

# 金属包层渐变折射率介质光波导 的传输特性与损耗

余守宪 谢峰潮

(北方交通大学应用物理系, 北京 100044)

## 提 要

用金属包层介质光波导损耗的微扰理论及藉助多层近似法用递推公式分析渐变折射率波导传播常数的方法,对几种类型的金属包层渐变折射率介质光波导的传输特性与损耗进行分析 and 讨论,得到了与精确数值计算结果相吻合的结果.

**关键词** 金属包层波导, 波导损耗, 渐变折射率波导.

## 1 引 言

与全介质光波导相比较,金属包层光波导的最大特点就是金属包层在光频范围内具有复介电系数  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ ,因而波导的传播常数是复数  $\beta = \beta' + i\beta''$ .严格分析金属包层光波导的传输特性与损耗,应该在复平面上对本征值方程求解.这种严格分析法尽管可以得到比较精确的结果,但由于在复平面内用牛顿切线法求根的叠代过程相当复杂和费时,不便使用与推广,尤其对于各种芯区为渐变折射率剖面的金属包层介质波导更是如此.因此,寻找简单而实用,物理思想比较明确,数值结果比较精确的近似解法就显得十分必要.关于这方面的工作,已经有一些报道<sup>[1~6]</sup>.本文作者也曾提出一种分析金属包层介质波导的传播常数与欧姆损耗的微扰分析法<sup>[7,8]</sup>.但它仅讨论了均匀介质波导,未涉及到渐变折射率分布的波导.作者也曾提出一个专门分析渐变折射率介质光波导的多层近似法<sup>[9]</sup>,它分析了各种类型的渐变折射率剖面介质波导的传输特性,物理思想清晰,计算过程简练且节省机时,所得结果十分精确,但并未涉及金属包层情况.在本文中,作者把上述两种方法结合起来,用来分析金属包层渐变折射率介质光波导的传输特性与损耗,得到了令人满意的结果.

## 2 理论分析

### 2.1 金属包层波导的微扰分析<sup>[7,8]</sup>

对于金属包层的波导(以及弱吸收介质波导),复传播常数  $\beta = \beta' + i\beta''$  和相应的模折射率  $N = N' + iN''$  ( $N = \beta/k_0$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ) 可以通过在复平面上求解本征值方程来得到.由于金属包层的复介电系数  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  在光频范围内  $|\epsilon''| \ll |\epsilon'|$ ,上述求解过程可以简化,即先忽略  $\epsilon''$ ,看作  $\epsilon = \epsilon'$  以求解相应的实本征值方程,求出  $N$  的实部  $N'$ ,即为传播常数的一级近似

收稿日期:1991年12月16日

\* 本文得到国家自然科学基金会资助.

值,然后再计算  $N$  的虚部  $N''$ 。

计算  $N''$  的思路为:把  $\varepsilon''$  看作一个小量,在一级近似中,由实部  $\varepsilon'$  相应的实本征值方程解出  $N'$ ,把  $N'$  看作  $\varepsilon'$  的函数  $N' = N'(\varepsilon')$ ,则  $\varepsilon''$  与  $N'$  对  $\varepsilon'$  的一阶导数的乘积给出  $N''$  之值:

$$N'' = (\partial N' / \partial \varepsilon') \times \varepsilon'' \quad (1)$$

文献[8]中已证明,用复变函数论的科希-里曼关系式可推知,所得  $N'$  及  $N''$  在准确到一级小量的范围内与由复本征值方程求得值相等,这里,  $(\partial N' / \partial \varepsilon')$  可以用简单的数值微分法求得.实例计算表明<sup>[8]</sup>,所得结果与精确数值解吻合.

## 2.2 多层近似法与递推公式

对于渐变折射率波导,其折射率剖面为

$$n^2(x) = \begin{cases} n_1^2 + (n_1^2 - n_2^2)f(x), & 0 \leq x \leq a \\ n_2^2, & x > a \\ n_3^2, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $a$  为芯区厚度,  $n_1$  及  $n_2$  分别为介质中的最大折射率与最小折射率,  $n_3$  为(金属)包层的(复)折射率,折射率分布函数  $f(x)$  对于五种类型折射率分布可以写成

$$f(x) = \begin{cases} 1 - (x/a), & \text{直线型} \\ 1 - (x/a)^2, & \text{抛物型} \\ \exp(-x/a), & \text{指数型} \\ \exp(-x^2/a^2), & \text{高斯型} \\ \operatorname{erfc}(x/a), & \text{余误差函数型} \end{cases} \quad (3)$$

将坐标尺寸放大  $k_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$  倍,取归一化传播常数  $P^2 = (N^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2)$ ,归一化厚度  $V = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ ,并设  $p = k_0(N^2 - n_3^2)^{1/2}$ ,则渐变折射率三层平板波导的赫姆霍兹方程可写为

$$\begin{cases} \psi'' - \{P^2 + [(n_2^2 - n_3^2)/(n_1^2 - n_2^2)]\} \psi = 0, & (0 > x > -\infty) \\ \psi'' + [f(x) - P^2] \psi = 0, & (0 < x < V) \\ \psi'' - p^2 \psi = 0. & (V < x < \infty) \end{cases} \quad (4)$$

将芯区等分为  $n$  层.设  $x_0 = 0$ ,  $x_n = V$ ,  $x_k - x_{k-1} = \Delta = (V/n)$ , ( $k = 1, 2, \dots, n$ );并设  $x = x_m$  处为振荡区与指数解区的转折点,令

$$\begin{aligned} K_i^2 &= f[(x_{i-1} + x_i)/2] - P^2, & (i = 1, 2, \dots, m) \\ q_i^2 &= P^2 - f[(x_{i-1} + x_i)/2]. & (i = m + 1, m + 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (5)$$

则可写出波动方程在各层的解为

$$\begin{aligned} \psi_0 &= A_0 \exp[p(x - x_0)], & (-\infty < x < x_0) \\ \psi_i &= A_i \cos[K_i(x - x_i) - \phi_i], & (i = 1, 2, \dots, m) \\ \psi_i &= A_i \{ \exp[-q_i(x - x_i)] + \delta_i \exp[q_i(x - x_i)] \}, & (i = m + 1, m + 2, \dots, n) \\ \psi_{n+1} &= A_{n+1} \exp[-P(x - x_n)]. & (x_n < x < \infty) \end{aligned} \quad (6)$$

对于 TE 模,  $\psi$  和  $\psi'$  在各界面处连续给出如下的递推公式

$$\phi_1 = -K_1 \Delta + \tan^{-1}(p/K_1) + m\pi, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7)$$

$$\phi_i = \tan^{-1}[(K_{i-1}/K_i) \tan(K_{i+1} \Delta + \phi_{i+1})], \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

$$\phi_m = -\tan^{-1}[(g_{m+1}/K_m) Y_{m+1}], \quad Y_{m+1} = [\exp(2q_{m+1} \Delta) - \delta_{m+1}] / [\exp(2q_{m+1} \Delta) + \delta_{m+1}] \quad (9)$$

$$\delta_j = (q_j - q_{j+1} z_{j+1}) / (q_j + q_{j+1} z_{j+1}), \quad z_{j+1} = [\exp(2q_{j+1} \Delta) - \delta_{j+1}] / [\exp(2q_{j+1} \Delta) + \delta_{j+1}], \quad (j = m + 1, m + 2, \dots, n - 1) \quad (10)$$

$$\delta_n = (q_n - P)/(q_n + P). \quad (11)$$

归一化传播常数  $P^2$  的求法如下. 对一尝试值  $P_0^2$ , 可由以上(11)、(10)、(9)、(8)各式顺次求得  $\delta_n, \dots, \delta_{m+1}, \phi_m, \dots, \phi_1$ , 当求得的  $\phi_1$  值与由(7)式算出的  $\phi_1$  值相等时, 即为所求的  $P^2$  值, 具体计算借助牛顿切线法. 此法程序简短\*, 计算简便, 利用(6)式及连续性条件可求得模场分布.

对于 TM 模, 要求  $\psi$  及  $\psi'/n^2$  在界面处连续, 递推公式与 TE 模相类似, 在此从略.

### 3 数值结果及损耗的讨论

用本文所介绍的方法, 分析计算了金包层的线性折射率分布波导, 指数折射率分布波导以及高斯函数折射率分布波导的复传播常数  $\beta = \beta' + i\beta''$ , 和银包层抛物型折射率分布波导的复模折射率  $N = N' + iN''$ , 分别列于表 1、表 2、表 3 与表 4 中, 表 1 与表 2 中波导折射率参数为:  $n_1^2 = 2.29592$ ,  $n_2^2 = 2.25$ ,  $n_3^2 = -10.3 - i1.0$  ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  时); 表 3 中波导折射率参数为:  $n_1^2 = 4.9665$ ,  $n_2^2 = 4.8469$ ,  $n_3^2 = -10.3 - i1.0$  ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  时); 表 4 中波导折射率参数  $n_1^2 = 5.29410$ ,  $n_2^2 = 5.24116$ ,  $n_3^2 = -16.32 - i0.5414$  ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  时). 显然, 本文介绍的方法所得结果与精确数值解结果均吻合很好, 说明它是合理的, 有效的, 能较简便地得出精确结果的有效方法.

Table 1 Values of complex propagation constants of gold-clad waveguide with linear index profile

a = 8 $\mu\text{m}$		
mode designation	$\beta$ (exact numerical)	$\beta$ (our method)
TE <sub>0</sub>	14.9923 - i0.2119(-4)	14.9922 - i0.2119(-4)
TE <sub>1</sub>	14.9523 - i0.2126(-4)	14.9522 - i0.2125(-4)
TE <sub>2</sub>	14.9195 - i0.2110(-4)	14.9196 - i0.2110(-4)
TM <sub>0</sub>	14.9893 - i0.1340(-3)	14.9922 - i0.1340(-3)
TM <sub>1</sub>	14.9494 - i0.1318(-3)	14.9537 - i0.1318(-3)
TM <sub>2</sub>	14.9167 - i0.1282(-3)	14.9196 - i0.1281(-3)
a = 5 $\mu\text{m}$		
TE <sub>0</sub>	14.9729 - i0.3395(-4)	14.9729 - i0.3395(-4)
TE <sub>1</sub>	14.9185 - i0.3301(-4)	14.9188 - i0.3301(-4)
TM <sub>0</sub>	14.9683 - i0.2125(-3)	14.9725 - i0.2131(-3)
TM <sub>1</sub>	14.9140 - i0.1977(-3)	14.9195 - i0.1976(-3)

从各表中可以看出, 金属包层渐变折射率波导的损耗有一些明显的特征, 即: 损耗与模阶数有关, 而 TM 模的衰减系数比 TE 模的衰减系数大(约相差一个数量级). 此外, 模损耗值随模阶数的变化情况与折射率分布的类型有关. 数值计算的结果表明, 除金包层线性分布波导外, 金包层指数分布波导和高斯分布波导以及银包层抛物型分布波导中, 模损耗值都是随着模阶数的增大而增大, 从这一点来说, 这几种金属包层渐变折射率导均适于用作只传输低阶 TE 模的模式滤波器或偏振器. 不难理解, 对于在金属包层与波导芯层之间有一缓冲层(阻挡层)的波导来说, 也具有此特征, 在此为省篇幅, 不再给出有关计算结果.

\* 仅约 50 句短语

Table 2 Values of complex propagation constants of gold-clad waveguide with exponential index profile

a = 8 $\mu\text{m}$		
mode designation	$\beta$ (exact numerical)	$\beta$ (our method)
TE <sub>0</sub>	15.0187 - i 0.1146(-4)	14.9970 - i 0.1145(-4)
TE <sub>1</sub>	14.9834 - i 0.1728(-4)	14.9678 - i 0.1728(-4)
TE <sub>2</sub>	14.9480 - i 0.2164(-4)	14.9480 - i 0.2164(-4)
TM <sub>0</sub>	15.0171 - i 0.7754(-3)	14.9976 - i 0.7754(-4)
TM <sub>1</sub>	14.9810 - i 0.1130(-3)	14.9682 - i 0.1133(-3)
TM <sub>2</sub>	14.9450 - i 0.1378(-3)	14.9451 - i 0.1377(-3)
a = 5 $\mu\text{m}$		
TE <sub>0</sub>	15.0031 - i 0.2314(-4)	14.9829 - i 0.2312(-4)
TE <sub>1</sub>	14.9467 - i 0.3461(-4)	14.9466 - i 0.3460(-4)
TM <sub>0</sub>	14.9998 - i 0.1575(-3)	14.9841 - i 0.1575(-3)
TM <sub>1</sub>	14.9419 - i 0.2231(-3)	14.9460 - i 0.2231(-3)

Table 3 Values of complex propagation constants of gold-clad waveguide with Gaussian index profile

a = 8 $\mu\text{m}$		
a ( $\mu\text{m}$ )	$\beta$ (exact numerical)	$\beta$ (our method)
TE <sub>0</sub> mode		
2	22.02452 - i 0.75740(-4)	22.02187 - i 0.75518(-4)
3	22.05636 - i 0.44834(-4)	22.05513 - i 0.44726(-4)
4	22.07324 - i 0.30299(-4)	22.07237 - i 0.30299(-4)
7	22.09590 - i 0.13753(-4)	22.09550 - i 0.13753(-4)
10	22.10527 - i 0.08215(-4)	22.10501 - i 0.08223(-4)
15	22.11269 - i 0.04541(-4)	22.11252 - i 0.04535(-4)
TE <sub>1</sub> mode		
2	21.91598 - i 0.71710(-4)	21.90691 - i 0.71564(-4)
3	21.97289 - i 0.52999(-4)	21.97054 - i 0.52982(-4)
4	22.00676 - i 0.38692(-4)	22.00672 - i 0.38692(-4)
7	22.05518 - i 0.19022(-4)	22.05472 - i 0.19021(-4)
10	22.07608 - i 0.11675(-4)	22.07597 - i 0.11674(-4)
15	22.09280 - i 0.06581(-4)	22.09278 - i 0.06581(-4)
TM <sub>0</sub> mode		
2	22.01726 - i 0.131794(-3)	22.02081 - i 0.31806(-3)
3	22.05205 - i 0.18924(-3)	22.05469 - i 0.18939(-3)
4	22.07033 - i 0.12789(-3)	22.07195 - i 0.12818(-3)
7	22.09459 - i 0.05783(-3)	22.09511 - i 0.05784(-3)
10	22.10449 - i 0.03443(-3)	22.10481 - i 0.03444(-3)
15	22.11226 - i 0.01896(-3)	22.11242 - i 0.01897(-3)
TM <sub>1</sub> mode		
2	21.90932 - i 0.27884(-3)	21.90730 - i 0.27874(-3)
3	21.96789 - i 0.21442(-3)	21.96790 - i 0.21400(-3)
4	22.00310 - i 0.15820(-3)	22.00385 - i 0.15821(-3)
7	22.05337 - i 0.07839(-3)	22.05378 - i 0.07832(-3)
10	22.07491 - i 0.04818(-3)	22.07546 - i 0.04817(-3)
15	22.09218 - i 0.02716(-3)	22.09227 - i 0.02715(-3)

Table 4 Values of complex propagation constants of silver-clad waveguide with parabolic index profile

TE <sub>0</sub>		
$a$ ( $\mu\text{m}$ )	$N$ (exact numerical)	$N$ (our method)
2	2.2935 - $i$ 0.1535(-5)	2.2935 - $i$ 0.1529(-5)
3.5	2.2966 - $i$ 0.6529(-6)	2.2966 - $i$ 0.6525(-6)
7	2.2988 - $i$ 0.2355(-6)	2.2988 - $i$ 0.2354(-6)

如所周知,金属包层光波导中的损耗包含金属包层的欧姆损耗以及界面上的散射损耗,因而渐变折射率的平板波导在比阶跃折射率平板波导损耗小,所以分析渐变折射率的金属包层波导实际意义较大.本文方法可以推广到金属包层任意折射率分布的各类波导结构,用以分析传输特性及损耗.

利用模损耗随波导参数、模式、阶数的变化,可应用于模式滤波器及偏振器中关于消光比,插入损耗等计算中,对有关器件的设计计算有实际意义.本文图1中画出了金包层高斯分布介质波导模损耗对于 TE<sub>0</sub>、TM<sub>0</sub>、TE<sub>1</sub>、TM<sub>1</sub> 四种模式的功率衰减系数随波导芯区宽度的变化曲线,可以看出,对于 TE<sub>0</sub> 模与 TM<sub>0</sub> 模,可以得到较大的消光比,以达到只传输最低阶 TE<sub>0</sub> 模的目的,而 TE<sub>0</sub> 模的损耗最小,有利于减小插入损耗.

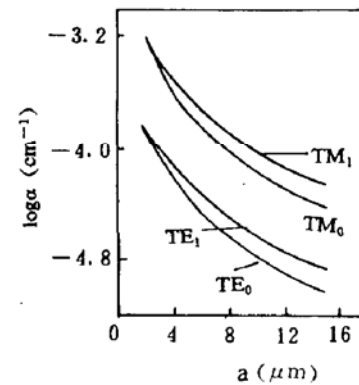


Fig. 1 Power attenuation coefficients of a metal-clad gaussian profile waveguide versus core width

## 参 考 文 献

- [1] M. Masuda, J. Koyama, Effects of a buffer layer on TM modes in a metal-clad optical waveguide using Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub>-C-plate. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(11):2994~3000
- [2] T. Findakly, C. L. Chen, Diffused optical waveguides with exponential profile; effects of metal-clad dielectric overlayer, *Appl. Opt.*, 1978, **17**(3):469~474
- [3] S. J. Al-Bader, Ohmic loss in metal-clad graded-index optical waveguides, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(1):8~11
- [4] S. J. Al-Bader, H. A. Jamid, Comparison of absorption loss in metal-clad optical waveguides, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1986, **MTT-34**(2):310~314
- [5] S. J. Al-Bader, H. A. Jamid, Guided wave characteristics of metal-clad graded-index planar optical waveguides. Analytic approach, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(5):539~543
- [6] S. J. Al-Bader, H. A. Jamid, Guided mode characteristics of metal-clad planar optical waveguides produced by diffusion, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1987, **MTT-35**(6):587~591
- [7] S. X. She, Propagation loss in metal-clad waveguides & weakly absorptive waveguides by a perturbation method, *Opt. Lett.*, 1990, **15**(16):900~902
- [8] S. X. She, Characteristic analysis of metal-clad & absorptive dielectric waveguides by a simple and accurate perturbation method, *Opt. & Quant. Electron.*, 1991, **23**:1045~1054
- [9] 余守宪, 谢峰潮, 求解非均匀平面波导导模的一种新方法. *量子电子学*, 1992, **9**(2):181~185

## Propagation characteristics and loss of metal-clad graded index optical waveguides

SHE Shouxian     XIE Fengchao

(*Department of Applied Physics, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)

(Received 16 December 1991)

### Abstract

A method to analyse propagation characteristics and loss of the metal-clad graded-index optical waveguides is proposed. The propagation constant and attenuation coefficient are calculated by using perturbation and multi-layer approximation for graded-index waveguides with the aid of recursion formulas. Metal-clad waveguides with typical refractive index profiles are analysed and discussed. The numerical results of this method agree well with those by exact numerical calculations.

**Key words** metal-clad waveguides, waveguide loss, graded-index waveguides.