金属包覆聚合物平板波导的微扰分析

张学亮，金 锋，邢汝冰，高福斌，张 平，于 斌
（中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130021）

摘要：用理想波导耦合模理论为基础的微扰方法分析金属包覆聚合物平板波导，推得波导传播常数的近似解。经数值计算，分别求得传播常数的正确解与近似解，二者相比较，证明近似解具有较高的精确度。从而将求解金属包覆聚合物波导本征值方程的复杂复数运算简化成实数运算。

关 键 词：金属包覆聚合物波导；传播常数；耦合系数
中图分类号：TN256 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7032(2000)02-0169-05

1 引 言

近年来，聚合物集成光学器件的研究取得了很大进步[1~3]。聚合物以其易合成改性、易与相关材料集成等许多诱人的特征，成为极有潜力的新型集成光学器件材料。聚合物集成光学器件与无机集成光学器件相比，成本低廉，可广泛应用于有线电视网络工程等领域，具有极其广阔的应用前景。

许多聚合物集成光学器件中含有金属包覆聚合物波导结构。设计此类器件，要对金属包覆波导进行特性分析[4]，但必须求解复数超越本征值方程，运算比较复杂。

本文以空气-聚合物-金属三层波导结构的金属包覆聚合物平板波导为例，由理想波导耦合模微扰理论[5,6]推导出波导传播常数的近似表达式。选择典型波导参数进行数值计算，将传播常数近似解与求解复数本征值方程得出的正确解相比较，并按传播常数的正确解与近似解绘制波导传播特性曲线及损耗特性曲线，证明近似解具有较高的精确度。本文把求解金属包覆聚合物波导本征值方程的复杂复数运算简化成实数运算，对于相关波导器件的设计来说简便而实用。

2 金属包覆聚合物波导

2.1 模式本征值方程

图1是空气-聚合物-金属三层结构的金属包覆聚合物平板波导基本结构示意图。聚合物波导层折射率为 n_1，厚度为 d；金属包覆层的折射率为 $n_2 = n_r + in_i$；空气折射率为 n_3。建立如图1所示的坐标系，并假定空气层及金属层趋于无限远，则此三层平板波导的折射率分布 $n(x)$ 为

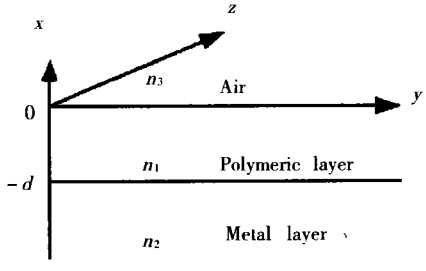

图1 金属包覆聚合物平板波导示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metal-clad polymeric slab waveguide.

$$n(x) = \begin{cases} n_1 & -d \leqslant x \leqslant 0, \\ n_2 & x < -d, \\ n_3 & x > 0。 \end{cases} \quad (1)$$

其TE模和TM模的模式场分布[5]为

$$E_{vy}, H_{vy} = \begin{cases} A_v\cos(\phi_v)e^{-q_v x} & 0 < x < \infty, \\ A_v\cos(\phi_v + h_v x) & -d \leqslant x \leqslant 0, \\ A_v\cos(h_v d - \phi_v)e^{p_v(x+d)} & -\infty < x < -d, \end{cases} \quad (2)$$

$$h_v = (n_1^2k_0^2 - \beta_v^2)^{1/2},\ p_v = (\beta_v^2 - n_2^2k_0^2)^{1/2},$$
$$q_v = (\beta_v^2 - n_3^2k_0^2)^{1/2}, \quad (3)$$

式中，v 为模阶数，$v = 0, 1, 2\cdots$；β_v 为传播常数；

收稿日期：1999-11-04；**修订日期**：1999-02-12
基金项目：国家自然科学基金重大项目(59190050-04)及863计划新材料领域资助项目
作者简介：张学亮(1975－)，男，山西朔州市人，现在长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士学位。

ϕ_v 由边界条件确定；$k_0=2\pi/\lambda$，λ 为工作波长；A_v 是归一化振幅系数，由功率归一化条件得出：

$$A_v^2 = 4z_0^{(-1)^r}(n_1^2)^r P/N_v D_v,$$

其中，$r=1$ 对应 TM 模的相关物理量，$r=0$ 对应 TE 模的相关物理量：

$$r = \begin{cases} 0 & \text{TE 模}, \\ 1 & \text{TM 模}, \end{cases}$$

$N_v=\beta_v/k_0$ 是波导有效折射率；$z_0=(\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2}$ 是真空波阻抗，μ_0 是真空磁导率，ε_0 是真空介电常数；P 为波导中 y 方向单位间隔沿 z 方向传播的光波功率；D_v 为波导有效厚度：

$$D_v = d + 1/(\zeta_2^r p_v) + 1/(\zeta_3^r q_v),$$

$$\zeta_2 = (N_v^2/n_1^2) + (N_v^2/n_2^2) - 1,$$

$$\zeta_3 = (N_v^2/n_1^2) + (N_v^2/n_3^2) - 1。$$

根据边界条件，由式(2)可得模式本征值方程[5]：

$$h_v d = v\pi + \mathrm{tg}^{-1}(\eta_{12}^r p_v/h_v) + \mathrm{tg}^{-1}(\eta_{13}^r q_v/h_v), \qquad v = 0,1,2\cdots \tag{4}$$

式中，$\eta_{12}=n_1^2/n_2^2$，$\eta_{13}=n_1^2/n_3^2$；h_v、q_v、p_v 同式(3)中表达。

由于金属层折射率为复数，所以金属包覆聚合物波导的模方程(4)为复数超越方程。解此复数方程求得复数传播常数 $\beta_v=\beta_v'+i\beta_v''$，其实部 β_v' 表示波导中光波传播规律，虚部 β_v'' 表示波导中光波的损耗。

2.2 本征值微扰分析

在理想波导耦合模理论[5,6]中，一个微扰波导系统可以用理想波导的耦合振幅方程来描述。将金属包覆聚合物波导看作微扰波导，设在其包覆层中忽略金属介电常数虚部的波导为相应的理想波导。则该理想波导相对介电常数分布 $[n_0(x)]^2$ 为

$$[n_0(x)]^2 = \begin{cases} n_1^2 & -d \leqslant x \leqslant 0, \\ n_r^2 - n_i^2 & x < -d, \\ n_3^2 & x > 0。 \end{cases} \tag{5}$$

此理想波导与金属包覆聚合物波导(即微扰波导)相比，除了包覆层折射率略有差别以外，其结构完全相同，因此两者的模式场分布及本征值方程在形式上是完全一致的。

用理想波导耦合模理论[5,6]中的耦合振幅方程，将金属包覆聚合物波导传播常数近似写成

$$\beta_v = \beta_{0v} + K_v, \tag{6}$$

式中，β_{0v} 为理想波导的 v 阶模传播常数，由理想波导的模式本征值方程(3)得出；K_v 为 β_v 的一级修正，也就是理想波导的 v 阶模自耦合系数[5]：

$$K_v = \frac{k_0}{4Pz_0}\int_{-\infty}^{+\infty}(n^2 - n_0^2)\left(E_{vt}^* E_{vt} + \frac{n_0^2}{n^2}E_{vz}^* E_{vz}\right)dx, \tag{7}$$

其中，E_{vt} 和 E_{vz} 分别为理想波导 v 阶模电矢量的横向和纵向分量。对 TE 模，$E_{vt}=E_{vy}$，$E_{vz}=E_{vx}=0$，这里的 E_{vy} 是理想波导 v 阶 TE 模式场分布，由式(2)将 β_v 代换为 β_{0v} 得出；对 TM 模，$E_{vt}=E_{vx}=(\beta_{0v}z_0/n_j^2k_0)H_{vy}$，$E_{vz}=-(iz_0/n_j^2k_0)(\partial H_{vy}/\partial x)$；$E_{vy}=0$。这里的 H_{vy} 是理想波导 v 阶 TM 模式场分布，由式(2)将 β_v 代换为 β_{0v} 得出。

将理想波导的 TE 及 TM 场分布式(2)分别代入式(7)，由式(6)推得聚合物金属包覆波导传播常数的实部和虚部的近似表达式：

对于 TE 模，

$$\beta_v' = \beta_{0v}, \tag{8}$$

$$\beta_v'' = \frac{n_r n_i k_0^2}{\beta_{0v} D_v p_v (1 + p_v^2/h_v^2)}; \tag{9}$$

对于 TM 模，

$$\beta_v' = \beta_{0v} + \frac{2n_r^2 n_i^2 n_1^2 P_v}{(n_r^2 - n_i^2)(n_r^2 + n_i^2)^2 \beta_{0v} D_v R}; \tag{10}$$

$$\beta_v'' = \frac{n_r n_i n_1^2}{D_v R} \cdot \left[\frac{\beta_{0v}}{P_v(n_r^2 - n_i^2)^2} + \frac{P_v}{\beta_{0v}(n_r^2 + n_i^2)^2}\right]; \tag{11}$$

式中，$R = 1 + [n_1^2/(n_r^2 - n_i^2)]^2[P_v^2/(k_0^2 n_1^2 - \beta_{0v}^2)]$。

于是，将其理想波导的传播常数代入式(8)～(11)，只需实数运算，即可得出相应微扰波导(即金属包覆聚合物波导)传播常数实部及虚部的近似解。

3 数值计算与分析

选择金属包覆聚合物波导典型参数。在光波长 0.6328μm 下，聚合物波导层折射率为 $n_1=1.588$，空气折射率为 $n_3=1.0$，金属层折射率为 $n_2=\sqrt{\varepsilon_m}$，ε_m 是金属层的相对介电常数，$\varepsilon_m=$

$-10.28-i1.04$（金），$\varepsilon_m=-39.88-i15.56$（铝）。解金属包覆波导的复数超越方程(4)，求出其复数传播常数正确解 $\beta_v=\beta_v'+i\beta_v''$。解理想波导的实数超越方程(4)，求出传播常数 β_{0v}；代入金属包覆聚合物波导传播常数的近似表达式(8)～(11)，可求出其传播常数实部 β_v' 和虚部 β_v'' 的近似解。计算不同波导层厚度的金(Au)、铝(Al)包覆聚合物平板波导传播常数实部 β'/k_0 及虚部 β''/k_0 的正确解与近似解，示于表 1～4（表中 Exact 行是相应波导层厚度的正确解，Approximate 行是相应波导层厚度的近似解）。比较近似解与正确解，可见波导传播常数实部、虚部的近似解与正确解很好相符。

表 1　金属(Au 或 Al)包覆聚合物波导 TM_0 模传播常数

Table 1　Propagation constants of metal-clad(Au or Al)polymeric waveguide for TM_0 mode.

		d(μm)	0.05	0.1	0.2
β'/k_0	Au clad	Exact	1.33638	1.66628	1.80578
		(10)Approximate	1.33736	1.66740	1.80693
	Al clad	Exact	1.13366	1.36984	1.56919
		(10)Approximate	1.13344	1.36882	1.56859
β''/k_0	Au clad	Exact	2.944E-2	3.906E-2	3.246E-2
		(11)Approximate	2.963E-2	3.926E-2	3.266E-2
	Al clad	Exact	2.298E-2	3.882E-2	2.990E-2
		(11)Approximate	2.288E-2	3.810E-2	2.947E-2

表 2　金属(Au 或 Al)包覆聚合物波导 TM_1 模传播常数

Table 2　Propagation constants of metal-clad(Au or Al)polymeric waveguide for TM_1 mode.

		d(μm)	0.5	1.2	2.0
β'/k_0	Au clad	Exact	1.41667	1.56275	1.57942
		(10)Approximate	1.41648	1.56272	1.57941
	Al clad	Exact	1.37598	1.55734	1.57821
		(10)Approximate	1.37514	1.55702	1.57811
β''/k_0	Au clad	Exact	3.044E-3	2.829E-4	5.940E-5
		(11)Approximate	3.025E-3	2.809E-4	5.956E-5
	Al clad	Exact	8.732E-3	1.789E-3	4.499E-4
		(11)Approximate	8.205E-3	1.607E-3	4.006E-4

表 3　金属(Au 或 Al)包覆聚合物波导 TE_0 模传播常数

Table 3　Propagation constants of metal-clad(Au or Al) polymeric waveguide for TE_0 mode.

		d(μm)	0.2	0.6	1.5
β'/k_0	Au clad	Exact	1.24940	1.52450	1.57579
		(8)Approximate	1.24934	1.52449	1.57579
	Al clad	Exact	1.21890	1.52200	1.57559
		(8)Approximate	1.22031	1.52212	1.57560
β''/k_0	Au clad	Exact	2.503E-3	2.078E-4	1.735E-5
		(9)Approximate	2.514E-3	2.087E-4	1.742E-5
	Al clad	Exact	6.270E-3	5.044E-4	4.092E-5
		(9)Approximate	6.759E-3	5.445E-4	4.424E-5

采用上述波导结构参数，根据式(3)和式(7)～(10)，绘制出金属(Au 和 Al)包覆聚合物波导的传播特性曲线（$\beta'/k_0\sim d$ 曲线）和损耗特性曲线（$\beta''/k_0\sim d$ 曲线），示于图 2～5；其中，实线和虚线分别对应于正确解和近似解。由此图可见，对于金包覆波导，传播特性曲线和损耗特性曲线的实线和虚线很好相符（虚线完全被实线覆盖）；对于铝包覆波导，传播特性曲线的实线和虚线很

好相符(虚线完全被实线覆盖),损耗特性曲线的 实线和虚线也基本相符。

表4 金属(Au或Al)包覆聚合物波导 TE_1 模传播常数

Table 4 Propagation constants of metal-clad(Au or Al)polymeric waveguied for TM_1 mode.

		$d(\mu m)$	0.5	1.2	2.0
β'/k_0	Au clad	Exact	1.22241	1.51299	1.55944
		(8)Approximate	1.22237	1.51298	1.55944
	Al clad	Exact	1.20476	1.51140	1.55907
		(8)Approximate	1.20557	1.51147	1.55909
β''/k_0	Au clad	Exact	1.484E-3	1.341E-4	3.118E-5
		(9)Approximate	1.490E-3	1.347E-4	3.131E-5
	Al clad	Exact	3.544E-3	3.167E-4	7.300E-4
		(9)Approximate	3.829E-3	3.424E-4	7.896E-4

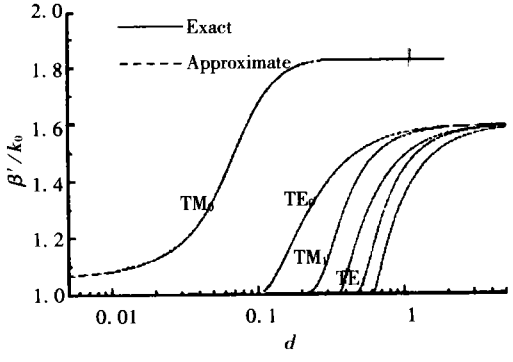

图2 金属金(Au)包覆聚合物波导传播特性曲线

Fig.2 Propagation curves of Au-clad polymeric waveguide.

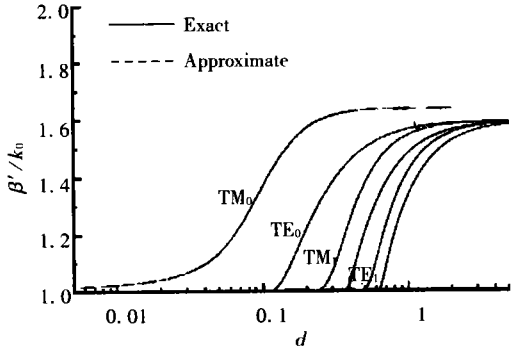

图3 金属铝(Al)包覆聚合物波导传播特性曲线

Fig.3 Propagation curves of Al-clad polymeric waveguide.

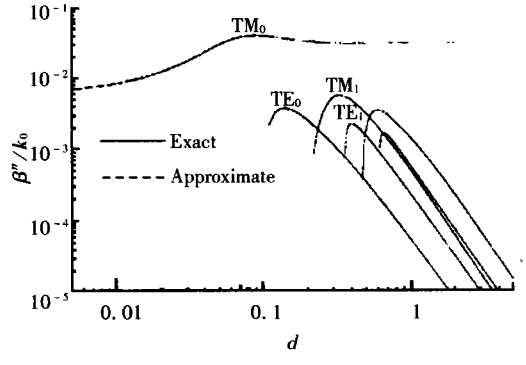

图4 金属金(Au)包覆聚合物波导损耗特性曲线

Fig.4 Attenuation curves of Au-clad polymeric waveguide.

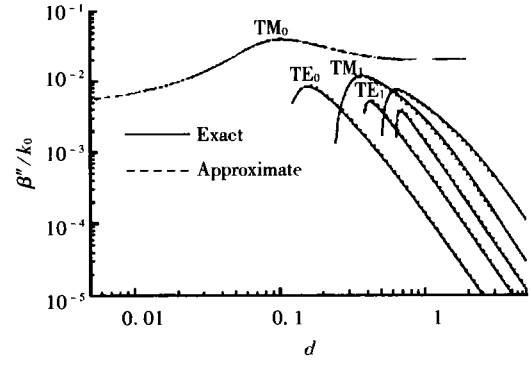

图5 金属铝(Al)包覆聚合物波导损耗特性曲线

Fig.5 Attenuation curves of Al-clad polymeric waveguide.

图2~5中的虚线,可简便地应用于相关的波导分析和设计。例如,给定波导层厚度,由图可知该波导所能承载的模式数量和相应模式的有效折射率;由图中可知各阶模式的截止厚度,根据设计需要,选择波导层厚度。又如,由损耗特性曲线,可得知其对应不同波导层厚度的损耗情况;利用金包覆波导 TM_0 模损耗比 TE_0 模损耗高一个数量级的事实,可研制只传输 TE_0 模而滤掉 TM_0 模的偏振器件等等。

4 结 论

本文以理想波导耦合模理论推得金属包覆聚合物波导传播常数的近似解,数值计算证明其与正确解相符得很好,具有较高的精确度。实际应用中可使用该近似公式求解金属包覆聚合物波导的传播常数,绘制出传播特性曲线和损耗特性曲线,可供相关光波导器件设计和制备参考。

参 考 文 献

[1] Larry R D. Polymeric electro-optic modulators [J]. *Chemistry & Industry*, 1997, 7 July: 510 - 514.
[2] Emmanuel V T, Peter V D, Roel G B, *et al*. Integrated optic devices based on nonlinear optical polymer [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(3): 778 - 787.
[3] Donald M B, Robert D M, Cecilia A W. Second-order nonlinearity in poled-polymer systems [J]. *Chem. Rev.*, 1994, **94**(1): 31 - 75.
[4] Kaminow I P, Mammel W L, Weber H P. Metal-clad optical waveguide analytical and experimental study [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 396 - 405.
[5] Jin Feng, Fan Junqing. *Integrated Optics* [M]. Beijing: National Defensive Industry Press, 1981.
[6] Marcuse D, Translated by Liu Hongdu. *Theory of optical medium waveguide* [M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Press, 1982, 104.

Perturbation Analysis of Metal-Clad Polymeric Slab Waveguide

ZHANG Xue-liang, JIN Feng, XING Ru-bing, GAO Fu-bin, ZHANG Ping, YU Bin
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130021, *China*)

Abstract

Optical waveguide with asymmetric metal/polymer/air layer stuctures has been studied. The field distributions for TE and TM modes of the waveguide are given, and the corresponding eigenvalue functions are deduced. The exact complex propagation constants can be achieved by solving the complex eigenvalue functions, but this calculation needs to be performed in complex region.

A kind of perturbation method based on coupling mode theory has been considered. With this method, the optical waveguide studied in this paper is assumed as perturbing waveguide. Ignoring the imaginary part of dielectric constant of the perturbing waveguide metal layer, we get a theoretical model called realistic waveguide. According to the coupling mode theory about realistic waveguide, the self-coupling coefficients for TE and TM modes of the realistic waveguide are deduced from the field distributions of the realistic waveguide. Then, the approximate complex propagation constants of the perturbing waveguide are got from the self-coupling coefficient and the propagation constant of the realistic waveguide. After some algebra, the formula of the real and the imaginary propagation constants are deduced. Compared with the exact method, this perturbation method can be performed only in real region.

A set of typical waveguide parameters is selected. The complex propagation constants for TE and TM modes of the waveguide are got by solving the complex eigenvalue functions, and the approximate ones are got by calculating the formula deduced from the perturbation method. Those results are listed in data tables. We can notice in the tables that the approximate propagation constants have a good agreement with the exact ones.

At last, we use both methods to get the propagation constants, then plot the characteristic curves. In the figures, the dash curves represent the approximate values, and the solid curves represent the exact values. We can see that most part of the dash curves are covered by the solid curves. That is to say, the approximate is good enough to replace the exact in getting the propagation constants, and can be used for corresponding waveguide design or preparation, to some extent simplifying the work.

Key words: metal-clad polymeric waveguide; propagation constant; coupling coefficient

Received 4 November 1999