

紧缩型含氟聚酰亚胺多模干涉波分复用器的 FD-BPM 分析*

禹 忠^{1,2} 韦 玮^{1,2} 侯 洵¹

(1 西安交通大学电子信息工程学院, 西安 710049; 2 复旦大学先进材料研究院, 上海 200433)

摘 要 为了减小波分复用器的器件长度, 在聚酰亚胺材料的基础上, 设计了一种膜态结构的 2×2 多模干涉波分复用器, 并分别用精确导模分析法对其进行模拟分析和优化设计。结果表明, 膜态结构波分复用器可以有效地对 980 nm 和 1 550 nm 光进行解复, 并且器件尺寸只有传统设计的 1/5。器件在器件长度和波长变动中显示出良好的容差性, 并且能够与掺铒放大器与激光器实现集成。其中, 膜态结构 MMI 聚酰亚胺波分复用器的干涉区宽度和长度以及输入宽度对其性能均有影响。

关键词 多模干涉器; 波分复用器; 精确导模分析法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

波分复用器 (WDM) 可实现不同波长或不同模式的光信号和解复。光波分复用器的集成器件目前主要有定向耦合器波分复用器、AWG 波分复用器、波导环形器波分复用器以及 MMI 波分复用器。基于 MMI 结构的波分复用器具有结构简单紧凑、带宽较大、制作容差性好和偏振无敏感性等优点, 深受人们关注。传统的 MMI 光集成器件尺寸比较大, 并且都是利用无机材料制作。本文利用含氟聚酰亚胺材料设计了一种基于膜态结构 MMI 波分复用器。这种波分复用器可以实现 980/1 550 nm 光信号的有效分离, 并且具有尺寸小、制作灵活方便等特点^[1, 2]。

1 理论与结构

2×2 MMI 波分复用器结构如图 1 所示。传统多模干涉波分复用器是根据自映像原理利用一般态进行设计, 即当干涉区的长度满足 $L_M = p(3L_\pi)$ 时, p 为偶数时可以得到正像, p 为奇数时可以得到反像。因此, 同一个端口输入得到两个波长分别为 λ_1 和 λ_2 的输入场, 满足下面条件就可以完全实现波长分离^[3~5]:

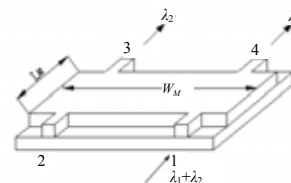
$$L_M = p(3L_\pi^{\lambda_1}) = (p+q)(3L_\pi^{\lambda_2}) \quad (1)$$

其中, p 为自然数, q 为奇数。由于干涉区长度 L_M

比较短时, 有利于实现系统集成, 保持较低的传输损耗, 而且从制造工艺方面来讲可以提高加工冗余。所以为了实现尽可能短的波分复用器的作用, 应使拍长比尽可能小, p 、 q 取尽可能小的值。因此, 令 $q = 1$, 两个波长的拍长比为

$$\frac{L_\pi^{\lambda_1}}{L_\pi^{\lambda_2}} = \frac{p+1}{p} \quad (2)$$

为了使 p 尽量的小, 必须增大干涉区宽度 W_M , 从而实现波长有效分离^[3~5]。

图 1 2×2 MMI 波分复用器示意图Fig.1 Scheme of 2×2 MMI multiplexer

将 MMI 的干涉区限制在支持 4~5 个模式时, 忽略高阶模的影响, 干涉区能量可以表示为^[6]

$$I = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0}{\mu_0} n_{\text{eff}} \int \Psi^2(x, y) dx = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0}{\mu_0} n_{\text{eff}} \int \left(\sum_v c_v \psi_v(y) \exp \left[j \frac{v(v+2)\pi}{3L_\pi} L \right] \right)^2 dx \quad (3)$$

当干涉区长度 $L = aL_\pi$ 时, 上式中积分项的实数

收稿日期 2005-01-16; 修改稿日期 2005-02-26

作者简介 禹忠 (1973-), 男, 博士, 主要研究方向为聚合物光波导及放大器基础研究。通讯作者 侯洵 (1936-), 男, 中国科学院院士, 教授, 主要从事光电发射材料及快速光电器件的研究。E-mail: houxun@opt.ac.cn

*国家自然科学基金 (59983001) 项目资助

项为

$$\sum_{v=0}^3 c_v^2 \psi_v^2 + (-1)^n \times 2[c_0 c_3 \psi_0 \psi_3 \cos(5\alpha\pi) + c_1 c_2 \psi_1 \psi_2 \cos(\frac{5}{3}\alpha\pi) + c_0 c_1 \psi_0 \psi_1 \cos(\alpha\pi) + c_2 c_3 \psi_2 \psi_3 \cos(\frac{7}{3}\alpha\pi)] + 2[c_0 c_2 \psi_0 \psi_2 \cos(\frac{8}{3}\alpha\pi) + c_1 c_3 \psi_1 \psi_3 \cos(4\alpha\pi)] \quad (4)$$

当 $\alpha = 3n$ 时, 实数项为

$$\sum_{v=0}^3 c_v^2 \psi_v^2 + (-1)^n \times 2[c_0 c_3 \psi_0 \psi_3 + c_1 c_2 \psi_1 \psi_2 + c_0 c_1 \psi_0 \psi_1 + c_2 c_3 \psi_2 \psi_3] + 2[c_0 c_2 \psi_0 \psi_2 + c_1 c_3 \psi_1 \psi_3] \quad (5)$$

n 为奇数时, 会出现一般态的正像, n 为偶数时会出现一般态的反演像。

当 $\alpha = 3n \pm 3/5$ 时, 实数项为

$$\sum_{v=0}^3 c_v^2 \psi_v^2 + (-1)^n \times 2[c_0 c_3 \psi_0 \psi_3 + c_1 c_2 \psi_1 \psi_2] + 2\xi[(-1)^n \times c_0 c_1 \psi_0 \psi_1 + c_2 c_3 \psi_2 \psi_3 + c_0 c_2 \psi_0 \psi_2 + c_1 c_3 \psi_1 \psi_3] \quad (6)$$

其中, $\xi = \frac{\sqrt{5}-1}{4}$ 。

如图 2 所示, n 为奇数时, 会在相应一般态正像的前后 $3/5L$ 处出现赝态反演像, 当 n 为偶数时在相应一般态反演像的前后 $3/5L$ 处出现赝态正像。

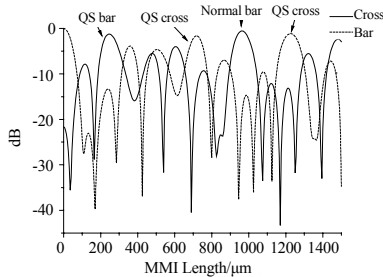


图 2 2×2 MMI 正像和反演像的输出与干涉区长度关系

Fig.2 Image and quasi-state vs. the length of interference in 2×2 MMI

2 器件分析

对于赝态结构波分复用器的设计, 本文采用宽角 FD-BPM 法进行分析研究。

在波导器件的导波层中, 光场 E 满足 Helmholtz 方程

$$\nabla^2 E - k_0^2 n^2 E = 0 \quad (7)$$

式中, k_0 为波数, n 为介质折射率。

场 $E(x, z)$ 表达为 $E(x, z) = E_0(x, z) \exp(-jk_0 z)$,

n_0 为参考折射率, 代入式 (7), 弱导近似下忽略 $\partial^2 \Psi / \partial z^2$ 则有

$$\sigma \frac{\partial E(x, z)}{\partial z} = \frac{\partial^2 E(x, z)}{\partial x^2} + \nu E(x, z) \quad (8)$$

式中, $\sigma = 2jk_0 n_0$, $\nu = k_0^2 (n^2 - n_0^2)$ 。

如果考虑截断误差, 上式中对 E 的二次微分可以表示为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{\delta^2 E}{\Delta x^2} - \frac{1}{12} \frac{\partial^4 E}{\partial x^2} \Delta x^2 + O(\Delta x)^4 \quad (9)$$

其中, $\delta^2 E = 2E_i - E_{i+1} - E_{i-1}$

对于一般的 FD-BPM 都是基于 Crank-Nicolse 差分格式的, 即只存在上式的第一项, 截断误差为 $O(\Delta x)^2$ 。如果要达到较高的精度, 可以使用 Douglas 差分格式, 即必须包含上式第二项, 式 (9) 可以写成以下差分格式:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\delta_x^2}{(\Delta x)^2 (1 + \delta_x^2 / 12)} \quad (10)$$

对式 (8) 采用宽角 FD-BPM, 即用 Padé 傍轴近似。 N 阶 Padé 近似可以将每一步分解为 N 分步, 其中 N 步中第 k 步采用下式表示:

$$E^{m+k/N} = \frac{1 + a_k P}{1 + a_k^* P} E^{m+(k-1)/N} \quad (11)$$

其中, $P = \partial^2 / \partial x^2 + \nu$, m 表示 z 轴上的距离, a_k^* 为 a_k 的共轭, 二者通过求解 N 阶复数方程组得到。

上式可以直接写成下面差分格式:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{2j \text{Im}\{a_k\} P}{(1 + \text{Re}\{a_k\} P \Delta z / N)} E \quad (12)$$

应用 Douglas 差分格式

$$\begin{aligned} & C_{i+1}^{mk/N} E_{i+1}^{m+k/N} + C_i^{mk/N} E_i^{m+k/N} + C_{i-1}^{mk/N} E_{i-1}^{m+k/N} \\ &= C_{i+1}^{m(k-1)/N} E_{i+1}^{m+(k-1)/N} + C_i^{m(k-1)/N} E_i^{m+(k-1)/N} + \\ & C_{i-1}^{m(k-1)/N} E_{i-1}^{m+(k-1)/N} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $C_{i \pm 1}^{m+(k-1)/N} = \frac{1}{12} + \Gamma_k \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{12} \nu_i^{m+1/2} \right)$,

$$C_i^{m+(k-1)/N} = \frac{5}{6} - \Gamma_k \left(\frac{2}{\Delta x^2} - \frac{5}{6} \nu_i^{m+1/2} \right)。$$

式中, 当上标为 $m+(k-1)/N$ 时, $\Gamma_k = a_k$; 上标为 $m+k/N$ 时, $\Gamma_k = a_k^*$ 。

式 (13) 可以用 Thomas 法求解三对角阵, 计

算量和 CN 格式基本相等。

边界条件采用 PML 边界条件,在 PML 边界区域 $(0, L)$ 的坐标复数化

$$x(\rho) = \int_0^L [1 - i\sigma(\rho)]d\rho \quad (14)$$

式中, $\sigma(\rho) = \sigma_{\max}(\rho/L)^2$ 。

$$\sigma_{\max} = -3\varepsilon_0 c_0 n_0^2 \ln(R_0)/2L \quad (15)$$

式中, R_0 为反射系数。

3 结果与讨论

本文的聚酰亚胺光波导材料利用六氟异丙烷二酐(6FDA)与 2,2'-三氟甲基联苯二胺(TFDB)以及六氟异丙烷二胺(6FIPDA)聚合制备。芯层为 6FDA/TFDB,在 980 nm 和 1 550 nm 的折射率分别为 1.569 3 和 1.561 3,包层为 6FDA/6FIPDA 在 980 nm 和 1 550 nm 下分别为 1.525 3 和 1.521 3。如图 1 所示的 MMI 波分复用器,两个不同波长光信号经过干涉区两束光会分别由两个不同输出口输出,实现两个波长光有效分离。其中,MMI 的干涉区宽度 W_M 为 12.7 μm ,输入和输出口宽度分别为 1 μm 。在 980 nm 和 1 550 nm 时,多模干涉器的拍长分别为 1 251 μm 和 932 μm ,拍长比约为 4:3,因此根据赝态设计的多模干涉器设计选择干涉区长度约 1 251 μm 左右。

图 3 所示为输入波长为 980 nm 和 1 550 nm 的光束在不同的输入口中心间距 W_s 下与插入损耗以及串扰关系。当输入口中心间距约为干涉区宽度 W_M 一半时即 6.4 μm ,980 nm 和 1 550 nm 下插入损耗分别为 2.03 dB 和 1.54 dB,达到为最小值。当输入间距偏离 $\pm 1 \mu\text{m}$ 时,插入损耗增加 1 dB。输入波长为 980 nm,当输入间距为 5 μm 和 8.4 μm 时,串扰达到最大值 22.61 dB 和最小值 21.29 dB。当输入波长为 1 550 nm,输入间距为 6.4 μm 时,串扰达到最小值 13.35 dB。因此在 MMI 波分复用器设计和加工中必须合理控制输入间距,以便得到最小的插入损耗和合理的串扰。

图 4 所示为输入波长为 980 nm 和 1 550 nm 的光束在不同的输入口宽度 W_i 下与插入损耗以及串扰关系。当输入口宽度不断增加,输入波长为 980 nm 时,插入损耗呈波浪式增加,串扰不断增加;而输入波长为 1 550 nm 时,插入损耗呈波浪式递

减,串扰不断减小。

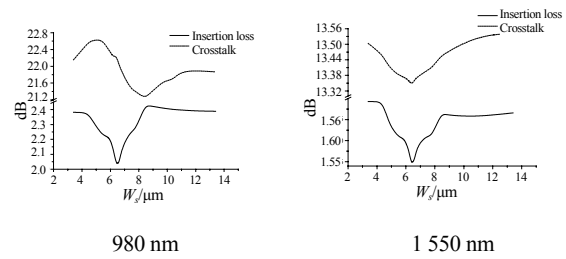


图 3 输入口中心间距和插入损耗以及串扰关系图

Fig.3 Input distance vs. insertion loss and crosstalk

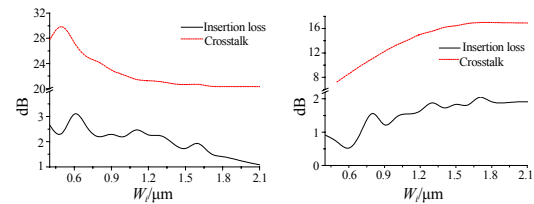


图 4 980 nm 时输入口宽度 W_i 和插入损耗以及串扰关系图

Fig.4 Input width vs. insertion loss and crosstalk

图 5 所示为输入波长为 980 nm 和 1 550 nm 的光束在不同干涉区长度 L_M 和插入损耗以及串扰的关系。由图 5 可知,当耦合宽度为 12.8 μm ,干涉区长度为 1 255 μm ,输入口中心间距为 6.4 μm ,以及输入口宽度为 0.9 μm 时,980 nm 插入损耗和串扰分别为 2.05 dB 和 22.39 dB,1 550 nm 下插入损耗和串扰分别为 1.49 dB 和 13.61 dB。由此看来器件加工过程中干涉区宽度对器件性能影响最大。

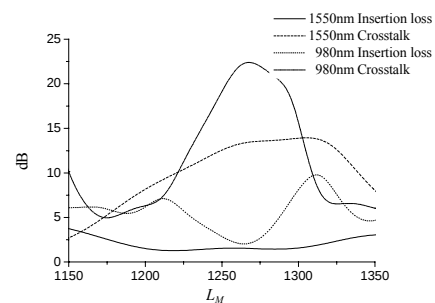


图 5 干涉区长度和串扰以及插入损耗关系

Fig.5 Length of interference vs. insertion loss and crosstalk

图 6 和图 7 分别为耦合宽度为 12.8 μm ,干涉区长度为 1 260 μm ,输入口中心间距为 6.4 μm ,以及输入口宽度为 0.9 μm 时,1 550 nm 和 980 nm 光场利用 FD-BPM 模拟的在基于聚酰亚胺的赝态结构

MMI 波分复用器的传输图。当 $L_M = 1\,255\ \mu\text{m}$ 时, 980 nm 光从波导交叉输出, 而 1 550 nm 光从直通端输出。

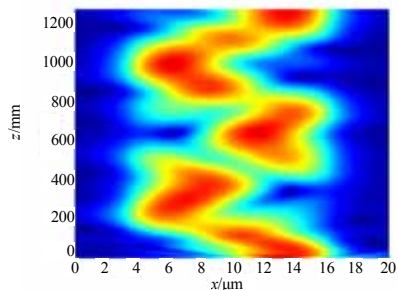


图6 1 550 nm 时光场在赝态结构 MMI 波分复用器中传输图

Fig.6 Propagation of the quasi-state of a 2×2 multi-mode interference multiplexer/demultiplexer on fluorinated polyimide at 1 550 nm

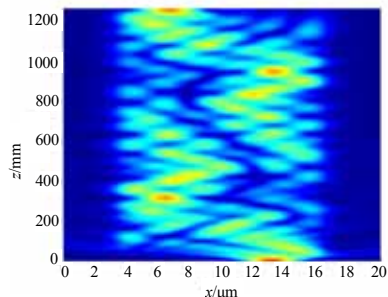


图7 980 nm 时光场在赝态结构 MMI 波分复用器中传输图

Fig.7 Propagation of the quasi-state of a 2×2 multi-mode interference multiplexer/demultiplexer on fluorinated polyimide at 980 nm

4 结 论

本文提出了一种利用含氟聚酰亚胺材料制作

的赝态结构 MMI 波分复用器。经过赝态结构设计的 MMI 波分复用器的尺寸只有传统 MMI 波分复用器的 1/5, 克服了后者尺寸相对较大的缺点, 更适合集成。利用精确导模分析法分别模拟和分析了这种波分复用器的工作原理并优化了各项参数。通过优化设计, 当 MMI 的干涉区宽度为 $12.8\ \mu\text{m}$, 干涉区长度为 $1\,261\ \mu\text{m}$, 980 nm 插入损耗和串扰分别为 2.05 dB 和 22.39 dB, 1550 nm 插入损耗和串扰分别为 1.49 dB 和 13.61 dB, 从而有效地实现 980 nm 和 1 550 nm 光信号的有效解复。因此, 这种波分复用器具有结构更紧凑、工作带宽大、制作容差性好等优点, 并且可以和掺铒波导放大器以及激光器实现集成。

参考文献

- [1] Keil N. Polymer AWG multiplexer resists temperature shifts[J]. Laser Focus World, 2001, 37(8 SUPPL.): 13
- [2] Lee M H, Ju J J, Park S, *et al.* Polymer-based devices for optical communications[J]. ETRI Journal, 2002, 24(4): 259~269
- [3] Wei H Z, Yu J Z, Liu Z L, *et al.* Fabrication of 2 x 2 tapered multimode interference coupler[J]. Electronics Letters, 2000, 36(19): 1618~1619
- [4] Tsao S L, Guo H C, Chen Y J. Design of a 2 x 2 MMI MZI SOI electro-optic switch covering C band and L band[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 33(4): 262~265
- [5] Hill M T, Leitens X J M, Khoe G D, *et al.* Optimizing imbalance and loss in 2 x 2 3-dB multimode interference couplers via access waveguide width[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2305~2313
- [6] Hong J M, Ryu H H, Park S R, *et al.* Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(1): 72~74

Compact Fluorinated Polyimide Multimode Interference for Wavelength-Division-Multiplexing System

YU Zhong^{1,2} WEI Wei^{1,2} HOU Xun¹

(1 School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2 Institute of Advanced Materials, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract To shorten the wavelength-division-multiplexer, a quasi-state is applied to a 2×2 multi-mode interference multiplexer/demultiplexer on fluorinated polyimide. The device is analyzed and optimized by explicated modal propagation analysis. The results show that the device can demultiplex for the 980 nm and 1 550 nm with the 1/5 length of normal designed device. Moreover, the device has high tolerance on the device length and wavelength variation and can be integrated with erbium doped amplifiers and lasers. The capability of device can be affected by the width and length of the interference or the width and distance of the input.

Key words multi-mode interference; wavelength-division multiplexer; explicated modal propagation analysis