

# 一种测量高反膜绝对反射率的新方法

黄永楷 庄大奎

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

提出了一种利用光延迟线的绝对反射率测量法,并给出实验结果。测量精度优于  $2 \times 10^{-4}$ 。

## 一、引 言

高反膜反射率的精密测定,对于改进涂膜工艺,提高膜层质量,开展膜层应用,都具有重要的意义。特别是对于抗高功率激光破坏膜层的研制尤为重要。

近年来,随着激光技术的发展,反射率的测量方法和精度也在发展和提高。一个重要的发展趋势,就是希望找到一种能够测量各种样品的多次反射测量法,用以达到提高测量精度的目的<sup>[1]</sup>。

我们曾经提出过一种利用光延迟线的能测量各种样品(包括凹面、凸面和平面的)的多次反射测量法<sup>[2]</sup>。但那种方法在作绝对反射率测量时,需要利用三块样品共作三组测量才能求出。这对球面镜样品来说,却非这样做不可。但对平面镜样品来说,就不一定要如此。这里,我们提出了一种新的改进,它不仅保持了文献[2]的优点,而且在测量平面镜样品时,更加简单方便。同时在结构上,比 White 型多次反射法也更为优越<sup>[3]</sup>。

## 二、测 量 原 理

同文献[2]的工作一样,我们仍用离轴共振腔来建立一个多次反射系统。不过,不同的是,这里的腔在作绝对反射率测量时只起一种参考作用。因为,两腔镜的反射率不出现在待测样品反射率的公式中。

设一束光线与光轴成一夹角离轴射入腔内,该光线便在其中来回反射。当腔长满足一定条件时,光在两镜之间经过  $n$  次反射之后又回到入射点,光点在镜面上的轨迹既可以形成点线,亦可以形成圆或椭圆,而且可以沿同一轨迹转很多圈。这与光线的初始入射条件和共振腔的调整有关。

利用光线矩阵<sup>[4]</sup>,我们可以很容易的求得光线在镜面上每次反射的坐标位置和方向,而且能非常方便的导出共振方程。这对我们设计实验系统来说,是必不可少的。

设入射光在第一腔镜上的入射坐标为  $x_0$ , 方向为  $\alpha'_0$  (光轴方向为  $z$ ), 则按 Kogelnik 公式<sup>[4]</sup>,

$$\begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin \theta} \begin{pmatrix} A \sin n\theta - \sin(n-1)\theta & B \sin n\theta \\ C \sin n\theta & D \sin n\theta - \sin(n-1)\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

而

$$\cos \theta = \frac{1}{2}(A+D), \quad (2)$$

其中  $ABCD$  由共振腔的参数决定。若共振腔的腔长为  $d$ , 两球面镜的曲率半径分别为  $b_1$  和  $b_2$ , 则容易求得<sup>[2]</sup>

$$\cos \theta = 1 - \frac{2d}{b_1} - \frac{2d}{b_2} + \frac{2d^2}{b_1 b_2}, \quad (3)$$

于是

$$d_{\pm} = \frac{b_1 + b_2}{2} \pm \frac{1}{2}(b_1^2 + b_2^2 + 2b_1 b_2 \cos \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$\theta = \frac{2k\pi}{n}, \quad 0 \leq k \leq \frac{n}{2}, \quad (5)$$

式中  $n$  是光在一个镜面上的反射次数,  $k$  是在  $0 \leq k \leq \frac{n}{2}$  之间的整数, 它表示光线沿同一轨迹所转的圈数。(4)式是一普遍公式, 适用于各种腔型。

例如, 对于平-凹腔, 利用(4)式, 令  $b_2 = \infty$ , 于是

$$d = \frac{1}{2} b \left( 1 - \cos \frac{2\pi k}{n} \right).$$

若要求反射次数  $n=40$ ,  $k=8$ ,  $b=2000$  mm, 则  $d=691$  mm。若光点的轨迹为圆, 圆的直径为 60 mm, 则每两光点之间的间隔为 4.6 mm。这样, 我们就可在入射镜上挖一  $\phi 3$  的小孔, 作为光线的引入和引出之用。

假如构成共振腔的两腔镜的反射率分别为  $R_1$  和  $R_2$ , 入射光强为  $I_0$ , 则出射光强  $I_1$  显然等于

$$I_1 = I_0 R_1^{n-1} R_2, \quad (6)$$

式中  $n$  为第二反射镜上的反射光点数。然后将镜 2 转到镜 1 一侧, 并将具有反射率为  $R$  的待测样品引入腔内, 如图 1 所示。这时测得的光强为

$$I_2 = I_0 R_1^{n-1} R_2 R^{2n}. \quad (7)$$

利用(6)和(7)式, 便得到待测样品的反射率

$$R = \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{\frac{1}{2n}}. \quad (8)$$

由此可见,  $R$  的数值与  $R_1$  和  $R_2$  无关, 并且测量过程是非常简单而方便的。

应当指出的是, 对于大曲率半径的样品, 测量方法与平面镜相同, 只需将腔镜的间距移动一个距离就成了。但对于小曲率半径的样品, 这样做有时会产生一些困难。这时, 在我们的装置上, 便可采用三镜组合法<sup>[2]</sup>或相对测量法来测出样品的反射率。

容易看出, 这个系统亦可用来测量低散射半透明样品的透过率  $T$ , 它显然等于

$$T = \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{\frac{1}{2n}}. \quad (9)$$

当然, 在这种情况下, 镜 2 不用转动, 而样品则与光轴垂直置于共振腔内。但由于样品的引入, 改变了光程, 因此, 必须重新调整腔长, 以满足共振条件, 否则, 出射光将可能被小孔遮拦。

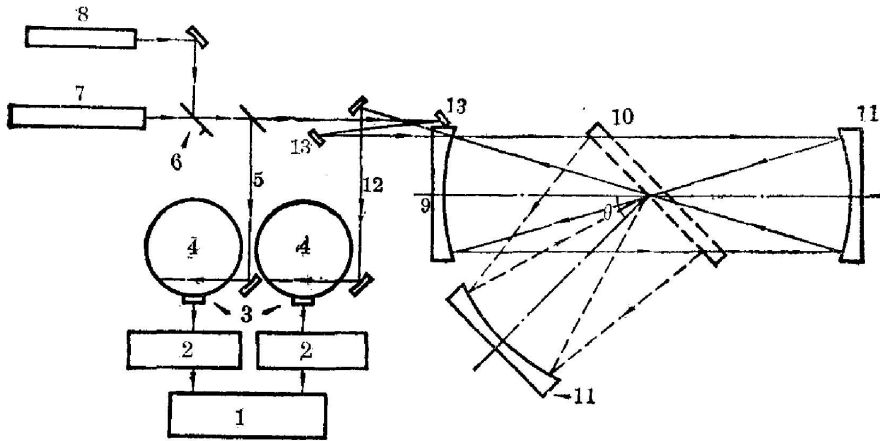


图1 红外反射率测量装置简图

1—数字记录系统; 2—锁相放大; 3—热释电接收器; 4—积分球; 5—参考光束; 6—调制盘;  
7—CO<sub>2</sub>激光器; 8—He-Ne激光器; 9—镜1(R<sub>1</sub>); 10—样品镜(E); 11—镜2(R<sub>2</sub>); 12—信号光束

Fig. 1 Schematic diagram of IR reflectivity measuring system

1—Digital recorder; 2—Phase-locked amplifier; 3—Pyroelectric receiver; 4—Integrating sphere;  
5—Reference beam; 6—Chopper; 7—CO<sub>2</sub> laser; 8—He-Ne laser; 9—Mirror 1(R<sub>1</sub>); 10—Sample  
mirror(R) 11—Mirror 2(R<sub>2</sub>); 12—Signal beam

从而起引误差。

显然, 利用这种方法测量反射率  $R$  和透射率  $T$ , 其测量精度均随反射次数  $n$  的增加而提高。测量结果的方差可以表示为

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\Delta R}{R} \\ \frac{\Delta T}{T} \end{array} \right\} \propto \frac{1}{\sqrt{2}n} \left| \frac{\Delta I}{I} \right| \quad (10)$$

必须注意的是, 在测量具有部分透过的反射膜层时, 不论是测量  $R$  还是  $T$  都要注意第二个界面反射光的干扰, 以及腔内其它多次反射光的干扰。不要让这些干扰光进入积分球。这个问题在实验上利用 He-Ne 激光调整光路, 通过人眼的观察是容易解决的。

### 三、实验装置与结果

实验装置如图 1 所示。He-Ne 激光用作调整光路之用。CO<sub>2</sub> 激光通过 226.2 赫的调制盘调制之后, 经过模匹配反射镜系统从镜 1 上的小孔离轴射入腔内, 光线在腔内经过多次反射之后, 又从镜 1 上的同一小孔输出, 然后射入内涂疏层的检测积分球。信号经热释电钽酸锂元件接收和锁相放大器放大以后, 最后用数字记录器记录。为了补偿激光光强起伏的影响, 我们还在光路中引入一个参考通道, 并在测量时, 同信号通道同时取样读数, 然后统一处理。这样, 我们便大大降低了光强起伏给测量带来的影响。

我们用涂金和硒化锌膜层的平面镜进行了绝对反射率测量, 六次数据如表 1 所示。

$$\sigma_{n-1} = \pm 1.3 \times 10^{-4}$$

表 1

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$\bar{R}$
0.9878 <sub>3</sub>	0.9877 <sub>6</sub>	0.9875 <sub>0</sub>	0.9876 <sub>1</sub>	0.9876 <sub>1</sub>	0.9875 <sub>1</sub>	0.9876 <sub>3</sub>

对同样一块膜,用另一方法测量<sup>[2]</sup>,得到的结果为  $0.9874_3 \pm 3 \times 10^{-4}$ ,两者很接近。

## 四、误差分析

本法的系统误差主要来源有二:

### 1. 检测系统的非线性

由于在检测  $I_1$  和  $I_2$  时,两者的强度不同,如果检测系统的响应存在着非线性,则将影响测量值的偏大。在我们实验的情况下,两者之比  $I_2/I_1$  最大不超过三倍。而接收器检测到的激光功率也小于 1 mW。我们用多孔法<sup>[5]</sup>测量了整个系统的线性,光强从  $\pm 0.1 \sim 15$  mW 范围内变化时,结果皆为线性反应。根据热释电元件的出厂数据,该元件按 10.6 微米的激光功率在 100 mW 以下皆为线性反应<sup>[6]</sup>。这与我们测量的结果一致。故不存在对这项误差的修正。

### 2. 光偏振效应

由于反射膜对不同偏振光在不同入射角下的反射率是不同的<sup>[7]</sup>,因而若用一种偏振光测得的反射率,将不能代表膜层对两种偏振光的平均反射率。在我们的情况下,CO<sub>2</sub> 激光输出基本上为自然光,入射角小于 20°。故给出的测量值是对两种偏振光的平均值。

## 五、结 论

这里提出的方法适用于各种激光光源。与 Arnon 等人采用的 White 型多次反射法<sup>[3]</sup>相比,大致有以下几点:

(1) 从精度上讲 两种测量相同,但这只有对高反膜才能如此;对反射率稍低的膜,则两者将相差较大。因为白炽光源的单色亮度要比激光光源低十几个量级,如果保持反射次数相同,则测量低反膜的信噪比,两者将要相差很多,因而精度也就要低。

(2) 从被测样品的多样性讲 我们的方法不仅可以测量平面、大曲率半径的样品,而且也可以测量小曲率半径的样品,对于 White 型系统则就比较困难。

(3) 从波长范围讲 虽然激光的调谐范围不如白炽灯宽,测量介质膜的反射带宽不太方便,但如果采用调频激光器,则这一缺点可以得到一定程度的克服。但激光的高单色亮度和方向性好的优点,白炽光源是无法比拟的。

(4) 从结构上讲 我们的结构更加简单经济,加工也较容易。因为我们构成多次反射的系统,只需用两面反射镜;而 White 型系统则需用三面反射镜。不但如此,我们的系统可以用任意曲率半径的球面镜来构成;而 White 型系统则必须用三面曲率相同的球面镜来构成,而且必须是共焦的。在调整测量系统时,也要求较严格。因而我们的方法容易在一般的实验室推广。

## 参 考 文 献

- [1] В. С. Лисицын, Ю. М. Надежкий и др., *Приб. Тех. Экспер.* 1975, №. 4 (Июль-Авг), 183.  
[2] 黄永楷, 孙伯荣等; 《计量学报》, 1981, 2, No. 1 (1), 18.  
[3] O. Arnon, P. Baumeister; *Appl. Opt.*, 1978, 17, No. 18 (15 Sep), 2913.  
[4] H. Kogelnik, T. Li; *Appl. Opt.*, 1966, 5, No. 10 (Oct), 1550.  
[5] M. Nonaka, T. Kashima; *Japan. J. A. P.*, 1963, 2, No. 12 (Dec), 785.  
[6] 私人通讯。  
[7] F. A. Jenkins, H. E. White; «*Fundamentals of Optics*» Fourth Edition (McGraw-Hill Kogakusha, LTD, 1976).

## A new method of determining absolute reflectivity of high-reflectivity-films

HUANG YONGKAI AND ZHUANG DAKUEI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Academia Sinica)

(Received 11 March 1981)

### Abstract

This paper presents a new method of measuring high reflectivity-films in respect of their absolute reflectivity by using a spherical cavity optical delay line. This method is characterized by

(1) Arbitrary adjustment of the number of reflections of a light beam on a sample mirror and the pattern traced by the light spot and hence a greater suitability to measurements of various kinds.

(2) With reflectivity given in terms of its absolute value.

(3) Simple in structure, easy for use, suitable for a general application to ordinary laboratories.

This paper gives the theoretical calculation formula for designing an optical delay line and a full consideration of this idea used as a reflectivity measuring instrument. The paper also points out that it is possible to measure the transmissivity of low scattering samples with this instrument. Experimental results show that this method can be used to measure the reflectivity of high-reflectivity-films with a precision of better than  $2 \times 10^{-4}$ .