

文章编号: 0253-2239(2001)02-142-05

金属覆层保偏光纤偏振器的五层波导模型及理论分析

倪 明 胡永明 陈 哲 孟 洲
(国防科技大学应用物理系, 长沙 410073)

摘要: 对金属覆层保偏光纤偏振器建立了五层波导变参量物理模型, 设计了自适应套孔爬山法的数值计算方法求解含多层波导本征值的复超越方程, 计算结果揭示了金属覆层保偏光纤偏振器的物理机制, 并对器件进行了优化设计, 给出了实验结果。

关键词: 保偏光纤; 光纤偏振器; 爬山法; 光波导

中图分类号: TN252 文献标识码: A

1 引 言

金属覆层保偏光纤偏振器^[1,2]是一种极为重要的光纤偏振器, 与缠绕型、双折射晶体等其他类型的光纤偏振器相比, 金属覆层保偏光纤偏振器具有消光比高、与应用系统中其他光纤匹配性好、损耗小、工艺简单的特点, 是光纤陀螺、光纤水听器、光纤相干检测系统的关键器件。对这种器件, 人们已进行了较多的理论及实验研究。以往的研究大多建立在四层波导或更简单的模型基础上^[3~6], 不能全面反映器件的结构特点和一些重要特征。

考虑到器件在制作过程中是将光纤嵌在一变曲率半径的槽中研磨后再镀上介质-金属复合膜层, 光纤芯与膜层间的距离是变化的, 由此, 我们建立了含金属的变参量五层波导结构的物理模型, 设计了自适应套孔爬山法^[7]获得了含金属的五层波导的本征值方程的解, 由解的结果说明了保偏光纤偏振器起偏的物理机制, 进一步分析了导模经过该偏振器时的波场分布情况, 得到了 TM、TE 模在起偏区域的模场图。

2 金属覆层保偏光纤偏振器的结构及起偏机制

金属覆层保偏光纤偏振器的物理结构如图 1 所示。在一玻璃基片上以半径 R 开一弧形的槽, 将保偏光纤定轴后嵌入槽中用胶固化, 将光纤磨抛到芯附近, 然后镀上介质-金属复合膜。当光波到达此复合膜区时, 在金属-介质界面上产生的表面等离子体波将光纤内一个偏振模耦合损耗掉。另一偏振模不能激发表面等离子体波, 可几乎无损耗地通过此区域, 从而实现起偏功能。

光在保偏光纤中传输时, 本无 TM、TE 模之称, 只有沿应力快慢轴的偏振模之别, 当光到达光纤模场与金属界面表面等离子体波相互影响的复合波导区域中后, 相对金属平面界面, 便有了 TM、TE 模之分。

一般情况下, 在制作熊猫保偏光纤偏振器时, 可使光纤快轴或慢轴与磨抛平面平行, 如图 2 所示, 从而可得快轴或慢轴偏振器。这两种偏振器除定轴的差异外, 有完全相同的起偏机制。

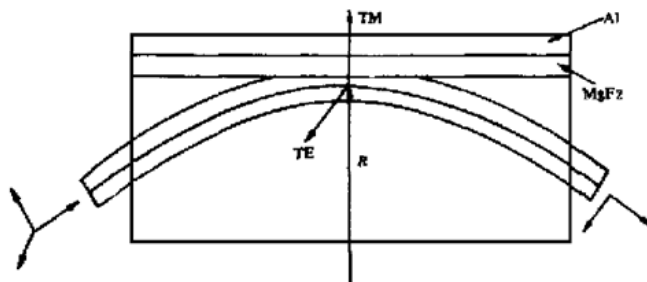


Fig. 1 The frame of the grinding and polishing fiber polarizer with meiallic coating

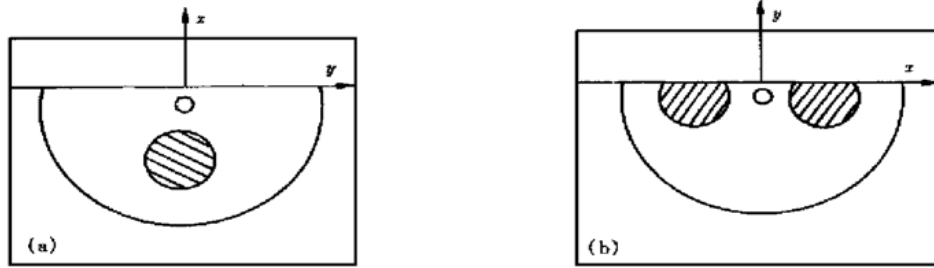


Fig. 2 The different fixed axis fiber polarizer with fast axis (a) or slow axis (b)

3 偏振器变参量五层波导物理模型及本征值方程

对于一个实际的器件, 一般磨抛区长度为几毫米, 而光纤弯曲半径 R 为几十厘米到一米以上, 光纤在磨抛区内“看”起来是非常平直的。以往的理论研究都把它作为参数不变的直波导处理^[4, 8]。但通过实验发现: 磨抛区内的不同点对器件偏振性能的影响不同, 器件有效的起偏过程只发生在一些特定的小域内, 这种偏振敏感区可能在器件的中部, 也可能在中央两侧。进一步的计算表明, 要保证器件的消光比为 35 dB~ 40 dB 的消光比指标, 器件对其结构参数和工作波长有严格的匹配要求, 它甚至要失去工艺上的可行性和应用价值, 而实际情况要宽松得多。事实上, 在光纤模激发的金属表面等离子体波的磨抛区内, 由光纤弯曲产生的磨抛深度变化已达数微米, 这已超过等离子体波作用的距离。因此, 已往的理论和研究结果暴露出明显的缺陷, 它不能精确反映器件的特性, 而这些特性正是使器件具有稳定性能和较好适应性的重要因素。

根据金属覆层保偏光纤偏振器的物理结构, 我们建立如图 3 所示的变参量五层波导模型。在此, 将纤芯作了等效平板波导的近似。文献[5]指出, 对于光纤中线偏振模的考虑, 这种近似是有效的。当熊猫型光纤研磨后, 不论是快轴偏振器磨掉一个猫眼或慢轴偏振器将两个猫眼各磨去一半, 光纤中部残存一定的应力并保持一定的双折射, 考虑到器件工作时 TE、TM 模都工作在主轴方向, 在求解时, 都将纤芯部分做各向同性介质处理。

由于光纤嵌在半径为 R 的槽内研磨, 纤芯与缓冲层间的间距 $d(x)$ 是变化的。器件要获得良好的偏振特性, 各参数间有严格的匹配要求, 然而, 在实际工艺及应用中, 缓冲层厚度 b 、折射率 n_3 、研磨深度 d 以及光的波长 λ 都难以精确确定。在器件中有一定变化范围的 $d(x)$ 正好有可能使各参数都得到

良好的匹配区域, 从而使器件的性能得到大大改善。这种变参量波导结构的考虑, 不仅更准确地描述了器件的结构特征, 而且更能反映出它的一些特性。其中一些重要结果是忽略变化 d 的四层波导模型无法得到的。

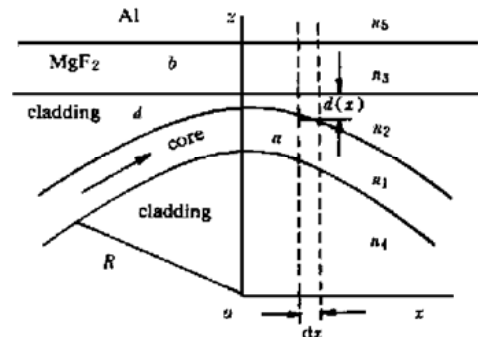


Fig. 3 The varying parameters model of grinding and polishing fiber polarizer with five-layer metallic optical waveguide

对于变参量五层波导的求解, 将研磨深度 d 作为 x 的变数, 对于各个给定的 x , 求出波导在局部小区域内的特性, 而整个器件的性能, 是由所有不同特性的小区域的积累效果决定的, 如消光比:

$$\eta = 10 \lg \frac{I_{TE}}{I_{TM}} = \frac{20}{\ln 10} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_{TE}(x) dx - \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_{TM}(x) dx \right]$$

在器件给定的 x 点上, 有确定的研磨深度 $d(x)$, 根据电磁场的基本理论^[9], 推得在位置 x 附近的小区域 dx 内 TM 的本征值方程^[7]:

$$k_1 a = m \pi + \arctan \left[\frac{p_4}{k_1} \right] + \arctan \left[\frac{A}{B} \right], \quad (1)$$

$$\frac{A}{B} = \frac{p_2(1 - D_2/D_1)}{k_1(1 + D_2/D_1)}, \quad (2)$$

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{p_2 \left[\frac{F_1}{F_2} + 1 \right] - \left[\frac{F_1}{F_2} - 1 \right]}{p_3 \left[\frac{F_1}{F_2} + 1 \right] + \left[\frac{F_1}{F_2} - 1 \right]} \exp(2dp_2), \quad (3)$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{p_3 - p_5}{p_3 + p_5} \exp(-2bp_3), \quad (4)$$

其中,

$$k_1^2 = k_0^2 n_1^2 - \beta^2,$$

$$p_i^2 = \beta^2 - k_0^2 n_i^2 \quad (i = 2, 3, 4, 5),$$

$$k_0 = 2\pi / \lambda,$$

λ 是自由空间的波长, m 是模序数, β 是导模的传播常数, 这里 $\beta = \alpha + i\beta_0$, 是复数。

由(1)式~(4)式构成一复超越方程。利用自适应套孔爬山法, 在 MATLAB^[10] 语言环境下, 获得了此方程的解 β 。在此基础上, 我们建立了仿真保偏光纤偏振器的程序。利用该程序, 可以方便地研究各参数变化时导模的振幅衰减系数或输出的消光比。我们利用 Pentium II/233 计算机计算 1 条曲线时间大约 2 min~3 min(取 50 个点)。

4 仿真结果

4.1 偏振器的理论基础

保偏光纤偏振器的基本理论基础是 TM 模、TE 模的损耗的差异。首先, 用仿真计算说明这个问题。图 4 是在一组参数下, TM 模和 TE 模的振幅衰减系数与坐标 x 的关系曲线。从图中可以看出, α_{TM} 在很大范围内有较大的值, 其最大值达到 10^3 m^{-1} 以上, 而 α_{TE} 的最大值仅为 4 m^{-1} 左右。这表明对 TM 模有很大的衰减, 而对 TE 模损耗很小, 这的确是一种理想 TE 模的偏振器结构。

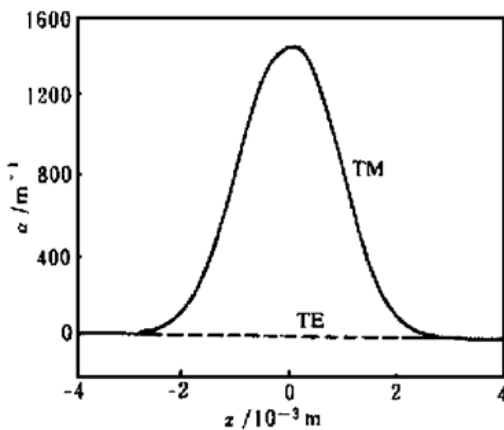


Fig. 4 The curve $\alpha - x$ of fiber polarizer. Real line: the model of TM; Broken line: the model of TE. The parameters illuminate: $n_1 = 1.456, n_2 = 1.446, n_3 = 1.38, n_4 = 1.446, n_5 = 1.2 + 7.0i, a = 5.0 \mu\text{m}, b = 0.1 \mu\text{m}, d = 1.0 \mu\text{m}, M = 0, \lambda = 1.3 \mu\text{m}, R = 1.0 \text{m}, x = -4 \text{mm} \sim 4 \text{mm}$

由上述结果不难看出, 当非偏振光注入该器件到达金属-介质复合膜区时, 会激发起 TM、TE 两种线偏振膜, TM 模通过该器件时会引起较大的损耗, 一定的情况下损失殆尽, 而 TE 模几乎没有损耗。这样, 光通过该器件后就是线偏振光(TE 模)。

4.2 偏振器的模场分布

为了进一步了解它的物理机制, 对 $x = 0$ 处的模场进行了分析。如图 5(a) 所示, TM 模场在磨剩的包层以及金属的表面有强波场传播, 进入金属层以后迅速衰减至零, 这就是所谓的等离子体表面波, 是它在金属表面传播时衰减引起 TM 模的较大损耗。如图 5(b) 所示, TE 模场不能激发等离子体表面波, 这和实验上的结果一致。

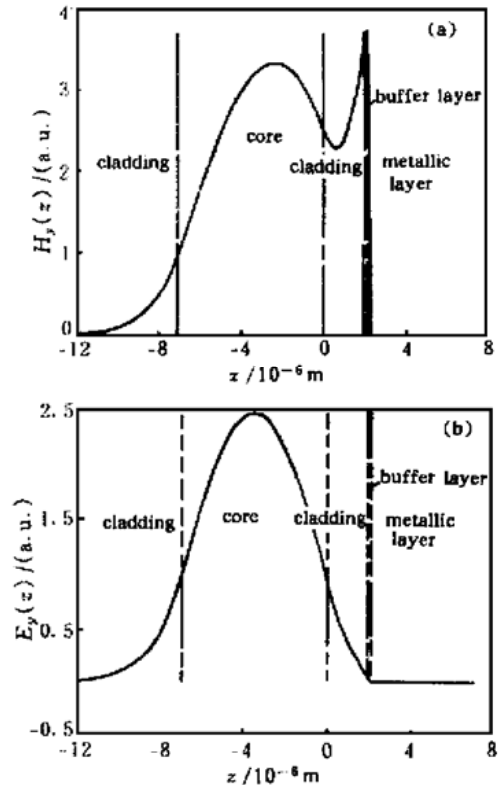


Fig. 5 The field distributing picture of the models TM and TE at $x = 0$ meter. The other parameters are the same as that of Fig. 4. (a) The model TM; (b) The model TE

4.3 偏振器的优化设计

器件的性能主要由多个结构参数来确定。这种确定并不是唯一的, 用不同的参数在一定范围内的组合都可以得到性能良好的器件, 但在不同的组合中, 器件性能对不同参量变化的敏感程度是不同的。对器件结构优化设计的基本原则是:

寻找这样的稳定结构, 在这些结构中, 对那些工艺中最难控制和最不稳定的参量有最大的容差。另一方面, 在器件结构的设计中, 并不寻求其最高的单项指标, 这些有很高单项指标“尖峰”的结构往往是不稳定的。

在该原则下, 用编制的程序寻找最佳参数匹配组合。下面是仿真的振幅衰减在一定的参数下关于缓冲层厚度 n_3 的优化的设计结果。

如图 6 所示, 在一定的参数组合下, 变化 n_3 得

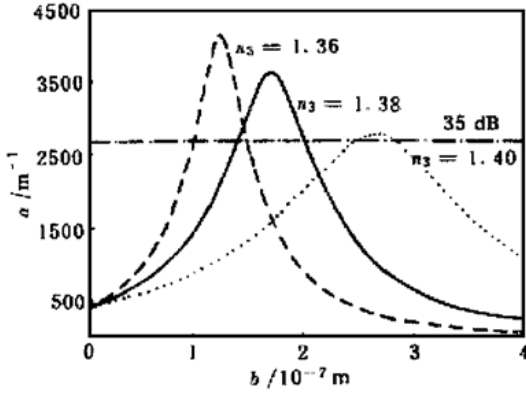


Fig. 6 The optimized choice to n_3 at some parameters

到振幅衰减系数随 b 变化关系曲线。从图中可以看出, $n_3 = 1.36$ 比 $n_3 = 1.38$ 有更高的消光峰值, 但对 35 dB 的指标要求, 当 $n_3 = 1.38$ 时 b 可有更宽的变化范围。特别对于缓冲层 MgF_2 , 其折射率 n_3 可在 1.32~ 1.39 范围内变化, 具体值取决于由镀膜工艺决定的膜层填充密度 P 。当 P 较大时 n_3 较大, 同时 n_3 也较稳定。综合考虑上述因素, 应取 $n_3 = 1.38$, $b = 1.78 \times 10^{-7} m$ 。这样虽然会牺牲一点消光指标, 但器件的稳定性得到了改善。

5 实验结果

5.1 优化设计结果

图 7 给出了一个工作在不稳定结构下的器件的测试结果。0007 号器件在 35 °C~ 38 °C 之间不扰动尾纤的情况下有大于 50 dB 的消光比, 是典型的尖峰不稳定结构, 但在 20 °C~ 40 °C 的范围内受温度的影响极大, 无法正常地使用, 实际上这个器件无任何使用价值。

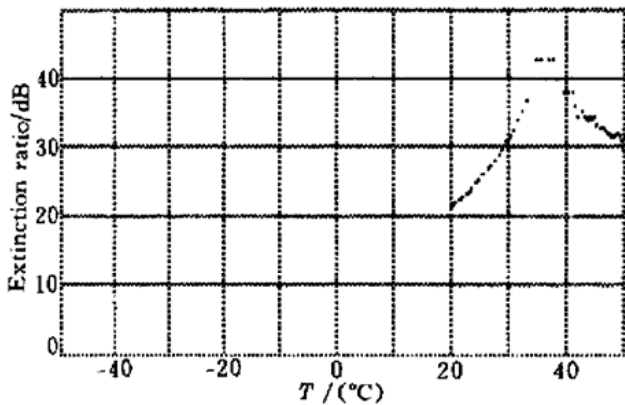


Fig. 7 The test result while the fiber polarizer work at instable point

图 8 给出了一个经优化设计的工作在稳定点器件的测试结果, 从图中可以看出, 0015 号器件性能确有改善。

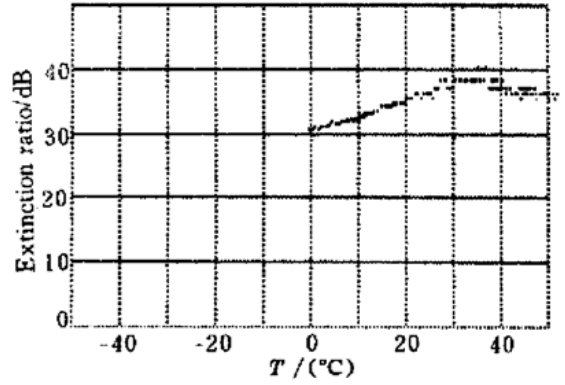


Fig. 8 The test result while the optimized fiber polarizer work at stable point

5.2 器件指标

器件的主要性能指标为: 工作波长 1.3 μm, 最高消光比大于 40 dB, 损耗小于 0.5 dB, 在 -30 °C~ 50 °C 范围内, 器件性能稳定, 器件尺寸为 1.6 mm × 35 mm。现已将该器件应用于光纤水听器 and 光纤陀螺系统中。

结束语 含金属五层平板波导方程是一复超越方程, 对该方程的直接求解采用了数值方法, 设计了自适应套孔爬山法获得了本征方程的解, 得到了导波在偏振区域的模场分布, 清楚地看到了 TM、TE 模在偏振器区域传播的差异, 使我们对保偏光纤偏振器的起偏机制的物理机理有了感性的认识。同时, 利用自适应套孔爬山法和编制的仿真系统获得了各个参数变化对器件性能影响的一系列结果, 在此基础上改进工艺获得了高指标的器件参数指标。

参 考 文 献

- [1] Chang C L. Fiber optic polarizer. *United State Patents* 4795233, 1989, 4: 795, 233
- [2] Todd D A, Robertson G R J, Failes M. Polarization-splitting polished fiber optic couplers. *Opt. Engng.*, 1993, 32(9): 2077~ 2081
- [3] 王子华. 晶体包层型光纤偏振器的理论分析. *光学学报*, 1992, 12(5): 462~ 465
- [4] 王 旭, 黄肇明, 朱红卫. 金属包层型平面光波导的偏振器和在线单模光纤偏振器的理论和实验研究. *红外与毫米波学报*, 1994, 13(3): 235~ 240
- [5] Henry W M, Love J D. Mismatch limitations on metal fiber polarizers. *Opt. & Quantum Electron.*, 1989, 21(1): 205~ 214
- [6] Johnstone W, Stewart G, Hart T *et al.*. Surface plasmon polaritons in thin metal films and their role in fiber optic polarizing devices. *J. Lightwave Technology*, 1990, 8(4): 538~ 543

- [7] 倪明, 胡永明, 陈哲等. 应用自适应套孔爬山法求解多层光波导复本征方程. *光电子激光*, 1999, **10**(5): 411~ 414
- [8] Yamamoto Y, Kamiya T, Yanai H. Characteristics of optical guided modes in multilayer metal clad planar optical guide with low-index dielectric buffer layer. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1975, **QE-11**(9): 729~ 736
- [9] 方俊鑫, 曹庄琪, 杨傅子. 光波导技术物理基础. 上海: 上海交通大学出版社, 1987. 4~ 5
- [10] 张志涌, 刘瑞桢, 杨祖樱. 掌握和精通 MATLAB. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997. 25~ 125

A Model and Analysis of Five-Layer Optical Waveguide of Polarization Maintaining Fiber Polarizer with Metallic Coatings

Ni Ming Hu Yongming Chen Zhe Meng Zhou

(Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

(Received 17 May 1999; revised 1 November 1999)

Abstract: A physical model of five-layer optical waveguide with variation parameters of polarization maintaining fiber (PMF) polarizer with metallic coatings is proposed. A numerical method named adaptive zoom hill climbing method is designed to solve complex transcendental equations of multi-layer optical waveguide. The computing results describe the physical mechanism of PMF polarizer with metallic coatings. Optimum design of device structure is achieved and the results of measurement are given.

Key words: polarization maintaining fiber; fiber optic polarizer; hill climbing method; optical waveguide