

硅基竖直耦合三环谐振波分复用器的特性*

闫欣¹ 马春生^{1,†} 王现银¹ 徐元哲¹ 鄂书林² 张大明^{1,2}

(1 吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室, 长春 130012)

(2 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 130021)

摘要: 对 $1 \times N$ 信道硅基竖直耦合三环谐振波分复用器的传输特性进行了分析, 给出了光学传递函数的公式. 在中心波长 1550.918nm、波长间隔 1.6nm 的情况下, 对其振幅耦合比率、波谱响应、分光光谱、插入损耗、信道间的串扰进行了数值模拟. 计算结果表明, 该器件具有以下良好性能: 若取小环与信道间的振幅耦合比率为 0.27, 小环与大环间的振幅耦合比率为 0.06, 该器件具有箱形波谱响应, 输出光谱中的次峰值已被抑制到 -25dB, 谐振峰平坦且陡峭, 3dB 带宽约为 0.28nm, 每条输出信道的插入损耗及串扰较小, 插入损耗小于 0.71dB, 串扰可降至 -53dB 以下.

关键词: 波分复用器; 传递函数; 波谱响应; 分光光谱; 插入损耗; 串扰

EEACC: 6260

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)06-1103-06

1 引言

利用多种材料制作的微环谐振器由于结构简单、集成度高、性能优良, 在有源和无源光通信网络中有着重要的应用^[1,2]. 利用微环的谐振功能, 可以制成滤波器^[3]、调制器^[4]、光学传感器^[5]、双环谐振激光器^[6]等. 特别是近年来随着制作工艺水平的提高, 微环谐振器在波分复用方面也有了一定的应用, 国外研制的微环谐振波分复用器已经在实验中呈现出明显的分波功能^[7].

单环谐振波分复用器虽然可以实现波分复用功能, 但是这种器件具有某些不足之处, 例如, 非谐振光较强, 波谱响应为洛伦兹型, 上凸形的谐振峰带宽不够平坦和陡峭, 信道间的串扰偏大, 这在一定程度上影响了器件的波分复用功能^[8]. 与前者相比, 双环谐振波分复用器可以对波分复用功能进行一些改善, 例如, 能够形成箱形波谱响应, 使得谐振峰带宽变得比较平坦陡峭, 并使非谐振光有所减弱, 从而可以在一定程度上减小各输出信道的插入损耗和串扰. 但是双环间的耦合是沿波导宽度方向上进行侧向耦合, 耦合作用较弱, 双环间的耦合间隙较小, 这使得器件的工艺制备遇到较大的困难^[9].

本文所要讨论的硅基竖直耦合三环谐振波分复用器则克服了上述器件的不足之处. 其设计思想是: 采用小环与信道、小环与大环沿波导厚度方向上进

行竖直耦合, 可以增大二者之间的耦合面积, 进而增大二者之间的振幅耦合比率, 从而可使二者之间的耦合层变厚, 这将有利于器件的工艺制备. 通过两个半径较小的微环和一个半径较大的微环的串联, 可以有效地增大自由光谱区 (FSR) 和信道数量, 并能形成箱形波谱响应, 使得谐振峰带宽变得更加平坦陡峭, 非谐振光变得更弱, 从而可以更加有效地减小各输出信道的插入损耗和串扰. 通过参量的优化选择, 这种器件可以实现波长间隔为 1.6nm, 一个 FSR 中含有 8 个谐振波长的 8 信道波分复用功能. 因而这种微环阵列可以成为密集型波分复用的理想器件.

本文对这种器件的传输特性进行了理论分析, 给出了光学传递函数的公式. 在中心波长 1550.918nm、波长间隔 1.6nm 的情况下, 对其振幅耦合比率、波谱响应、分光光谱、插入损耗、信道间的串扰等主要光学特性进行了数值模拟, 并对模拟结果进行了适当的讨论.

2 理论分析

2.1 基本结构与基本功能

图 1 给出了竖直耦合三环谐振波分复用器的结构图、一个分波单元的结构图及其三维立体图, 以及微环和信道的波导芯在 P 点处的横截面图和折射

* 国家自然科学基金(批准号: 60576045)及中国科学院“百人计划”资助项目

† 通信作者. Email: mesheng@163.com

2005-10-12 收到, 2006-01-14 定稿

率分布. 这一器件是由 N 个分波单元构成, 每个分波单元中含有两个半径为 R_{1i} 的较小微环和一个半径为 R_{2i} 的较大微环. 小环横跨在信道和大环之上, 形成了竖直耦合. 两个较小的微环同处于上面的平面内, 而信道和较大的微环同处于下面的平面内, 二

者之间存在一耦合层. 主信道与输出信道之间成 90° 角. $R_{1i} = R_{11} + (i - 1)\Delta R_1$, $R_{2i} = R_{21} + (i - 1)\Delta R_2$, $\Delta R_1, \Delta R_2$ 分别为相邻分波单元中小环、大环的半径差, 并令主信道的长度为 $2L_1 + (N - 1)L_2$, 其中 L_1 和 L_2 已在图 1(a) 中标出.

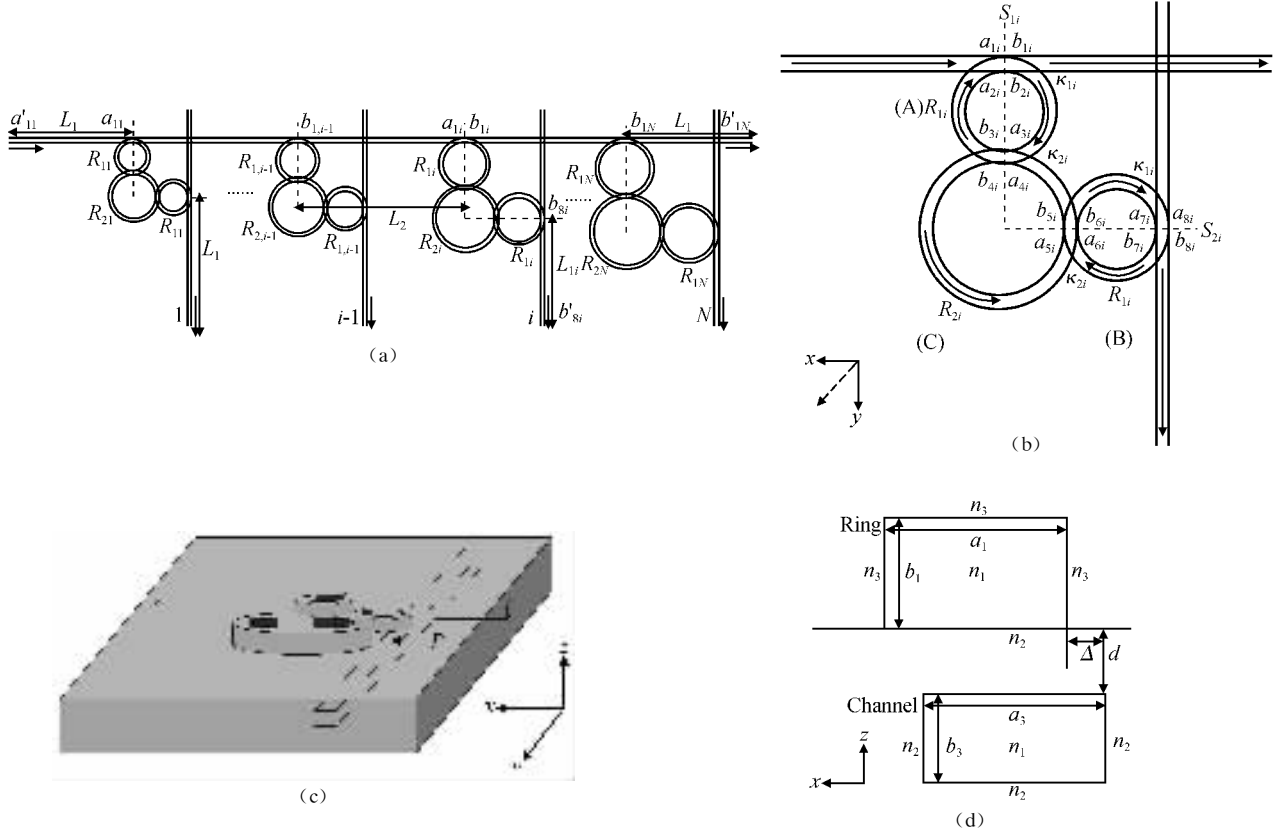


图 1 (a) 竖直耦合三环谐振波分复用器的结构图; (b), (c) 一个分波单元的结构图及其三维立体图; (d) 微环和信道的波导芯在 (c) 中 P 点处的横截面图和折射率分布

Fig.1 (a) Diagram of a vertically-coupled triple microring resonant wavelength multi/demultiplexer; (b), (c) That of a basic filter element and its three-dimensional graph; (d) Cross-sections and refractive index profiles of the channel and ring at point P in (c)

该器件的波分复用工作原理为: 含有不同波长的复信号光从主信道的输入端口输入后, 其中每个波长的光耦合进入各自相应的分波单元中, 因满足各自的谐振条件而引起谐振, 当耦合进入各自相应的输出信道时, 以这一谐振波长的输出光强为最大, 从而完成分波功能. 其逆过程则完成合波功能.

2.2 传递函数

在图 1(b) 所示的第 i 个分波单元中, 令 κ_{1i}, κ_{2i} 分别为上面小环与下面信道间、上面小环与下面大环间的振幅耦合比率, 并有 $t_{1i} = (1 - \kappa_{1i})^{1/2}$, $t_{2i} = (1 - \kappa_{2i})^{1/2}$. 光波通过截面 S_{1i}, S_{2i} 的输入和输出振幅之间有下述关系

$$\begin{cases} b_{ji} = t_{ji}a_{ji} - j\kappa_{ji}a_{j+1,i} \\ b_{j+1,i} = -j\kappa_{ji}a_{ji} + t_{ji}a_{j+1,i} \end{cases}, \quad j = 1, 3, 5, 7 \quad (1)$$

式中 $a_{8i} = 0$; 对于 $j = 1, 7, \kappa_{ji} = \kappa_{1i}, t_{ji} = t_{1i}$; 对于 $j = 3, 5, \kappa_{ji} = \kappa_{2i}, t_{ji} = t_{2i}$. 求解方程组 (1) 可得

$$b_{11} = U_1 a_{11}, \quad b_{81} = V_1 a_{11} \quad (2)$$

$$\begin{cases} b_{1i} = U_i b_{1,i-1} \exp(-j\psi_2) \\ b_{8i} = V_i b_{1,i-1} \exp(-j\psi_2) \end{cases}, \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

式中

$$U_i = t_{1i} - \frac{C_i^{(1)}}{C_i}, \quad V_i = \frac{C_i^{(2)}}{C_i} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_i = & \kappa_{2i}^2 t_{1i} \exp[-j(2\phi_{1i} + \phi_{2i} + \phi_{3i})] \times \\ & \{ t_{2i} [1 - t_{1i} t_{2i} \exp(-j2\phi_{1i})] + \\ & [t_{2i} - t_{1i} \exp(-j2\phi_{1i})] \} + \\ & [1 - t_{1i} t_{2i} \exp(-j2\phi_{1i})]^2 \times \\ & \{ 1 - t_{2i}^2 \exp[-j(\phi_{2i} + \phi_{3i})] \} \end{aligned} \quad (5)$$

$$C_i^{(1)} = \kappa_{1i}^2 t_{2i} \exp(-j2\phi_{1i}) [1 - t_{1i} t_{2i} \exp(-j2\phi_{1i})] \times \{1 - \exp[-j(\phi_{2i} + \phi_{3i})]\} + \kappa_{1i}^2 \kappa_{2i}^2 t_{1i} \exp[-j(4\phi_{1i} + \phi_{2i} + \phi_{3i})] \quad (6)$$

$$C_i^{(2)} = \kappa_{1i}^2 \kappa_{2i}^2 \exp[-j(2\phi_{2i} + \phi_{3i})] \quad (7)$$

此处 $\phi_2 = L_2(\beta_3 - j\alpha_L)$, $\phi_{1i} = \pi R_{1i}(\beta_{1i} - j\alpha_{R_{1i}})$, $\phi_{2i} = \pi R_{2i}(\beta_{2i} - j\alpha_{R_{2i}})/2$, $\phi_{3i} = 3\pi R_{2i}(\beta_{2i} - j\alpha_{R_{2i}})/2$.

对(2),(3)式从 $i = 1$ 到 N 进行递推,并利用振幅间的关系 $a'_{11} = a_{11} \exp(j\psi_1)$, $b'_{1N} = b_{1N} \exp(-j\psi_1)$, $b'_{8i} = b_{8i} \exp(-j\psi_{1i})$, 此处 $\psi_1 = L_1(\beta_3 - j\alpha_L)$, $\psi_{1i} = L_{1i}(\beta_3 - j\alpha_L)$, 则可得到由主信道输入端口至输出端口的光强传递函数 $|B_N|^2$ 和由主信道输入端口至每条输出信道输出端口的光强传递函数 $|D_i|^2$ 分别为

$$|B_N|^2 = \left| \frac{b'_{1N}}{a'_{11}} \right|^2 = \left| \frac{b_{1N} \exp(-j2\psi_1)}{a_{11}} \right|^2 = \left| \left(\prod_{i=1}^N U_i \right) \exp[-j(N-1)\psi_2] \exp(-j2\psi_1) \right|^2 \quad (8)$$

$$|D_i|^2 = \left| \frac{b'_{8i}}{a'_{11}} \right|^2 = \left| \frac{b_{8i} \exp[-j(\psi_{1i} + \psi_1)]}{a_{11}} \right|^2 = \left| \left(\prod_{k=1}^{i-1} U_k \right) V_i \exp[-j(i-1)\psi_2] \exp[-j(\psi_{1i} + \psi_1)] \right|^2 \quad (9)$$

3 计算结果及讨论

3.1 参数优化

为了在器件中实现单模传输并获得良好的传输特性,必须首先对器件的相关参量进行优化.利用文献[8]给出的方法及相应的公式对 1×8 信道硅基 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ ^[10] 竖直耦合三环波分复用器进行参量优化,其结果由表 1 给出.在计算中已考虑了微环的弯曲损耗,因此器件的插入损耗主要是由信道和微环的传输损耗以及微环的弯曲损耗所形成.

表 1 参数优化值

Table 1 Optimized values of parameters

中心波长	$\lambda = 1550.918\text{nm}$
波长间隔	$\Delta\lambda = 1.6\text{nm}$
所有微环和信道的芯折射率	$n_1 = 1.6532$
大环和信道的包层折射率	$n_2 = 1.4508$
小环的包层折射率	$n_3 = 1$
所有微环和信道的芯宽度	$a = 2.0\mu\text{m}$
小环的芯厚度	$b_1 = 1.0\mu\text{m}$
大环和信道的芯厚度	$b_2 = 0.75\mu\text{m}$
中心小环的谐振级数	$m_{14} = 100$
中心大环的谐振级数	$m_{24} = 250$
相邻分波单元中谐振级数差	$\Delta m = 2$
中心小环的谐振半径	$R_{14} = 16.1181\mu\text{m}^1$

续表

中心大环的谐振半径	$R_{24} = 40.2952\mu\text{m}^1$
相邻分波单元中小环半径差	$\Delta R_1 = 0.341\mu\text{m}^1$
相邻分波单元中大环半径差	$\Delta R_2 = 0.369\mu\text{m}^1$
自由光谱区	$\text{FSR} = 27.70\text{nm}$
输出信道数	$N = 8$
长度	$L_1 = 4000\mu\text{m}$
长度	$L_2 = 250\mu\text{m}$
功率传输损耗系数	$2\alpha_p = 0.5\text{dB/cm}$

1) 为理论计算值,其有效数字可根据具体工艺精度而取舍.

3.2 振幅耦合比率

选择合适的耦合层厚度,然后通过调整上面小环和下面信道、上面小环和下面大环在耦合点处沿波导宽度方向上各自的偏离量,即图 1(b)中小环 A 沿 y 方向,小环 B 沿 x 方向,大环 C 沿 x, y 所夹直角的平分线(图中虚线箭头)方向进行调整,可使所有分波单元中的 κ_{1i}, κ_{2i} 的值分别相等.因此在以下的分析中我们假定 $\kappa_1 \equiv \kappa_{1i}, \kappa_2 \equiv \kappa_{2i}$.

在实际情况下,为了获得形状合适的箱形波谱响应,振幅耦合比率 κ_1, κ_2 都要进行适当的选择.当选择适当的耦合层厚度后,即可得到所需要的 κ_1 值,但此时 κ_2 的值也随之而定,但这一值不一定是所需要的.为了得到所需要的 κ_2 的值,可以通过适当选择上面小环和下面大环间的偏离量来达到这一目的.限于篇幅这里略去 κ_1, κ_2 的选择过程,只给出优化结果.我们取耦合层厚度 $d = 0.71\mu\text{m}$, 则有 $\kappa_1 = 0.27$, 此时若进一步选取小环与大环间的偏离量 $\Delta = 0.223\mu\text{m}$ (此值为理论计算值,其有效数字可根据具体工艺精度而取舍),则可得到 $\kappa_2 \approx 0.06$.

3.3 波谱响应

定义每条输出信道的传输光谱为

$$T_i(\lambda)(\text{dB}) = 10\lg(|D_i(\lambda)|^2) \quad (10)$$

图 2 显示了小环与信道间的振幅耦合比率 κ_1 对中心波长附近的谐振峰形状的影响,取 $\kappa_2 = 0.06, \kappa_1 = 0.14, 0.27, 0.40$. 可以看出,当 κ_1 过小时,如 $\kappa_1 = 0.14$, 谐振峰凸凹起伏较大;当 κ_1 过大时,如 $\kappa_1 = 0.40$, 谐振峰不够平坦;当 κ_1 选择适当时,如 $\kappa_1 = 0.27$, 此时谐振峰比较平坦陡峭,呈现箱形波谱响应.

图 3 显示小环与大环间的振幅耦合比率 κ_2 对中心波长附近的谐振峰形状的影响,取 $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.03, 0.06, 0.09$. 可以看出,当 κ_2 过小时,如 $\kappa_2 = 0.03$, 谐振峰不够平坦且峰宽较窄;当 κ_2 过大时,如 $\kappa_2 = 0.09$, 谐振峰虽然较宽但有凸凹起伏;当 κ_2 选择适当时,如 $\kappa_2 = 0.06$, 与之对应的小环与大环间的偏离量 $\Delta = 0.223\mu\text{m}$, 此时谐振峰比较平坦陡峭,呈现箱形波谱响应.因此为了形成箱形波谱响应,在

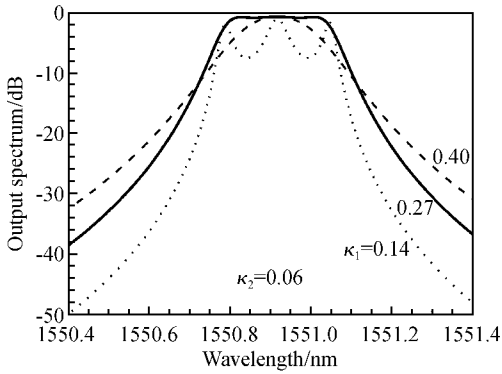


图 2 小环与信道间的振幅耦合比率 κ_1 对中心波长附近的谐振峰形状的影响 $\kappa_2 = 0.06, \kappa_1 = 0.14, 0.27, 0.40$, 其他相关参数见表 1.

Fig.2 Effect of amplitude coupling ratio κ_1 on the output spectrum around the central wavelength $\kappa_2 = 0.06, \kappa_1 = 0.14, 0.27, 0.40$. The values of other parameters are presented in Table 1.

以下的分析中取 $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.06$.

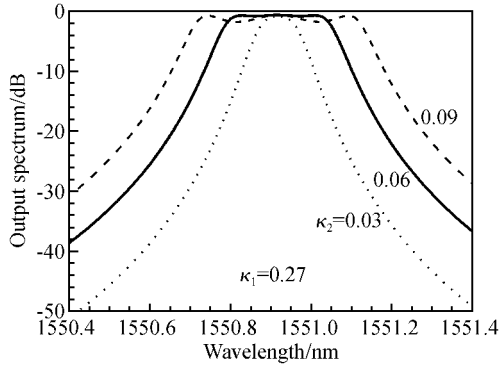


图 3 小环与大环间的振幅耦合比率 κ_2 对中心波长附近的谐振峰形状的影响 $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.03, 0.06, 0.09$, 其他相关参数见表 1.

Fig.3 Effect of amplitude coupling ratio κ_2 on the output spectrum around the central wavelength $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.03, 0.06, 0.09$. The values of other parameters are presented in Table 1.

3.4 FSR

不同半径的微环串联时可以有效地增大 FSR^[11]. 小环的 FSR 约为 13.85nm, 大环的 FSR 约为 5.54nm. 当这两个小环和大环串联时, FSR 扩大到 27.70nm, 因此在这一较宽的 FSR 中可以容纳波长间隔为 1.6nm 的 17 个谐振波长. 但是计算表明, 此时在输出信道的传输光谱中, 对次谐振峰的抑制不够好, 这将引起较大的插入损耗和信道间的串扰. 如果在这一较宽的 FSR 中插入波长间隔为 1.6nm 的 8 个谐振波长, 此时在输出信道的传输光谱中, 对次谐振峰的抑制较好, 可以有效地减小插入损耗和

信道间的串扰. 因此我们在器件的设计中, 取输出信道的个数为 8.

3.5 分光光谱

图 4 给出了 8 条输出信道的输出光谱, 取 $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.06$. 8 个谐振波长全部插入一个 FSR 中, 并由各自对应的输出信道输出, 从而实现了波分复用功能. 由图可以看出, 谐振峰以外所有的次峰值已被抑制到 -25dB 以下, 各谐振峰呈现箱形波谱响应, 比较平坦陡峭, 各谐振峰的 3dB 带宽约为 0.28nm.

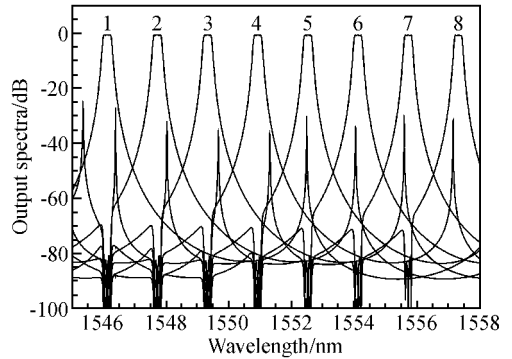


图 4 8 条输出信道的分光光谱 $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.06$, 其他相关参数见表 1.

Fig.4 Demultiplexing spectrum of 8 output channels $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.06$. The values of other parameters are presented in Table 1.

3.6 插入损耗和串扰

每条输出信道的插入损耗和串扰分别定义为

$$L^{(i)}(\lambda_i) (\text{dB}) = -10 \lg(|D_i(\lambda_i)|^2) \quad (11)$$

$$L_{CT}^{(i)}(\lambda_i) (\text{dB}) = 10 \lg\left(\frac{\sum_{j \neq i, j=1}^N |D_j(\lambda_i)|^2}{|D_i(\lambda_i)|^2}\right) \quad (12)$$

图 5 显示了每条输出信道的插入损耗和串扰. 由图可以看出, 当输出信道标号增大时, 插入损耗随之增大, 所有输出信道的插入损耗和串扰都比较小, 分别小于 0.71dB 和 -53dB. 应该说明的是, 只有当次谐振峰的波长等于分波波长时, 次谐振峰才会对串扰产生明显的影响. 由图 4 可以看出, 分光光谱中的次谐振峰的位置均不处在 8 个分波波长的位置上, 因此次谐振峰不会对串扰产生明显的影响.

4 结论

本文给出了硅基垂直耦合三环谐振波分复用器传递函数的公式, 并对其振幅耦合比率、波谱响应、分光光谱、插入损耗、信道间的串扰等传输特性进行

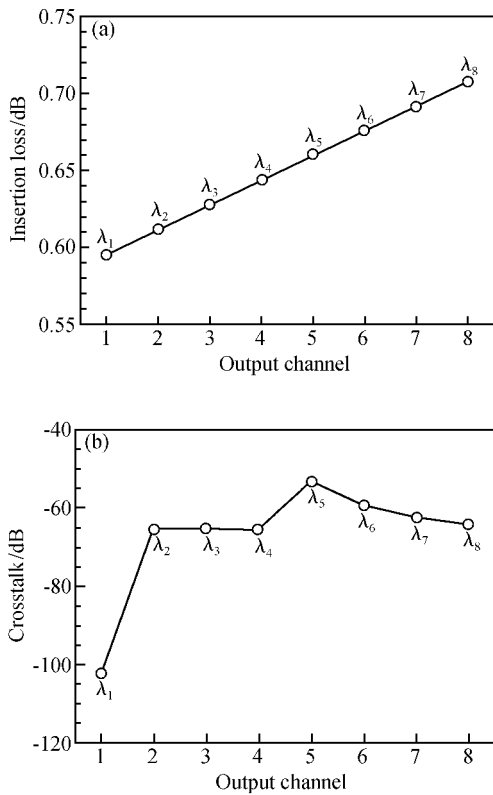


图 5 8 条输出信道的插入损耗 (a) 和串扰 (b) $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.06$, 其他相关参数值见表 1.

Fig. 5 Insertion loss (a) and crosstalk (b) of 8 output channels $\kappa_1 = 0.27, \kappa_2 = 0.06$. The values of other parameters are presented in Table 1.

了理论分析和数值模拟. 参数优化结果表明, 我们所设计的这种器件具有箱形波谱响应、带宽平坦陡峭、非谐振光弱、各输出信道的插入损耗和串扰低等良好的传输性能, 因而可以成为密集型波分复用的理想器件.

参考文献

- [1] Madsen C K, Lenz G, Bruce A J, et al. Multistage dispersion compensator using ring resonators. *Opt Lett*, 1999, 24(22): 1555
- [2] Yang J Y, Zhou Q J, Zhao F, et al. Characteristics of optical bandpass filters employing series-cascaded double-ring resonators. *Opt Commun*, 2003, 228(1~3): 91
- [3] Yan Xin, Ma Chunsheng, Xu Yuanzhe, et al. Theoretical analysis of $M \times N$ microring resonator array on silicon. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(11): 2223 (in Chinese) [闫欣, 马春生, 徐元哲, 等. 硅基 $M \times N$ 型微环阵列滤波器的理论分析. *半导体学报*, 2005, 26(11): 2223]
- [4] Gheorma I L, Osgood R M. Fundamental limitations of optical resonator based high-speed EO modulators. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14(6): 795
- [5] Krioukov E, Klunder D J W, Driessen A, et al. Sensor based on an integrated optical microcavity. *Opt Lett*, 2002, 27(7): 512
- [6] Liu B, Shakouri A, Bowers J E. Wide tunable double ring resonator coupled lasers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14(5): 600
- [7] Sozuki S, Hatakeyama Y, Kokubun Y, et al. Precise control of wavelength channel spacing of microring resonator add-drop filter array. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 20(4): 745
- [8] Ma C S, Wang X Y, E S L, et al. Optimization design and manufacturing tolerance analysis of polymer microring resonant wavelength multiplexer. *Opt Eng*, 2005, 44(2): 025005
- [9] Ma C S, Yan X, Xu Y Z, et al. Analysis of polymer microring resonant wavelength demulti/multiplexer with double serial-identical microrings in every filter element. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2005, 7(3): 135
- [10] Suzuki S, Kokubun Y, Nakazawa M, et al. Ultrashort optical pulse transmission characteristics of vertically coupled microring resonator Add/drop filter. *J Lightwave Technol*, 2001, 19(2): 266
- [11] Oda K, Takato N, Toba H A. Wide-FSR waveguide double-ring resonator for optical FDM transmission system. *J Lightwave Technol*, 1991, 9(6): 728

Characteristic of a Vertically-Coupled Triple Microring Resonant Wavelength Multi/Demultiplexer*

Yan Xin¹, Ma Chunsheng^{1,†}, Wang Xianyin¹, Xu Yuanzhe¹, E Shulin², and Zhang Daming^{1,2}

(1 *State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

(2 *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China*)

Abstract: Transmission characteristics are analyzed, and general formulas for the transfer functions are presented for a Si-based vertically-coupled triple microring resonant wavelength multi/demultiplexer with $1 \times N$ channels. The simulated results show that this device can demultiplex 8 different wavelengths around the central wavelength of 1550.918nm with a wavelength spacing of 1.6nm. The device possesses a flat box-like spectral response, its 3dB bandwidth is about 0.28nm, its inserted loss is less than 0.71dB, and its crosstalk is below -53 dB for every output channel.

Key words: wavelength multi/demultiplexer; transfer function; spectral response; demultiplexing spectrum; insertion loss; crosstalk

EEACC: 6260

Article ID: 0253-4177(2006)06-1103-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No.60576045) and the Project of the Chinese Academy of Sciences for Hundreds of Talents

† Corresponding author. Email: mcsheng@163.com

Received 12 October 2005, revised manuscript received 14 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics