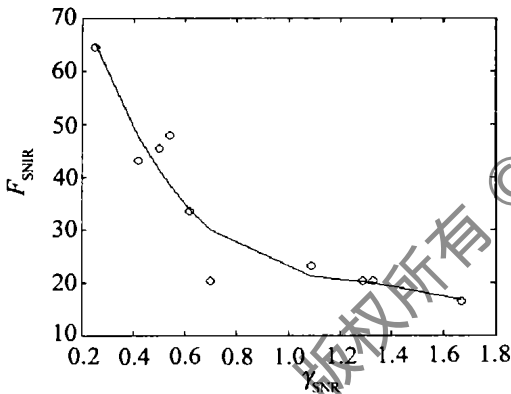


Fig. 5 a—input Y_{SNR} vs F_{SNR} (dot) b—fitting by MATLAB (line)

通过光源的发散特性改变激光源与探测器的距离来改变输入信号的大小,以此改变输入的信噪比,通过示波器观察输出的情况,得到在不同情况下信噪比的改善如表 1 所示。

定义信噪改善比 $F_{SNR}^{[1]}$: $F_{SNR} = \text{输出信噪比} / \text{输入信噪比}$ (电压信噪改善比),得到输入信噪比与 F_{SNR} 的关系如图 5 所示。如图 5 所示,随着输入信噪比的增加,信噪比的改善逐渐减小。

3 结论

相关处理是信号处理中提高信号信噪比的基本方法之一。如何根据相关处理设计性能优良的相关处理器,是研究的主要目标,针对光电信号检测的主要特点,设计了二元光电探测器和相关处理器电路。信号通过相关检测电路,可以减少噪声,提高信噪比,信噪比的改善 F_{SNR} 可以达到 33.47,即信噪比提高了 30dB 以上。可以认为,使用二元光电探测器和相关处理技术,可以保证系统具有极低的虚警率,满足检测微弱光电信号的实际需求。

参考文献

- [1] 陈佳圭. 微弱信号检测 [M]. 北京: 中央广播电视大学出版社, 1987. 7~ 13.
- [2] 江国舟, 江超. 微弱信号检测的基本原理与方法研究 [J]. 湖北师范学院学报(自然科学版), 2001, 21(4): 45~ 52.
- [3] 江原直树, 森真作. 利用小波变换检测微弱雷达信号 [J]. 空载雷达, 1997(2): 53~ 60.
- [4] 方毓景, 赵慧民. LSL 自适应权向量法检测弱脉冲信号方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 1999, 17(1): 87~ 92.
- [5] 王利亚, 沈阳, 潘忠孝 *et al.* 随机共振应用初步研究 [J]. 计算机与应用光学, 2000, 17(1): 79~ 80.
- [6] 史斯. 电光学手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1978. 86~ 89.

(上接第 233 页)

在不考虑其它失调因数的情况下,对于一定的腔长失调量,探测器孔径越大,其测量的相对误差越小。这对实验系统的仪器选配有一定指导意义。

在纳秒信号的测量中,快速探测器孔径不可能太大。可以采用具有球透镜的探测器进行一定程度的改善。测量精度的提高,主要依靠实验的调节。可以采用具有对数变换功能的示波器,根据信号的对数曲线,进一步精确调节腔长。当然探测器越灵敏,所探测的衰荡脉冲数越多,腔长调节精度也就越高。

另外,在本文的计算中,没有考虑失调模式在腔

内的衍射损耗。由于腔镜尺寸远大于衰荡腔的本征基模,所以计算带来的误差可以忽略。

参考文献

- [1] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S. Mirror reflector based on optical cavity decay time [J]. Appl Opt, 1984(23): 1238~ 1242.
- [2] 孙福革, 孙龙, 戴东旭. 用光腔衰荡光谱方法精确测量高反射的反射率 [J]. 中国激光, 1999, A26(1): 35~ 38.
- [3] 赵宏太, 柳晓军, 王谨 *et al.* 用光腔衰荡测定腔镜及镜片的反射率 [J]. 光电子·激光, 2001, 12(1): 71~ 73.
- [4] 吕百达. 激光光学 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 168~ 170.
- [5] KOGELNIK H. Coupling and conversion coefficients for optical modes [J]. Symposium on Quasi Optics, 1964, 8~ 10(6): 333.