

光学薄膜的非均匀色散研究

张 伟 李庆波 薛 岩 赵恒谦

(哈尔滨工业大学)

摘要: 本文从光学薄膜实际结构的理想模型出发, 讨论了沿膜厚方向上的非均匀折射率及非均匀色散, 提出了非均匀色散的可能模型, 设计了非均匀色散的测量方法, 并对ZnS薄膜进行了测量。

文中给出了ZnS薄膜的测量与计算机计算结果, 并对此进行了分析和讨论。

Study on the inhomogeneous dispersion of the optical thin films

Zhang Wei, Li Qingbo, Shue Yan, Zhao Heng qian

(Harbin Institute of Technology)

Abstract: The inhomogeneous index and inhomogeneous dispersion of the optical thin films are discussed from the ideal model of the real structure of these, and possible models have been proposed for the inhomogeneous dispersion in this thesis. A method of measuring the inhomogeneous dispersion has been designed. And the measurements have completed for the ZnS thin layers.

The results of the measurement and the computation by computer are given for the ZnS thin layers in this thesis.

一、引 言

光学薄膜的色散及沿膜厚方向上的折射率非均匀现象已为人们所熟知, 尽管有关非均匀折射率的理论还不尽完善。一些模型^{[1][2][3]}被提出用来拟合测量的非均匀折射率已取得比较满意的结果。我们知道, 由于薄膜的特殊结构, 无疑薄膜的色散及折射率的非均匀是同时存在的, 这就是折射率的非均匀色散, 是薄膜的综合缺陷之一。有关薄膜非均匀色散的研究, 国内外尚不多见, Bertrand Bouard等(1985)^[3]的测量结果表明了这种现象确实存在, 即在不同的膜厚处具有不同的折射率色散, 但Bertrand Bouard等仅给出了薄膜最内层和最外层(将单层膜看作许多个子层组成)的测量结果, 而未能就此问题做进一步的研究。本

文就薄膜的非均匀色散问题进行了研究，提出了描述这种非均匀色散的数学模型，并以ZnS薄膜为例，测量与计算了这种非均匀色散，给出了非均匀色散系数的函数关系曲线。

二、薄膜结构模型、非均匀折射率及色散

70年代初H. K. Pulker等^[4]就提出圆柱体状的薄膜结构模型(如图1a所示),此后,S. Ogura^[5]在他的博士论文中提出了两种修改模型(如图1b和c所示)。

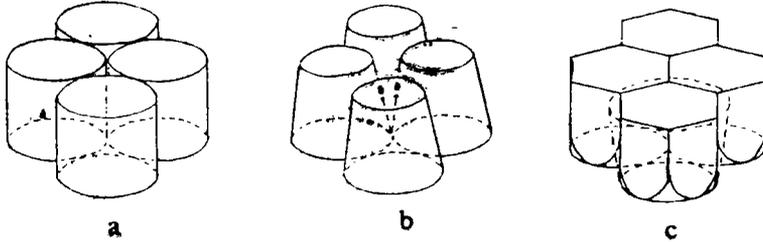


图1 薄膜微观结构的三种理想模型

只有图1b所示的模型具有明显的沿膜厚方向上的折射率变化,这是由于在不同的厚度截面上,这一模型的锥体体积是变化的,锥体间的空气隙体积也是变化的缘故。正是这种特殊的结构,不仅使薄膜具有沿膜厚方向上变化的折射率,也使得薄膜的色散具有了综合的意义,即为电介质(柱体)与自由电子气体(空气隙)色散的综合,其综合情况是非常复杂的,对大部分可见区的膜料来说,较合适的简化模型为^{[6][7]}

$$n^2(\lambda) = 1.0 + \frac{\lambda^2}{A + B\lambda^2} \quad (1)$$

式中, A 、 B 为与膜料及空气隙特性有关的常数。

关于薄膜沿厚度方向的非均匀折射率,除按将厚度分成若干子层,使每个子层间具有微不同的折射率这种简单模型^[1]处理外,下面两种模型与实际测量结果比较接近

$$n(t) = Ae^{-B'/t} \quad (2)$$

$$n^2(t) = A' + \frac{B'}{C' + t^2} \quad (3)$$

式中, t 为膜层厚度; A 、 B 、 A' 、 B' 与 C' 均为薄膜特性有关的常数。

需要特别指出的是:无论是作者原意还是从实际测量的结果来看,上述两个模型均是指在薄膜膜层中某厚度 t 处的折射率,也可理解为该处 δt 子层的折射率,而不是该厚度 t 下的平均折射率,即通常可测量到的实际折射率。图2给出了膜厚为 d ,膜层中某厚度 t 及该处 δt 子层的示意图。按照以上概念,并根据实际测量点的规律——最初厚度处,折射率变化缓慢,此后随厚度变化较快,当膜厚增加到某一厚度后,折射率的变化又显得平缓——具有反正切的规律,由此可知方

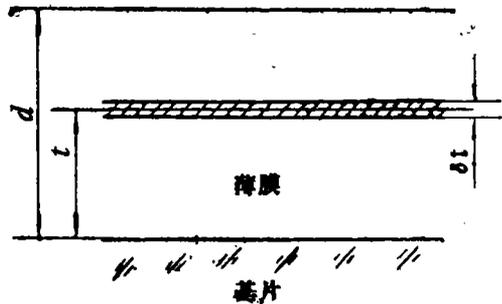


图2 膜厚,膜层中某厚度(t)及该处子层 δt 的示意图

$$n^2(d) = \frac{1}{d} \int_0^d \left(A' + \frac{B'}{C' + t^2} \right) dt$$

$$= A + \frac{B}{d} \operatorname{arc} \operatorname{tg}(cd) \quad (4)$$

这里 A 、 B 、 C 均为常数，且

$$\left. \begin{aligned} A &= A' \\ B &= B' / \sqrt{C'} \\ C &= 1 / \sqrt{C'} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

实际测量及计算表明^[8]，这一模更符合非均匀折射率随厚度的变化规律。

三、非均匀色散及其测量

1. 非均匀色散

所谓非均匀色散是指在薄膜的不同厚度处具有不同的折射率色散，亦可认为该膜层在不同波长处具有不同的沿膜厚方向的非均匀折射率。按照这两个定义，非均匀色散的可能模型为

$$n^2(\lambda, t) = 1.0 + \frac{\lambda^2}{A(t) + B(t)\lambda^2} \quad (6)$$

或

$$n^2(\lambda, t) = A(\lambda) + \frac{B(\lambda)}{d} \operatorname{arc} \operatorname{tg}[c(\lambda)d] \quad (7)$$

式中， $A(t)$ 、 $B(t)$ 为与膜料及薄膜孔隙气体特性有关的厚度函数， $A(\lambda)$ 、 $B(\lambda)$ 与 $C(\lambda)$ 为与膜料、孔隙、基片及其它工艺因素有关的波长函数。

显然方程 (6) 与 (7) 是同一物理原型的不同数学描述，且方程 (6) 较方程 (7) 更简单，由薄膜的色散方程较非均匀模型更加成熟与完善，因此选择方程 (6) 来拟合与计算非均匀色散更加合适。

2. 测量方法

采用光学监控与石英监控相结合的方法，以特定波长监控，在膜层生长过程中的不同厚度层次上，用波长扫描测量薄膜的透过率，同时读出该透过率对应的厚度值，由此得到多组 (T, d, λ) 值，进而可根据 T 、 d 、 λ 及折射率 n 的关系由计算机反解得到薄膜的非均匀、色散及非均匀色散的具体值。

考虑到基片背面反射影响的透过率公式为

$$T = \frac{T_a T_b}{T_a + T_b - T_a T_b} \quad (8)$$

式中， T_a 及 T_b 分别为薄膜及基片背面的透过率，且

$$T_a = \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0} \frac{(1 - r_1)^2 (1 - r_2)^2}{1 + (r_1 r_2)^2 + 2 r_1 r_2 \cos \delta} \quad (9)$$

别为薄膜上、下界面的Fresnel反射系数； δ 为薄膜的位相厚度。

方程(8)与(9)给出了 T 与 θ_0 、 λ 、 d 及 n 的函数关系(n 含在Fresnel反射系数及位相厚度中， d 含在位相厚度中)，由此根据测量值、利用计算机解出折射率，进而分别按方程(1)、(4)及(6)拟合 $n \sim x$ 、 $n \sim d$ 及 $n \sim \lambda$ 、 d 关系得到薄膜的色散、非均匀及非均匀色散模型中的系数。

四、测量结果、处理与分析

表1给出的是ZnS薄膜的一组典型测量值。

根据表1的测量数据，反解方程(8)与(9)得到不同厚度处的色散及不同波长处的折射率非均匀，如图3与4所示，图中的实线曲线是按方程(6)与(7)的拟合结果。

表1 ZnS薄膜的一组典型测量值

λ (nm) T (%) d (nm)	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
33	76.4	76.6	76.8	77.0	77.5	77.6	78.5	79.0	79.2	79.4	81.5
38	74.8	75.5	76.0	76.5	76.5	76.7	76.5	76.6	76.9	76.9	77.0
54	69.0	69.5	69.7	69.9	70.0	70.1	70.0	70.0	70.1	70.2	70.2
75	67.3	67.6	67.6	67.6	68.0	68.0	68.1	68.1	68.2	68.2	68.3

工艺条件：入射角： $\theta_0 = 14^\circ$ ；入射介质：空气；基片：K9玻璃；基片温度：140~150℃；真空度： $(3 \sim 4) \times 10^{-5}$ Torr。

从图中可见，ZnS薄膜的非均匀色散是非常明显的，方程(1)、(4)中的系数 A 、 B 与 C 不再是常数，而分别是关于厚度及波长的函数。根据方程(6)及(4)的拟合结果，方程(6)中的 $A(d)$ 、 $B(d)$ 曲线如图5所示。

五、结论与讨论

我们也对冰晶石、氟化镁薄膜做了同样的研究，这些研究表明：非均匀色散是存在的，且遵守一定的规律：

1. 方程(4)给出的非均匀模型更接近实际；
2. 非均匀、色散亦或非均匀色散，在波长较短区及厚度较小时，更加明显；
3. 在膜厚较大或长波区，方程(6)中的 $A(d)$ 、 $B(d)$ 趋于常数(参见图5)，表明

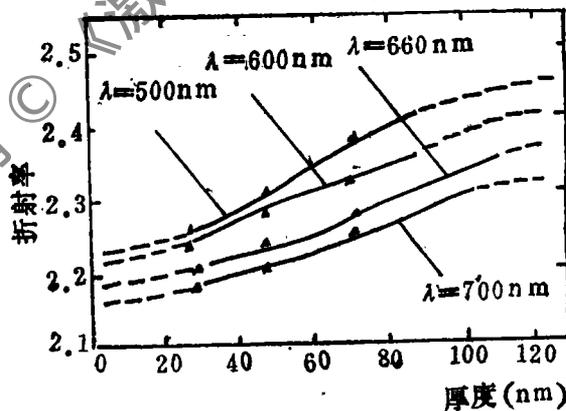


图3 不同厚度下ZnS薄膜的色散

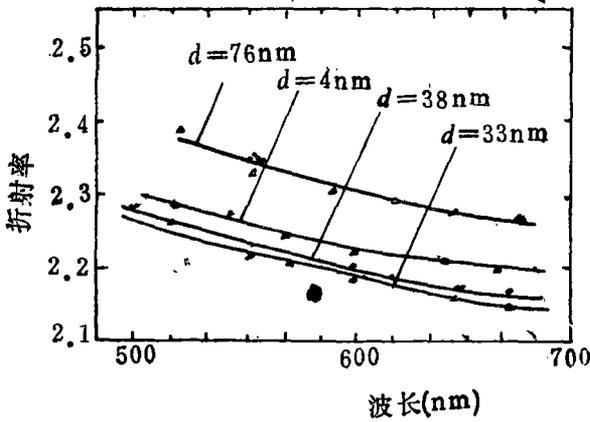


图4 不同波长处ZnS薄膜的非均匀

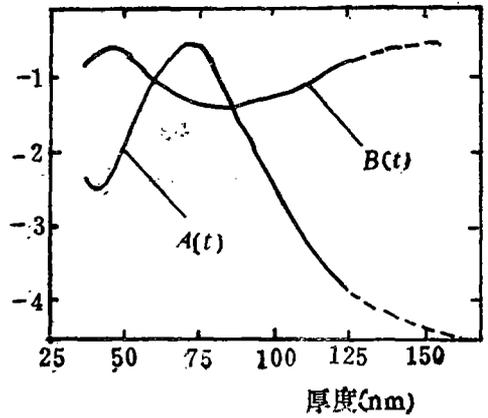


图5 非均匀色散模型(6)中, $A(t)$ 、 $B(t)$ 的测量曲线

此时可不考虑非均匀色散现象。

本文着重对ZnS薄膜进行了研究,有关 $A(d)$ 、 $B(d)$ 、 $A(\lambda)$ 、 $B(\lambda)$ 及 $C(\lambda)$ 的具体函数表达式,有待在大量工作的基础上得到。

本文工作一直得到穆英教授的关怀和帮助,刘伟和杨茂华同志编制了部分计算程序,在此致以真挚的感谢。

参 考 文 献

- [1] J. P. Borgono et. al., Appl. Opt., 1982, Vol. 21, No. 22, P. 4020~4029.
- [2] R. P. Netterfield, Appl. Opt., 1976, Vol. 15, No. 8, P. 1969~1973.
- [3] Bertrand Bovard et. al., Appl. Opt., 1985, Vol. 24, No. 12, P. 1803~1807.
- [4] H. K. Pulker et. al., Thin Solid Films, 1971, Vol. 9, P. 57.
- [5] S. Ogura, Some Feathers of the Behaviour of Optical Thin Films, Ph. D. Thesis, 1975.
- [6] J. A. Debrowolski et. al., Appl. Opt., 1983, Vol. 22, No. 20, P. 3191~3200.
- [7] 张伟等,《激光技术》,1988年,Vol. 12, No. 1, P. 29~33.
- [8] 张伟等,沿膜厚方向的非均匀折射率模型研究,待发表。

收稿日期:1988年9月27日。