

文章编号: 1001-3806(2004)05-0459-04

反射率测量技术研究的进展

易亨瑜^{1,2}, 吕百达¹

(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: 阐述了反射率测量中的几种典型方法, 并根据测量原理将它们分成了两大类。一类是根据检测光束在待测样品上的反射次数的(单)多次反射法; 另一类是基于谐振腔特性的测量方法。以相对误差或测量精度作为设计的评价标准, 论述和分析了各种技术的测量原理及其优缺点, 介绍了国内外反射率测量技术的发展现状及其目前的技术水平。对测量技术的发展方向进行了剖析, 提出一些影响测量精度的问题。

关键词: 反射率; 单次反射法; 二次反射法; 多次反射法; 多程室; 光延迟线; 精细度; 损耗

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

The advance of techniques of reflectivity measurement

YI Heng-yu^{1,2}, L ü Bai-dai¹

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

Abstract: The development of techniques of reflectivity measurements is reviewed and analyzed. Based on the measurement principles, the techniques can be divided into two types. One is single-reflectance, double-reflectance and multi-reflectance on the sample. The other is other measurement based on resonator's characteristics, such as optical cavity decay time, cavity ring-down spectroscopy, spherical cavity optical delay lines, the fineness of the resonator, and the loss compare between two active resonators. Their advantages and disadvantages, in particular, their measurement errors are discussed. Some current hot spots and future directions are analyzed.

Key words: reflectivity; single-reflectance; double-reflectance; multi-reflectance; multiple-pass cell; optical delay lines; fineness; loss

引 言

反射率测量技术是计量领域中的一个重要研究方向, 它有许多具体的测量方法^[1~10]。如何选择合适的方法, 目前尚无这方面的技术评述。从结构上, 反射率测量系统由光源、测量原理、测量主体及探测器等 4 部分组成, 其中测量主体是用来实现测量原理的光路装置, 它由待测样品和其它辅助光学镜片构成。根据反射率测量原理可分为两大类: 第 1 类是(单)多次反射法, 其中多次反射法可以看成是在单次反射法的基础上, 利用实验技巧, 改进测量主体, 增加待测样品上的光束反射次数的测量方法; 第 2 类是基于谐振腔特性的测量方法, 这些特性分别是谐振腔的精细度参数、损耗猝灭特性和脉冲能量

衰荡特性。本文中在误差分析的基础上, 论述和分析了各种测量技术的原理及其优缺点, 介绍了国内外反射率测量技术的发展现状及其目前技术水平。

1 单、多次反射法

这类方法的测量结果受光源稳定性影响很大, 故在其误差分析中, 主要考虑光源强度起伏的影响。根据检测光束在待测样品上的反射次数 k , 它可具体分为单次反射法、二次反射法、多次反射法。设 I_2 是无样品时的光强, I_1 是加入待测样品后的光强, 则样品反射率和相对测量误差为:

$$R = \frac{\sqrt{I_1}}{\sqrt{I_2}}, \left| \frac{\Delta R}{R} \right| = \frac{1}{k} \left| \frac{\Delta I_1}{I_1} \right| + \frac{1}{k} \left| \frac{\Delta I_2}{I_2} \right| \quad (1)$$

显然, 在样品上反射次数越多, 测量精度就越高。

单次反射法可利用简单光路或分光光度计(见图 1a 和图 1b)进行测量, 它对光源稳定度依赖性较强, 测量精度较低, 常用于精度要求不高的光学实验。二次反射法(见图 1c)因其光路形状也称

作者简介: 易亨瑜(1969-), 男, 硕士, 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: 2003-09-30; 收到修改稿日期: 2003-11-18

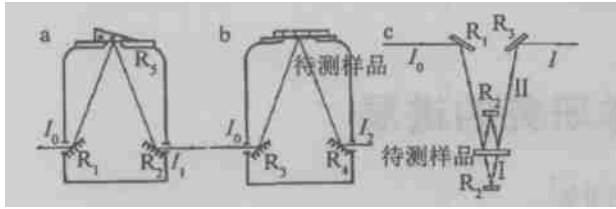


图 1 分光光度计单次反射测量法(a,b)和 WV 法测量原理(c)

WV 法,如中科院上海光机所的 GFS 高反射测量仪^[1],在可见光区的测量精度 $\leq \pm 5 \times 10^{-4}$;在红外区的测量精度 $\leq \pm 1 \times 10^{-3}$ 。

多次反射法(见图 2a 和图 2b)有助于提高测量精度。其最初的光源是由氢灯、氘灯、钨丝灯、卤钨灯等通过色散器件获得的单色光,这类光源的光谱调谐范围宽,但其单色亮度低、方向性差,限制了反射次数。当激光出现后,由于其单色亮度高、方向性好,推动了多次反射法的运用与发展。因为在谐振腔内,能够很好地实现光束在待测样品上更多次数的反射,所以,基于谐振腔的多次反射技术(光延迟线法)逐渐被用于高精度反射率测量方法中。图 2c 中的测量主体是多程室,对插入镜片进行测量^[2],测量精度优于 2×10^{-4} ;也可对腔镜进行测量,对于 $R > 98\%$ 的红外镀金膜腔镜,实验中测量相对误差为 0.1% 左右^[3]。

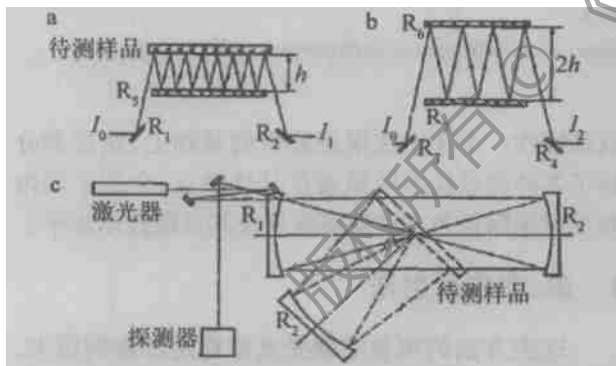


图 2 一般多次反射法(a,b)和光延迟线法(c)

2 基于谐振腔特性的测量方法

激光的出现,促进了谐振腔在反射率测量技术中的应用。谐振腔的特性参数有精细度参数、损耗猝灭特性和脉冲能量衰荡特性等等。根据特性参数的不同,这类反射率测量技术具体分为腔内脉冲能量衰荡法、谐振腔损耗比较法以及利用谐振腔精细度的测量法。

2.1 利用谐振腔的精细度测定的方法

这种方法是通过测量谐振腔精细度的测量,来精确地求出腔镜的反射率。由 2 个反射率分别为 R_1 和 R_2 镜片组成稳定谐振腔,在压电陶瓷上加锯齿波

电压对腔长进行调节,得到图 3 所示的透射谱曲线。图中 FSR 为谱线的自由光谱区,FWHM 为半峰全宽,其精细度为:

$$F = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} \quad (2)$$

理论上可求得透射谱线的精细度为:

$$F = \frac{\pi \sqrt{R_1 R_2}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}} \quad (3)$$

所以可利用 3 个反射镜,依次分别组成 3 组 F-P 腔,从而求出相应的 R_1 和 R_2 。该方法^[4]对高反膜镜片的测量精度较高,可达到 10^{-4} 量级。

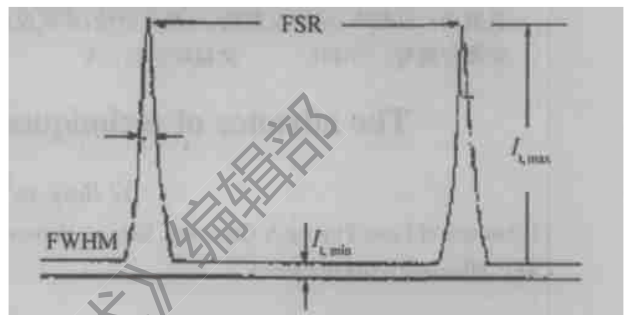


图 3 谐振腔的透射谱

2.2 谐振腔损耗比较测量法

这类方法的测量装置见图 4,它是利用两个激活谐振腔的损耗比较来测量镜片的反射率。在待测样品插入前后,保持其它条件不变,一个激光谐振腔可形成直腔和折叠腔,比较这两个腔的输出特性,从而计算出样品带来的插入损耗。

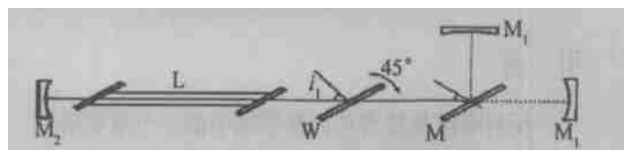


图 4 反射率的谐振腔损耗比较测量法(两个腔)

M_1, M_2 —腔镜;M—待测样品;L—He-Ne 放电管;W—旋转窗

根据菲涅耳定律,旋转窗片对 p 偏振光的反射比为:

$$R = 2L / (1 + L) \quad (4)$$

式中, L 是平板窗片一个界面的菲涅耳反射损耗,它与 p 偏振光对旋转窗界面的入射角有关。由(4)式计算可得到图 5a。在激光两次猝灭时,定义猝灭张角 ϕ 为窗片的两个反射损耗(理论上这两个值相等)所对应的两个入射角之差。这样可以把图 5a 转换为图 5b。

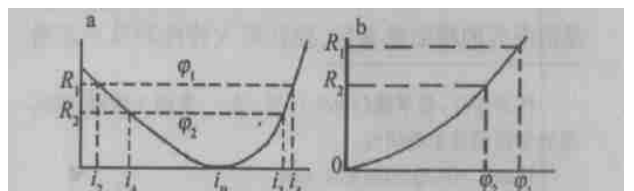


图 5 a—旋转窗片的反射率 R 与入射角 i 的关系 b— R 与猝灭张角 ϕ 的关系

如图 5b 所示,在布儒斯特角为 i_B 时,旋转窗片对 p 偏振光的反射比为 0;当角度为特定角时,谐振腔不出光。这种方法需要分两次进行测量。第 1 次测量,不放入待测样品,旋转窗片 W 到角度为 i_1 使激光束猝灭(或输出最大);然后反向旋转窗片 W 到角度为 i_2 ,使激光束再次猝灭(或输出最大);插入待测样品,并保持谐振腔腔长不变,进行第 2 次测量。在调节时,利用该曲线上不同点的反射特性,形成测激光器的猝灭张角法和测激光器最大输出法两种方法。

(1) 猝灭张角法通过增大反射损耗使激光束猝灭(或输出最大),以确定激光器的猝灭张角。在猝灭张角法中,待测样品的反射率为:

$$R = R_1 - R_2 \quad (5)$$

1977 年, SANDERS^[5] 利用这种方法得到重复精度为 $\pm 10^{-4}$ 。

(2) 在测激光器最大输出法中,利用窗片的反射损耗在布儒斯特角处最小,以此来测定激光器最大输出状态。待测样品 M 的反射率为:

$$R = (1 - L)^4 \quad (6)$$

蒋跃^[6] 利用这种方法得到重复精度为 $\pm 5.0 \times 10^{-5}$ 。其测量精度为:

$$dR = -4(1 - L)dL = 16 \left| 1 - \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^3 \cdot \left| \frac{n^2 (\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}) (n^2 - 1) \sin \theta}{(n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})^3 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right| d\theta \quad (7)$$

式中, n 为旋转窗片的折射率。对于反射率为 99.14%~99.86% 的待测样品,对应的 $\Delta\theta \approx 3^\circ \sim 8^\circ$,测角装置分辨率设为 $d\theta = \pm 15''$,则有 $dR = 1.25 \times 10^{-5}$ 。

2.3 腔内脉冲能量衰荡法

这类方法的光源是单脉冲激光,其测量原理是通过测量单脉冲光辐射在谐振腔中的衰荡时间,求出谐振腔的总损耗,进而得到其腔镜的反射率。根据测量装置和由实验测量值求解腔镜反射率的公式的差异,具体分为以下两种方法。

(1) 采用环形腔^[7]的时间衰减法(见图 6a)。若谐振腔由 n 个镜片构成, R_i 和 α_i 为第 i 个镜片的反射率和损耗,则总反射率为:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i = \prod_{i=1}^n e^{-\alpha_i} = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \alpha_i\right) = e^{-\delta} \quad (8)$$

若待测镜反射率均为未知,可在 $n+1$ 个镜子中,进

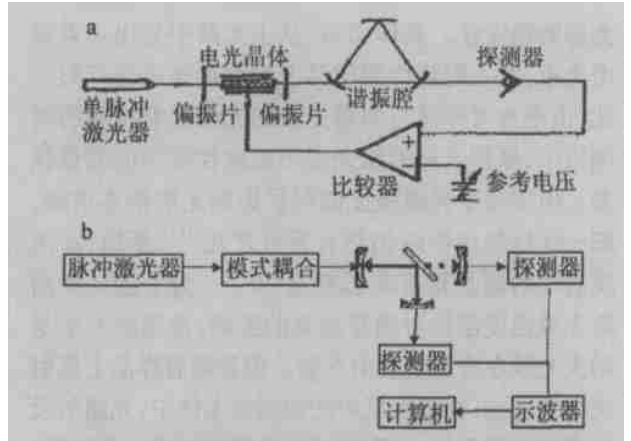


图 6 a—反射率测量的时间衰减测量法 b—光腔衰荡光谱法

行 $n+1$ 次组合。每次选用不同的 n 个,并测得相应的 R ,便可求出各个镜子的反射率。

(2) 采用直腔和折叠腔^[9,10]光腔衰荡光谱法(见图 6b)。所以样品反射率为:

$$R_3 = \exp \frac{L}{c} \frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau} \quad (9)$$

式中, τ_0, τ 分别是直腔和折叠腔的衰荡时间。测量时应尽量保持两腔腔长一致,使衍射损耗介质吸收损耗尽量小。腔镜的反射率可采用直腔方式进行互测。

时间衰减法和光腔衰荡法都是对腔内指数型衰荡信号的检测来获得反射率,摆脱了激光能量输出的起伏带来的误差。反射率的检测精度:

$$\Delta R = (1 - R) \left[-\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} \right] < 0.01(1 - R) \quad (10)$$

该式说明反射率愈高,谐振腔损耗越低,该方法测量结果的精度也愈高。另外也说明了可以用低精度反射率标定出高精度的反射率。对于反射率 $R \geq 0.99990$ 的腔镜^[8],其精度优于 2×10^{-6} 。

3 各种测量方法的对比

由上节可知,第 1 类方法的测量原理相对简单,测量的反射率值范围较广,但测量精度较低,受光源强度的起伏影响较大;而第 2 类方法的测量精度较高,测量结果与光源的稳定性无关,但只适用于高反射率反射率的测量。例如对于光腔衰荡光谱法,若待测样品反射率小于 97%,理论分析可得,脉冲信号衰荡很快,探测器上得到的信号较少,从而影响 $\Delta\tau_0/\tau_0$ 的精度;实验上还需对数据进行截取,可能无法得到测量结果。所以在一般反射率测量中,第 1 类方法是不能替代的。

在第1类方法中,提高测量精度的途径是改进光源的稳定性。具体而言,从主光路中分出一束参考光束,对入射到待测样品上的测量光束进行归一化,由于参考光强与测量光束的光强具有相同的时间因子,原则上可消除光源不稳定性带来的测量误差。但实验中光源强度的起伏影响无法根本消除,归一化后起伏影响仍然有万分之几^[11],所以,多次反射法的测量精度难以超过 10^{-4} 。为了进一步消除光源强度起伏对测量结果的影响,常用的方法是增大光线在样品上反射次数。但是随着样品上反射次数的增加,在多次反射法的测量主体中,光路的设计难度和调节加大,限制了测量精度的进一步提高。

第2类方法从理论上消除光源强度起伏对测量结果的影响。其提高精度的途径转变为减小其它因素(不包括待测样品和腔镜的反射率)对谐振腔特性的影响。其中谐振腔损耗比较有利于测量样品的偏振特性,其误差来源于旋转窗片在不同角度时的吸收、散射损耗之差和测角装置引入的误差;由于这种方法是在谐振腔内进行调节,所以调节难度相对较大。对于利用腔精细度法测量高反射率,测量的样品反射率角度有限,只适合于检测零反射率的镜片;其次待测样品的非球面误差将导致光束在腔内振荡时产生附加像差,造成谐振腔的本征模与入射模不匹配,从而改变透射谱线精细度并影响测量精度;另外由于激光器输出腰斑的漂移,造成了注入腔的模式耦合不匹配,从而改变透射谱线精细度,影响该方法的测量精度。

在第2类方法中,光腔衰荡光谱法具有许多优点。与时间衰减法相比,由于它采用折叠腔,使测量过程相对简单,调节较方便;与利用腔精细度的测量法相比,它可以对镜片任意角度的反射率进行测量;而且模式不匹配引起的高阶模因损耗大,可在其数据处理中排除。它还可利用低精度反射率,标定出高精度的反射率。所以在高反射率测量中,光腔衰荡光谱法具有广泛的应用前景。

4 总结与展望

反射率测量精度的提高,能促进镀膜工艺技术的进一步发展。其中超高反射率的精确测量对强激光传输系统的研制具有重要意义,是提高系统效率、输出功率和最终光束质量的保证。在反射率测量技

术发展中,各部件的革新都在一定程度上促进了新的测量方法的产生,并使测量精度不断得以提高。可以看到,反射率测量技术,通过一定的实验技巧,增加在待测样品上光束的反射次数,或与其它测试技术(如吸收光谱技术,谐振腔损耗特性及其光学参数)的交叉融会,对其测量主体进行变革,配合相应的探测器和光源,能够产生更高精度的测试结果。可以预见,对谐振腔的其它光学参数、特性的进一步开发利用,就会产生新的测试方法。

反射率测量技术的发展使测量系统更加复杂,所需仪器技术含量更高,调节难度更大,工程化更难。另外还提出了许多需要深入研究解决的问题。以谐振腔为例,若要提高测量精度,必须使腔镜不完全反射损耗在数量级上大于腔内其它损耗(谐振腔几何偏折损耗、衍射损耗、腔内介质吸收损耗),这就对激光光束质量、模式匹配、谐振腔失调失配等方面提出了更深入的研究需求。对于镜片在工作环境中的反射率检测技术、强光功率、激光线宽、环境气体的影响,必须深入分析介质吸收损耗模型及其对测量精度的影响程度。

文中的部分参考文献由彭勇提供,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 苏锴隆,丁安华,刘海清. 激光反射镜高反射率的精确测量——“GFS高反射率测量仪”[J]. 光学学报,1982,2(1):57~65.
- [2] 黄永楷,庄大奎. 一种测量高反膜绝对反射率的新方法[J]. 光学学报,1982,2(1):67~71.
- [3] 郑兵. 多程室金膜红外反射率的测定[J]. 中国激光,1985,12(12):746~747.
- [4] 刘杰,李健,于全训. 谐振腔光学参数的测量[J]. 中国激光,1997,24(7):591~594.
- [5] SANDERS V. High-precision reflectivity measurement technique for low-loss laser mirrors[J]. Appl Opt,1977,16(1):19~20.
- [6] 蒋跃. 超高反射率的损耗比较测量法研究[J]. 光学学报,1997,17(11):1594~1598.
- [7] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S. Mirror reflector based on optical cavity decay time[J]. Appl Opt,1984,23:1238~1242.
- [8] 蒋跃. 极低损耗膜片反射率的一种测量方法[J]. 应用激光,1996,16(3):126~128.
- [9] CZYZEWSKIA, CHUDZYNSKIS, ERNST K *et al.* Cavity ring-down spectrography[J]. Opt Commun,2001(8):271~275.
- [10] 孙福革,孙龙,戴东旭. 用光腔衰荡光谱方法精确测量高反镜的反射率[J]. 中国激光,1999,A26(1):35~38.
- [11] 邵桂英,曹银花. 1.06 μm 高反射率绝对测量的研究[J]. 光学机械,1992(6):57~61.