

微机求解透明光学薄膜元件 N 、 d 的方法

李天从

黄佳钰

(华侨大学)

(机械委工程设计院)

摘 要

本文提出利用单层介质材料的光谱透射率曲线,在微机上用最优化方法直接求解 $n(\lambda)$ 和 d 的方法.它比椭偏法具有更好的精度(n 分辨到0.001, d 分辨到1 Å),速度更快. $n(\lambda)$ 值可作为膜系计算和分析的依据.

关键词 光学薄膜元件, 透射率, 最优化方法

一、前 言

在设计光学薄膜膜系的特性时,设计者如有用于构成膜系的膜层材料的折射率 N 的精确数据,尤其是在该膜系所使用的光谱区域内的色散参数 $N(\lambda)$,对于指导膜系的设计具有十分重要的意义,可是,现有大部分折射率的数据是针对块状材料的.一般说来,这些数据和在薄膜态的相应数据会有相当大的差别.如Bennett和Bocty给出了一个厚度为346 Å的硅膜的例子,它在可见光谱区域内的 n 值在0.23—3.2的范围内,而从文献上引用的块状材料的 n 值竟是5.5.同时,薄膜的光学常数强烈地依赖于其制备的工艺条件.仅仅引用文献中的数据常常会造成失误,掌握和控制各个具体制备条件下薄膜的光学常数是制造优质光学薄膜元件的前提.

测定薄膜光学常数的常用方法是光度法、椭圆偏振法、布儒斯特角法和利用波导原理的棱镜耦合器法.

光度法测定的折射率 n 的误差为0.01—0.09.椭圆偏振法测量精度高,配上微机之后数据处理速度较快,但通常只能测量6328 Å这一特定波长对应的 n 值,而且操作不甚方便.全波段的椭偏仪仅仅在日本等少数国家有商品出售,但价格太贵,且不易买到.

我们利用单层薄膜的光谱透射率曲线,在微机上用最优化方法直接求解全波段折射率 $n(\lambda)$ 和这层膜的几何厚度 d ,与椭偏法相比,具有更好的精度(n 可以分辨到0.001, d 可以分辨到1 Å),而且速度更快,所有运算只需几十秒.求解打印出来的薄膜材料的 $n(\lambda)$ 值,可以直接作为膜系设计和计算的依据.

本文1988年6月20日收到.

二、理论计算

根据麦克斯韦方程和薄膜光学理论, 导出基片和单层膜组合的特征矩阵

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta_1 & (i/\eta_1) \sin\delta_1 \\ i\eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{pmatrix},$$

其中, 膜层的位相厚度 $\delta_1 = (2\pi/\lambda) n_1 d_1 \cos\theta_1$; 对 P 分量 $\eta_1 = n_1/\cos\theta_1$; 对 S 分量 $\eta_1 = n_1 \cos\theta_1$.

由膜系的光纳 $Y = C/B$, 得

$$Y = \frac{\eta_2 \cos\delta_1 + i\eta_1 \sin\delta_1}{\cos\delta_1 + i(\eta_2/\eta_1) \sin\delta_1},$$

则光纳为 η_0 的入射介质和光纳为 Y 的膜系之间的界面的能量反射率为

$$R = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \cdot \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^*$$

当入射介质为空气, 入射角为零时, 则玻璃——介质膜系的反射率和透射率分别为

$$R = \frac{(1+n_1^2)(n_1^2+n_2^2)-4n_1^2n_2+(1-n_1^2)(n_1^2-n_2^2)\cos(4\pi n_1 d/\lambda)}{(1+n_1^2)(n_1^2+n_2^2)+4n_1^2n_2+(1-n_1^2)(n_1^2-n_2^2)\cos(4\pi n_1 d/\lambda)},$$

$$T = \frac{8n_1^2n_2}{(1+n_1^2)(n_1^2+n_2^2)+4n_1^2n_2+(1-n_1^2)(n_1^2-n_2^2)\cos(4\pi n_1 d/\lambda)}.$$

由上可知, 基片上单层介质膜的反射率 $R(\lambda)$ 和透射率 $T(\lambda)$ 是折射率 $n(\lambda)$, 薄膜几何厚度 d 的函数。通常入射介质为空气, 基片的 n_2 是已知的。因此, 理论上便可从测出的 $RD(\lambda)$ 和 $TD(\lambda)$ 值求得 $n(\lambda)$ 和 d 。由于一般不可能把 n 和 d 写成 R 和 T 的显函数, 其表达式是非线性的, 所以可看作为一个最优化的问题进行处理。

三、方法和实例

1. 确定评价函数, 令

$$F = (1/L) \sum_{\lambda} |T(\lambda) - TD(\lambda)|$$

其中, L 代表所测量及优化的波点数。所测的波点越多, 即 L 越大, 则精度越高。

2. 镀制单层薄膜: 在透明玻璃基片上镀制 $\lambda/4$ 或 $3\lambda/4$ 的透明单层薄膜。

3. 测量实镀薄膜的 $TD(\lambda)$: 用高精度的分光光度计测量并记录 $TD(\lambda)$ 曲线。

4. 最优化方法: 应用黄金分割法或渐近法, 编制好薄膜计算机程序, 将各波点的 $TD(\lambda)$ 输入微机。对 n, d 进行优化, 当 F 为极小值时, 所对应的 n, d 即为该膜层的色散参数 $n(\lambda)$ 和几何厚度 d 。

5. 实例: 在 K_9 玻璃上镀制 Ta_2O_5 薄膜, 数据见表1。

表1 Ta_2O_5 薄膜的 $n(\lambda)$ 、 d 数值*

$\lambda(\text{nm})$	TD	$ T-TD $	n	ng
400	0.838	0.000581	2.022	1.5281
420	0.823	0.000019	2.002	1.5261
440	0.810	0.000008	1.998	1.5244
460	0.800	0.000020	1.993	1.5229
480	0.793	0.000026	1.986	1.5215
500	0.787	0.000123	1.985	1.5203
520	0.783	0.000010	1.982	1.5191
540	0.780	0.000068	1.981	1.5181
560	0.779	0.000062	1.978	1.5172
580	0.778	0.000131	1.978	1.5164
600	0.779	0.000063	1.974	1.5156
620	0.780	0.000025	1.972	1.5149
640	0.781	0.000047	1.972	1.5142
660	0.783	0.000013	1.970	1.5136
680	0.785	0.000061	1.969	1.5131
700	0.788	0.000622	1.968	1.5125
720	0.790	0.000459	1.968	1.5120
740	0.792	0.000135	1.968	1.5110
760	0.795	0.000692	1.968	1.5111
780	0.797	0.000162	1.968	1.5107
800	0.800	0.000129	1.966	1.5103

* $F=1.64E-04$, $d=75.217(\text{nm})$.

四、讨 论

1. 可靠性分析: 由上例可见, 用微机优化后在4000—8000 Å 范围内, 每隔200 Å 求得 Ta_2O_5 的 n 和这层膜的 d , 得到的透射率与该膜层的实测透射率的平均误差 $< 0.02\%$. 对于膜系设计和薄膜制备, 其精度足够令人满意. 用本方法求解 TiO_2 , Y_2O_3 等氧化物的色散参数和几何厚度, 设计出的数据与实镀曲线有很好的 consistency.

2. 如何求解透明基片上有吸收的介质膜或金属膜的 N 和 K : 可利用 Hadley 和 Dennison 曲线确定, 亦可利用 Bennett 和 Booty 方法. 后者应用单变量搜索技术, 即用薄膜计算机程序的一种最优化的方法, 因为 N 和 K 不是高度相关的量, 故此法相当有效.

参 考 文 献

- [1] Macleod, H.A., 著, 周九林, 尹树百译, 光学薄膜技术, 国防工业出版社, (1974).
- [2] 唐晋发、郑权编著, 应用薄膜光学, 上海科学技术出版社, (1984).

A Microcomputer-based Method for Evaluating N and d Values of a Transparent Optical Thin Film

Li Tiancong Huang Jiayu

Abstract

For evaluating $n(\lambda)$ and d values of a transparent optical thin film, this paper presents a microcomputer-based optimal method by making use of the spectral transmittance curve of single film dielectric material. As compared with the elliptical polarization method, this faster method is also better in its accuracy, with a n value up to 0.001 and a d value up to 1 Å. The $n(\lambda)$ value may serve as a basis for the computation and analysis of a film system.

Key words optical thin film elements, transmittance, optimization methods.