

聚合物三微环垂直信道谐振插分滤波器的设计

王鹏飞¹, 鄂书林¹, 马春生^{1,2}, 张大明^{1,2}, 邓文渊¹,
王宪银², 孙德贵¹

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, 长春 130031;

² 吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子国家重点实验室, 长春 130023

摘要: 在聚合物波导单微环谐振插分滤波器的基础上, 设计出了基于聚合物宽自由光谱区的三微环波导谐振波分复用器(*TRR, Triple Ring Resonators*), 并利用耦合模理论对所设计的微环谐振插分滤波器件进行了理论计算, 发现自由光谱区间有很大的扩宽($FSR=60\text{nm}$), 并且该三微环插分滤波器件的自由光谱区是构成器件的不同半径两种微环自由光谱区的最小公倍数。同时, 我们对该插分滤波器件的垂直信道与主信道输出 / 输入振幅比率进行了分析。

关键词: 集成光学; 聚合物; 插分滤波器; 耦合模理论; 自由光谱区

Designs for polymer vertical channel triple coupled microring resonators

Add/Drop filter

WANG Pengfei¹, E Shulin¹, MA Chunsheng^{1,2}, ZHANG Daming^{1,2}, DENG Wenyuan¹, WANG Xianyin²,
SUN Degui¹

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese
Academy of Sciences, Changchun 130031, China

² State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin
University, Changchun, 130022, China

Abstract: Based on the design of polymer single ring resonator, we demonstrated a polymer vertical channel triple coupled microring resonators (TRR) Add/Drop filter with a wide free spectral ranger (FSR). The device's FSR was expanded to 60nm by making a mathematical analysis of coupling mode theory. At the same time, we analyzed the transmission equation of the amplitude of input and output lightwaves.

Keywords: Integrated Optics; Polymer; Add/Drop filter; Coupling mode theory; FSR

1. 引言

微环谐振插分滤波器件作为波分复用器应用于光通信领域的波分复用、解复用方面, 其优越的表现已引起了人们的广泛关注。微环谐振插分滤波器是 WDM 通信系统的一个关键部件, 同其他的光—电—光通信转换方式比较, 微环谐振插分滤波器具有成本低、工作效率高等优越性^[1]。作为光通信密集波分复用 (DWDM) 系统的关键器件, 微环谐振插分滤波器可以用作波分复用、解复用, 具有集成度高、波长间隔小、信道数多、串扰低、输出平坦等优点, 在光通信网络中有着广泛的应用^[2]。

聚合物基集成光学器件是近几年发展起来的集成光学器件。它可以沉积在任何衬底上, 并呈现低损耗传播, 还可以通过调节聚合物材料的成份, 使材料达到不同的折射率, 从而满足光波导器件的要求。目前国际上的微环谐振插分滤波器件主要集中在 SiO_2/Si 或 $AlGaAs-GaAs$ 材料上^[3,4,5], 但是这种高质量厚膜波导材料的生长比较困难, 需要的设备复杂, 造成器件价格一直居高不下。因此, 国际上一些研究者开始研究用聚合物材料制作微环谐振插分滤波器件^[6,7]。由于聚合物材料的特性使得 $Polymer/Si$ 微环谐振波分复用器件具有价格便宜、工艺简单、折射率调整容易、透明性好以及偏振不

灵敏等优点，使其在与无机材料的竞争中处于有利地位。目前在日本、美国、德国等一些发达国家都在积极开展聚合物微环谐振插分滤波器件的研究工作，并已取得许多重要进展，一些主要性能指标正逐渐达到无机微环谐振波分复用的水平。

本文将详细介绍一种新型的微环谐振插分滤波器——聚合物三微环垂直信道谐振插分滤波器，如图1所示

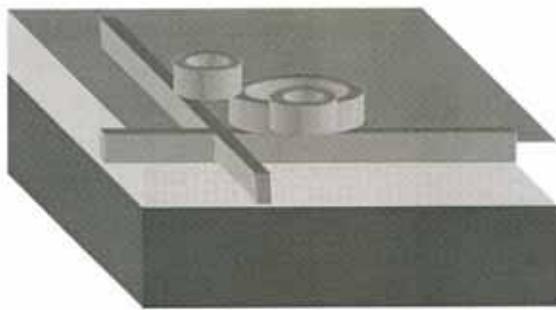


图1 三微环垂直信道谐振插分滤波器

并对其扩展自由光谱区的机理进行了详细的阐述，利用耦合模理论^[8,9,10]对其自由光谱区 *FSR*；谐振级数；垂直信道与主信道输出 / 输入振幅比率等参数进行了分析，并给出信道波导和微环波导有效折射率、微环半径、波导芯厚度等结构参量的优化方法。

2. 理论与设计

在评价微环谐振滤波器的性能优劣过程中，很重要的一个器件性能指标是自由光谱区 *FSR* (*free-spectral-range*)^[11]，

$$FSR = \frac{c}{2\pi n r} \quad (1)$$

式中，*c* 为真空中的光速，*n* 为波导的有效折射率，*r* 为微环的半径。从式中我们可以看出，*FSR* 与 *r* 成反比，在三微环谐振插分滤波器的设计中，我们采用的是一个大微环和两个相同大小的小微环的串联接，故器件中大、小微环的自由光谱区 *FSR* 可表示为

$$FSR_i = \frac{c}{2\pi n r_i} \quad (i=1,2) \quad (2)$$

通常，大、小微环由相互独立的谐振频率，为了使它们有相同的谐振频率，我们可以设置为 $N/r_1 = M/r_2$ ，三微环器件的 *FSR* 我们可以写成

$$FSR = M \cdot FSR_1 = N \cdot FSR_2 \quad (3)$$

M 和 *N* 分别为大、小微环的谐振数，它们之间的关系是互质的，*FSR₁* 和 *FSR₂* 分别是大、小微环的自由光谱区，由(3)式，我们可以看出，*FSR* 是 *FSR₁* 和 *FSR₂* 的最小公倍数。我们对设计器件中的大、小微环的自由光谱区进行了分别计算，结果见图2、3

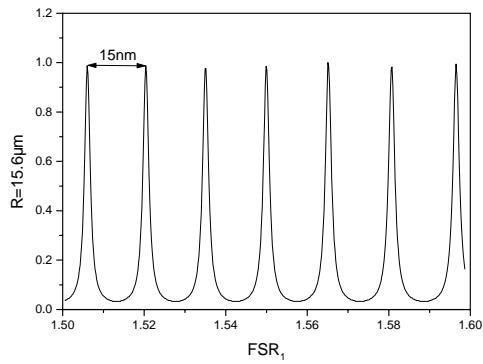


图 2 器件中大微环的自由光谱区 R

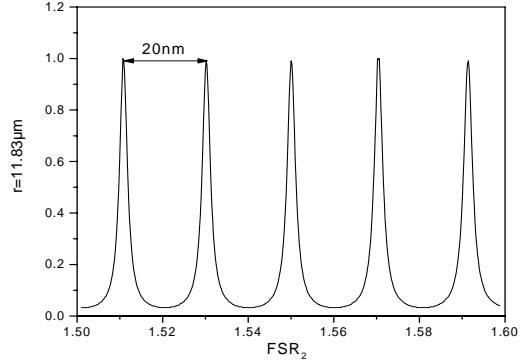


图 3 器件中小微环的自由光谱区 r

由上图可以看出，器件中大微环半径为 $R=15.6\mu\text{m}$ 时，其自由光谱区间 $FSR_1=15\text{nm}$ 谐振级数 $m_1=103$ ；小微环半径为 $r=11.83\mu\text{m}$ 时，其自由光谱区间 $FSR_2=20\text{nm}$ 谐振级数 $m_2=79$ 。计算中我们对于信道波导，其波导芯与四周包层选择两种组分不同的有机聚合物材料，信道波导芯及微环波导的折射率为 $n_1=1.635$ ；信道波导芯四周包层和微环波导芯下包层的折射率为 $n_2=1.465$ ；微环波导芯上包层及左右包层的折射率我们选用空气的折射率 $n_3=1$ ；信道波导和微环波导的芯宽度 $a=2\mu\text{m}$ ；中心波长 $\lambda=1.550918\mu\text{m}$ ；大微环及信道波导芯厚度 $b_1=1.55\mu\text{m}$ ；小微环波导芯厚度 $b_2=1.1\mu\text{m}$

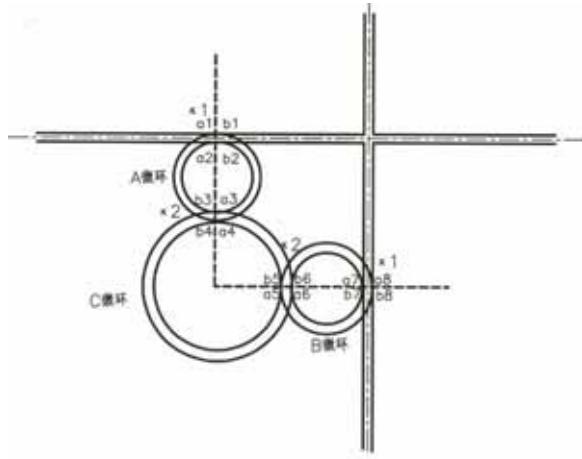
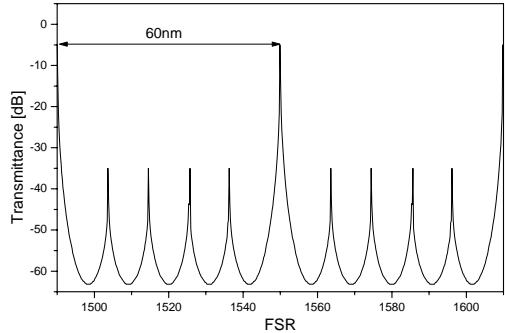


图 4 三微环垂直信道谐振插分滤波器的自由光谱区 图 5 三微环垂直信道谐振插分滤波器结构分析示意图

下面我们对所设计的聚合物三微环垂直信道谐振插分滤波器的垂直信道与主信道输出 / 输入振幅比率进行分析。设 α_L 直信道波导的模式损耗系数; α_R 为 C 微环波导的损耗系数; α_r 为 A、B 微环波导的损耗系数; κ_1 为 A、B 微环波导与直信道波导间的振幅耦合比率; κ_2 为 A、B 微环波导与 C 微环波导间的振幅耦合比率; $t_1 = (1 - \kappa_1^2)^{1/2}$ 为 A、B 微环波导与直信道波导间的透射比率; $t_2 = (1 - \kappa_2^2)^{1/2}$ 为 A、B 微环波导与 C 微环波导间的透射比率。可以写出

$$a_2 = b_3 \exp(-j\phi_1) \quad \phi_1 = \pi r(\beta - j\alpha_r) \quad (4)$$

$$b_1 = t_1 a_1 - j\kappa_1 a_2 = t_1 a_1 - j\kappa_1 b_3 \exp(-j\phi_1) \quad (5)$$

$$b_2 = -j\kappa_1 a_1 + t_1 a_2 = -j\kappa_1 a_1 + t_1 b_3 \exp(-j\phi_1) \quad (6)$$

$$a_3 = b_2 \exp(-j\phi_2) \quad \phi_2 = \pi r(\beta - j\alpha_r) \quad (7)$$

$$a_4 = b_5 \exp(-j\phi_3) \quad \phi_3 = \frac{\pi R(\beta - j\alpha_R)}{2} \quad (8)$$

$$b_3 = t_2 a_3 - j\kappa_2 a_4 = t_2 b_2 \exp(-j\phi_2) - j\kappa_2 b_5 \exp(-j\phi_3) \quad (9)$$

$$b_4 = -j\kappa_2 a_3 + t_2 a_4 = -j\kappa_2 b_2 \exp(-j\phi_2) + t_2 b_5 \exp(-j\phi_3) \quad (10)$$

$$a_5 = b_4 \exp(-j\phi_4) \quad \phi_4 = \frac{3\pi R(\beta - j\alpha_R)}{2} \quad (11)$$

$$a_6 = b_7 \exp(-j\phi_5) \quad \phi_5 = \pi r(\beta - j\alpha_r) \quad (12)$$

$$b_5 = t_2 a_5 - j\kappa_2 a_6 = t_2 b_4 \exp(-j\phi_4) - j\kappa_2 b_7 \exp(-j\phi_5) \quad (13)$$

$$b_6 = -j\kappa_2 a_5 + t_2 a_6 = -j\kappa_2 b_4 \exp(-j\phi_4) + t_2 b_7 \exp(-j\phi_5) \quad (14)$$

$$a_7 = b_6 \exp(-j\phi_2) \quad \phi_2 = \pi r(\beta - j\alpha_r) \quad (15)$$

$$a_8 = 0 \quad (16)$$

$$b_7 = t_1 a_7 - j\kappa_1 a_8 = t_1 b_6 \exp(-j\phi_2) \quad (17)$$

$$b_8 = -j\kappa_1 a_7 = -j\kappa_1 b_6 \exp(-j\phi_2) \quad (18)$$

由上式，我们可以得到输入和输出振幅比率

$$\left| \frac{b_8}{a_1} \right|^2 = \frac{\kappa_1^2 \kappa_2^2 \exp[j2(\phi_1 + \phi_3)]}{\exp[j4(\phi_1 + \phi_3)] - \kappa_2^4 t_1^2 - 2t_1 t_2 \exp(j2\phi_1 + j4\phi_3) + 2\kappa_2^2 t_1 t_2 \exp(j2\phi_1) - t_2^2 \exp(j4\phi_1) + t_1^2 t_2^2 \exp(j4\phi_3) - 2t_1^2 t_2^2 \kappa_2^2 + 2t_1 t_2^3 \exp(j2\phi_1) - t_1^2 t_2^4}$$

3. 结论

设计出了一种新型的一种特殊结构的微环谐振插分滤波器——基于聚合物的三微环垂直信道谐振插分滤波器，并利用耦合模理论对其自由光谱区 *FSR* 进行了计算，发现其自由光谱区相对单微环谐振插分滤波器有很大的扩展。并对垂直信道与主信道输出 / 输入振幅比率进行了分析，对各器件间的耦合系数关系、插入损耗、主信道和垂直信道的输出光谱、输出信道间的串扰等特性的理论分析还在进行中。

Reference

1. Sai T. Chu, Brent E. Little, Wugen Pan, Taro Kaneko, Shinya Sato, Yasuo Kokubun. An eight-channel add-drop filter using vertically coupled microring resonators over a cross grid. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(6): 691-693, 1999
2. Shuichi Suzuki, Yutaka Hatakeyama, Yasuo Kokubun, Sai Tak Chu. Precise control of wavelength channel spacing of microring resonator add-drop filter array. *Journal of Lightwave Technology*, 20(4):745—749, 2002
3. J. V. Hrynewicz, P. P. Absil, B. E. Little, R. A. Wilson, P. T. Ho. Higher Order Filter Response in Coupled Microring Resonators, *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(3): 320-322, 2000
4. Senichi Suzuki, Keizo Shuto, Yoshinori Hibino. Integrated-Optic Ring Resonators with Two Stacked Layers of Silica Waveguide on Si, *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(11): 1256-1258, 1992
5. D. Rafizadeh, J. P. Zhang, S. C. Hagness, A. Taflove, K. A. Stair, S. T. Ho, Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 21.6-nm free spectral range, *Optics Letters*, 22(16): 1244-1246, 1997
6. S.T. Chu, W. Pan, S. Sato, T. Kaneko, B.E. Little, Y. Kokubun, "Wavelength trimming of a microring resonator filter by means of a UV sensitive polymer overlay," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 11(6): 688-690, 1999
7. Chung-Yen Chao, Jay Guo, Biochemical sensors based on polymer microrings with sharp asymmetrical resonance, *Applied Physics Letters*, 83(8): 1527-1529, 2003
8. E. A. J. Marcatili. Bends in optical dielectric guides. *The Bell System Technical Journal*, 2071-2103, 1969
9. D. Marcuse. Bending losses of the asymmetric slab waveguide. *The Bell System Technical Journal*, 50(6): 2551-2563, 1971
10. C. P. Bates. Intermodal coupling at the junction between straight and curved waveguides. *The Bell System Technical Journal*, 2258-2281, 1969
11. Kazuhiro Oda, Norio Takato, Hiromu Toba, A wide-FSR waveguide Double-Ring resonator for optical FDM transmission systems, 9(6): 728-736, 1991

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>