

文章编号: 0258-7025(2009)01-0134-05

聚合物双环谐振滤波器的研究

孔光明^{1,2} 鄂书林¹ 邓文渊¹ 郭洪波¹ 张大明³ 陈长鸣³

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
² 中国科学院研究生院, 北京 100039
³ 吉林大学电子科学与工程学院集成光电子国家重点联合实验室, 吉林 长春 130023

摘要 设计了一种基于多模干涉(MMI)耦合输入/输出结构的跑道型双微环串联谐振滤波器,并采用紫外光敏聚合物材料 SU-8 作波导芯层,聚合物 CYTOP 为下包层,在硅基底上完成了器件的制备。器件的波导端面尺寸为 $2\ \mu\text{m}\times 1\ \mu\text{m}$,与设计值相符,扫描电镜显示所制备的器件波导侧壁陡直度较高。直波导传输损耗的测试结果表明,在 1550 nm 波长,直波导传输损耗约为 2.0 dB/cm。测试并获得了多模干涉结构和器件的透光及输出光谱图。测试结果表明,MMI 结构在较宽的波长范围内实现了接近 50:50 的功分比,微环谐振滤波器的透光性能良好,实现了滤波功能,器件的自由光谱区 FSR 实际值约为 0.94 nm,与设计参数值很接近。研究结果表明采用聚合物 SU-8 制备小波导尺寸微环谐振器的器件简便可行。

关键词 集成光学;微环谐振滤波器;紫外光刻;SU-8

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093601.0134

Study on Polymer Double-Ring Resonant Filter

Kong Guangming^{1,2} E Shulin¹ Deng Wenyuan¹ Guo Hongbo¹
Zhang Daming³ Chen Changming³

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130023, China

Abstract In this paper, a micro-ring resonant filter(MRRF), consisting of two cascaded coupled racetrack rings and using MMI as input/output coupling structure, was designed and fabricated on the Si substrate by using a UV sensitive polymer material SU-8 as the core material of the waveguide and polymer material CYTOP as the bottom cladding layer. According to the scanning electron microscope (SEM) results, the cross sectional size of waveguide of the device is $2\ \mu\text{m}\times 1\ \mu\text{m}$, which is in accordance with the designed value, the waveguide shows high sidewall quality. The propagation loss of straight optical waveguide is measured to be 2.0 dB/cm at 1550 nm wavelength. The near field optical pattern from the output port of MMI structure and the output spectrum of the MRRF were obtained. The measured results show that the power ratio of the MMI was close to 50:50 in a relatively wide range of wavelengths, and the filtering was realized, the measured free spectral range FSR of device is about 0.94 nm, which is close to the designed value. The study results show that it is simple and feasible for fabricating MRRF with fine waveguide by using SU-8.

Key words Integrated optics; micro-ring resonant filter; UV photolithography; SU-8

1 引 言

微环谐振滤波器(MRRF)已经成为实现密集波分复用(DWDM)技术的关键器件之一,不仅具有优

良的滤波特性,且结构简单、便于制作、易于同其他器件实现大规模的集成^[1~10]。利用聚合物材料制作微环谐振滤波器可降低成本,且许多光电聚合物材料

基金项目: 吉林省科技厅项目(20060521)、应用光学国家重点实验室基金(O6133FQ064)和长春市科技攻关项目(05GG13)资助课题。

作者简介: 孔光明(1983—),男,硕士研究生,主要从事聚合物光波导器方面件的研究。E-mail: konggm@163.com

导师简介: 鄂书林(1963—),女,副研究员,主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: eshulin@sohu.com (通信联系人)

都具有优良的光电特性,如材料损耗低、热光稳定性高、折射率易调整等。采用聚合物制备微环谐振滤波器,可以有效降低成本,灵活满足不同的需要,促进其应用,因此已经成为一个被持续关注的热点^[11]。

近几年,一些具有负性光敏特性的新型聚合物材料引起了人们的格外关注,这类材料直接采用曝光-显影工艺形成图案结构,省掉了常规工艺中的掩膜和反应离子刻蚀等步骤,简化了工艺,有效提高了生产效率,因而倍受关注。SU-8 是其中应用最多的一种,这是一种环氧树脂类的紫外固化型负性聚合物光刻胶,具有良好的力学性能、抗化学腐蚀性和热稳定性,在近紫外光(365~400 nm)范围内具有很高的光学透明性,能够得到具有高深宽比和垂直侧壁的结构。研究表明 SU-8 用作波导材料的光传输损耗也很低,因此将 SU-8 用于制备光波导器件已经开始引起研究人员极大的关注^[12~14]。

与单微环谐振结构相比,串联双微环谐振结构

在串音性能和通带结构方面都有很大的改善^[15];与多微环谐振结构相比,其工艺制作的难度又相对较低。微环与信道波导的耦合处采用多模干涉(MMI)耦合结构来代替传统的方向耦合结构,可以增大制备工艺容差,降低对设备的要求^[16]。本文采用具有负性光敏特性的 SU-8 2002 作为波导芯层材料,设计制作了基于 MMI 输入/输出结构的双环串联微谐振滤波器,测试了 MMI 结构和器件的通光特性,获得了器件的谐振输出特性光谱并分析了器件的滤波和损耗特性。研究结果表明采用聚合物 SU-8 制备小波导尺寸的微环谐振器的器件是简便而且可行的。

2 微环谐振滤波器的设计和制作

2.1 器件结构的设计与优化

器件的结构及参数如图 1 所示,利用传输矩阵法^[17,18],可得到谐振输出光的光强传递函数为:

$$|D|^2 = \left| \frac{jk_1^2 k_2 \exp[-j(\Phi_1 + \Phi_2 + 2\Psi)]}{1 - t_1 t_2 [\exp(-j2\Phi_1) + \exp(-j2\Phi_2)] + t_1^2 \exp[-j2(\Phi_1 + \Phi_2)]} \right|^2, \quad (1)$$

式中 k_1, k_2 分别为微环与信道间、微环与微环间的振幅耦合比, t_1, t_2 为相应的振幅透射比,

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{1}{2}L_r(\beta_r - j\alpha_r), \quad \Psi = L(\beta_s - j\alpha_L),$$

其中 $L_r = L_{\text{MMI}} + 2\pi R$, L_r 为光绕环一周的路径长度, L_{MMI} 为多模干涉耦合器的长度, R 为微环半径, L 为输入/输出信道波导长度。 β_s, β_r 分别为信道波导和微环波导的传播常数, α_r, α_L 分别为微环和信道的损耗系数。

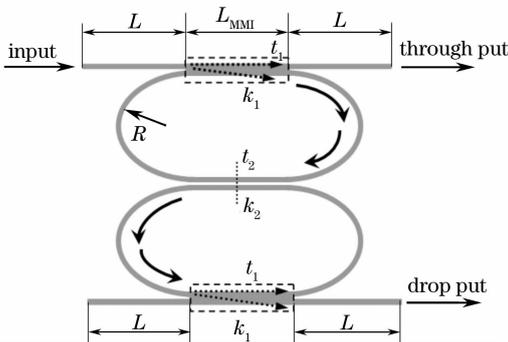


图 1 跑道型双微环谐振滤波器原理图

Fig. 1 Schematic of racetrack double-ring resonant filter

微环谐振滤波器的工作原理可以用谐振方程表示为 $L_r n_c = m\lambda$, n_c 为微环波导模式的有效折射率, λ 为谐振波长, m 为谐振级数。由谐振方程可以得到微环半径和自由光谱区(FSR)的表达式

$$R = \frac{m\lambda}{2\pi n_c}, \quad \text{FSR} = \frac{\lambda n_c}{m m_g},$$

其中 $n_g = n_c - \lambda dn_c/d\lambda$ 为波导的群折射率。

表 1 双环谐振滤波器的优化设计参数

Table 1 Optimized design parameters of double-ring resonant filter

resonant filter	
Central wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	1.550
Refractive index of core layer	1.575
Refractive index of bottom layer	1.34
Refractive index of cladding layer	1.0
Width of waveguide $/\mu\text{m}$	2.0
Depth of waveguide $/\mu\text{m}$	1.0
Radius of micro-ring $/\mu\text{m}$	200.06
Width of MMI structure $/\mu\text{m}$	8.0
Length of MMI structure $/\mu\text{m}$	135.5
Length of the rest parts of the ring except MMI structure $/\mu\text{m}$	1432.5
Resonant series m	880
Gap of coupling waveguides between two rings $/\mu\text{m}$	0.712
FSR $/\text{nm}$	0.912

由于环的半径较大,且波导折射率差较大,在设计时取微环和信道波导的截面尺寸相同,利用光波导模式理论^[19]对波导尺寸进行优化,得到波导的宽度和厚度分别为 $2.0 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 。芯层与下包层分别采用 SU-8 2002 和 CYTOP,二者在 1550 nm

波长的折射率分别为 1.575 和 1.34, 上包层为空气。综合考虑所能允许的工艺条件, 选择谐振级数 $m=880$, 得到微谐振环波导半径为 $200.06 \mu\text{m}$, 自由光谱区约为 0.912 nm , 表 1 给出了跑道型双微环

谐振滤波器的具体优化设计参数。

2.2 器件的制备

根据聚合物 SU-8 的材料特点, 采用的器件制备工艺流程如图 2 所示。

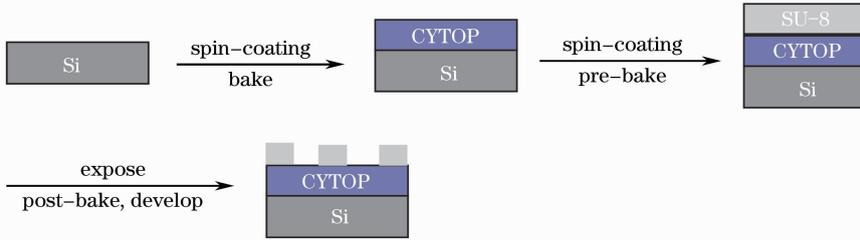


图 2 器件制备工艺流程

Fig. 2 Fabrication process of device

具体的制作工艺过程及参数如下:

1) 在处理好的硅衬底上旋涂厚度为 $2 \mu\text{m}$ 左右的 CYTOP 膜(先在 500 r/min 转速下匀胶 10 s , 接着在 1000 r/min 转速下匀胶 15 s), 然后先在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘焙 30 min , 再升温至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘焙 60 min 。

2) 在 CYTOP 膜表面旋涂 SU-8 2002 (先在 500 r/min 转速下匀胶 10 s , 接着在 6000 r/min 转速下匀胶 20 s), 成膜厚度约为 $1 \mu\text{m}$ 。

3) 前烘。将步骤 2 制备的样品先在 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘焙 10 min , 然后继续在 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘焙 20 min 。

4) 光刻。接触式曝光(I 线 365 nm) 35 s 。

5) 后烘。先在 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘焙 10 min , 然后继续在 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘焙 20 min 。

6) 显影。PGMEA 显影液中显影 40 s 。由于 SU-8 本身是一种负性光刻胶, 所以在光刻过程中被曝光的部分在显影时不溶于显影液而被保留下来, 其余部分被显影液溶解掉, 形成波导图形。显影结束后接着用异丙醇除去余胶并用去离子水清洗器件, 然后用氮气流烘干。

7) 在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘焙 30 min 。目的是增大波导和下包层之间的结合力。

3 实验结果和分析

3.1 直波导与 MMI 结构的测试

图 3 为制备得到的直波导端面扫描电镜 (SEM) 图, 从图中可以看出波导的侧壁很光滑而且陡直度很高。利用截断法^[20]对直波导在 1550 nm 工作波长的传输损耗进行测量, 得到传输损耗约为 2.01 dB/cm 。为减小波导端面的影响, 测试前对波导端面进行了抛光处理。

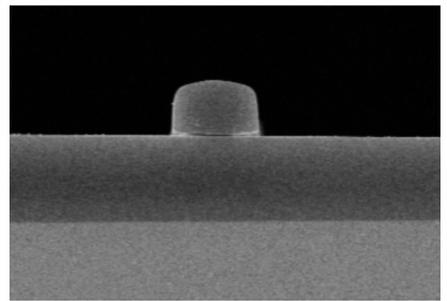


图 3 直波导结构端面图

Fig. 3 Cross-sectional view of a straight waveguide

图 4(a) 为制备得到的多模耦合器型 (MMI) 结构的扫描电镜图, 图中的 MMI 结构的波导图案非常清晰, 结构的尺寸与设计要求的相符, 尤其是输入波



图 4 (a) MMI 结构扫描电镜图, (b) MMI 结构近场输出光斑, (c) MMI 结构两臂输出光功率比值随输入波长的变化关系

Fig. 4 (a) SEM photographs of MMI structure, (b) output near-field patterns of MMI structure, (c) relationship

between power ratio from two arms of MMI structure and input wavelength

导之间间距的控制比较好。其边缘有轻度的不规则,这是由于工艺条件的限制造成的,目前还无法完全消除,这可能会对器件的损耗有一定的影响。利用光纤-波导耦合测试系统对其进行测试:由可调谐激光器发出的信号光经单模光纤耦合进 MMI 结构的一个输入波导中,之后在 MMI 的输出端被分为两束,输出光用 CCD 相机采集,获得的输出光斑如图 4(b)所示。从图中可以看出,两个输出波导所输出光斑的形状大小与强度都比较一致。在 1545~1555 nm 波长范围内对两臂输出光功率比值(功分比)随波长的变化关系进行测试,得到结果如图 4(c)所示,从图中可以看出,所制备的 MMI 结构的功分比随波长的变化较小,两臂的输出光功率偏差也较小,实现了接近 50:50 的功分比。

3.2 器件的测试

图 5 为整个器件的扫描电镜图,从图中可以看出所制备器件的图案比较清晰,样品的均匀性较好,这说明采用 SU-8 聚合物制备小波导尺寸微环谐振器的器件是可行的。

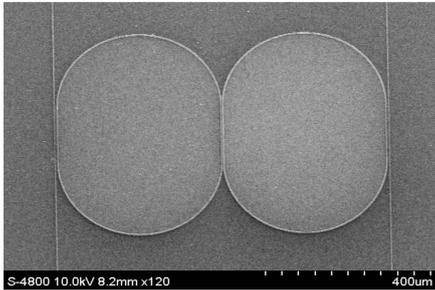


图 5 跑道型双微环谐振滤波器扫描电镜图

Fig. 5 SEM photographs of racetrack double-ring resonant filter

图 6 为 $\lambda=1550.03$ nm 时,器件的直通和下传波导的近场输出光斑。图中右侧的光斑为下传端口输出光,左侧的光斑为直通端口输出光。观察不同输入波长时,两个输出端的输出光斑强度对比的结

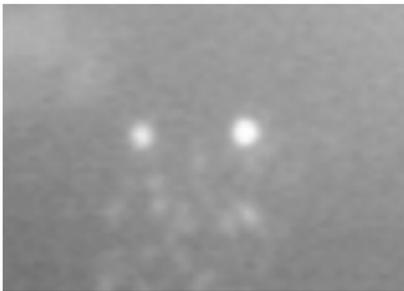


图 6 滤波器输出光斑(入射波长 $\lambda=1550.03$ nm)

Fig. 6 Output near-field patterns of filter (input $\lambda=1550.03$ nm)

果,发现在任何时候两个输出端都有输出光强,只是强度的对比不同,这说明器件的串扰比较严重。造成这种现象的原因,主要可能是器件波导中存在一定程度的多模现象,不同模次的谐振波形成了相互干扰。图 7 为利用 ASE 和光谱分析仪对器件的谐振输出特性光谱进行测试的结果。从图中可以看到器件实现了滤波的功能,其 FSR 约为 0.94 nm,与设计值很接近。器件的插入损耗较大,主要包括光纤与输入/输出波导之间的耦合损耗和器件内部的传输损耗两部分。由图中结果,计算得出器件内部的传输损耗系数 α 约为 10.6 dB/cm,与直波导的损耗相比增加较快。这主要有两个原因,一是微环的弯曲波导与多模干涉直波导之间存在损耗,二是弯曲波导部分的侧壁不光滑造成的辐射损耗,前者可以通过进一步优化设计弯曲波导与直波导结合部分的机构来降低,后者则需要进一步改进工艺条件,使器件的损耗降低,这是下一步工作的重点。

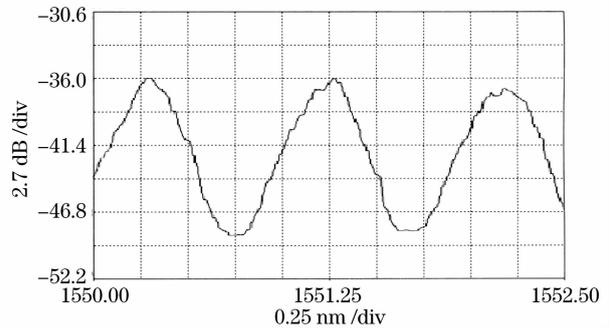


图 7 滤波器输出特性光谱

Fig. 7 Characteristic output spectrum of filter

4 结 论

设计并制备了空气/SU-8/CYTOP 波导结构的全聚合物跑道型双环串联谐振滤波器。扫描电镜结果显示器件的整体形貌良好,器件波导侧壁的陡直度较高。通过截断法测得在 1550 nm 波长,直波导传输损耗约为 2.01 dB/cm。测试了 MMI 结构和器件的通光情况,测试结果表明,MMI 结构在较宽的波长范围实现了接近 50:50 的功分比,器件的传输损耗尽管还比较大,但实现了滤波的功能。下一步需要通过进一步对器件结构进行优化设计,并改进工艺技术,降低器件损耗,提高器件的性能。

参 考 文 献

- Little B, Chu S, Haus H *et al.*. Microring resonator channel dropping filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(8): 998~1005

- 2 Yang Jianyi, Zhou Qingjun, Zhao Feng *et al.*. Characteristics of optical bandpass filters employing series-cascaded double-ring resonators[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(1~3): 91~98
- 3 Little B, Chu S, Absil P *et al.*. Very high-order microring resonator filters for WDM applications [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2263~2265
- 4 M. A. Popovic, T. Barwicz, M. R. Watts *et al.*. Multistage high-order microring resonator add-drop filters[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2571~2573
- 5 Han Xiyou, Pang Fufei, Cai Haiwen *et al.*. Optical waveguide ring resonator filter by using ion-exchanged glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1053~1056
韩秀友, 庞拂飞, 蔡海文等. 一种离子交换制备的玻璃光波导谐振腔滤波器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1053~1056
- 6 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Characteristic analyses of series-coupled multiple-ring resonator filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 207~211
董小伟, 裴丽, 简水生. 集成串联环型谐振光滤波器特性的数值分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 207~211
- 7 Vien Van. Synthesis of elliptic optical filters using mutually coupled microring resonators[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(2): 584~590
- 8 Chun-Sheng Ma, Xian-Yin Wang, De-Lu Li *et al.*. Characteristic analysis of series-cascaded microring resonator arrays[J]. *Optics & Laser Technol.*, 2007, **39**(6): 1183~1188
- 9 Deng Wenyuan, E Shulin, Sun Degui *et al.*. Analysis of a 1×32 polymer micro-ring resonant wavelength de-multi/multiplexer assistant with interleave filter[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(1): 21~25
邓文渊, 鄂书林, 孙德贵等. 基于 Interleave 和微谐振环的 32 信道波分复用器特性[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(1): 21~25
- 10 Li Weibin, Sun Junqiang. Analysis of characteristics of the interleaver based on a double-coupler resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1191~1194
李卫彬, 孙军强. 一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1191~1194
- 11 Payam Rabiei, William H. Steier, Cheng Zhang *et al.*. Polymer micro-ring filters and modulators[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(11): 1968~1975
- 12 Yi Futing, Miao Peng. A new method for fabrication of SU8 structures with a high aspect ratio using a mask-back exposure technique[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2004, **25**(1): 26~29
- 13 Anthony S. Holland, Vishal S. Balkunje. Fabrication of raised and inverted SU8 polymer waveguides[C]. *SPIE*, 2005, **5644**: 353~366
- 14 B. Y. Shew, C. H. Kuo. UV-LIGA interferometer biosensor based on the SU-8 optical waveguide[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, **120**: 383~389
- 15 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Filtering characteristic of series-coupled double-ring optical microresonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1191~1195
杨建义, 江晓清, 王明华. 串联双环光微谐振器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1191~1195
- 16 Sun Yiling, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Multimode interference couplers and their applications in optical communication system[J]. *Study on Optical Communications*, 2004, (2): 67~69
孙一翎, 江晓清, 王明华. 多模干涉耦合器及其在光通信系统中的应用[J]. *光通信研究*, 2004, (2): 67~69
- 17 Yariv A. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguide[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 321~322
- 18 Zhang Xiaobei, Huang Dexiu, Hong Wei *et al.*. Transfer matrix method for analyzing transmission characteristics of microring resonator arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1585~1592
张小贝, 黄德修, 洪伟等. 传输矩阵法分析微环谐振器阵列传输特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1585~1592
- 19 Wang Xianyin. Optimization Design and Characteristic Analysis for Polymer Micro-Ring Resonant Wavelength Multiplexer[D]. Changchun: Jilin University, 2004. 99~101
王现银. 聚合物微环谐振波分复用器的优化设计与特性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2004. 99~101
- 20 Anthony S. Holland, Vishal S. Balkunje. Effects of design geometry on SU-8 polymer waveguides[C]. *SPIE*, 2005, **5649**: 186~194