

# 对偏振变动和膜厚变动脱敏的高分子 波导宽带耦合器

周建忠<sup>1</sup> 陈抱雪<sup>1</sup> 贾洪波<sup>1</sup> 赵德欣<sup>2</sup> 袁一方<sup>1</sup> 矾守<sup>3</sup>

(1 上海理工大学光电学院, 上海 200093)

(2 霓塔光电器件上海有限公司, 上海 200233)

(3 日本东京农工大学工学部应用化学系, 日本 184-8588)

**摘 要** 针对高分子光波导制造工艺中波导芯厚度的均匀性难以控制, 以及材料较大的折射率各向异性引起的偏振态依赖性的实际问题, 提出了采用抗波导芯厚度误差、抗偏振变动的宽带波导耦合器回路结构的解决方案, 并给出了优化设计的理论和方法. 在实测了含氟聚酰亚胺薄膜的色散特性的基础上, 采用该方法做了中心波长为 1550 nm、带宽为 120 nm 的 3 dB 含氟聚酰亚胺波导耦合器设计. 该器件的三维 BPM 仿真运行结果表明, 在上述带宽上, 波导芯厚度变动在 7~8  $\mu\text{m}$  的范围内, 两个正交偏振态均可实现  $(50 \pm 1.0)\%$  功率输出比的良好特性.

**关键词** 光波导; 含氟聚酰亚胺光波导; 抗偏振变动; 抗膜厚变动

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A

## 0 引言

以 1550 nm 为中心波长的密集波分复用 (DWDM) 已成为大容量光通信的关键技术, 在 DWDM 中,  $2 \times 2$  的 3 dB 宽带耦合器是实现分波/合波功能的重要器件<sup>[1]</sup>, 采用石英材料制备这类耦合器的工作已有不少报道<sup>[2]</sup>. 为了降低制造成本, 用高分子材料制作光波导器件受到了越来越多的关注<sup>[3~7]</sup>. 近年来开发的含氟聚酰亚胺材料是一种比较理想的光波导用高分子聚合物<sup>[8,9]</sup>. 但是, 与  $\text{SiO}_2$  玻璃相比, 含氟聚酰亚胺有较大的折射率各向异性, 双折射率的典型值约为 0.008 左右. 由于 3 dB 宽带耦合器对相位差变动极为敏感, 由折射率各向异性引起的偏振态影响构成了器件设计上的重大难题.

含氟聚酰亚胺光波导的制备工艺包括淀积薄膜、缩聚反应、光刻、反应离子蚀刻等技术环节. 薄膜淀积采用旋涂法, 由于旋涂过程中径向各点的线速度不同, 形成的薄膜膜厚沿径向渐薄. 另一方面, 旋涂终止后, 由于表面张力作用, 导致边缘处的薄膜厚度骤增. 实验结果表明波导芯层的膜厚具有中心高、沿径向递减、在边缘处突起的分布特征. 基片边缘膜厚骤增区域在划片时被切去, 对器件不构成直接影响. 问题是密布着器件单元的区域存在  $\sim 1 \mu\text{m}$  的厚度差, 导致不同基本单元的条状波导的厚度不同, 导模的传播常数随之变化, 波导耦合器的

相位失配. 由于干涉型宽带耦合器对相位变动十分敏感, 结果导致器件特性发生变动. 产业上构成的直接问题是同一基板上的器件成品率降低.

为了解决上述两个应用上的实际问题, 本文提出了一种新的方案, 通过对耦合器波导结构参数的优化设计, 利用波导色散同时抵消偏振变动和波导芯厚度变化对耦合器输出特性的影响. 考虑到器件单元尺寸很小, 设计时忽略了器件单元内的厚度变化. 优化设计的器件经三维波束传播法 (BPM) 仿真运行, 结果显示, 该器件在 7~8  $\mu\text{m}$  的波导芯厚度变动范围内、在 120 nm 带宽上、两个正交偏振态均维持了 3 dB 功率耦合比, 输出变动在  $\pm 1.0\%$  以内.

## 1 设计原理

含氟聚酰亚胺光波导宽带耦合器由图 1 所示马赫-泽德干涉型回路构成, 它由两个定向耦合器和一个光路差调整结构组成. 两个定向耦合器的平行段的长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ . 由于在靠近平行段两端的弯曲部分发生光波的耦合, 用某个等效耦合长度增量  $L_c$  来反映这个效应.  $\Delta L$  是上下两支波导的长度

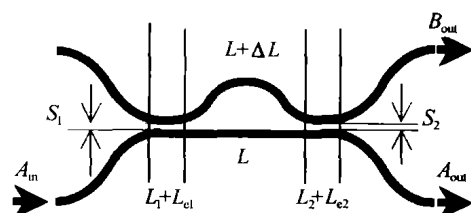


图 1 马赫-泽德干涉型波导耦合器结构

Fig. 1 The construction of the Mach-Zehnder interferometer type waveguide coupler

差,  $S_1$  和  $S_2$  分别是两个定向耦合器的平行段波导的间隔. 设上下两支波导均为单模波导, 具有相同的折射率, 波导芯的截面宽度为  $w$ , 厚度为  $t$ . 用  $A_{in}$  代表入射光振幅,  $A_{out}$  和  $B_{out}$  分别代表两个输出端的出射光振幅. 则输出的功率耦合比  $\eta$  可表示成

$$\eta = \frac{|B_{out}|^2}{|A_{out}|^2 + |B_{out}|^2} = a^2 + b^2 + 2ab \cos(\beta \Delta L) \quad (1a)$$

$$a = \cos \left[ \frac{\pi}{2L_{c1}}(L_1 + L_{e1}) \right] \sin \left[ \frac{\pi}{2L_{c2}}(L_2 + L_{e2}) \right] \quad (1b)$$

$$b = \sin \left[ \frac{\pi}{2L_{c1}}(L_1 + L_{e1}) \right] \cos \left[ \frac{\pi}{2L_{c2}}(L_2 + L_{e2}) \right] \quad (1c)$$

式中,  $\beta$  为传播常数,  $L_{c1}$  和  $L_{c2}$  分别代表两个定向耦合器的完全耦合长度. 完全耦合长度  $L_c$  与耦合器中的一对本征偶、奇对称模的传播常数  $\beta_e$  和  $\beta_o$  有如下关系<sup>[10]</sup>

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} \quad (2)$$

由于波导色散,  $\beta_e$  和  $\beta_o$  随波长  $\lambda$ 、波导芯折射率  $n_g$ 、周围包层折射率  $n_c$ 、定向耦合器的平行段波导的间隔  $S$ 、以及波导芯截面尺寸  $w$ 、 $t$  的变化而变动, 彼此间的数学关系甚是复杂, 在我们的工作中采用有限差分法求解  $\beta_e$  和  $\beta_o$ . 因此  $L_{c1}$  和  $L_{c2}$  是  $\lambda$ 、 $w$ 、 $t$ 、 $n_g$ 、 $n_c$ 、以及  $S_1$  和  $S_2$  的隐函数

$$L_{ci} = L_{ci}(\lambda, w, t, n_g, n_c, s_i) \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

等效耦合长度增量  $L_e$  由下式得到<sup>[10]</sup>

$$L_e = \frac{2L_c}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\eta_o} \quad (4)$$

式中  $\eta_o$  是单个定向耦合器的输出功率比, 该定向耦合器的平行段长度取  $L_c$ .  $\eta_o$  由三维 BPM 算出. 因此  $L_{e1}$  和  $L_{e2}$  也可用下式表示成  $\lambda$ 、 $w$ 、 $t$ 、 $n_g$ 、 $n_c$ 、以及  $S_1$  和  $S_2$  的隐函数

$$L_{ei} = L_{ei}(\lambda, w, t, n_g, n_c, s_i) \quad (i=1, 2) \quad (5)$$

条波导的传播常数  $\beta$  是  $\lambda$ 、 $w$ 、 $t$ 、 $n_g$  和  $n_c$  的隐函数

$$\beta = \beta(\lambda, w, t, n_g, n_c) \quad (6)$$

求解  $\beta$  的近似方法有数种, 这里采用有限差分法.

单模条波导的本征模是混合模, 可以分解为 TE-like 模  $E_{11}^x$  和 TM-like 模  $E_{11}^y$  两个正交偏振态. 由于含氟聚酰亚胺的折射率各向异性, 一般情况下, 对不同的偏振模呈现不同的折射率. 其色散特性和偏振依赖性可以被表示为

$$n_g = n_g(\lambda, E_{11}^x \text{ or } E_{11}^y \text{ mode}) \quad (7a)$$

$$n_c = n_c(\lambda, E_{11}^x \text{ or } E_{11}^y \text{ mode}) \quad (7b)$$

把式(3)和(5)~(7)的关系代入式(1),  $\eta$  可以看作波导回路的几何参量  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $\Delta L$ 、 $w$ 、 $t$  以及  $L_c$ 、 $L_e$ 、 $n_g$ 、 $n_c$  和  $\beta$  等物理参量有关的波长  $\lambda$  和偏振态  $E_{11}^x$  或  $E_{11}^y$  模的隐函数

$$\eta = \eta(L_i, s_i, \Delta L, w, t; \lambda, E_{11}^x \text{ or } E_{11}^y \text{ mode})$$

$$(i=1, 2) \quad (8)$$

宽带耦合器要求在一定的波长带宽上维持输出功率耦合比  $\eta$  恒定, 一般情况下, 当波导芯厚度  $t$  和光波偏振态发生变动时, 输出特性将随之变动. 作为例子, 图 2 给出了一个含氟聚酰亚胺光波导 3 dB 宽带耦合器的数值结果. 该器件的  $L_1$  和  $L_2$  分别取 1.6252 mm 和 0.3533 mm,  $\Delta L$  为 0.682  $\mu\text{m}$ ,  $S_1$  和  $S_2$  均为 5  $\mu\text{m}$ ,  $w$  取 8  $\mu\text{m}$ . 当芯厚度  $t=8 \mu\text{m}$  时,  $E_{11}^x$  模的输出功率比呈现平坦的波长特性,  $E_{11}^y$  模的输出功率比出现了波长依存性; 当  $t=7 \mu\text{m}$  时, 两个偏振模的  $\eta$  随波长变化发生显著变动.

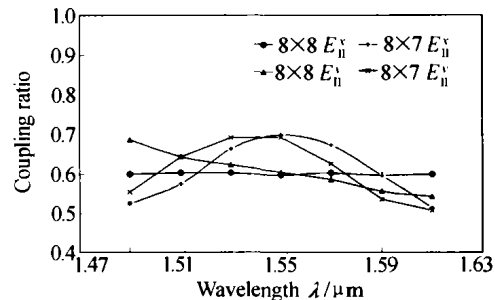


图 2 未经优化的光波导耦合器的数值结果

Fig. 2 The numerical result of 3 dB waveguide coupler without optimizing for polarization-independence and thickness-insensitivity

于是设计目标归结为, 结合含氟聚酰亚胺材料的色散和双折射特性, 利用上述方程给出的关系, 优化设计波导回路的几何参量, 在利用  $\eta$  的波长色散特性实现宽带的 3 dB 耦合的同时, 消除器件对波导芯厚度变动和偏振态的依赖性. 即在优化选定的波导回路参量  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $\Delta L$ 、 $w$  下, 器件输出特性应表现如下的期望功率耦合比

$$\eta(\lambda, t, E_{11}^x \text{ mode}) = \eta(\lambda, t, E_{11}^y \text{ mode}) = 50\%, \quad \lambda \in \lambda_0 \pm \Delta\lambda; t \in [7 \mu\text{m}, 8 \mu\text{m}] \quad (9)$$

式中,  $\lambda_0$  是中心波长,  $2\Delta\lambda$  是带宽. 由于涉及器件特性的参量太多, 彼此间的数学关系又十分复杂, 为了实现上述设计目标, 我们采用了统计优化的方法. 设字母  $Q$  代表设计追求的目标功率耦合比, 字母  $D$  表示  $\eta$  和  $Q$  的差

$$D_{imn} = \eta_{imn} - Q, (i=1, 2; m=1, 2, \dots; n=1, 2, \dots) \quad (10)$$

式中, 下标  $i=1, 2$  分别代表  $E_{11}^x$  模和  $E_{11}^y$  模,  $m$  代表不同膜厚的取样值,  $n$  代表一系列波长的取样值.

定义如下评价函数  $\delta$  来统计反映在所考虑的波长带域和膜厚的范围上、包含两个正交偏振态在内的、器件的输出功率耦合比的设计值与目标值的吻合程度  $\delta = \sum_i \sum_m \sum_n D_{imn}^2, (i=1, 2; m=1, 2, \dots; n=1, 2, \dots)$  (11) 显然,  $\delta$  愈小, 器件的带宽特性、偏振特性以及不依赖膜厚变动的特性愈好. 由于  $\eta$  是波长和波导芯厚

度的连续函数,以合理的采样密度在波长带域和膜厚范围上离散抽样可以保障评价函数 $\delta$ 反映问题的实质. $\delta$ 的最小化过程在数学上有很多方法,我们采用了数值扫描结合求解偏微分方程组的方法.

## 2 设计用基本参量

### 2.1 含氟聚酰亚胺光波导参量测试

将六氟丙烷二酐(6FDA)与二氨基二苯醚(ODA)、2,2'-二(三氟甲基)-4,4'-联苯二胺(TFDB)按等莫尔数配平,在氮气氛围中,与N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)溶媒充分搅拌,得到相应的共聚亚胺酸.在石英基板上,用旋涂法成膜后,经350℃氮气氛围热处理,完成缩聚反应和脱溶媒和脱水,制得含氟聚酰亚胺薄膜光波导.图3给出了用棱镜耦合仪测得的含氟聚酰亚胺中6FDA/TFDB的含量比例与折射率的关系,以及双折射特性.显示出明显的线性特性,波导芯和包层的折射率可以通过调节含氟聚酰亚胺中6FDA/TFDB的含量来精确控制.色散特性用反射波损耗测量仪测量,结果显示在140 nm带宽内基本呈线性色散,折射率波长系数约为 $-0.84 \times 10^{-5}/\text{nm}$ .

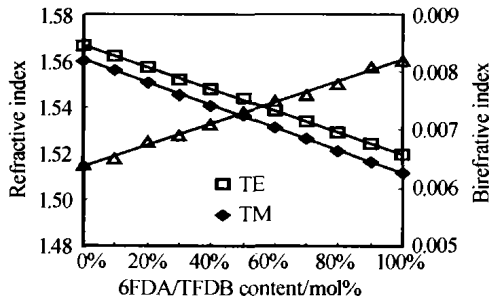


图3 6FDA/TFDB的含量比例与折射率( $n_{TE}$ 和 $n_{TM}$ )及双折射的关系

Fig. 3 The refractive index ( $n_{TE}$  &  $n_{TM}$ ) and birefringent index depend on 6FDA/TFDB content

### 2.2 耦合器基本参量的计算

设计中使用的的基本参量 $L_c$ 和 $L_e$ 由BPM计算获得.导模传播常数 $\beta$ 由BPM的横截面有限差分法算出.以含氟聚酰亚胺的测量结果为数值依据,采用有限差分法计算条波导的传播常数 $\beta$ 和方向性耦合器的偶、奇对称模的传播常数 $\beta_e$ 和 $\beta_o$ ,然后由式(2)得到 $L_c$ .等效耦合长度增量 $L_e$ 由式(4)得到,式中 $\eta_e$ 是平行段长度取 $L_c$ 的单个方向性耦合器的输出功率比,由三维波束传播法(OPTIWAVE-BPM-CAD)算出.该方向性耦合器的几何结构与图1所示波导回路中单个方向性耦合器的完全相同,BPM计算取横向细分宽度 $0.2 \mu\text{m}$ 、纵向步长 $1 \mu\text{m}$ .

## 3 设计和仿真运行结果

考虑到与单模光纤耦合的匹配性,取波导芯的

截面尺寸为 $w = 8 \mu\text{m}$ , $t$ 的变动范围参照实测数据取 $7 \sim 8 \mu\text{m}$ ,相对折射率差 $\Delta = 0.3\%$ ,这里定义 $\Delta = (n_g^2 - n_c^2)/n_g^2$ .该波导在1550 nm波段激励单模.以1550 nm为中心波长,在1490~1610 nm带宽上,以20 nm为间隔离散提取七个波长,取 $7 \mu\text{m}$ 、 $7.5 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 三个芯层厚度,对两个正交偏振态共记42个计算点进行式(11)的最小化数值运算.数学上表现为求解如下微分方程组

$$\frac{\partial \delta}{\partial x_j} = 0; (j = 1, 2, 3) \quad (12a)$$

$$x_1 = L_1, x_2 = L_2, x_3 = \Delta L \quad (12b)$$

求解过程中,参变量 $S_1$ 和 $S_2$ 采用数值扫描赋值.经适当微调整,结果得到与 $\delta$ 值 $0.34 \times 10^{-4}$ 对应的器件几何参量 $L_1$ 、 $L_2$ 和 $\Delta L$ 分别为 $3.1032 \text{ mm}$ 、 $1.1862 \text{ mm}$ 和 $0.391 \mu\text{m}$ , $S_1 = S_2 = 5 \mu\text{m}$ .

为了验证器件的特性,采用三维波束传播法对优化设计的器件做了仿真运行,结果示于图4.在1490 nm至1610 nm的120 nm带宽上,波导芯厚度变动在 $7 \sim 8 \mu\text{m}$ 范围内,两个正交偏振态的功率输出比均在 $(50 \pm 1.0)\%$ 以内,实现了很好的宽带特性和抗偏振变动、抗波导芯厚度变动的性能.

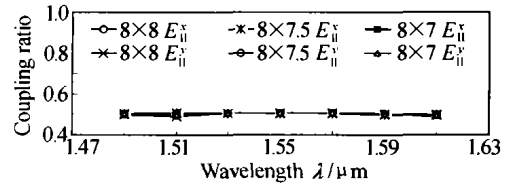


图4 3 dB耦合器的3D-BPM仿真运行结果

Fig. 4 The three-dimensional BPM simulation result of the fluorinated polyimide 3 dB waveguide coupler

## 4 结论

提出了一种适合于宽带光波导耦合器的抗偏振变动、抗波导芯厚度误差的优化设计理论和方法.在实测了含氟聚酰亚胺薄膜的色散特性、双折射率和膜厚分布的基础上,使用该方法,在1490~1610 nm带域上,对含氟聚酰亚胺光波导3 dB耦合器做了优化设计.器件经三维波束传播法模拟运行验证,结果表明,在120 nm带宽上,波导芯层厚度变动在 $7 \sim 8 \mu\text{m}$ 范围内,两个正交偏振态均实现了 $(50 \pm 1.0)\%$ 功率输出比的良好特性.

### 参考文献

- 1 Akihiro T, Kaname J, Masao K. Silica-based waveguide-type wavelength-insensitive couplers (WINC's) with series-tapered coupling structure. *J Lightwave Technol*, 1992, 10(12): 1815~1824
- 2 Takato N, Hanawa F, Okamoto K, et al. Optical couplers using silica-based planar lightwave circuits. *NTT R&D*, 1994, 43(11): 1281~1288

- 3 Kobayashi J, Matsuura T, Sasaki S, *et al.* Single-mode optical waveguides fabricated from fluorinated polyimides. *Appl Opt*, 1998, **47**(9): 943 ~ 948
- 4 Kurokawa T, Takato N, Katayama Y. Polymer optical circuits for multimode optical fiber systems. *Appl Opt*, 1980, **19**(18): 3124 ~ 3129
- 5 Hartman D H, Lalk G R, Howse J W, *et al.* Radiant cured polymer optical waveguides on printed circuit boards for photonic interconnection use. *Appl Opt*, 1989, **28**(1): 40 ~ 47
- 6 Keil N, Yao H H, Zawadzki C, *et al.* 4 × 4 polymer thermo-optic directional coupler switch at 1.55 μm. *Electron Lett*, 1994, **30**(8): 639 ~ 640
- 7 Tohru M, Junya K, Shinji A, *et al.* Heat-resistant flexible-film optical waveguides from fluorinated polyimides. *Appl Opt*, 1999, **38**(6): 966 ~ 971
- 8 Booth B L. Low loss channel waveguides in polymers. *J Lightwave Technol*, 1989, **7**(10): 1445 ~ 1453
- 9 Chen Baoxue, Lu Hongliang, Zhao Dexin, *et al.* Optimized design of temperature-insensitive optical waveguide coupler with 120 nm bandwidth using fluorinated polyimide. *Appl Opt*, 2003, **42**(2): 271 ~ 274
- 10 Chen B X, Yuan Y F, Mamoru Iso. Design of wide wavelength-insensitive coupler using statistical optimum method. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 996 ~ 1000

## Polarization-independent and Thickness-insensitive Broad-band Fluorinated Polyimide Waveguide Coupler

Zhou Jianzhong<sup>1</sup>, Chen Baoxue<sup>1</sup>, Jia Hongbo<sup>1</sup>, Zhao Dexin<sup>2</sup>, Yuan Yifang<sup>1</sup>, Mamoru ISO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

<sup>2</sup> Nitta Shanghai Co., Ltd, Shanghai 200233

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan 184-8588

Received date: 2003-05-21

**Abstract** A statistical optimum design method suitable for polarization-independent and thickness-insensitive for broad-band waveguide coupler is proposed. Using the method, the fluorinated polyimide waveguide 3 dB coupler for 1490 ~ 1610 nm is designed with the optimization of the polarization and thickness fluctuation of the waveguide's core. The design result is verified by the 3D-BPM simulation, and shows coupling ratio of  $(50 \pm 1.0)\%$  in the 120 nm waveband and thickness fluctuation region of 7 ~ 8 μm for the two orthogonal polarizations.

**Keywords** Optical waveguide; Fluorinated polyimide waveguide; Polarization-independent; Thickness-insensitive



**Zhou Jianzhong** male, a native of Jiangsu Province. He is studying in College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology. Main research interests are in the field of optic waveguide.