

文章编号: 0253-2239(2003)05-0560-05

# 含氟聚酰亚胺光波导 120 nm 宽带耦合器的 抗温度变动设计\*

卢红亮<sup>1</sup> 陈抱雪<sup>1</sup> 赵德欣<sup>2</sup> 矾 守<sup>3</sup> 袁一方<sup>1</sup> 贾洪波<sup>1</sup> 梁东波<sup>1</sup> 龙彩华<sup>1</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:** 提出一种适合于宽带光波导耦合器的抗温度变动的优化设计理论和方法。使用该理论和方法, 在 1490~1610 nm 带域上, 对含氟聚酰亚胺光波导做了宽带光波导 3 dB 耦合器的抗温度变动设计。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, 从零下 10 °C 至零上 40 °C 的温度变动中, 器件实现了  $(0.500 \pm 0.007)$  功率输出比的良好特性。同时报道了含氟聚酰亚胺薄膜波导的制备工艺及其温度特性和色散特性的测试。

**关键词:** 波导光学; 含氟聚酰亚胺光波导; 光波导耦合器; 抗温度变动耦合器; 高分子光波导

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## 1 引 言

以 1550 nm 为中心波长的密集波分复用 (DWDM) 已成为高速大容量光通信的关键技术, 随着列阵波导光栅 (AWG) 技术的发展, 1550 nm 波段的利用带宽已达 80~100 nm。与此相适应, 在用户接入网的信号分路系统中, 对  $2 \times N$  分支耦合器提出了相应的带宽要求。该耦合器由一个  $2 \times 2$  的 3 dB 宽带消波长依存耦合器 (WINC)<sup>[1]</sup> 和两个  $1 \times N$  多路分支耦合器组成<sup>[2]</sup>。由于 3 dB 宽带耦合器的输出特性要求光路差精度达 0.1  $\mu\text{m}$ , 通常采用 Si 基 SiO<sub>2</sub> 光波导或石英基 SiO<sub>2</sub> 光波导结构, 通过平面加工工艺来控制误差。SiO<sub>2</sub> 光波导具有相当好的耐环境特性和长期稳定性, 但制造技术难度大、成本高, 很难满足用户接入网的低成本要求。采用高分子材料制备光波导器件是降低器件成本的有效途径, 这是因为高分子薄膜的制备工艺远比 SiO<sub>2</sub> 的来得容易。

比较典型的光学用高分子材料是聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 已被用于制备塑料光纤<sup>[3]</sup> 和光波导<sup>[4]</sup>。虽然聚甲基丙烯酸甲酯对可见光透明度很

好, 但它的 C-H 键振动对长波长构成了吸收, 不适合 1550 nm 波段。一种改进的高分子材料是氟代聚甲基丙烯酸酯和氘代聚甲基丙烯酸酯的共聚物 (d-PFMA; Deuterated Poly-fluoro Methacrylate), 在 d-PFMA 中大部分的 H 被较重的原子 D 和 F 替代, 构成 C-D 键和 C-F 键, 使得吸收峰发生红移。用 d-PFMA 制备的单模波导的近红外传输损耗可小于 0.1 dB/cm<sup>[5]</sup>。d-PFMA 的问题是玻璃温度很低, 一般只能在低于 100 °C 环境下加工使用。考虑到光波导器件与半导体光源、探测器等同基集成封装时有 280 °C 以上的焊接工艺, d-PFMA 是不合适的。

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, 含氟聚酰亚胺有数种配制方法。实验采用六氟丙烷二酐 (6FDA)、二氨基二苯醚 (ODA) 与 2,2'-二(三氟甲基)-4,4'-联苯二胺 (TFDB) 的反应聚合来制备。含氟聚酰亚胺兼有聚酰亚胺的耐高温特性和掺氟后的近红外吸收小的特点, 解决了上述材料的缺陷。但是, 和所有高分子聚合物一样, 含氟聚酰亚胺具有很大的折射率温度系数, 大约是石英的 20 倍。由于 3 dB 宽带耦合器对相位差变动极为敏感, 含氟聚酰亚胺的温度特性成了器件设计上的重大难题。

为此提出一种解决方案, 给出了设计理论和方法, 通过对耦合器波导结构的优化, 利用波导色散抵消温度对耦合器输出特性的影响。设计的器件经三维波束传播法仿真运行, 结果显示, 该器件在

\* 国家自然科学基金 (60177017)、上海市教委科技发展基金 (2000H12) 资助课题。

E-mail: bxchen@online.sh.cn

收稿日期: 2002-04-05; 收到修改稿日期: 2002-05-20

-10~40 °C 的温度范围内,在 120 nm 带宽上维持了 3 dB 功率耦合比,输出变动为  $\pm 0.7\%$ 。

## 2 设计原理

含氟聚酰亚胺光波导宽带耦合器由图 1 所示的马赫-曾德尔干涉仪型波导回路构成。它由两个方向性耦合器和一个光路差调整结构组成。两个方向性耦合器的平行段的长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ 。由于在

连接平行段两端的弯曲部分也发生光波的耦合,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差, $S_1$  和  $S_2$  分别是两个方向性耦合器的平行段波导的间隔。 $A_{in}$  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。设上下两支波导均为单模波导,具有相同的折射率,波导芯的截面尺寸相同,宽度和厚度分别为  $w$  和  $t$ 。则输出的功率耦合比  $\eta$  可表示成如下形式:

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

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

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

式中, $L_{c1}$  和  $L_{c2}$  分别代表两方向性耦合器的完全耦合长度, $\beta$  为传播常量。

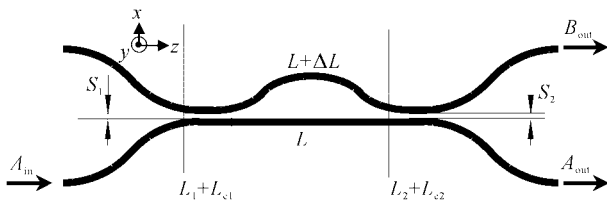


Fig. 1 The construction of Mach-Zehnder interferometer type waveguide coupler used in the design

对于一个物理参量维持不变的光波导方向性耦合器,当使用波长被确定后,其输出端的功率耦合比的变动与两个因素有关,一个是方向性耦合器两输入端的两相干输入光的振幅比例,另一个是两相干输入光之间的位相差。图 1 所示马赫-曾德尔干涉仪型波导回路的第一个方向性耦合器被用于产生两支具有一定振幅比例的相干光,光路差结构被用于调整两支相干光的位相差。再经过第二个方向性耦合器获得期望的输出功率耦合比。由于方向性耦合器的完全耦合长度以及波导导模的传播常量具有随波长变动而变化的色散特性,因此通过对两个方向性耦合器以及其间的光路差结构的各个物理参量的优化设计,可以实现在某个波长范围内彼此间的色散互相抵消。从而在这个波长段,由这三部分结构组成的马赫-曾德尔干涉仪型波导回路的总色散被消除,输出功率耦合比与波长无关,维持恒定。已有报道了采用这种设计方法的  $\text{SiO}_2$  光波导宽带耦合器<sup>[6]</sup>。

然而,如上节所述,高分子聚合物的折射率温度系数的绝对值远大于  $\text{SiO}_2$ ,当环境温度变动时,高分子波导的折射率随之变动。虽然这种变动对波导芯与包层的相对折射率差的影响不大,但对波导的传播常量影响较大。传播常量的变动直接导致了相位差变动,结果使得耦合器的输出功率比随环境温度变动而发生漂移。作为例子,图 2 给出了一个含氟聚酰亚胺光波导宽带耦合器的数值结果,该器件的消色散设计采用了 20 度时的折射率。此温度下, $L_1$ 、 $L_2$  和  $\Delta L$  分别取 1.800 mm、2.752 mm 和 0.782  $\mu\text{m}$  时,输出功率比呈现平坦的波长特性;当温度变动  $\pm 20$  度时,输出功率比出现了波长依存性。为了改善器件的温度特性,优化设计时除了考

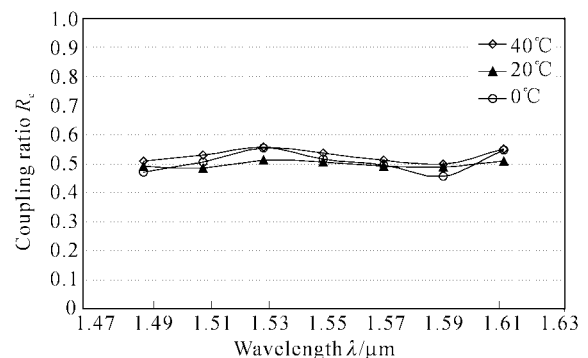


Fig. 2 An example of the numerical calculation for 3 dB waveguide coupler in fluorinated polyimide. In its design, temperature-independence was not considered, and output shows the temperature dependency, when the temperature separates from design temperature 20 °C

考虑消色散以外,还必须同时考虑抗温度变化。其间涉及的函数关系体现在熟知的模方程和方向性耦合器的耦合系数公式中。

设波导芯和周围包层的折射率分别是  $n_g$  和  $n_c$ , 由于波导色散,  $L_{c1}$ 、 $L_{c2}$  和  $L_{e1}$ 、 $L_{e2}$  分别是波长  $\lambda$ 、 $\omega$ 、 $t$ 、 $n_g$ 、 $n_c$ 、以及  $S_1$  和  $S_2$  的函数:

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

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

$\beta$  是  $\lambda$ 、 $\omega$ 、 $t$ 、 $n_g$  和  $n_c$  的函数:

$$\beta = \beta(\lambda, \omega, t, n_g, n_c). \quad (4)$$

含氟聚酰亚胺材料的色散和温度特性被表示成

$$n_g = n_g(\lambda, T), \quad (5)$$

$$n_c = n_c(\lambda, T), \quad (6)$$

式中,  $T$  是环境温度。显然  $\eta$  是  $\lambda$  和  $T$  的函数。以中心波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、中心温度  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  为出发点, 器件设计时要解决的是确定上述参量中的  $\omega$ 、 $t$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $n_g$ 、 $n_c$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  和  $\Delta L$ , 为了实现  $\eta$  对  $\lambda$  和  $T$  的不敏感, 数学上表现为这些参量必须满足(7)式的联立方程:

$$\eta(\lambda, T) = 50\% \pm \delta\eta, \quad (7a)$$

$$|\delta\eta(\lambda, T)|_\lambda = \left| \frac{\partial\eta}{\partial\lambda} \times \delta\lambda \right| < \sigma_\lambda, \quad (7b)$$

$$|\delta\eta(\lambda, T)|_T = \left| \frac{\partial\eta}{\partial T} \times \delta T \right| < \sigma_T, \quad (7c)$$

$$\delta\eta = |\delta\eta(\lambda, T)|_\lambda + |\delta\eta(\lambda, T)|_T. \quad (7d)$$

3 dB 耦合器在实用上要求  $\delta\eta \leq 2.3\%$ <sup>[1]</sup>, 相应的允许变动量  $\sigma_\lambda$  和  $\sigma_T$  将根据  $\delta\eta$  来合理分配。由于待确定的参量多于(7)式给出的方程数, 我们采用在合理范围内对各参量的细分扫描来求解, 现行微型计算机对解析所需的速度和容量已不构成困难。

### 3 设计用基本参量

#### 3.1 含氟聚酰亚胺光波导参量测试

将 6FDA 与 ODA、TFDB 按等摩尔数配平, 在 N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)溶媒中反应聚合, 得到相应的共聚亚胺酸。在石英基板上, 用旋涂法成膜后, 经  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  脱溶媒处理制得含氟聚酰亚胺平面光波导。在精密调温系统中, 用棱镜薄膜耦合技术测量波导的折射率温度特性, 结果如图 3 所示。用最小二乘法线性拟合, 得含氟聚酰亚胺的折射率温度系数约为  $-1.3 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。

将端面研磨抛光后的单模光纤的一端插入共聚亚胺酸中, 经  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  脱溶媒处理制得含氟聚酰亚胺终端。光纤的另一端接入反射波损耗测量仪(惠普

公司 HP81534A), 在  $1550 \text{ nm}$  波长处测量反射波损耗, 由此换算终端处含氟聚酰亚胺的折射率。图 4 给出了含氟聚酰亚胺中  $m(6\text{FDA})/m(\text{TFDB})$  的质量比例与折射率的关系, 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  $m(6\text{FDA})/m(\text{TFDB})$  的质量比来精确控制。扫描  $1550 \text{ nm}$  波带的波长测量相应的折射率, 结果显示在  $140 \text{ nm}$  带宽内基本呈线性色散, 折射率波长系数约为  $-0.84 \times 10^{-5} / \text{nm}$ 。

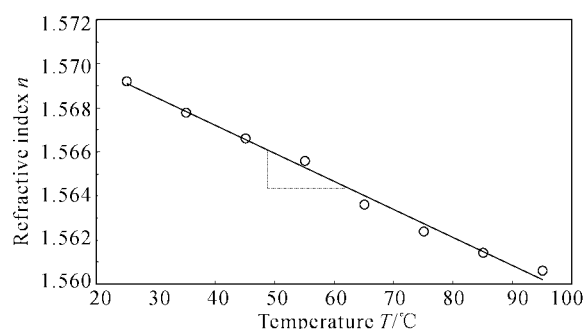


Fig. 3 Dependence of refractive index of the fluorinated polyimide film on temperature determined by the prism coupling method. The linear fitting by the least square method shows index-temperature coefficient is about  $-1.3 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$

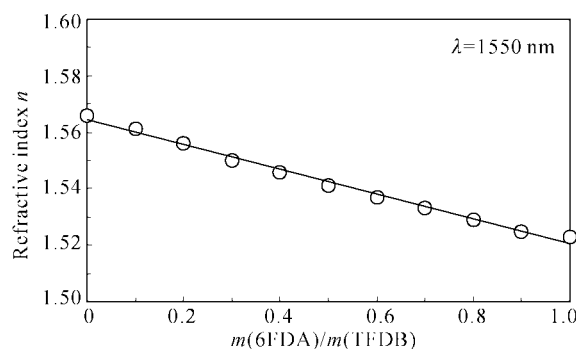


Fig. 4 The refractive index of the fluorinated polyimide determined by the return loss method shows it indirectly depends on content of  $m(6\text{FDA})/m(\text{TFDB})$

#### 3.2 耦合器基本参量的取得

器件设计的最终结果将通过波束传播法的模拟运行来验证, 故优化设计中使用的参量  $\beta$ 、 $L_c$  和  $L_e$  由波束传播法计算获得。导模传播常量  $\beta$  由波束传播法的横截面有限差分法算出。方向性耦合器的完全耦合长度  $L_c$  与耦合器中的一对本征偶、奇对称模的传播常量  $\beta_e$  和  $\beta_o$  有如下关系<sup>[7]</sup>:

$$L_c = \pi / (\beta_e - \beta_o). \quad (8)$$

因而, 由波束传播法求出  $\beta_e$  和  $\beta_o$  后,  $L_c$  就被确定了。

等效耦合长度增量  $L_c$  由下式得到<sup>[6]</sup>

$$L_c = (2L_c/\pi)\cos^{-1}\sqrt{\eta_s}, \quad (9)$$

式中  $\eta_s$  是单个方向性耦合器的输出功率比, 该方向性耦合器的平行段长度取  $L_c$ , 方向性耦合器的几何结构与图 1 所示马赫-曾德尔干涉仪回路中单个方向性耦合器的完全相同。 $\eta_s$  由三维波束传播法算出, 计算取横向细分宽度  $0.2 \mu\text{m}$ 、纵向步长  $1 \mu\text{m}$ 。

#### 4 设计和仿真运行结果

在中心波长  $1550 \text{ nm}$  处和中心温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  下, 求解(7)式。经适当地探索性运算和归纳整理后, 取  $S_1=S_2=5 \mu\text{m}$ 、 $w=t=8 \mu\text{m}$ 、 $\Delta=0.3\%$  时, 对应若有若干个  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $\Delta L$  组合使方程组(7)式得以满足。这里定义  $\Delta=(n_g^2-n_c^2)/2n_g^2$  为相对折射率差。进一步在  $1490\sim 1610 \text{ nm}$  带宽上, 以  $20 \text{ nm}$  为间距离散提取七个波长, 分别在温度  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  上, 对共记 42 个计算点进行如下统计优化处理。设字母  $O$  代表设计追求的目标功率耦合比, 字母  $D$  表示  $\eta$  和  $O$  的差, 用下标  $m$  区别六个不同的温度, 用下标  $n$  区别七个被抽样的波长, 得到

$$D_{nm} = \eta_{nm} - O, \quad m = 1, 2, \dots, 6; n = 1, 2, \dots, 7. \quad (10)$$

定义如下评价函数  $\delta$  来统计反映在所考虑的波长带域和温度范围上, 输出功率耦合比的设计值与目标值的吻合程度:

$$\delta = \sum_m \sum_n D_{nm}^2, \quad m = 1, 2, \dots, 6; n = 1, 2, \dots, 7. \quad (11)$$

Table 1 The numerical result obtained by three-dimensional BPM simulation, of 3 dB waveguide coupler in fluorinated polyimide. It shows that the coupling ratio of  $(0.500 \pm 0.007)$  in 120 nm waveband and temperature region of  $-10\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  is realized

Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	Temperature $T / ^\circ\text{C}$					
	-10	0	10	20	30	40
1.49	0.4992	0.4995	0.4998	0.5001	0.5003	0.5006
1.51	0.5032	0.5034	0.5036	0.5038	0.5040	0.5042
1.53	0.5057	0.5058	0.5059	0.5059	0.5060	0.5061
1.55	0.5066	0.5066	0.5067	0.5067	0.5068	0.5068
1.57	0.5070	0.5066	0.5069	0.5069	0.5068	0.5067
1.59	0.5065	0.5065	0.5065	0.5065	0.5064	0.5064
1.61	0.5061	0.5061	0.5061	0.5061	0.5061	0.5061

**结论** 提出了适合于宽带光波导耦合器的抗温度变动的优化设计理论和方法。报告了含氟聚酰亚胺薄膜波导的制备工艺, 实测了含氟聚酰亚胺薄膜的温度特性和色散特性。在此基础上, 对含氟聚酰亚胺

显然,  $\delta$  愈小, 设计愈趋近目标。

取目标功率耦合比  $O = 0.5$ , 将上述若干个  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $\Delta L$  组合逐次代入(11)式, 经适当地微调整, 结果得到与  $\delta$  值等于  $0.000026$  对应的器件几何参量  $L_1$ 、 $L_2$  和  $\Delta L$  分别为  $0.05600 \text{ mm}$ 、 $1.54047 \text{ mm}$  和  $0.819 \mu\text{m}$ 。为了验证器件的特性, 我们用三维波束传播法进行了仿真运行。使用的仿真软件是加拿大 OPTIWAVE 公司出品的波束传播法计算机辅助设计软件, 仿真运行的截面尺寸为  $440 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ , 分点长度与步长分别为  $0.2 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$ 。仿真结果列于表 1, 相应的特性曲线示于图 5, 在  $1490 \text{ nm}$  至  $1610 \text{ nm}$  的  $120 \text{ nm}$  带宽上, 从零下  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  至零上  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度变动中, 器件的功率输出比均在  $(0.500 \pm 0.007)$  以内, 实现了很好的宽带和抗温度变动特性。

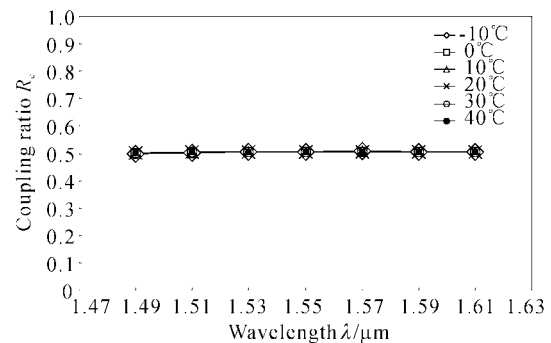


Fig. 5 The simulation result obtained by three-dimensional BPM, of 3 dB waveguide coupler in fluorinated polyimide. It exhibits temperature-insensitive characteristic in the waveband of  $1490\sim 1610 \text{ nm}$

光波导做了中心波长为  $1550 \text{ nm}$ 、带宽为  $120 \text{ nm}$  的  $3 \text{ dB}$  抗温度变动设计。三维波束传播法仿真运行结果表明, 在上述带域内, 从零下  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  至零上  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度变动中, 器件实现了  $(0.500 \pm 0.007)$  功率输

出比的良好特性。

### 参 考 文 献

- 1 Takato N, Hanawa F, Okamoto K *et al.*. Optical couplers using silica-based planar lightwave circuits. *NTT R&D.*, 1994, **43**(11):1281~1288 (in Japanese)
- 2 Kitazawa M, Hasegawa A, Sato E. Passive double star fiber-optic subscriber system. *HITATI HYORONN.*, 1995, **77**(9):15~18 (in Japanese)
- 3 Kaino T, Fujiki M, Oikawa S *et al.*. Low-loss plastic fibers. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(17):2886~2888
- 4 Booth B L. Low loss channel waveguides in polymers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(10):1445~1453
- 5 Imamura S, Yoshimura R, Izawa T. Polymer channel waveguides with low loss at 1.3  $\mu\text{m}$ . *Electron. Lett.*, 1991, **27**(15):1342~1343
- 6 Chen Baoxue, Yuan Yifang, Mamoru Iso. Wide waveband wavelength-insensitive coupler design using statistical optimum method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(8):996~1000 (in Chinese)
- 7 Nishihara H, Haruna M, Suhara T. *Optical Integrated Circuit* (光集成回路). Tokyo, Ohm Co., Ltd., 1993, 9~49 (in Japanese)

## Design of Temperature-Insensitivity for 120 nm Waveband Fluorinated Polyimide Waveguide Coupler

Lu Hongliang<sup>1</sup> Chen Baoxue<sup>1</sup> Zhao Dexin<sup>2</sup> Mamoru Iso<sup>3</sup> Yuan Yifang<sup>1</sup>  
Jia Hongbo<sup>1</sup> Liang Dongbo<sup>1</sup> Long Caihua<sup>1</sup>

1 College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093  
2 Nitta Shanghai Co., Ltd, Shanghai 200233  
3 Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 184-8588, Japan

(Received 25 April 2002; revised 20 May 2002)

**Abstract:** A statistical optimum design method suitable for temperature-insensitive waveguide coupler is proposed. Using the method, 120 nm waveband fluorinated polyimide waveguide 3 dB coupler is designed with the optimization of the temperature fluctuation. The design result is verified by the 3D-BPM simulation, and shows that the coupling ratio of  $(0.500 \pm 0.007)$  in the waveband of 1490~1610 nm and temperature region of  $-10 \sim 40$  °C is realized. The measuring method for refractive index dependence on temperature and for dispersion characteristic of the fluorinated polyimide film is also reported.

**Key words:** waveguiding optics; fluorinated polyimide waveguide; waveguide coupler; temperature-insensitive coupler; polymer waveguide