

金属包层单模光纤偏振器的分析*

余守宪

(北方交通大学物理系, 北京 100044)

摘 要 给出计算金属包层单模光纤偏振器中两种正交偏振模式的损耗系数, 偏振器的消光比与插入损耗的微扰分析方法. 本法计算较简便, 且能分析光纤芯区被部分刻蚀的情况, 此情况的分析尚未报道. 其计算结果与实验结果符合.

关键词 单模光纤, 金属包层光纤, 光纤偏振器, 吸收损耗.

1 引 言

金属包层单模光纤偏振器是在光纤一侧刻蚀部分包层乃至刻蚀部分纤芯, 经抛光后镀以金属膜制成的^[1~3]. 它的严格理论分析十分困难, 迄今未见报道. 曾有用薄膜波导近似估算的报道^[2,3], 估算结果与实验数据偏差较大. 文献[4]报道了利用光波导耦合的等效电流理论^[5]进行理论分析的方法, 得到了与实验结果相符的计算结果, 但计算式较复杂, 且仅限于部分刻蚀包层的情况. 实验数据表明^[3], 刻蚀光纤芯区可得到较大的消光比, 而这种情况迄今尚未见分析.

本文提出一种新的分析方法, 其要点是: 用等效正方形芯逼近振荡区, 用微扰修正法求出传播常数实部, 并用作者等曾提出的^[6,7]对复数折射率波导进行微扰分析的方法, 求出 TE 及 TM 模式的传播常数虚部, 从而得到两种正交模式的损耗系数及其差值, 以算出偏振器的消光比(ER)与插入损耗(IL). 理论计算结果表明, 在刻蚀包层与刻蚀纤芯两种情况下, 理论曲线均匀与实验测得曲线相符合, 可供设计制作光纤偏振器时参考. 本法的优点是计算较简便, 且可分析刻蚀包层及刻蚀光纤芯区两种情况.

2 理论分析

金属包层单模光纤偏振器的结构剖面示意图及本文所用坐标系如图 1 所示, 图 1(a)表示部分刻蚀包层情况(情况 I), 图 1(b)表示部分刻蚀芯区情况(情况 II). 电振动方向平行于金属面(x 轴方向)及垂直于金属面(y 轴方向)的两种模式分别用 TE 模及 TM 模表示. R 为芯区半径, H 为金属膜面与圆形芯上方向的距离(情况 I 下, $H > 0$, H 即缓冲层厚度; 情形 II 下, $H < 0$, $-H$ 即纤芯被刻蚀的深度). n_1 与 n_2 各为芯区及包层的折射率, 均为实数, $n_3 = n_3' -$

收稿日期: 1993年3月22日; 收到修改稿日期: 1993年6月3日

* 国家自然科学基金资助项目.



Fig. 1 Cross section of a metal-clad single-mode fiber polarizer

in_3 为金属的复数折射率, 它取决于金属及光波波长 λ , 相应的复数介电系数

$$\epsilon_3 = \epsilon'_3 - i\epsilon''_3, \quad \epsilon'_3 = n_3'^2 - n_3''^2, \quad \epsilon''_3 = 2n_3' n_3''.$$

以下分别对两种情况导出用以计算复数传播常数 $\beta = \beta' - i\beta''$ 的有关计算式, 用 α_x 及 α_y 分别表示两种正交模式的功率衰减系数 ($\alpha = 2\beta''$). 对于长度为 L 的光纤偏振器, 消光比 ER 及插入损耗 IL 分别由以下两式给出:

$$ER = 10 [(\alpha_y - \alpha_x) \cdot L / \ln(10)] \text{ dB} \tag{1}$$

$$IL = 10 [\alpha_x \cdot L / \ln(10)] \text{ dB} \tag{2}$$

2.1 情况 I (包层被部分刻蚀)

如图 2 所示, 作为零级近似, 用边长 $2a$, 面积等于 πR^2 的正方形光芯区逼近光纤芯区, $a = \sqrt{\pi} R/2$, 方形区与金属面的距离 $h = H + (1 - \sqrt{\pi}/2)R$, 用 Marcatili 法求出模折射率 $N (= k_0\beta)$ 的实部的零级近似值 N_0 . 再用微扰修正法^[8,9]对角区进行修正, 得 N^2 的修正量 $(\Delta N^2)_1$, 然后, 根据等效正方形与圆形的几何差别, 利用变分公式^[8] $\Delta N^2 = \int (\Delta n^2) \psi^2 dx dy / \int \psi^2 dx dy$, 求出因边界变化引起的 N^2 修正量 $(\Delta N^2)_2$, 即得到模折射率实部的平方值为 $N^2 = N_0^2 + (\Delta N^2)_1 + (\Delta N^2)_2$ (为书写方便, 以下用 N 表示 N 的实部 N'). 最后, 用复数折射率微扰法^[8,9]求得模折射率的虚部 N'' , 这里

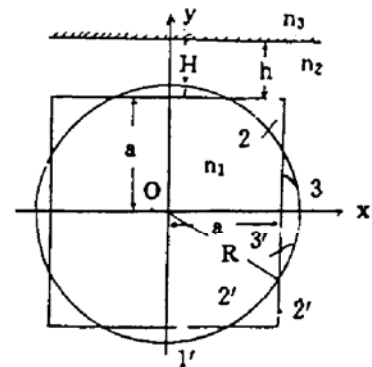


Fig. 2 Equivalent square waveguide of the fiber

$$N''^2 = \epsilon''_3 \frac{\partial}{\partial \epsilon'_3} (N^2) \tag{3}$$

式中 $\partial N^2 / \partial \epsilon'_3$ 可借助简单的数值微分法求得, 于是, 由 $\beta'' = k_0 N''$ ($k_0 = 2\pi/\lambda$) 及 $\alpha = 2\beta''$ 分别得出两种模式有功率衰减系数 α_x 与 α_y , 以求得 ER 及 IL .

在零级近似下, 可设场函数 $\psi(x, y) = X(x)Y(y)$, 由 Helmholtz 方程求本征值 N^2 如下所述.

$$\begin{aligned} \text{令} \quad K_1 &= k_0 \sqrt{n_1^2 - N_x^2}, & p_1 &= k_0 \sqrt{N_x^2 - n_2^2} \\ K_2 &= k_0 \sqrt{n_1^2 - N_y^2}, & p_2 &= k_0 \sqrt{N_y^2 - n_2^2}, & q_2 &= k_0 \sqrt{N_y^2 - \epsilon_3} \end{aligned} \tag{4}$$

为合并分析两种正交的模式, 令在 TE 模情况下

$$C_x = (n_1/n_2)^2, \quad C_1 = 1, \quad C_2 = 1, \tag{5}$$

在 TM 模情况下

$$C_x = 1, \quad C_1 = (n_1/n_2)^2, \quad C_2 = n_2^2/\epsilon_3 \quad (6)$$

于是场函数 $X(x)$ 及 $Y(y)$ 可分别表示为:

$$X(x) = \begin{cases} \cos(K_1 x) & x \leq a \\ C_x \cos(K_1 a) \cdot e^{-\gamma_1(x-a)} & x \geq a \end{cases} \quad (7)$$

(由对称性, 仅需考虑右半平面), 及

$$Y(y) = \begin{cases} A_0 e^{\gamma_2(y+a)} & -\infty < y \leq -a \\ A_1 \cos(K_2 y + \theta) & -a \leq y \leq a \\ A_2 e^{\gamma_2(y-a-h)} - B_2 e^{-\gamma_2(y-a-h)}, & a \leq y \leq a+h \\ A_3 e^{-\gamma_2(y-a-h)} & a+h \leq y < \infty \end{cases} \quad (8)$$

由边界条件, 对于基模, 求得 N_z^2 及 N_y^2 的本征值方程分别为

$$K_1 a = \tan^{-1}(C_x p_1/K_1), \quad K_2 \cdot 2a = \tan^{-1}(C_1 p_2/K_2) + \tan^{-1}(C_1 p_2/K_2 \cdot Z) \quad (9)$$

式中

$$Z = \frac{C_2 q_2/K_2 + \tanh(p_2 h)}{1 + C_2 q_2/K_2 \tanh(p_2 h)} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \theta = K_2 a - \tan^{-1}(C_1 p_2/K_2), & A_0 = C_1 A_1 \cos(K_2 a - \theta) \\ A_1 = \frac{1}{C_1 \cos(K_2 a + \theta)} \cdot (A_2 e^{-\gamma_2 h} - B_2 e^{\gamma_2 h}) \\ A_2 = \frac{1}{2} (1/C_2 - q_2/p_2) A_3, & B_2 = -\frac{1}{2} (1/C_2 + q_2/p_2) A_3 \end{cases} \quad (11)$$

零级近似值 N_0^2 (Marcattili 近似) 由下式给出

$$N_0^2 = N_z^2 + N_y^2 - n_1^2 \quad (12)$$

对角区进行微扰修正所得修正量为

$$(\Delta N^2)_1 = (n_1^2 - n_2^2) \frac{I_2 J_2}{IJ}$$

其中

$$I_1 = \int_0^a X^2 dx, \quad I_2 = \int_a^\infty X^2 dx, \quad I = I_1 + I_2$$

$$J_0 = \int_0^a Y^2 dy, \quad J_1 = \int_a^{a+h} Y^2 dy, \quad J_2 = \int_{a+h}^\infty Y^2 dy, \quad J = J_0 + J_1 + J_2$$

对芯区边界变化作微扰修正所得修正量为

$$(\Delta N^2)_2 = (n_1^2 - n_2^2) (S_1 - S_2 + S_3 + S'_1 - S'_2 + S'_3)$$

其中 $S_1, S_2, S_3, S'_1, S'_2, S'_3$ 分别表示归一化场函数 ψ 的平方在 1, 2, 3, 1', 2', 3' 中的积分。(为简明计, 不再列出上述各个积分计算用的表示式); 于是

$$N^2 = (N_z^2 + N_y^2 - n_1^2) + (n_1^2 - n_2^2) \frac{I_2 J_2}{IJ} + (n_1^2 - n_2^2) (S_1 - S_2 + S_3 + S'_1 - S'_2 + S'_3) \quad (13)$$

如前所述, 功率衰减系数 α 可以借助数值微分法利用(3)式求出. 对 TE 模及 TM 模分别求得 α_x 与 α_y 后, 即可由(1)式, (2)式求得消光比与插入损耗.

2.2 情况 I (纤芯被部分刻蚀)

在此情形下, $H < 0$, 设 $S = R + H$, 则未被刻蚀的芯区截面积为 $\pi R^2 - (R^2/2)(\theta - \sin \theta)$,

其中 $\theta = 2 \cos^{-1}(S/R)$. 取等效正方形芯区的边长等于该面积与最大厚度 $R + S$ 之比, 即取

$$a = \frac{R^2[\pi - (\theta/2) + (\sin \theta/2)]}{2(R + S)}, \quad \theta = 2 \cos^{-1}(S/R)$$

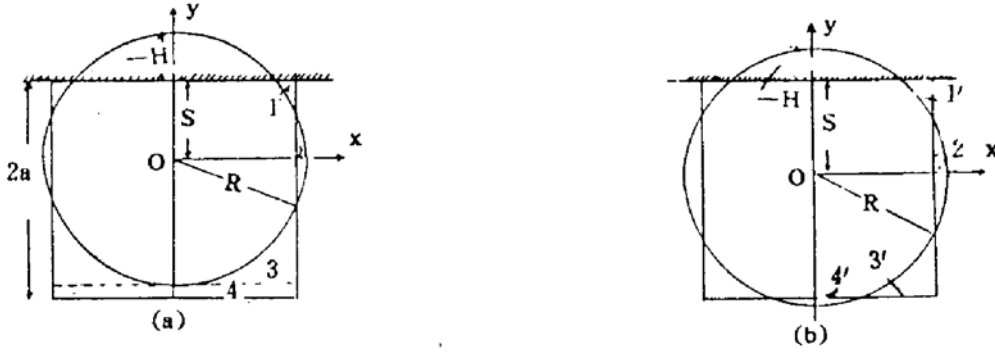


Fig. 3 Core etched fiber (a) $2a > R + S$, (b) $2a < R + S$

如图 3(a), (b) 所示, 为等效正方形与芯区边界图 3(a) 表示 $2a > R + S$ 情况, 图 3(b) 表示 $2a < R + S$ 情况.

分析方法与情况 I 完全类似, 在情况 I 中场函数可写为

$$X(x) = \begin{cases} \cos(K_1 x) & x \leq a \\ C_2 \cos(K_1 a) \cdot \exp[-p_1(x - a)] & x \geq a \end{cases} \quad (14)$$

$$Y(y) = \begin{cases} A_1 \exp[p_2(y + 2a - s)] & y \leq -(2a - s) \\ A_1 \cos(K_2 y + \theta) & s \geq y \geq -(2a - s) \\ A_2 \exp[-q_2(y - s)] & y \geq s \end{cases} \quad (15)$$

N_z^2 与 N_y^2 的本征值方程分别为

$$K_1 a = \tan^{-1}(C_2 p_1 / K_1) \quad (16)$$

$$K_2 \cdot 2a = \tan^{-1}(C_1 p_2 / K_2) + \tan^{-1}(C_3 q_2 / K_2) \quad (17)$$

其中对 TM 模 $C_3 = 1$, 对 TE 模 $C_3 = n_1^2 / n_3^2$, 而

$$\theta = \tan^{-1}(C_3 q_2 / K_2) - K_2 s$$

$$A_0 = \frac{K_2}{p_2} \sin[K_2(2a - s) - \theta] A_1, \quad A_2 = \frac{K_2}{q_2} \sin(K_2 s + \theta) A_1$$

仿前, 可得

$$N^2 = (N_z^2 + N_y^2 - n_1^2) + (\Delta N^2)_1 + (\Delta N^2)_2 \quad (18)$$

修正量 $(\Delta N^2)_1$ 及修正量 $(\Delta N^2)_2$ 分别计算如下述.

$$(\Delta N^2)_1 = (n_1^2 - n_2^2) \frac{I_2(J_0 + J_2)}{IJ} \quad (19)$$

$$I = I_1 + I_2, \quad J = J_0 + J_1 + J_2$$

而 I_1, I_2 各为 X^2 在区间 $(0, a)$ 及 (a, ∞) 的定积分, J_0, J_1, J_2 各为 Y^2 在区间 $(-\infty, s - b)$, $(s - b, s)$ 及 (s, ∞) 的定积分.

2.2.1 在图 3(a) ($b > R + S$) 所示情况下

$$(\Delta N^2)_2 = (n_1^2 - n_2^2)(-S_1 + S_2 - S_3 - S_4) \quad (20)$$

其中 S_1, S_2, S_3, S_4 分别为区域 1, 2, 3, 4 中归一化场函数平方 $\psi^2(x, y)$ 的积分值.

2.2.2 在图 3(b) ($b < R + S$) 所示情况下

$$(\Delta N^2)_2 = (n_1^2 - n_2^2)(-S'_1 + S'_2 - S'_3 + S'_4) \quad (21)$$

其中 S'_1, S'_2, S'_3, S'_4 分别为区域 $1', 2', 3', 4'$ 中归一化场函数平方 $\psi^2(x, y)$ 的积分.

α_x 与 α_y 以及消光比 ER 及插入损耗 IL 的计算与情况 I 完全相同.

3 实例计算与讨论

为检验本文方法的有效性, 并对理论结果进行讨论, 按文献[2,3]所给有关实验数据, 将理论计算结果与实验结果进行了比较.

在情况 I (包层被部分刻蚀) 下, 取(文献[2]) $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.4603$, $n_2 = 1.4577$ (相应于 $\Delta = 0.16\%$), $n_3(\text{Al}) = 1.48 - j9.0$ ($\epsilon'_3 = -78.81$, $\epsilon''_3 = 26.64$), $2R = 9.4 \mu\text{m}$, 偏振器长度 $L = 3 \text{ cm}$. 所得消光比与缓冲层厚度 H (以 μm 计) 的关系曲线如图 4 所示, 图中小圆圈标出实验数据, 实线为实验曲线(文献[2]图 5), 虚线为本方法的计算结果. 两者符合颇好, 说明本方法可以得到较满意的结果. 计算结果表明, 消光比与插入损耗之比的量级为 10^2 (例如, 当 $H = 2.5 \mu\text{m}$ 时, 算得 $\alpha_x = 0.0039$, $\alpha_y = 0.352$), 当缓冲层厚度 H 增大时, 消光比急剧下降, 故减小缓冲层厚度有利于获得较大的消光比.

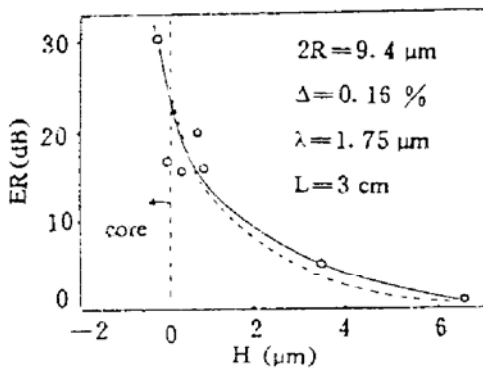


Fig. 4 Relation between extinction ratio (ER) and buffer-layer thickness (H)

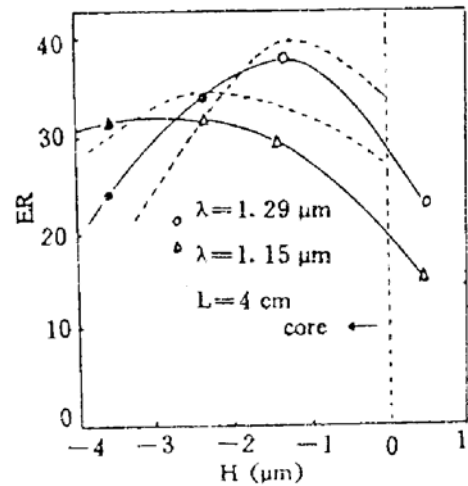


Fig. 5 Relation between extinction ratio (ER) and etching depth H

在情形 II (芯区被部分刻蚀) 下, 取(文献[3]) $n_1 = 1.4603$, $n_2 = 1.4577$, 对于 $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$, $n_3(\text{Al}) = 1.48 - j9.0$ ($\epsilon'_3 = -78.81$, $\epsilon''_3 = 26.64$), 对于 $\lambda = 1.29 \mu\text{m}$, $n_3(\text{Al}) = 2.3 - j11.5$ ($\epsilon'_3 = -126.96$, $\epsilon''_3 = 52.90$). 由光纤的截止波长 $\lambda_c = 0.87 \mu\text{m}$ 及归一化截止频率 $V_c = (2\pi/\lambda_c) \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 2.405$ 可算得芯区半径 $R = 3.82 \mu\text{m}$. 偏振器长度 $L = 4 \text{ cm}$. 图 5 中小三角及小圆圈分别给出 $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ 及 $\lambda = 1.29 \mu\text{m}$ 时的实验值, 实线给出消光比与刻蚀深度 ($H = 0$ 到 $H = -4 \mu\text{m}$) 之间的关系曲线, 虚线给出相应的理论计算曲线, 可见理论曲线与实验曲线符合较好. 在 $\lambda = 1.29 \mu\text{m}$ 时, 最大消光比实验值为 37 dB , 对应于刻蚀深度 $H = -1.3 \mu\text{m}$, 而理论计算给出最大消光比为 39 dB , $H = -1.2 \mu\text{m}$; 在 $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ 时, 最大消光比实验值为 32 dB , 对应于刻蚀深度 $H = -2.4 \mu\text{m}$, 而理论计算给出最大消光比为 34 dB , $H = -2.3 \mu\text{m}$. 在 $\lambda = 1.29 \mu\text{m}$ 时, 与最大消光比相应的插入损耗计算值为 0.82 dB , 在 $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ 时, 与最大消光比相应的插入损耗计算值为 0.91 dB , 可见能满足获得单模单偏振的要求(在实验中, 因刻蚀引起的表面粗糙及光纤结构的不规则性, 插入损耗可达几个 dB ^[3]).

计算结果表明,芯区被部分刻蚀可以得到比包层被部分刻蚀情况较大的消光比,而在芯区被部分刻蚀情况下,可以选择刻蚀深度值以使消光比取极大值而插入损耗较小.

参 考 文 献

- [1] W. Eickhoff, In-line fibre-optic polariser. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(20) : 762~763
- [2] T. Hosaka, K. Okamoto, J. Noda, Single-mode fibre optic polarizer. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **18**(10) : 1569~1572
- [3] T. Hosaka, K. Okamoto, T. Eda Hiro, Fabrication of single-mode fiber-type polarizer. *Opt. Lett.*, 1983, **3**(2) : 124~126
- [4] T. Yu, Y. Wu, Theoretical study of metal-clad optical waveguide polarizer. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(6) : 1209~1213
- [5] Y. Wu, Equivalent current theory of optical waveguide coupling. *J. Opt. Soc. Amer. (A)*, 1987, **4**(10) : 1902~1910
- [6] S. X. She, Propagation loss in metal-clad waveguides and weakly absorptive waveguides by a perturbation method. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(6) : 900~902
- [7] S. X. She, Characteristic analysis of metal-clad and absorptive dielectric waveguides by a simple and accurate perturbation method. *Opt. and Quant. Electron.*, 1991, **23** : 1045~1054
- [8] 乔力, 余守宪, 条形介质波导导模的近似分析. *光学学报*, 1986, **8**(10) : 930~935
- [9] A. Kumar, K. Thyagarajan, A. K. Ghatak, Analysis of rectangular core dielectric waveguides; an accurate perturbation approach. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(1) : 63~65

Analysis of Metal-Clad Single-Mode Optical Fiber Polarizer

She Shouxian

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

(Received 22 March 1993; revised 3 June 1993)

Abstract The perturbation method is used to analyse the metal-clad single-mode optical fiber polarizer for calculating the attenuation coefficient of polarized fundamental modes, the extinction ratio (ER) and insertion loss (IL) of polarizers. The method is simple and can be applied to the case of fibre core partially etched off, which has not be reported before. The results of the present method agree with those of experiment.

Key words single-mode fibre, metal-clad optical fibre, optical fibre polarizer, absorption loss.