

对称膜堆定值监控的反射率圆图技术

郭 屏 郑舒颖
(北京师范大学物理系) (北京光电技术研究所)

提 要

已知对称膜堆 $[A2BA]^m$ 的大体结构和基底反射率,通过反射率圆图技术和简单算术运算,可得到膜堆的确切结构和定值监控的参数。并给出了监控模式的设计步骤和实验结果。
关键词: 多层膜;反射率圆图。

一、引 言

由于定值监控方法的出现^[1]和推广^[2], $[A2BA]^m$ 类型的膜堆的产品性能及其重复性有了显著的改善。我们曾系统地研究了反射率圆图辅助技术对于 $[A2BA]^m$ 和 $[AB2CBA]^m$ 两种薄堆的定值法监控问题^[3],指出如果在反射率圆图上添加若干定比厚度(CTR)等值曲线,就可以容易地从图上读出监控参数。本文更加具体地探讨与 $[A2BA]^m$ 膜堆监控问题有关的圆图方法。这里面存在两种不同的目标:第一种,已知 $[A2BA]^m$ 膜堆的具体结构,并规定了监控波长,要求出两个监控水平,即起始和终止的反射率或透过率。第二种,只知道膜堆的大体结构(即 $[A2BA]^m$ 类型或 $[B2AB]^m$ 类型)和起始监控水平,然后根据最佳监控灵敏度考虑,同时求出膜堆的精确结构和其他监控参数。本文的内容是属于后者。

二、定比厚度曲线

假定 $[A2BA]^m$ 膜堆的基本半周期的两层膜A和B,镀在复振幅反射率为 r_s 的基片上(图1),这两层膜的相位厚度分别是 δ_A 和 δ_B 。在设计波长上, δ_A 和 δ_B 之和等于 $\pi/2$,并且 r_s 是实数。所以镀上A和B层以后,反射率 r 从正实轴顺时针地转到负实轴上;或则相反,从负实轴转到正实轴上。我们发现^[3],在振幅反射率复平面上, $\tan 2\delta_A/\tan 2\delta_B$ 的等值线是一系列圆弧,犹如图2所示。圆弧的参数由下列给出:

$$\left. \begin{aligned} \text{圆心} &= \left[\frac{u(1+f_B^2) - v(1+f_A^2)}{2(uf_B - vf_A)}, 0 \right], \\ \text{半径} &= \left[\frac{u(1+f_B^2) - v(1+f_A^2)}{2(uf_B - vf_A)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} u &= -(1+f_A^2)/(1-f_B^2), \\ v &= \tan 2\delta_A/\tan 2\delta_B, \\ f_I &= (1-n_I)/(1+n_I). \quad (I=A \text{ 或 } B) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

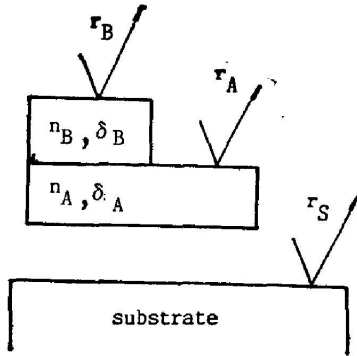


Fig. 1 The first half period layers, A and B, of the symmetric stack $(A2BA)^m$ on the substrate with an amplitude reflectance r_s .

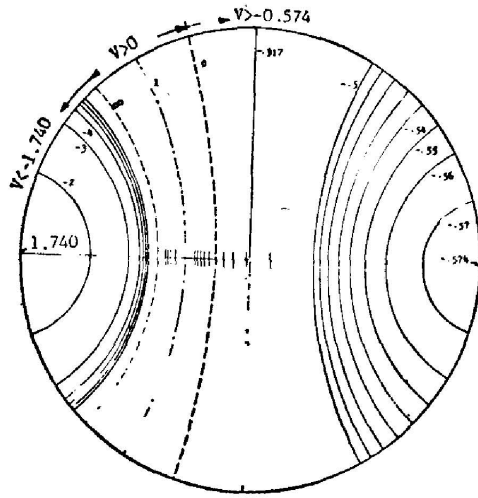


Fig. 2 The CTR contours given by Eq. (1) for the stack $(A2BA)^m$, where $n_A=2.35$ and $n_B=1.35$

我们称这些圆弧为 $[A2BA]^m$ 膜堆的定比厚度(CTR)曲线。这里“定比厚度”并非指相位厚度本身之比,而是指确定的相位厚度的正切函数之比。仅当 $v=1$ 时,这两者才是一致的。

图 2 是低通膜堆($n_A=2.35$ 和 $n_B=1.35$)的 CTR 等值线分布图。该图也适用于高通膜堆($n_A=1.35$ 和 $n_B=2.35$),但是图上所标的数值不再是 v 的数值,而是 $1/v$ 的数值。譬如,在图 2 中,和虚轴相重合的 CTR 等值线,具有 $v=-0.317$; 对于高通膜堆该轴则对应于 $v=-3.159$ CTR 等值线。这些 CTR 等值线将有助于确定定值法监控的监控参数。

三、监控参数的确定和实验结果

将含有 CTR 曲线的圆图和对应膜层材料的反射率圆图相重叠,或者在这些反射率圆图上加绘 CTR 曲线,即可方便地确定任何初始反射率下的对称膜堆结构的监控系数。这一对称结构膜堆的 v 数值是给定的。应当挑选最合理的 r_s 和 v 的数值,使第一膜层的终点反射率落在变化最灵敏(对厚度变化而言)的区域。根据最近的资料^[4],这个区域处于复振幅反射率单位圆中上和下两个半圆的中部。所以,在下面例子中我们选取与虚轴重合的 CTR 等值线。

为了叙述方便,下面将采用薄膜光学中惯用的符号,用 H 和 L 分别代表高的和低的折射率材料的四分之一波膜层。这样,对称膜堆 $[A2BA]^m$ 可以具体地表示为 $[\alpha H2\beta L\alpha H]^m$, 或者 $[\alpha L2\beta H\alpha L]^m$, 这里 α 和 β 是常数。

首先,确定 $[\alpha H2\beta L\alpha H]^m$ 膜堆的监控参数。假定基底的振幅反射率 $r_s=0.332$, 这相当于在折射率为 1.52 的玻璃上预镀了两层膜 HL 。在镀第一层膜 αH 时,镀层的振幅反射率矢量在该层反射率圆图上从 r_s 位置顺时针地旋转,扫过 4.50 根厚度等值线,到达负虚轴上(图 3a), 终点振幅反射率 $r_A=-0.526i$ 。接着镀基本半周期的第二层 βL , 反射率矢量在 $n_L=1.35$ 反射率圆图上继续扫过 12.25 根厚度等值线, 到达了负实轴上(图 3b), 终点

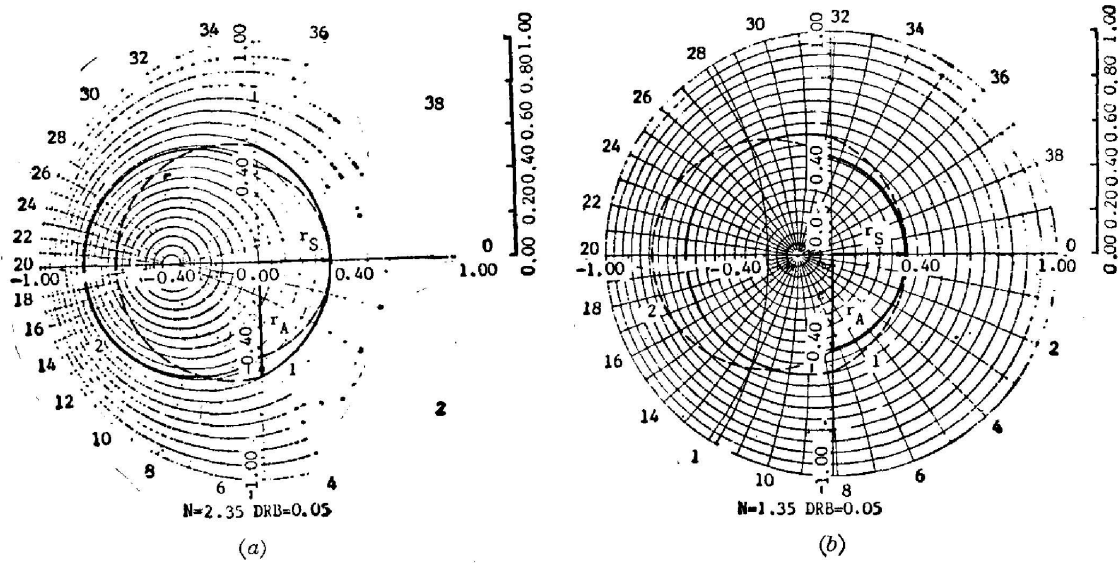


Fig. 3 Amplitude reflectance evolutions, starting with $r_s = 0.332$, are closed curves for the basic periods:

1, $(0.225H1.225L0.225H)_M$; 2, $(0.373L1.590H0.373L)_M$. These curves are depicted on the reflectance diagrams for $n_H = 2.35$ (a) and $n_L = 1.35$ (b), respectively

反射率 $r_B = -0.799$ 。以上是说明在监控波长 λ_M 上的振幅反射率随光学厚度演变的情况。对正入射的情况, 两层膜的相位厚度分别为

$$\left. \begin{aligned} 2\delta_H &= \frac{4\pi(nd)_H}{\lambda_M} = 4.50\pi/20, \\ 2\delta_L &= \frac{4\pi(nd)_L}{\lambda_M} = 12.25\pi/20. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中脚标 M 特指监控波长。如果用 $\lambda_M/4$ 表达这两层膜的光学厚度, 从上式得到

$$(nd)_H = \alpha_M \lambda_M/4; \quad (nd)_L = \beta_M \lambda_M/4. \quad (4)$$

将这些代入(3)式, 即可求得

$$\alpha_M = 0.2250, \quad \beta_M = 0.6125. \quad (5)$$

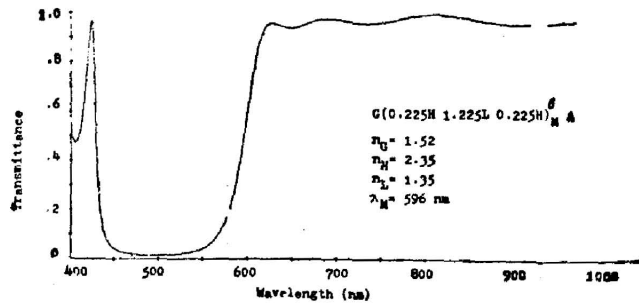
于是, 在监控波长上该膜系的结构为: $(0.225H1.225L0.225H)_M$ 。再则, 监控波长和膜堆设计波长 λ_0 (即反射带中心波长) 的关系如下

$$\frac{\lambda_M}{\lambda_0} = \frac{1}{\alpha_M + \beta_M} = 1.194. \quad (6)$$

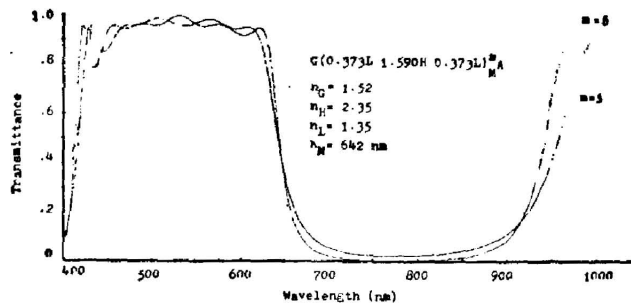
所以, 在设计波长 λ_0 上该膜堆又可表示为 $(0.269H1.463L0.269H)_M$ 。其中的系数等于(5)式的结果乘以 1.194。我们将膜堆表示式和监控参数总结在下表中。

Table

	$(0.225H1.225L0.225H)_M$		$(0.373L1.590H0.373L)_M$	
Termination levels	r_s	0.332 (0.932)	0.332 (0.932)	
	r_a	-0.526i (0.763)	-0.434i (0.853)	
Monitoring wavelengths	λ_M	1.194 λ_0	60.856 λ_0	

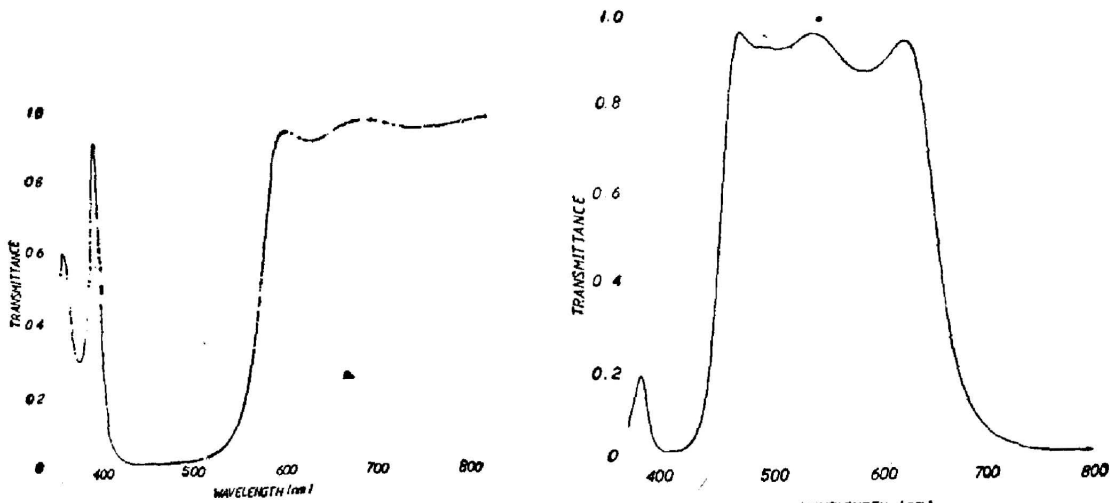


(a)



(b)

Fig. 4 Calculated spectral transmittances for the stacks shown in the table



(a)

(b)

Fig. 5 Measured spectral transmittances for the stacks shown in the table

在表中, 还列出一种高通膜堆 $(\alpha L 2\beta H \alpha L)^m$ 的监控参数和具体结构式。该结构具有 $v = -3.159$, 其 OTR 等值线也和虚轴重合。起始振幅反射率也取为 0.332。从两个膜层的反射率圆图读得基本半周期中两层膜的相位厚度分别为 $2\delta_L = 7.45\pi/20$, $2\delta_H = 15.90\pi/20$ 。根据该表所列的对称膜堆结构式, 计算得到的光谱透过率曲线列于图 4(a) 和 (b) 中。表中带有括号的数字是指对应的实测透过率, 这里假定未镀过膜的基片 ($n_s = 1.52$) 的透过率为 1.0^[5]。

计算表明,由于膜层相位厚度的读数误差,导致监控反射率所在的波长的波动,波动范围小于 1 nm。此时反射率中心波长的偏差约 10 nm。

这两种膜堆光谱透过率的实验曲线(图 5)和计算的曲线是符合的。

四、结 语

在振幅反射率复平面上,对称膜堆(A2BA)^m的定比厚度等值线是一系列和实轴正交的圆弧,有些等值线通过膜堆反射率变化最陡峭区域。出于对定值法监控灵敏度的考虑,本文采用这样的监控模式,即预先选定 ν 值和起始的监控反射率,通过反射率圆图辅助技术,就可以确定对称膜堆的确切结构和监控参数。采用了这些监控参数得到的两种对称膜堆的光谱透过率实验曲线与计算结果是符合的。

感谢北京光电技术研究所严昭南和贾小仲同志帮助做实验。

参 考 文 献

- [1] H. A. Macleod, E. Pelletier; *Opt. Acta*, 1977, 24, No. 9 (Sep), 907.
- [2] F. T. Zhao; *Appl. Opt.*, 1985, 24, No. 20 (Oct), 3339.
- [3] S. Y. Zheng, P. Guo *et al.*; «*Optical Interference Coatings, 1988 Technical Digest Series*», Vol. 6, (Optical Society of America, Washington, D. C. 1988), 101~104.
- [4] D. Smith, P. Baumeister; *Appl. Opt.*, 1979, 18, No. 1 (Jan), 111.

Reflectance diagram technique in level monitoring of symmetric stacks

GUO PING

(*Department of Physics, Beijing Normal University*)

ZHENG SHUYING

(*Beijing Institute of Opto-Electric Technology*)

(Received 16 January 1989)

Abstract

It has been shown in this paper that the constant thickness ratio contours for the symmetric multilayers of $(A2BA)^m$ type are a series of circular arcs perpendicular to the real axis on the complex amplitude reflectance diagram for the layer A or B . Some of the CTR contours pass through the areas having drastic changes in reflectances. By taking the reflectance change sensitivity to the optical thickness into consideration, a level monitoring scheme for such multilayers with $v = -0.317$ or -3.169 is chosen. When the starting reflectance of a precoated substrate is given, the monitoring terminations for the individual layers in the basic layer periods, the monitoring wavelengths, as well as the exact constructions of the multilayers are determined with the aid of the reflectance diagram technique. During this course, only very simple arithmetic calculations are involved. The measured spectral transmittance of two symmetric multilayers, produced by using the above monitoring scheme, are very good in accordance with the numerical results of the designed ones.

Key words: multilayer; reflectance diagram.