

文章编号 : 0258-702X(2002)03-0249-04

# 集成光学 TM/TE 模分离器的研制

黄 晖, 胡鸿璋, 李云娜, 张胜甲

(天津大学理学院应用物理系, 天津 300072)

耿 凡

(航天机电总公司八三五八研究所, 天津 300192)

**提要** 用光束传播方法(BPM)对集成光学无间隙指向耦合器型 TM/TE 模分离器的理论模型进行了仔细的分析, 通过结构参数的优化, 设计了一种模分离器, 理论计算 TM 模和 TE 模分离比优于 40 dB。同时制作了相应的器件, 测试结果表明: TM 模和 TE 模分离比分别达到 28 dB 和 25 dB。

**关键词** 集成光学 模分离器 指向耦合器

中图分类号 TN 256 文献标识码 A

## Integrated Optical TE/TM Polarization Splitter on LiNbO<sub>3</sub> Using Titanium Diffusion

HUANG Hui<sup>1</sup>, HU Hong-zhang<sup>1</sup>, LI Yun-na<sup>1</sup>, ZHANG Sheng-jia<sup>1</sup>, GENG Fan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Applied Physics Department, College of Science, Tianjin University, Tianjin 300072)  
(<sup>2</sup> China Spaceflight Industry Corporation, Head Office 8358 Institute, Tianjin 300192)

**Abstract** A advanced polarization splitter with directional coupler has been proposed for use in integrated optical circuits on LiNbO<sub>3</sub>, and a detailed theoretical analysis has been given. The power splitting ratio of the polarization splitter has been calculated by using 2D-beam propagation method(BPM). In theory, the power splitting ratios of the TM mode and TE mode through the splitter are both above 40 dB. At the same time, some polarization splitters have been actually fabricated. And the power splitting ratios of the TM mode and TE mode are 28 dB and 25 dB, respectively.

**Key words** polarization splitter, integrated optics, directional coupler

## 1 引 言

模分离器是相干光测量和光纤通讯网络中不依赖于偏振的集成光学器件的重要组成部分。模分离器通过分离两偏振独立的模(TE 模和 TM 模), 可以使器件不依赖于外反馈的偏振控制, 集成度高, 是研制集成光学声光可调谐滤波器的关键部件。

模分离器按工作原理可以分成两大类: 第一种是利用在模分离器中传播的波的基模和一阶模的传播常数的不同, 通过模间的干涉来实现非相干 TM/TE 模的分离, 如指向耦合器型和交叉型<sup>[1,2]</sup>; 第二种

模分离器利用分叉波导结构的非对称引起的模传播常数的不同, 使 TM/TE 模在出口端分离, 如 Y 结型模分离器<sup>[3]</sup>。在实际的光通讯应用中, 模分离器为了与其他的光通讯之间的耦合, 需要有固定宽度的光波导和简单对称的结构, 因此, 利用第一种原理的方案, 有更好的应用前景。本文用 BPM<sup>[4]</sup>法设计了一种模分离器。

## 2 原理和设计

模分离器的总体结构图如图 1 所示。它由三部

收稿日期 2000-12-05; 收到修改稿日期 2001-02-19

基金项目 国家自然科学基金项目(批准号:10084001), 该项目同时受到中国科学院半导体所集成光学国家重点实验室的部分资助。

作者简介: 黄晖(1976.4—), 男, 天津大学理学院应用物理系硕士研究生, 研究方向为集成光电子学。E-mail: huhongzh@

分组成:两端的分叉波导结构( I 和 III )和中间的 14  $\mu\text{m}$  宽的双模波导( II )。在  $\text{LiNbO}_3$  基片上的  $\text{Ti}^{3+}$  扩散波导的折射率分布可由下式给出

$$\begin{aligned} \delta n_o(x, y) &= d_o \cdot [F(x, y)] \\ \delta n_e(x, y) &= d_e \cdot E(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

Ti 离子浓度

$$\begin{aligned} \alpha(x, y) &= \frac{C_0}{2} \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{W-2x}{2D_x}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{W+2x}{2D_x}\right) \right] \times \\ &\exp\left(-\frac{y^2}{D_y^2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

上两式的各个参数由文献 [5] 给出。

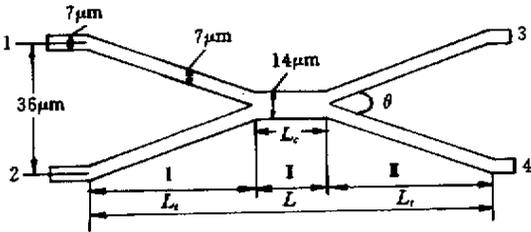


图 1 模分离器结构示意图

Fig.1 Configuration of the polarization splitter

由于 TM/TE 模的相互偏振独立,模分离器的作用原理可以用双模干涉理论来解释:如图 1 所示, TM/TE 模从端口 1 或 2 入射后,进入分叉波导的相互作用区域后,会激起两个模:基模和一阶模,若以模分离器的水平的中心对称线看,可以把它们当作对称模和反对称模。对称模和反对称模是相干的,在整个作用区域传播时,二者会发生相互干涉。当满足下面条件<sup>[6]</sup>

$$\Delta\phi(L) = \phi_{\text{sys}}(L) - \phi_{\text{asy}}(L) = \begin{cases} n\pi & (\text{准 TE 模}) \\ m\pi & (\text{准 TM 模}) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $|n - m| = 2k - 1, k = 1, 2, 3, \dots, \phi_{\text{sys}}, \phi_{\text{asy}}$  表示对称模和反对称模的位相改变。

根据  $n$  是偶数或奇数,TE 模的对称模和反对称模在作用区末端发生相长或相消干涉;同时, TM 模的情况刚好相反,发生相消或相长干涉。这样 TE, TM 模就分别从端口 3 或 4 出射,从而实现模的分离。

对称模和反对称模相互干涉,它们的位相差由模分离器 3 个部分位相差之和组成。在模分离器第 I 部分和第 III 部分的位相差相同,由于对称模和反对称模的传播常数随着径向传导距离而不同,故它们的位相差是一个积分式

$$\Delta\phi(L) = \int_0^{L_i} \beta_s(z) dz - \int_0^{L_i} \beta_a(z) dz \quad (4)$$

当模传导到径向位置  $L_i$  处,模场分布  $\psi(x, y, L_i)$  可以表示成

$$\psi(x, y, L_i) = \sum_{\mu} A_{\mu} \exp(-i\phi_{\mu}) \psi_{0,\mu}(x, y) \quad (5)$$

$\mu = s, a$

式中  $\psi_{0,\mu}(x, y)$  是 14  $\mu\text{m}$  宽波导的归一化对称和反对称场分布,利用其正交归一性

$$\iint_{\Omega} \psi_{0,\mu}(x, y) \psi_{0,\nu}(x, y) dx dy = \delta_{\mu\nu} P \quad (6)$$

计算(5)式的重叠积分,化简可得

$$\begin{aligned} b_{\mu} &= A_{\mu} P \exp(-i\phi_{\mu}) = \\ &\iint_{\Omega} \psi(x, y, L_i) \psi_{0,\mu}(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (7)$$

故对称模和反对称模的位相差可以写成

$$\Delta\phi_i = \phi_{L_i,s} - \phi_{L_i,a} = -\arg b_s + \arg b_a \quad (8)$$

分叉波导的相互作用距离  $L_i$  只与波导的分叉角度  $\theta$  有关,故位相差  $\Delta\phi_i$  与分叉波导的分叉角度  $\theta$  有关。

光波(TM/TE)在模分离器的中间双模波导中传导时,激起的对称模和反对称模的位相差为

$$\Delta\phi_c = \phi_{L_c,s} - \phi_{L_c,a} = (\beta_s - \beta_a)L_c \quad (9)$$

用 BPM 法计算 14  $\mu\text{m}$  宽双模波导的导模(对称模和反对称模)的场分布,然后通过一维快速傅里叶变换可以分别求出 TM/TE 的对称模和反对称模的模传播常数差是  $\Delta\beta_{\text{TE}} = 0.009817, \Delta\beta_{\text{TM}} = 0.0043$ 。

故(3)式可以改写成

$$\Delta\phi(L) = \Delta\beta_c L_c + 2\Delta\phi_i = \begin{cases} n\pi & \text{TE} \\ m\pi & \text{TM} \end{cases} \quad (10)$$

其中  $\Delta\beta_c$  代表  $\Delta\beta_{\text{TE}}$ (对 TE 模)或  $\Delta\beta_{\text{TM}}$ (对 TM 模),代表 TE 模的整数  $n$  和代表 TM 模的整数  $m$  的奇偶性不同,只有当  $n$  代表的曲线和  $m$  代表的曲线有交点时,才能同时满足式(10),实现 TM/TE 模的分离(见图 2)。为了减少模分离器的长度,一般尽量使  $n, m$  的值较小。图 2 显示了根据式(10)解出的  $L_c$  和  $\theta$  的关系,从图中可以看出,当  $n = 3, m = 2$  时,曲线有交点( $\theta = 0.65^\circ, L_c = 580 \mu\text{m}$ ),在这种情况下,TE 模经过模分离器时是叉通的, TM 模是直通的。但在实践中,由于受工艺的限制,我们发现分叉波导如图 1 那样的连接,在模版的制作和溅射时都难以把握,为此我们将模分离器的结构改成图 3 所示,分叉波导通过一宽度渐变的波导与 14  $\mu\text{m}$  宽双模波导相连,用 BPM 法计算这种结构的模分离器,可知这时  $L_c$  和  $\theta$  的关系如图 2 所示,当  $n = 3, m = 2$  时,有交点( $\theta = 0.55^\circ, L_c = 250 \mu\text{m}$ ),故模分离器的具体结构有  $L_c =$

250 μm , θ = 0.55° , h = 2 μm。

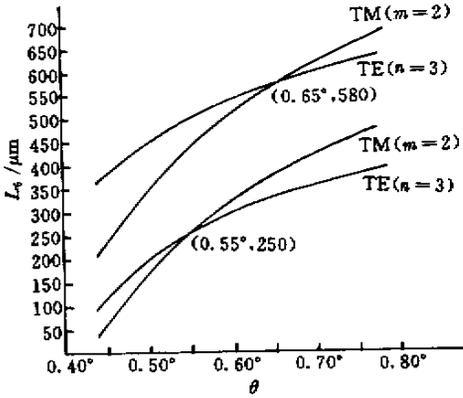


图 2 模分离器中分叉角 θ 与中心波导长度 L<sub>c</sub> 的关系

Fig.2 Relation between the divarication-angle θ and the central segment L<sub>c</sub>

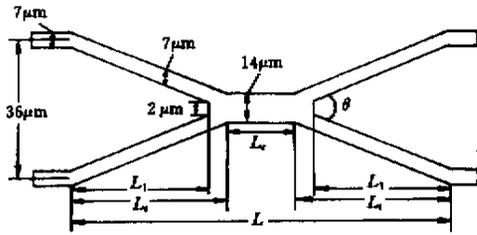


图 3 改进后模分离器的结构示意图

Fig.3 Configuration of the advanced polarization splitter

模分离器的最重要性能指标是模分离比：

$$\eta_{TE} = -10 \lg \frac{P_4}{P_3 + P_4}$$

$$\eta_{TM} = -10 \lg \frac{P_3}{P_3 + P_4} \quad (11)$$

其中 P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub> 分别指出射端口 3 A 的 TE/TM 模的光功率。

在理论设计过程中,为了使器件能够实际应用于 DWDM 通讯系统或器件,如不依赖于偏振的集成光学声光可调谐滤波器,TE 模和 TM 模分离比和它们在模分离器中传导时的透过率随波长的关系也是一个重要的性能指标,经计算得它们之间的关系如图 4 所示。它们随波长的浮动很小。

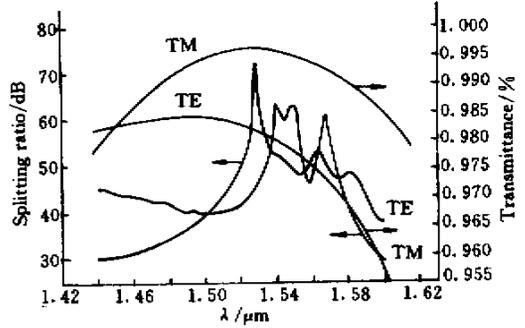


图 4 TM/TE 模在改进后模分离器中的模分离比、透过率与波长的关系

Fig.4 Splitting ratio and transmission of TM/TE mode in advanced splitter versus the wavelength

### 3 器件制作与实验测量

为了验证理论结果,针对 n = 3, m = 2 交点处的角度 θ = 0.55°, 选用一系列不同双模波导长度 L<sub>c</sub> (210 ~ 300 μm) 制作多个模分离器并测量了它们的模分离特性。模分离器的制作选用 x 切 LiNbO<sub>3</sub> 晶体做基片材料,这种切向的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体抑制 Li<sup>+</sup> 的外扩散的能力强,从而防止了寄生波导的产生。制作过程如下:在经过彻底清洗的 LiNbO<sub>3</sub> 基片上用剥离工艺溅射上若干厚度为 110 nm,形状如图 3 所示的钛膜,然后在 1050℃ 高温中扩散 9 h,最后将两端面抛光,就制成了 TM/TE 模分离器。

测量的实验装置如图 5 所示。波长 0.6328 μm He-Ne 激光用于光路准直;波长 1.523 μm 的线偏振的 He-Ne 激光,通过 1/4 波片后变成圆偏振光,经显微物镜聚焦到单模光纤上,将单模光纤对准模分离器的一个入射端口,从模分离器的一出射端口出来的光用一 Glan 棱镜检偏,转动 Glan 棱镜,分别测量 TM/TE 模的光强,然后移动探测器,用同样的方法测量出另一出射端口的 TM/TE 模光强。实际上测得模分离器的 TM/TE 模分离比如图 6 所示,当相干条件(公式(10))不能很好地满足时,模分离的效果就不理想,这很好地验证了理论计算结果。实验

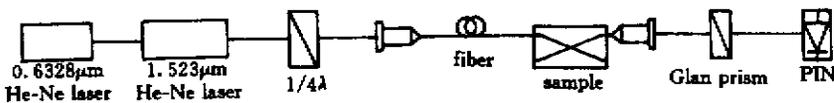


图 5 模分离器的实验测量装置图

Fig.5 Experimental set-up for the measurement of mode-splitting ratio

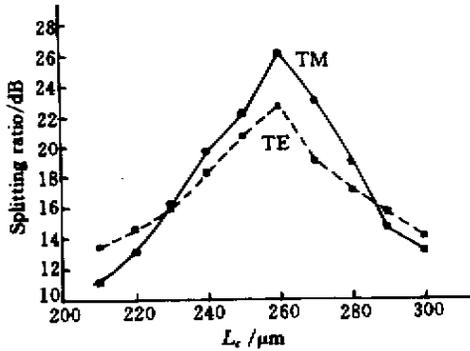


图 6 不同中心波导长度  $L_c$  的模分离器中 TM/TE 模分离比的变化关系

Fig.6 Mode-splitting ratio versus the length of the central segment  $L_c$

测得的模分离器的模分离比比理论计算的值要小 10 dB 以上,这主要是由于测量所用的 PIN 的受光面积较聚焦光斑的面积大,有大量的杂散光被 PIN 吸收,从而大大增加了不通光的出射端口出射的弱光强度,很大程度上降低了测量时模分离器的模分离比,因此实际器件的模分离性能可能更好一些。

## 参 考 文 献

- 1 Amalia N. Miliou, Ramakant Srivastava, Ramu V. Ramaswamy. A  $1.3 \mu\text{m}$  directional coupler polarization splitter by ion-exchange [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**( 2 ): 220 ~ 225
- 2 He Xihong, Hu Hongzhang, Dai Heyi et al.. Design and fabrication of an optical TE/TM mode splitter using Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguide crossings [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 1997, **A24**( 4 ) 315 ~ 318 ( in Chinese )
- 3 Bing Yuan, Xiaohong Song, Hongzhang Hu. A TE-TM mode splitter on LiNbO<sub>3</sub> using an asymmetric Y-junction with a gap region [ J ]. *Opt. Comm.*, 1994, **107**( 3 A ) 205 ~ 207
- 4 M. D. Feit, J. A. Fleck, Jr.. Calculation of dispersion in graded-index multimode fibers by a propagating-beam method [ J ]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**( 16 ) 2843 ~ 2851
- 5 E. Strake, G. P. Bava, I. Montrosset. Guided mode of Ti:LiNbO<sub>3</sub> channel waveguide: A novel quasi-analytical technique in comparison with the scalar finite-element method [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**( 6 ) 1126 ~ 1135
- 6 L. Bersiner, U. Hempelmann, E. Strake. Numerical analysis of passive integrated-optical polarization splitters: comparison of finite-element method and beam-propagation method results [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**( 2 ) 422 ~ 433

## 敬 告 作 者

根据“中国学术期刊(光盘版)”和“美国工程信息公司(EI)数据库”的要求,本刊从 2002 年第一期起对刊登的论文增加下列内容:

1. 论文第一作者简介(30~50 字)。可按以下顺序列出:姓名(出生年月),性别,民族(汉族可省略),籍贯,职称,学位,研究方向。在简介前加“作者简介:”作为标识。
2. 电子信箱
3. 文章参考文献类型标识 [ M ]—专著(书) [ C ]—论文集 [ J ]—期刊文章 [ D ]—学位论文 [ R ]—报告 [ S ]—标准 [ P ]—专利,并置于论文题目后。[参考文献的题目、作者(3 位以上写满 3 位)、年、卷、期、起止页码均须给全并准确]
4. 为便于联系和审稿,英文版稿件请附中文摘要。  
希作者在投稿时提供以上信息,谢谢合作。

《中国激光》编辑部  
二〇〇二年三月