

金属包层型平面光波导偏振器和在线单模光纤偏振器的理论和实验研究*

王旭 黄肇明

(上海科技大学, 上海市特种光纤重点开放实验室, 上海, 201800)

朱红卫

(上海交通大学微电子研究所, 上海, 200030)

F. Yan

(Department of Physics, Columbia University, New York, N.Y. 10027, U.S.A.)

摘要 改进了 Y. Yamamoto 提出的多层平面介质波导理论方法, 并将改进后的方法应用于金属包层型平面介质波导偏振器和在线单模光纤偏振器, 进行了理论和实验研究.

关键词 平面光波导, 金属包层型平面光波导偏振器, 在线单模光纤偏振器.

1 理论分析

金属包层型平面光波导如图 1 所示^[1]. 假若波导模式在 Z 方向以相位因子 $e^{j(\omega t - k_z \cdot Z)}$ 传播^[2], 由于引入金属折射率损耗系数使得 k_z 成为一个复数, 因此, 本征方程为一个复杂的复数超越方程. 我们改进了 Y. Yamamoto 的复杂近似解法, 避免了繁琐的推导, 数学表达简洁, 精确度提高, 其过程简述如下.

本征方程为

$$2aQ_3 = m\pi + \tan^{-1} \left(t_{34} \cdot \frac{Q_4}{-jQ_3} \right) + \tan^{-1} \left\{ t_{32} \cdot \frac{Q_2}{Q_3} \cdot \tan \left[\tan^{-1} \left(t_{21} \cdot \frac{Q_1}{-jQ_2} \right) - Q_2 b \right] \right\}, \quad (1)$$

式 (1) 中

* 上海市自然科学基金资助项目.

本文 1992 年 10 月 31 日收到, 修改稿 1993 年 5 月 20 日收到.

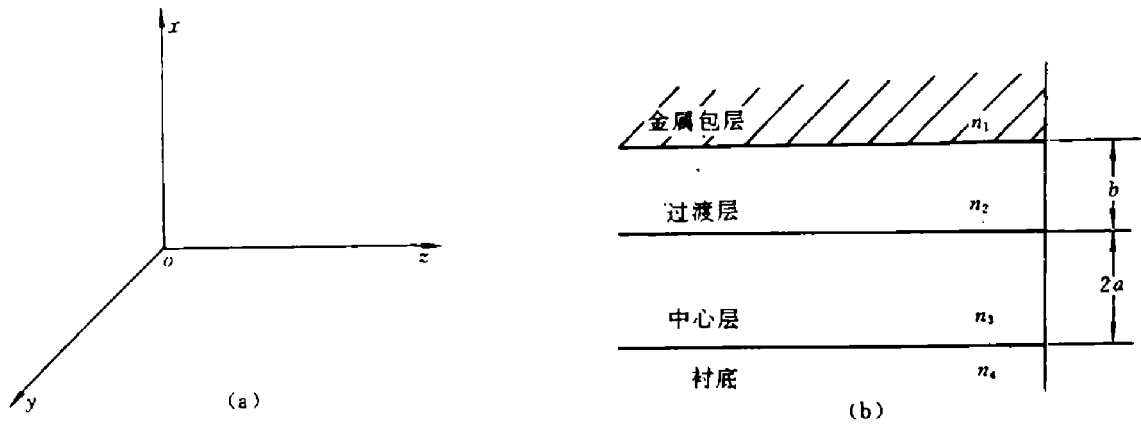


图 1 金属包层型平面光波导模型

Fig. 1 The waveguide model structure of the metal-clad planar waveguide

$$t_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{TE mode} \\ \left(\frac{n_p}{n_q}\right)^2, & \text{TM mode} \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_L = k_0(n_L^2 - n^2)^{\frac{1}{2}}, \quad L = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

$$n = \frac{k_z}{k_0} = \frac{\beta - j\alpha}{k_0}, \quad (4)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (5)$$

以上各式中 $2a$ 是中心层的厚度, Q_L 是每一区域的横向波数, n 是模式的有效折射率, m 是模数. 在中心层中的横向波数可由下式得到:

$$Q_3^{(0)} = \frac{m+1}{2a}\pi, \quad (6)$$

模式的有效折射率为

$$n^{(0)} = \left\{ n_3^2 - \frac{(m+1)^2}{4a^2 k_0^2} \pi^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

其它区域的横向波数可由下式得到:

$$Q_L^{(0)} = -jk_0 \left[n_3^2 - \frac{(m+1)^2}{4a^2 k_0^2} \pi^2 - n_L^2 \right]^{\frac{1}{2}} = -jQ_L^{(0)'}, \quad L = 2, 4 \quad (8)$$

$$Q_1^{(0)} = k_0 \left[n_1^2 - n_3^2 + \frac{(m+1)^2}{4a^2 k_0^2} \pi^2 \right]^{\frac{1}{2}} = Q_1^{(0)'} - jQ_1^{(0)''}. \quad (9)$$

由于 $Q_L^{(0)'}$ 、 $Q_1^{(0)'}$ 、 $Q_1^{(0)''}$ 都是正实数, 将式 (8)、(9) 代入 (1), 可得

$$k_z = \beta - j\alpha = k_0 \left(n_3^2 - \frac{Q_3^{(1)^2}}{k_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} \approx k_0 \cdot n_3 - \frac{Q_3^{(1)^2}}{2k_0 \cdot n_3}, \quad (10)$$

其中

$$Q_3^{(1)} = \frac{m+1}{2a} \left\{ 1 - \frac{\nu_3}{2aW_4} \frac{\nu_3[\xi_1 \exp(2Q_2^{(0)'}b) - \xi_2 \exp(-2Q_2^{(0)'}b) - j4W_1'W_2]}{2aW_2[\xi_1 \exp(2Q_2^{(0)'}b) + \xi_2 \exp(-2Q_2^{(0)'}b) + \xi_3]} \right\}. \quad (11)$$

对于 TE 模有

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= W_1' + jW_1'' = Q_1^{(0)'} - jQ_1^{(0)''}, \\ W_L &= Q_L^{(0)'}, \quad L = 2, 4 \\ \nu_3 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对于 TM 模有

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= W_1' + jW_1'' = [Q_1^{(0)'} - jQ_1^{(0)'']}/n_1^2, \\ W_L &= Q_L^{(0)'}/n_L^2, \quad L = 2, 4 \\ \nu_3 &= 1/n_3^2. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

同时有

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= (W_1')^2 + (W_1'')^2 + W_2^2 - 2W_1''W_2, \\ \xi_2 &= (W_1')^2 + (W_1'')^2 + W_2^2 + 2W_1''W_2, \\ \xi_3 &= 2[(W_1')^2 + (W_1'')^2 - W_2^2]. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

这样, 我们根据式 (11)、(12)、(13)、(14) 进行数值运算, 避开了复杂的近似推导过程, 只要在式 (10) 的基础上分别取出实部和虚部, 便可得出 β 、 α 的全部数据和规律. 这种改进后的方法对于金属包层型平面光波导偏振器和在线单模光纤偏振器中光传播的研究十分合适, 每一点上的 TM 模式和 TE 模式的传输特性和衰减特性^[4]都一览无余.

2 金属包层型平面光波导偏振器和单模在线光纤偏振器的特性研究

敷有 buffer-layer 的金属包层型平面光波导偏振器的波导模型与图 1 近似, 在中心层和金属膜之间敷有一定折射率的过渡层, 能够提高偏振器的性能, 为了获得高偏振度及低插损, 要求 TM_0 模衰减大, TE_0 模衰减小, 以使 $\alpha_{TM_0}/\alpha_{TE_0}$ 尽可能地大^[5].

运用改进的方法, 借助计算机求解复数超越方程, 从计算中可发现一些十分有用的规律, 如图 2、3、4、5 所示. 这些图中都存在一最佳值, 只要合理设计厚度、折射率的过渡层和金属膜, 可得到最佳性能的金属包层型平面光波导偏振器 (或者模式滤波器).

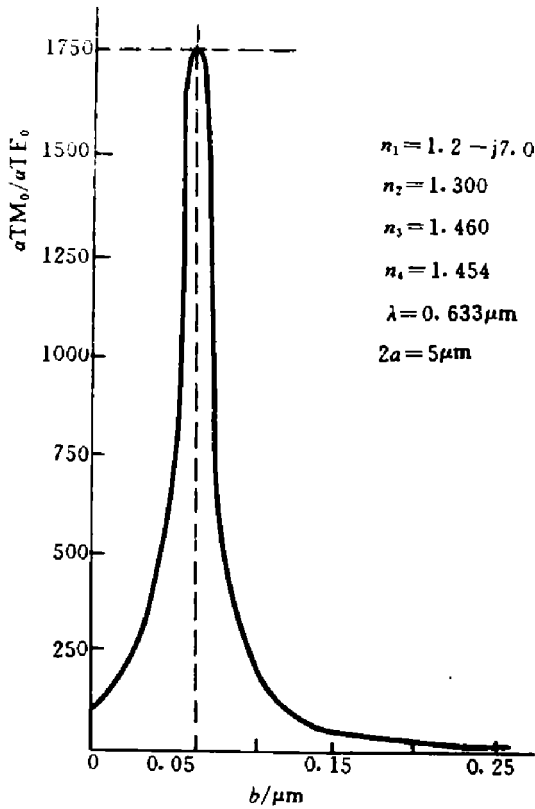


图 2 以过渡层厚度 b 为参变量的 $\alpha_{TM_0}/\alpha_{TE_0}$ 变化曲线
 Fig. 2 $\alpha_{TM_0}/\alpha_{TE_0}$ versus the buffer layer thickness b

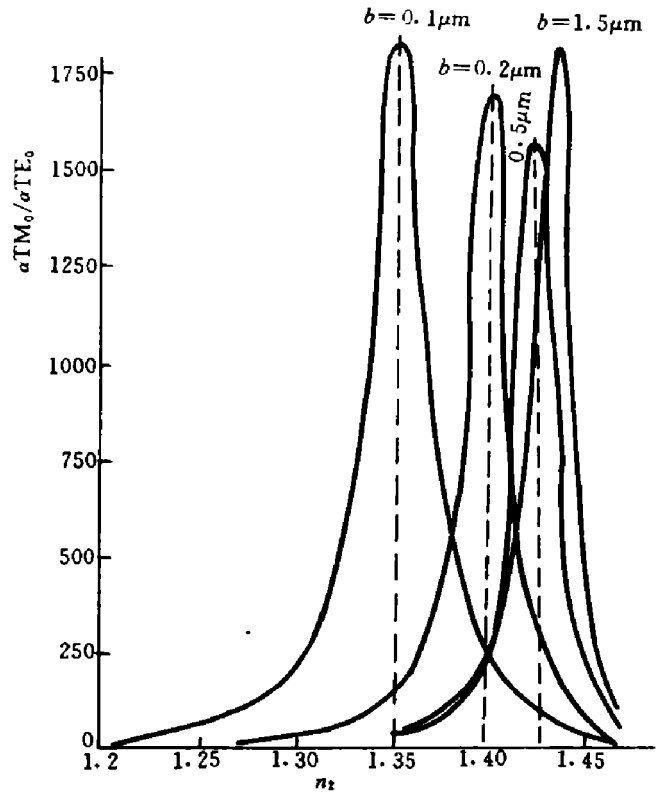


图 3 以过渡层的折射率 n_2 为参变量的 $\alpha_{TM_0}/\alpha_{TE_0}$ 的变化曲线
 Fig. 3 $\alpha_{TM_0}/\alpha_{TE_0}$ versus the refractive index n_2 of buffer layer

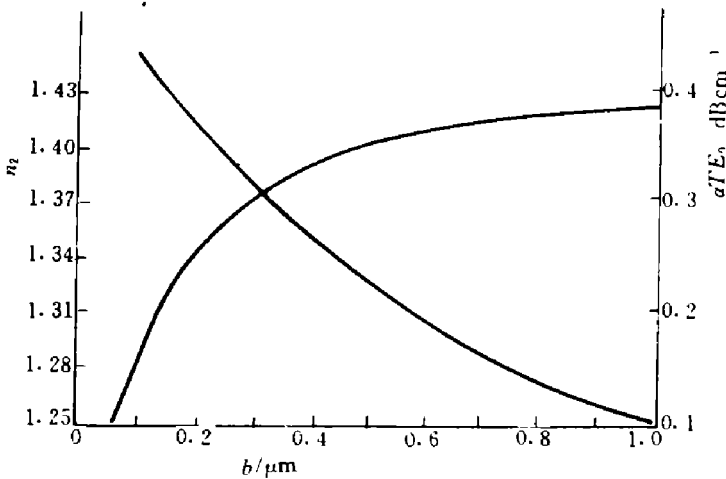


图 4 与图 3 峰值点相对应的特性曲线
 Fig. 4 The characteristic curves corresponding to the peak value point in Fig. 3

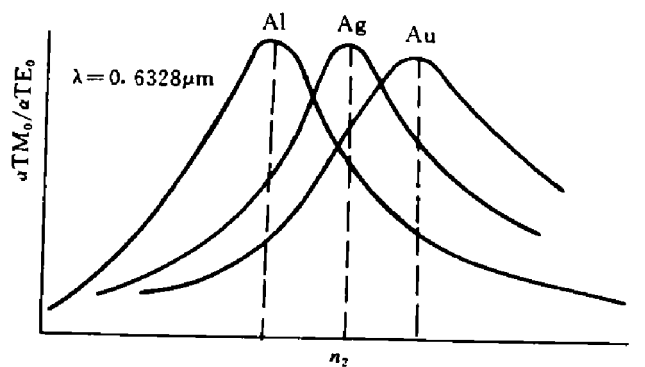


图 5 以过渡层折射率 n_2 为参变量的不同金属包层的 $\alpha_{TM_0}/\alpha_{TE_0}$ 的变化曲线 (图中只描述一般规律, 故未标出数值, Al: Ag、Au 的 n 和 $|K|$ 分别为 1.2、0.065、0.15 和 7.0、4、3.2)
 Fig. 5 $\alpha_{TM_0}/\alpha_{TE_0}$ vs. the refractive index n_2 of buffer layer for various metal materials

常规单模光纤偏振器结构如图 6 所示. 其波导模型也与图 1 近似. 本文方法也完全适用于它, 计算得到类似的结论.

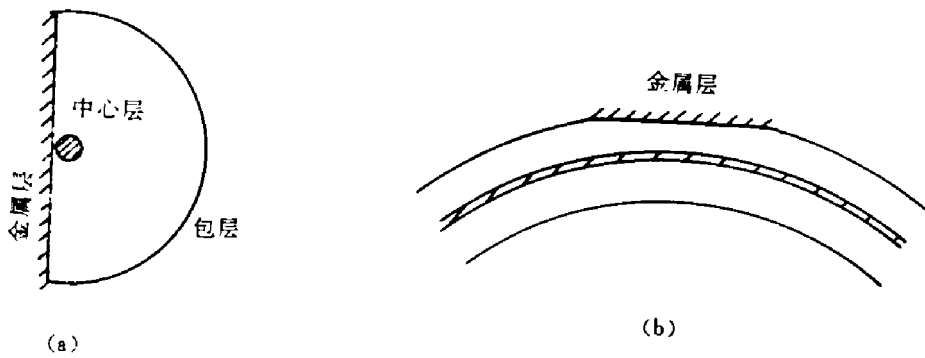


图 6 在线单模光纤偏振器结构 (a) 截面图; (b) 剖面图
 Fig. 6 Structure of on-line single-mode fiber-optic polarizer (a) cross-section; (b) profile

3 实验研究

根据本文分析, 选择合适的厚度、折射率、金属膜进行合理的设计, 能够得到性能优良的单模光纤偏振器.

将长约 2 m 的单模光纤用环氧固化剂牢牢地胶在一开槽的石英块中, 槽体内的光纤事先去掉包皮, 槽呈弧型, 半径为 $R=22\text{ cm}$, 如图 7 所示. 然后, 开始使用粗细磨料研磨石英块, 并不断监测. 经表面抛光, 真空镀膜^[6,7] (约 150 nm 厚度 Al 膜) 形成在线单模光纤偏振器. 其测量装置如图 8 所示. 上海科大光纤所特种光纤重点开放实验室已制成了偏振度大于 30 dB、而插损小于 1 dB 的光纤偏振器.

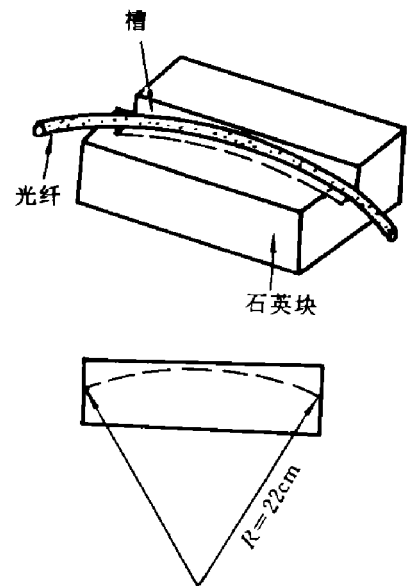


图 7 光纤偏振器制备示意图
 Fig. 7 The set-up for fabricating the on-line single-mode fiber polarizer

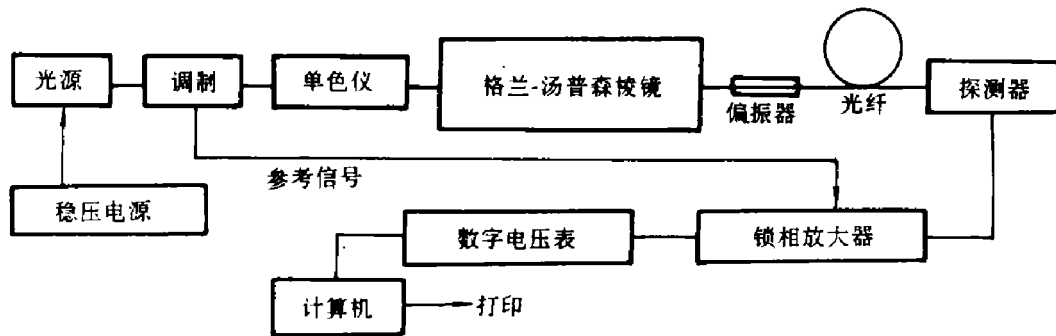


图 8 单模在线光纤偏振器测量实验装置图
 Fig. 8 The set-up for measuring the performances of the on-line single-mode fiber-optic polarizer

参考文献

- 1 Xu Wang, et al. *Optics Letters*, 1993,18(10):805~807
- 2 王子华, 王旭. 国家 863 计划·光电子技术与集成光学论文集, 北京: 清华大学出版社, 1990

- 3 Yamamoto Y, et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, **QE-11**(9):729~736
- 4 王子华, 王旭. *光学学报*, 1991, **11**(12):1095~1100
- 5 Eichoff. *Elec. Lett.*, 1980, **16**:762~763
- 6 Hosaka et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**:1569~1572
- 7 Feth, et al. *Opt. Lett.*, 1986, **11**:386~388

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF METAL-CLAD PLANAR WAVEGUIDE POLARIZER AND ON-LINE SINGLE-MODE FIBER POLARIZER*

Wang Xu Huang Zhaoming

(*Wave Science Laboratory, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800, China*)

Zhu Hongwei

(*Microelectronic Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

F. Yan

(*Department of Physics, Columbia University, New York, N.Y. 10027, U.S.A.*)

Abstract The theoretical method for multilayer planar waveguide, which Y. Yamamoto presented, was greatly improved, and applied to the metal-clad planar waveguide polarizer and on-line single-mode fiber polarizer for theoretical and experimental research work.

Key words planar waveguide, metal-clad planar waveguide polarizer, on-line single-mode fiber polarizer.

*The project supported by the Shanghai Natural Science Foundation.