

从薄膜波导传播衰减的角度研究 光学薄膜的损耗: (I) 理论分析

刘 旭 唐晋发

(浙江大学光仪系, 杭州 310027)

E. Pelletier

(ENSPM Marseille 13397, France)

提 要

本文从理论上分析了光学薄膜中的三种基本缺陷: 折射率消光系数、表面粗糙度以及折射率不均匀性对薄膜内导波传播衰减的影响。基于这些缺陷对光学薄膜内不同导模传播衰减作用的不同, 提出了一种区分薄膜中的吸收与散射损耗的方法。

关键词: 光损耗、薄膜、波导、光散射、光吸收。

一、引 言

国内外很多学者都致力于薄膜损耗的研究, 并提出不少方法: 如光度法^[1], 量热法^[2], 测量散射光空间分布法^[3]等。但在传统的方法中, 探测光束是从外部照射在薄膜样品上的, 膜厚限制了探测光束与薄膜媒介的作用距离, 从而使传统方法的测试灵敏度受限制。与传统的方式不同, 薄膜中导波光的传播方式扩大了光与薄膜媒介的作用距离, 导波的传播特性更能充分地反映出薄膜媒介的结构状况, 因而提高了对薄膜损耗的测试灵敏度。但由于薄膜中导波传播的复杂性, 使得损耗的分析变得十分复杂。本文的目的就是要探讨如何从导波传播衰减来分析薄膜的吸收与散射损耗。

二、理 论 分 析

考虑一单层薄膜系统: 基底是折射率为 n_s 、表面是微粗糙的(记作: $f_s(z) = x+d$) 介质; 薄膜是一高折射率 n_f 、微小的消光系数 k_f 表面亦为微粗糙(记作: $f_o(z) = x$) 的媒介; 此外, 薄膜的折射率沿 z 方向随机波动(记作: $\Delta n_f(z)$); 如图 1 所示。

假设二个微粗糙界面的粗糙度与导波光波长以及薄膜厚度的比值均远小于 1; 折射率的随机波动量 $\Delta n_f(z)$ 也远小于薄膜折射率 n_f 即 $\Delta n_f(z) \ll n_f$, 而且这些缺陷均为 z 变量的随机函数, 具有如下统计特性^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \langle f_c(z_1)f_c(z_2) \rangle &= \sigma_c \exp\left[-\frac{|z_1-z_2|}{l_c}\right], \\ \langle f_s(z_1)f_s(z_2) \rangle &= \sigma_s \exp\left[-\frac{|z_1-z_2|}{l_s}\right], \\ \langle (\Delta n_f(z_1) \Delta n_f(z_2)) \rangle &= \sigma_n \exp\left[-\frac{|z_1-z_2|}{l_n}\right]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示缺陷沿 z 方向的系综平均; σ_c, σ_s 为相应界面的均方根粗糙度; σ_n 为薄膜折射率波动的均方根值; l_c, l_s, l_n 分别为相应缺陷的相关长度。

当某一导模的导波在这样的薄膜结构中传播时, 导波的部分能量被薄膜吸收转化为热能, 部分能量将因缺陷的扰动而以散射光的形式产生损耗, 减弱了沿传播方向导波的光强。一般以 $I = I_0 e^{-\alpha z}$ 表示导波光强沿传播方向 z 的强度变化, 其中 α 即为此导波的传播衰减系数。具体分析如下:

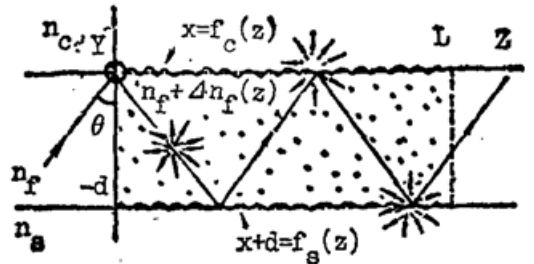


Fig. 1 Schema of a single layer optical thin film waveguide

1. 吸收损耗对传播衰减的影响

由于薄膜中存在吸收, 当某一导模的导波在薄膜中传播时, 薄膜的吸收使导波的能量发生衰减。导模的传播常数 $\zeta_{sm} = \beta_m - i\beta'_m$ 可以很好地表示出这一关系。

一般形式的薄膜波导导模方程为^[5]:

$$\zeta_{fm}d - \text{tg}^{-1}\left[\eta_{cf} \frac{\zeta_{cm}}{\zeta_{fm}}\right] - \text{tg}^{-1}\left[\eta_{sf} \frac{\zeta_{sm}}{\zeta_{fm}}\right] = m\pi. \quad (2)$$

式中: $\zeta_{fm} = (k_0^2 n_f^2 - \zeta_{zm}^2)^{1/2}$; $\zeta_{cm} = (\zeta_{zm}^2 - k_0^2 n_c^2)^{1/2}$; $\zeta_{sm} = (\zeta_{zm}^2 - k_0^2 n_s^2)^{1/2}$; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, 且 $\eta_{jf} = n_j^2 / (n_f - ik_f)^2$ (TM 模) 或 $\eta_{jf} = 1$ (TE 模) ($j=c, s$)。依据薄膜波导的结构, 用数值方法求解此复超越方程, 就可获得该薄膜各导模的复传播常数 ζ_{sm} 。而这些传播常数的虚部 (β'_m) 正对应着相应导模的传播衰减系数。所以吸收损耗所致的传播衰减系数 α_a 为:

$$\alpha_a = 2\beta'_m. \quad (3)$$

2. 散射损耗对传播衰减的影响

薄膜波导微粗糙界面以及薄膜中折射率的随机波动对导模传播的影响是以光散射损耗的形式表现出来的。

从麦克斯韦方程推得图 1 所示的薄膜波导媒介的波方程为:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} + \mu_0 \omega^2 \varepsilon(x, z) \mathbf{E} &= 0, \\ \nabla^2 \mathbf{H} + \mu_0 \omega^2 \varepsilon(x, z) \mathbf{H} &= \frac{\nabla \varepsilon(x, z) \times \nabla \times \mathbf{H}}{\varepsilon}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $\varepsilon(x, z)$ 为波导媒介的有效介电常数。对于微粗糙界面以及折射率波动的薄膜波导, 在一级近似的条件下, 有效介电常数为^[6]:

$$\varepsilon(x, z) = \varepsilon^0(x) + \varepsilon^1(x, z), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^1(x, z) &= \varepsilon_0 f_c(z) \{n_c^2 \delta(x-0) - n_s^2 \delta(x-0)\} + \varepsilon_0 f_s(z) \{n_s^2 \delta(x+d) - n_f^2 \delta(x+d)\} \\ &\quad + 2\varepsilon_0 \Delta n_f(z) \theta[0-x] \theta[x+d], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\varepsilon^0(x) = \varepsilon_0 \{n_c^2 \theta[x-0] + n_s^2 \theta[d-x] + n_f^2 \theta[0-x] \theta[x+d]\}, \quad (7)$$

公式中的 ε_0, μ_0 分别为真空中的介电常数与磁导率; $\delta(x)$ 为 Dirac 函数; $\theta[x]$ 为 Heaviside

函数。可见波导的缺陷可以用等效附加介电常数 $\varepsilon^1(x, y)$ (附加源) 来表示, 正是这些附加源造成了导波传播的散射损耗。

根据波导光学理论, 薄膜波导三种模式的场: 空气模、基底模以及导模(前二种为辐射模)组成了一完整的正交基。所以波导中任何场均可用此正交基的线性组合来表示^[7]:

$$\left. \begin{aligned} E(x, y) &= \sum_{m=0}^N c_m(z) E_m(x, z) + \int g_r(z, \beta) E_r(x, z, \beta) d\beta, \\ H(x, z) &= \sum_{m=0}^N b_m(z) H_m(x, z) + \int v_r(z, \beta) H_r(x, z, \beta) d\beta. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 E_m, H_m 为各导模的电场与磁场; E_r, H_r 为辐射模的电场与磁场; $c_m(z), b_m(z), g_r(z, \beta), v_r(z, \beta)$ 为相应模式的待定幅值系数; 上式中的求和项为导模的线性组合, 积分项为辐射模的线性组合, 它是散射于波导以外的光场, 即散射损耗。因此要确定散射损耗, 就应求解出积分项中相应的幅值系数 $g_r(z, \beta)$ 与 $v_r(z, \beta)$ 。应用波导中模的正交性^[7]:

$$\left. \begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} E(\beta) E^*(\beta') dx &= \frac{\beta}{2\omega\mu_0} \delta(\beta - \beta'), \\ \int_{-\infty}^{+\infty} H(\beta) H^*(\beta') / n^2 dx &= \frac{\beta}{2\omega\varepsilon_0\mu_0} \delta(\beta - \beta'), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 β, β' 均为模的传播常数。可以推得幅值系数方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 g_r(z, \beta)}{\partial z^2} - 2i\beta \frac{\partial g_r(z, \beta)}{\partial z} &= -\frac{\omega\beta}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^1(x, z) E_l(x, z) E_r^*(x, z, \beta) dx, \\ \frac{\partial v_r(z, \beta)}{\partial z^2} - 2i\beta \frac{\partial v_r(z, \beta)}{\partial z} &= -\frac{\omega\beta\mu_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon^1(x, z)}{\varepsilon^0(x)} H_l(x, z) H_r^*(x, z, \beta) dx \\ &\quad + \frac{e_y\beta}{2\omega} \int_{-\infty}^{+\infty} H_r^*(x, z, \beta) \cdot \frac{\nabla \varepsilon^1(x, z)}{\varepsilon^0(x)} \\ &\quad \times \nabla \times H_l(x, z) e_y dx. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中已假设初始导模的场为 $E_l(x, z)$ 与 $H_l(x, z)$; 上标 * 的项为相应场的共轭复数; e_y 为 y 方向上的单位矢量。方程(10)的解 g_r, v_r , 结合在 z 方向上薄膜波导缺陷段 L 适当的边界条件^[8], 就可以推出波导的散射损耗(ΔI_d), 并推得由此散射损耗造成的传播衰减 α_d 为

$$\alpha_d = \frac{\Delta I_d}{LI} = \frac{1}{L} \int_{-n_s k_0}^{n_s k_0} \langle |g_r^+(L, \beta)|^2 \rangle \frac{|\beta|}{p} d\beta. \quad (11)$$

式中 $p = (n_s^2 k_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}$, 此处积分限 $n_s k_0, -n_s k_0$ 包含了二种辐射模。对于 TM 模, 应取 $v_r^+(L, \beta)$ 项代替(11)式中的 $g_r^+(L, \beta)$ 。

α_d 包含了由微粗糙界面引起的面散射损耗 α_s , 以及折射率波动所致的体散射损耗 α_v 。一般情况下, 对一个既有吸收损耗又有散射损耗的薄膜系统, 导波总的传播衰减应为:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_d = \alpha_a + \alpha_s + \alpha_v \quad (12)$$

3. 综合数值分析

为了定量了解导模的传播衰减, 本文从数值上分析在三种特定情况下薄膜中导模传播衰减的特征, 其结果如图 2(a), 2(b), (2c) 所示。

- (a) 吸收损耗 α_a 占主导;
- (b) 表面粗糙造成的面散射损耗 α_s 占主导;
- (c) 薄膜折射率波动造成的体散射损耗 α_v 占主导。

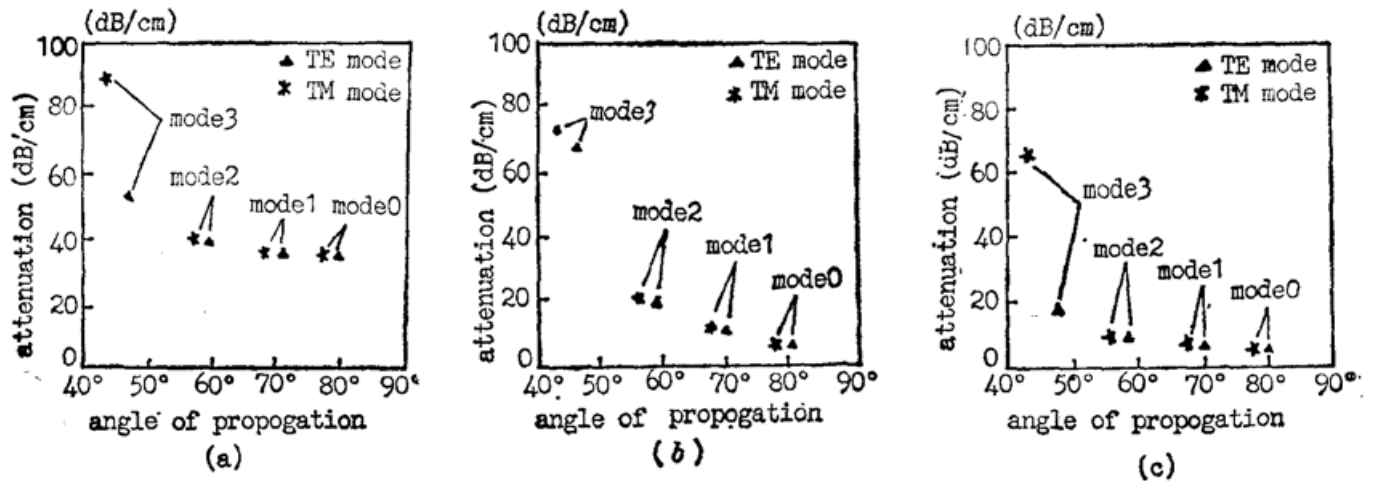


Fig. 2 Attenuation coefficients of the guided modes for a thin film wave guide of the structure: $n_0=1$, $n_f=2.2$, $n_s=1.5$, $nd=10\lambda/4$ ($\lambda=632.8\text{nm}$) in following conditions:

- (a) $k_f=3.5\times 10^{-5}$; $\sigma_c=\sigma_s=0.5\text{nm}$; $\sigma_n=0.001$; $l_c=l_s=l_n=1\mu\text{m}$
 (b) $k_f=3\times 10^{-6}$; $\sigma_c=\sigma_s=3.5\text{nm}$; $\sigma_n=0.001$; $l_c=l_s=l_n=1\mu\text{m}$
 (c) $k_f=3\times 10^{-6}$; $\sigma_c=\sigma_s=0.5\text{nm}$; $\sigma_n=0.01$; $l_c=l_s=l_n=1\mu\text{m}$

比较各缺陷情况时衰减随导模传播角 θ 的变化特点, 可以发现:

(1) 导模的传播衰减对薄膜的缺陷非常灵敏。 10^{-5} 的消光系数以及 2nm 量级的界面粗糙度均能显著地体现于传播衰减系数;

(2) 导模的衰减随其模的级次的增高而增大。 当薄膜的吸收损耗很小而可略去时, 零级导模 (TE₀, TM₀) 的衰减系数非常小;

(3) 在表面散射与体散射情形, 衰减随传播角的变化 $At(\theta)$ 甚为急剧, 而在吸收损耗占主导的情形, 则比较平缓。 散射损耗对高级次导模衰减的作用很大。 若将衰减随传播角的变化 $At(\theta)$ 外推至 $\theta=90^\circ$ 角, 则 $At(\theta)$ 趋于一常值极限。 这儿的 $At(\theta)$ 是各导模的传播衰减系数 α 随传播角的变化方式。

依据衰减随导模传播角的变化特征, 就可以从不同导模的传播衰减来区分薄膜中的吸收与散射损耗。 因为从物理意义上讲 $At(90^\circ)$ 衰减值正对应于薄膜厚度为无穷大时, 零级导模波导的传播衰减, 所以 $At(90^\circ)$ 不再含有表面散射损耗的影响, 而仅仅取决于消光系数 k_f 以及薄膜折射率的波动值。 对于一般蒸发技术制备的光学介质薄膜, 其折射率的消光系数约在 $10^{-5}\sim 10^{-3}$ 范围内, 对应地在 $\theta=90^\circ$ 角时的传播衰减约在 $10\text{dB/cm}\sim 1000\text{dB/cm}$ (对 632.8nm 波长而言) 之间, 而当折射率的波动值 σ_n 在 0.001 到 0.01 之间变化时, 对应的衰减仅为 0.0006dB/cm 到 0.06dB/cm 。 所以对于此特定的传播角, 当薄膜的消光系数 $k_f>10^{-6}$ 时, 体散射对衰减的影响要比吸收的弱很多完全可以略去不计。 这样利用外推得的 $At(90^\circ)$ 值就可以确定薄膜的消光系数 k_f 。

有了薄膜的消光系数 k_f , 根据前面的理论结果就可确定各导模因吸收产生的衰减 α_a , 然后将 α_a 与所测得的导模的传播衰减 α_m 相比较即得各导模对应于散射损耗的衰减:

$$\alpha_d = \alpha_m - \alpha_a, \quad (13)$$

由此就可以分离对应于各导模的吸收损耗与散射损耗所产生的衰减。

本文工作曾得到法国马赛 ENSPM 的同事们的帮助与支持, 特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. P. Borgogno *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 20 (Oct), 3575.
[2] P. A. Temple; *Proc. SPIE*, 1982, Vol. 325.
[3] P. Roche *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 20 (Oct), 3561.
[4] J. M. Elson *et al.*; *J. O. S. A.*, 1979, **69**, No. 1 (Jan), 31.
[5] P.K. Tien; *Appl. Opt.* 1971, **10**, No. 11 (Nov), 2395.
[6] M. Amz *et. al.*; *J. O. S. A. (A)*, 1986, **3**, No. 12 (Dec), 2055.
[7] D. Marcuse; «*Theory of Dielectric Optical Waveguide*», (Academic Press, 1974.)Chap. 2.
[8] D. J. Walter *et al.*; *Thin Solid Filmg*, 1978, **52**, No. 3 (Aug), 461.

Studies on optical thin film loss from the analysis of the attenuations of guided waves: (I) theoretical analysis

LIU XU AND TANG JINFA

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

E. PELLETIER

(ENSPM, Marseille 13397, France)

(Received 14 March 1991; revised 4 June 1991)

Abstract

The influences of extinction coefficient of refractive index, roughness of the interfaces and index heterogeneities of an optical thin film waveguide on the attenuations of guided modes are analysed theoretically in this paper. Based on the characteristics of the attenuation coefficients of different modes due to these imperfection factors, a new method is proposed to separate the absorption loss and scattering loss of the thin film.

Key words: optical loss, thin film, waveguide, scattering, absorption.

(待续)