

文章编号: 0253-2239(2005)01-45-6

聚合物微环谐振波分复用器传输特性的理论分析*

王现银^{1,2} 马春生^{1*} 鄂书林² 闫新¹ 徐元哲¹ 张大明¹ 孙德贵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 130023
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: 根据耦合模理论, 给出了 $1 \times N$ 信道微环谐振波分复用器(MRRWM)的光强传递函数通用公式, 并分析了微环谐振波分复用器的传输特性。利用参量优化结果, 在中心工作波长约为 $1.55 \mu\text{m}$ 、波长间隔约 5.6 nm 的情况下, 对 1×8 信道硅基聚合物微环谐振波分复用器进行了数值模拟。计算结果表明, 该器件具有以下优良的性能: 分波光谱准确, 自由光谱区约为 18 nm , 对于半径 $10 \mu\text{m}$ 以上的微环弯曲损耗很小, 且器件的插入损耗主要由波导的传输损耗决定, 振幅耦合比率为 0.2 时对应的每条垂直输出信道的插入损耗在 0.57 dB 以下, 信道间的串扰小于 -18.5 dB , 输出谐振峰 3 dB 带宽可达 0.25 nm , 最小背景光的强度约为 3.8×10^{-4} 。

关键词: 集成光学; 微环谐振波分复用器; 传递函数; 插入损耗; 串扰

中图分类号: TN256; TN205 文献标识码: A

Theoretical Analysis for Transmission Characteristics of Polymer Microring Resonant Wavelength Multiplexer

Wang Xianyin^{1,2} Ma Chunsheng¹ E Shulin² Yan Xin¹ Xu Yuanzhe¹
Zhang Daming¹ Sun Degui²

(¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130023
² State Key Laboratory on Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

Abstract: The transmission characteristics are analyzed, and the general formulas of the transmission functions are presented for the microring resonant wavelength multiplexer (MRRWM) with $1 \times N$ channels in terms of the coupled mode theory. Using the results of parameters optimization, the numerical modeling is performed for a polymer MRRWM around the central wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ with the wavelength spacing of 5.6 nm and 8 vertical output channels. The computed results show that the device has an exact output spectrum, the insertion loss is small and determined mostly by the transmission loss for microrings with radius R greater than $10 \mu\text{m}$. For the case of the amplitude coupling ratio of 0.2 , the device designed possesses some excellent features including the free spectral range of 18 nm , smaller insertion loss less than 0.57 dB , lower crosstalk below -18.5 dB , 3 dB -bandwidth of 0.25 nm , and weaker background intensity of 3.8×10^{-4} for every output vertical channel.

Key words: integration optics; microring resonant wavelength multiplexer; transmission function; insertion loss; crosstalk

1 引 言

利用多种材料制作的微环谐振器(MRR)由于工艺简单并具有优良的滤波特性, 长期以来就在有源和无源光学系统中有着重要的应用。利用微环的

谐振功能, 不仅可以制成滤波器^[1~3], 还可以制成调制器^[4]、光学传感器^[5]、双环谐振激光器^[6]等光电子器件。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

* 国家自然科学基金(60177022)及中国科学院百人计划资助课题。

作者简介: 王现银(1971~), 男, 山东邹城人, 在读博士研究生, 主要从事集成光电子学和导波光学方面研究工作。

* * 通信联系人。E-mail: wxyrcl@yahoo.com.cn.

收稿日期: 2003-11-26; 收到修改稿日期: 2004-04-30

所研制的微环谐振波分复用器(MRRWM)已经在实验上呈现出明显的分波功能^[7,8]。

微环谐振波分复用器可以设计成有周期性和无周期性两种结构,不仅能够实现复用、解复用功能,而且两个结构完全相同的波分复用器连接在一起还能够实现路由功能。由于该类器件的体积较小,每 1 cm^2 的半导体芯片上可以集成 $10^4 \sim 10^5$ 个,具有相当高的集成度^[7]。

聚合物材料不仅成本低廉、便于合成,而且多数光电聚合物材料如聚丙烯酸酯、聚酰亚胺等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、工艺相容性好等等,是制作微环谐振器等集成光学器件的理想材料^[9]。

本文对 $1 \times N$ 信道微环谐振波分复用器的传输特性进行了理论分析,给出了光学传递函数的通用公式。在中心工作波长约 $1.55 \mu\text{m}$ 、波长间隔 5.6 nm 的情况下,对 1×8 信道硅基聚合物微环谐振波分复用器的自由光谱区、输出光谱、插入损耗、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

本文分析的 $1 \times N$ 信道微环谐振波分复用器的

结构特点是,信道和微环不在同一平面内,微环处于信道之上。与平面耦合型相比,这种结构可以获得较大的振幅耦合比率,从而更易于实现信道与微环间的光功率耦合,不仅可以使各层材料及波导芯尺寸的选择有较大的灵活性,而且有利于微环中光信号的传输和谐振。

图 1(a)给出了 1×8 信道微环谐振波分复用器的结构简图,它由 N 个分波单元构成,每个分波单元中含有一个半径为 R_i 的微环:

$$R_i = R_1 + (i-1)\Delta R,$$

其中 R_1 为初始半径, ΔR 为微环半径差。主信道的长度为 $2L_1 + (N-1)L_2$, L_1 为主信道端口到与其邻近的耦合点的距离, L_2 为主信道上两个相邻耦合点间的距离, L_{1i} 为第 i 条垂直信道的输出端口与其邻近的耦合点间的距离, $L_i = L_1 + (i-1)\Delta R$ 。当从主信道输入端口输入 N 个波长的信号光 $\lambda_i = \lambda_1 + (i-1)\Delta\lambda$ (λ_1 为初始波长, $\Delta\lambda$ 为波长间隔) 时,这 N 个波长的信号光分别在半径为 R_i 的 N 个微环中发生谐振,并由相应的垂直信道的输出端口输出,从而完成波分复用功能。图 1(b)给出了某个分波单元的结构简图,图 1(c)则显示了微环波导和信道波导的横截面图和折射率分布。通过优化微环波导与信道波导的折射率分布和波导芯尺寸,可使二者的模传播常量 β 相等。

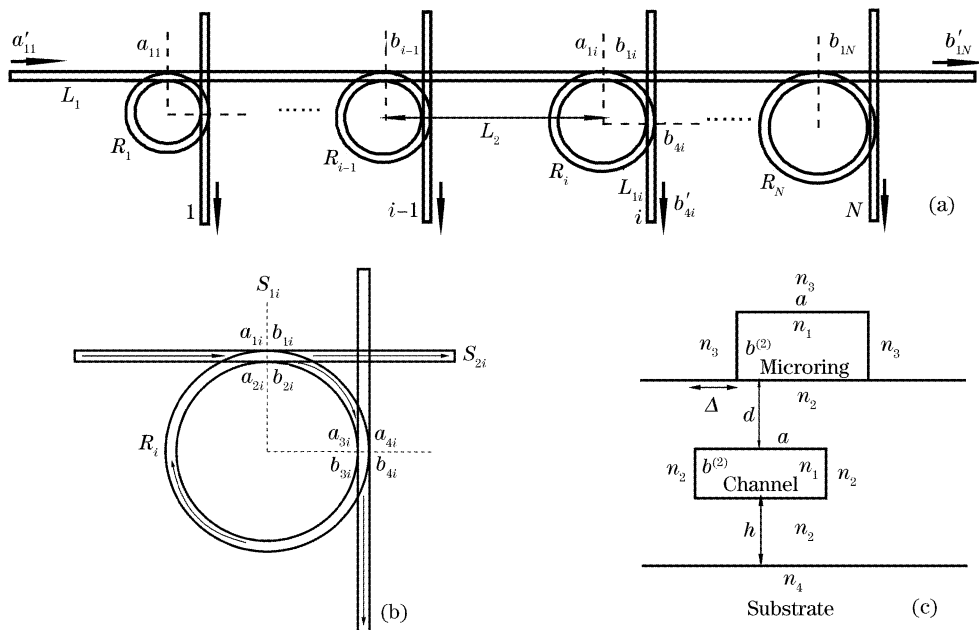


图 1 (a) 微环谐振波分复用器的示意图, (b) 一个分波单元的结构简图, (c) 信道波导与微环波导的横截面图及折射率分布

Fig. 1 (a) Schematic diagram of a microring resonant wavelength multiplexer, (b) that of a basic filter element,

(c) cross sections and refractive index profiles of the channel and the microring

2.2 设计原理

令微环半径为 R ，微环波导的模有效折射率为 n_c ，真空中光波长为 λ ，谐振级数为 m ，为使微环波导中传输的光产生谐振，必须满足谐振方程 $2\pi R n_c = m\lambda$ 或 $2\pi R\beta = 2\pi m^{[10]}$ ，由此可以得到微环谐振半径 R 、相邻分波单元的微环半径差 ΔR 、自由光谱区 (FSR) 及每个自由光谱中所能容纳的最大输出信道数 N_{\max} 分别为

$$\begin{cases} R = \frac{m\lambda}{2\pi n_c}, & \Delta R = \frac{mn_g}{2\pi n_c^2} \Delta\lambda, \\ d_{\text{FSR}} = \frac{\lambda}{m} \frac{n_c}{n_g}, & N_{\max} = \text{ent}\left(\frac{d_{\text{FSR}}}{\Delta\lambda}\right), \end{cases} \quad (1)$$

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

(1) 式中的第二式表明，相邻微环半径差 ΔR 与波长间隔 $\Delta\lambda$ 之间近似呈线性关系，波长依次相差 $\Delta\lambda$ 的信号光从主信道波导输入后将分别耦合进入半径依次相差 ΔR 的不同微环波导中发生谐振，然后耦合进入相应的垂直输出信道波导中输出，从而实现分波功能。利用上述公式则可对微环谐振波分复用器进行参量优化和结构设计。

2.3 传递函数

当微环半径足够大时，由波导弯曲而引起的模传播常量的改变很小以致可以忽略。令 α_{Ri} 为第 i 个微环波导中模式的损耗系数， α_L 为信道波导中模式的损耗系数，因而微环波导、信道波导模的复传播常量分别为 $\beta - j\alpha_{Ri}$ 、 $\beta - j\alpha_L$ 。通过适当调整微环波导与信道波导间的偏离量 Δ 可使每个微环波导与信道间的振幅耦合比率具有相同的值并令为 κ ，相应的振幅透射比率为 $t = (1 - \kappa^2)^{1/2}$ 。在第 i 个分波单元中通过微环中心和两个耦合点做截面 S_{1i} 、 S_{2i} ，并令在两条信道波导和微环波导中光波通过上述截面的输入和输出振幅分别为 a_{1i} 、 b_{1i} 、 a_{2i} 、 b_{2i} 、 a_{3i} 、 b_{3i} 、 a_{4i} 、 b_{4i} 。

对于第 i 个分波单元，根据耦合模理论可以得到下述方程

$$b_{1i} = ta_{1i} - j\kappa a_{2i} = ta_{1i} - j\kappa b_{3i} \exp(-j\phi_{1i}), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} b_{2i} &= -j\kappa a_{1i} + ta_{2i} = \\ &= -j\kappa a_{1i} + tb_{3i} \exp(-j\phi_{1i}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$b_{3i} = ta_{3i} = tb_{2i} \exp(-j\phi_{2i}), \quad (4)$$

$$b_{4i} = -j\kappa a_{3i} = -j\kappa b_{2i} \exp(-j\phi_{2i}), \quad (5)$$

式中

$$\phi_{1i} = 3\pi R_i(\beta - j\alpha_{Ri})/2,$$

$$\phi_{2i} = \pi R_i(\beta - j\alpha_{Ri})/2.$$

求解(2)式~(5)式，得到

$$b_{1i} = U_i a_{1i}, \quad b_{4i} = V_i a_{1i}, \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} U_i = \frac{t\{1 - \exp[-j(\phi_{1i} + \phi_{2i})]\}}{1 - t^2 \exp[-j(\phi_{1i} + \phi_{2i})]}, \\ V_i = -\frac{\kappa^2 \exp(-j\phi_{2i})}{1 - t^2 \exp[-j(\phi_{1i} + \phi_{2i})]}, \end{cases} \quad (7)$$

由于 $a_{1i} = b_{1,i-1} \exp(-j\psi_2)$ ， $\psi_2 = L_2(\beta - j\alpha_L)$ ，代入(6)式，从而得到振幅递推关系为

$$b_{1i} = U_i a_{1i}, \quad b_{4i} = V_i a_{1i}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} b_{1i} = U_i b_{1,i-1} \exp(-j\psi_2), \\ b_{4i} = V_i b_{1,i-1} \exp(-j\psi_2), \end{cases} \quad (9)$$

由此则可以得到

$$\begin{cases} \frac{b_{1N}}{a_{11}} = \left(\prod_{i=1}^N U_i\right) \exp[-j(N-1)\psi_2], \\ \frac{b_{4N}}{a_{11}} = \left(\prod_{k=1}^{i-1} U_k\right) V_i \exp[-j(i-1)\psi_2], \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{b_{1N}}{a_{11}} = \left(\prod_{i=1}^N U_i\right) \exp[-j(N-1)\psi_2], \\ \frac{b_{4i}}{a_{11}} = \left(\prod_{k=1}^{i-1} U_k\right) V_i \exp[-j(i-1)\psi_2], \end{cases} \quad (11)$$

在主信道的输入/输出端口处光波的输入/输出振幅及在每条垂直信道的输出端口处光波的输出振幅分别为

$$\begin{cases} a'_{11} = a_{11} \exp(j\phi_1), \\ b'_{1N} = b_{1N} \exp(-j\phi_1), \\ b'_{4i} = b_{4i} \exp(j\phi_{1i}), \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\phi_1 = L_1(\beta - j\alpha_L)$ ， $\phi_{1i} = L_{1i}(\beta - j\alpha_L)$ 。利用(10)式~(12)式，则可得到由主信道输入端口至输出端口的光强传递函数 $|B_N|^2$ 及由主信道输入端口至每条垂直信道输出端口的光强传递函数 $|D_i|^2$ 分别为

$$|B_N|^2 = \left|\frac{b'_{1N}}{a'_{11}}\right|^2 = \left|\frac{b_{1N} \exp(-j2\phi_1)}{a_{11}}\right|^2 = \left|\left(\prod_{i=1}^N U_i\right) \exp(-j(N-1)\psi_2) \exp(-j2\phi_1)\right|^2, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} |D_i|^2 &= \left|\frac{b'_{4i}}{a'_{11}}\right|^2 = \left|\frac{b_{4i} \exp(-j(\phi_{1i} + \phi_1))}{a_{11}}\right|^2 = \\ &= \left|\left(\prod_{k=1}^{i-1} U_k\right) V_i \exp[-j(i-1)\psi_2] \exp[-j(\phi_{1i} + \phi_1)]\right|^2, \end{aligned} \quad (14)$$

3 计算结果及讨论

利用上面给出的公式,对 1×8 硅基聚合物微环谐振波分复用器的传输特性进行了数值模拟。为了在器件中实现单模传输并获得较好的传输特性,必须对相关的结构参量进行优化。限于篇幅,本文仅在表 1 中列出了这一器件的 E_{00}^z 主模的参量优化结果,其优化过程将另文详加介绍。

表 1 参量优化值

Table 1 Optimum values of parameters

Central wavelength $\lambda_4/\mu\text{m}$	1.550918
Wavelength spacing $\Delta\lambda/\text{nm}$	5.6
Refractive index of polymer core of channels and microrings n_1	1.6278
Refractive index of polymer claddings of channels n_2	1.465
Refractive index of air claddings of microrings n_3	1.0
Core width of channels and microrings $a/\mu\text{m}$	2.00
Core thickness of channels $b^{(1)}/\mu\text{m}$	1.07
Core thickness of microrings $b^{(2)}/\mu\text{m}$	1.5
Resonant order m	79
Resonant radius for central microring $R_4/\mu\text{m}$	12.65
Radius difference of adjacent microrings $\Delta R/\text{nm}$	50.0
Free spectral range d_{FSR}/nm	18.0
Maximum number of vertical output channels in a FSR n_{max}	3
Total number of vertical output channels N	8
Distance from input port to adjacent coupling point of main channel $L/\mu\text{m}$	4000
Distance between two adjacent coupling points of main channel $L_2/\mu\text{m}$	250
Propagation loss coefficient $2\alpha_p/\text{cm}^{-1}$	0.1

3.1 微环的弯曲损耗和衬底的泄漏损耗

器件的插入损耗主要包括信号光在传输过程中因微环侧壁的不平整性引起的散射损耗、微环的弯曲损耗、高折射率硅衬底引起的泄漏损耗以及材料的传输损耗。需要指出的是,由于微环侧壁的不平整性引起的散射损耗随着制作工艺的提高已得到较为理想的控制,本文仅讨论其它几种损耗对器件传输特性的影响。

图 2 给出了微环波导 E_{00}^z 主模的功率弯曲损耗系数 $2\alpha_b$ 与微环半径 R 的关系曲线,计算公式为文献[11]中的(11)式。可以看出,弯曲半径 R 越大,功率弯曲损耗系数 $2\alpha_b$ 就越小。当取中心信道波长 $\lambda_4 = 1.550918 \mu\text{m}$ 、谐振级数 $m=79$ 时,所对应的中心微环半径 $R_4 = 12.65 \mu\text{m}$,此时的功率弯曲损耗系数 $2\alpha_b \approx 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$,远小于波导的功率传输损耗系数

0.1 cm^{-1} 。

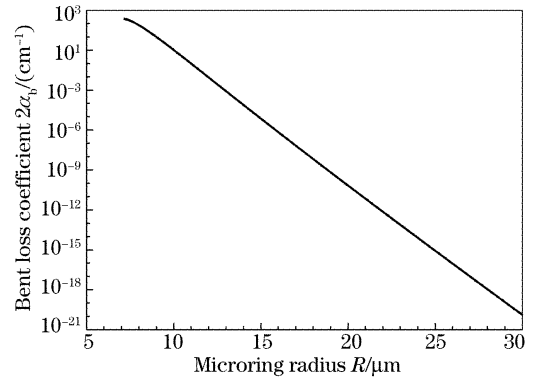


图 2 功率弯曲损耗系数 $2\alpha_b$ 随弯曲半径 R 的变化曲线
Fig. 2 Curve of the bent loss coefficient $2\alpha_b$ versus the bend radius R of microring

图 3 给出了 E_{00}^z 主模的功率泄漏损耗系数 $2\alpha_1$ 随波导芯与衬底间限制层的厚度 h 的变化曲线,计算公式为文献[12]中的(18)式。可以看出,限制层厚度 h 越大,则功率泄漏损耗系数 $2\alpha_1$ 越小。如取下层限制层厚度 $h \geq 6 \mu\text{m}$,功率泄漏损耗系数 $2\alpha_1$ 则可下降到 10^{-9} cm^{-1} 以下,已经很小可以忽略。因此在以下的计算中只考虑波导的传输损耗和弯曲损耗,取功率传输损耗系数 $2\alpha_p \approx 0.1 \text{ cm}^{-1}$,功率弯曲损耗系数 $2\alpha_b \approx 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。

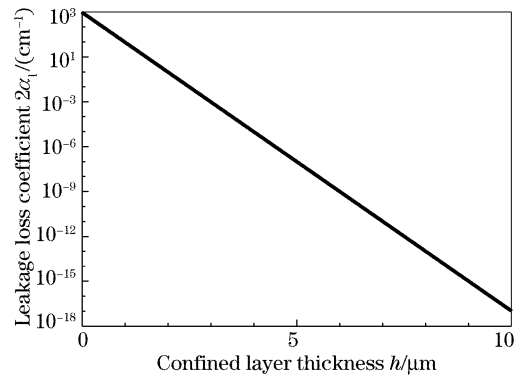


图 3 功率泄漏损耗系数 $2\alpha_1$ 随下层厚度 h 的变化曲线
Fig. 3 Curve of the substrate leakage loss $2\alpha_1$ versus the confined layer thickness h

3.2 主信道和竖直信道的输出光谱

图 4(a)显示了振幅耦合比率 $\kappa=0.2$ 时的主信道输出光谱,图 4(b)显示了振幅耦合比率 κ 对中心竖直信道输出光谱的影响,所用公式为(13)式、(14)式。由图 4 可知,非谐振波长的光可同时由主信道和各竖直信道中输出。在不考虑损耗的情况下,主信道和竖直信道的输出光强之和等于主信道的输入光强,体现了功率守恒;而谐振波长的光则完全从各竖直信道输出,主信道的输出强度为零。从图 4(b)

还可看出, 垂直信道背景光的强度随振幅耦合比率 κ 的增加而增大。当振幅耦合比 κ 在 0.3~0.1 范

围内取值时, 背景光较暗, 其强度小于 2×10^{-3} , 已经能够满足器件性能指标的要求。

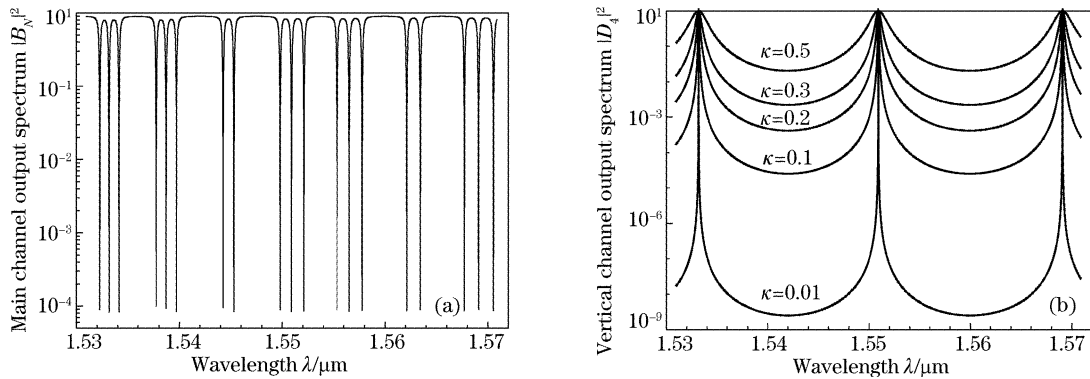


图 4 (a) $\kappa=0.2$ 时的主信道输出光谱, (b) $\kappa=0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ 时的中心垂直信道输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of (a) the main channel where $\kappa=0.2$, and that of the central vertical channel where $\kappa=0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$

图 5(a) 显示了 8 条垂直信道的输出光谱, 取 $\kappa=0.2$, 及图 5(b) 显示了中心波长 λ_4 附近谐振峰的形状, 取 $\kappa=0.1, 0.2, 0.3$, 所用公式为(14)式。由于所设计的器件不具有周期性, 对于波长间隔为 $\Delta\lambda$ 的非连续性的输入信号光, 只有在图 5(a) 中标有波长符号的 8 个谐振波长能够从各自对应的垂直信道中输出, 而其他没有标记波长符号的谐振波长不能由垂直信道输出, 此时把 8 个谐振波长可分别插入 3 个相邻的自由光谱区中, 从而实现了波分复用功

能。从图 5(a) 还可以看出, d_{FSR} 约为 18 nm, 这与由 (1) 式中的第三式的计算结果完全一致。由图 5(b) 可以看到, 输出谐振峰呈洛伦兹形状, 并随振幅耦合比率 κ 的增大而变宽, 同时背景光变强。当振幅耦合比率 κ 分别取 0.1、0.2、0.3 时, 相应的输出谐振峰的 3 dB 带宽 (半峰全宽) 依次约为 0.07 nm、0.25 nm、0.56 nm, 最小输出背景光的强度各自下降到约为 2.3×10^{-5} 、 3.8×10^{-4} 、 2.1×10^{-3} 。

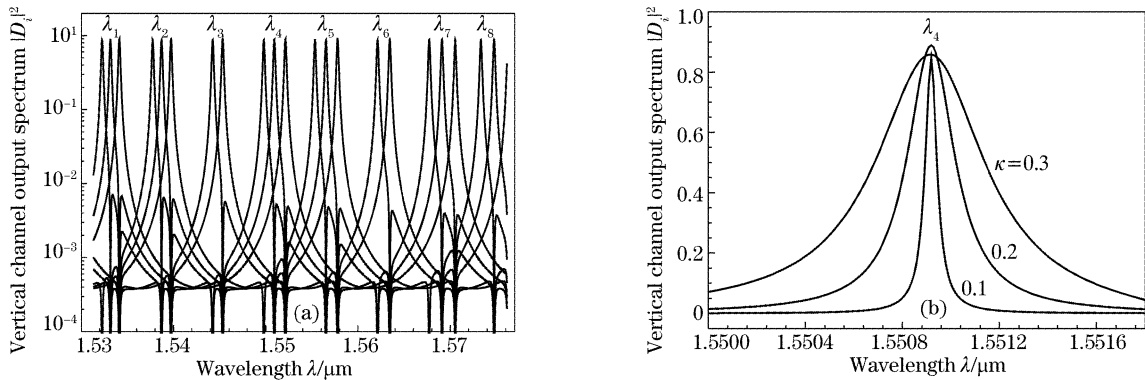


图 5 (a) $\kappa=0.2$ 时的 8 条垂直信道的输出光谱, (b) $\kappa=0.1, 0.2, 0.3$ 时的中心波长谐振峰的形状

Fig. 5 (a) Output spectra of 8 vertical channels where $\kappa=0.2$, (b) shapes of resonant peaks around central wavelength where $\kappa=0.1, 0.2, 0.3$

由于自由光谱区的周期性, 对于连续的输入光, 与 8 个目标谱. 振波长相差自由光谱区整数倍的部分非目标谐振波长的光也会同时由各相应的垂直信道输出, 这将对器件的测试造成一定的困难。如果利用 8 个非连续的目标谐振波长进行测试, 该器件将会有效地实现预定的分波功能, 而实际应用正是如此。

3.3 输出信道的插入损耗

根据以上各种损耗的分析结果可知, 器件的插

入损耗主要来自于波导的模式传输损耗和微环波导的弯曲损耗。每条垂直输出信道的插入损耗定义为

$$L^{(i)} = -10 \lg(|D_i|^2). \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

图 6 给出了 8 条垂直输出信道的插入损耗, 所用公式为(14)式和(15)式, 取振幅耦合比率 $\kappa=0.1, 0.2, 0.3$ 。图 6 中可以看出, 随着谐振波长的增大, 输出信道的插入损耗变大。当取 $\kappa=0.1, 0.2, 0.3$ 时, 插入损耗分别降至 0.77, 0.57, 0.77 dB 以下。

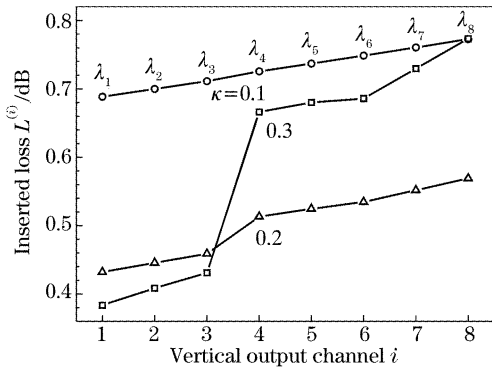


图 6 8 条垂直输出信道的插入损耗

Fig. 6 Inserted loss of 8 vertical output channels

3.4 输出信道的串扰

当 N 个不同波长的信号光从主信道输入时,从第 i 条垂直信道输出的波长为 (i) 的信号光中,主要是此信道中的谐振光,而其它 $N-1$ 条垂直信道窜入该信道的具有相同波长的残余信号光的光强很弱。每条垂直输出信道的串扰定义为

$$L_{\text{CR}}(\lambda_i) = 10 \lg \left[\frac{\sum_{j \neq i, j=1}^N |D_j(\lambda_i)|^2}{|D_i(\lambda_i)|^2} \right], \quad (16)$$

$(i = 1, 2, \dots, N)$

图 7 给出了 8 条垂直输出信道的串扰,所用公式为(14)式和(16)式,取振幅耦合比率 $\kappa = 0.1, 0.2, 0.3$ 。图中可以看出,随着振幅耦合比率 κ 的增大,8 条垂直输出信道的串扰随之变大。总地来看,信道间的串扰比较小,若取振幅耦合比率 $\kappa = 0.2$,各输出信道的串扰可降到 -18.5 dB 以下。

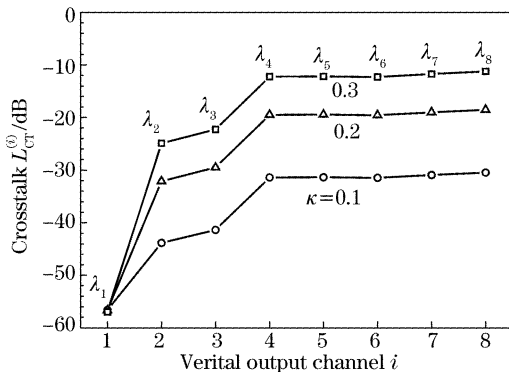


图 7 8 条垂直输出信道的串扰

Fig. 7 Crosstalk of 8 vertical output channels

4 结 论

本文给出了微环谐振波分复用器传递函数的通

用公式,并对硅基聚合物微环谐振波分复用器的传输特性进行了详细的理论分析和数值模拟。计算结果表明,所设计的这种器件具有优良的传输性能。具体而言,对于半径 $10 \mu\text{m}$ 以上的微环,弯曲损耗很小,器件的插入损耗主要由波导的传输损耗决定。当取振幅耦合比率 $\kappa = 0.2$ 时,各垂直信道输出光谱中谐振峰的 3 dB 带宽可达 0.25 nm ,最小背景光的强度约为 3.8×10^{-4} ,每条垂直输出信道中谐振波长的插入损耗依次为 $0.43, 0.45, 0.46, 0.51, 0.52, 0.53, 0.55, 0.57 \text{ dB}$,串扰依次为 $-56.7 \text{ dB}, -32.1 \text{ dB}, -29.5 \text{ dB}, -19.5 \text{ dB}, -19.5 \text{ dB}, -19.6 \text{ dB}, -19.0 \text{ dB}, -18.5 \text{ dB}$ 。

本文给出的相关公式简单实用,在微环谐振波分复用器及同类器件的设计方面具有一定的实用参考价值。所设计的 1×8 信道硅基聚合物微环谐振波分复用器,目前在实验室正处于试制阶段。

参 考 文 献

- Brent E. Little, Sai T. Chu, Hermann A. Haus *et al.*. Microring resonator channel dropping filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 998~1005
- Payam Rabiei, William H. Steier, Cheng Zhang *et al.*. Polymer micro-ring filters and modulators[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(11): 1968~1975
- Giora Griffel. Synthesis of optical filters using ring resonator arrays [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7): 810~812
- I.-L. Gheorma, R. M. Osgood, Jr.. Fundamental limitations of optical resonator based high-speed EO modulators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(6): 795~797
- E. Krioukov, D. J. W. Klunder, A. Driessen *et al.*. Sensor based on an integrated optical microcavity[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(7): 512~514
- Bin Liu, Ali Shakouri, John E. Bowers. Wide tunable double ring resonator coupled lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(5): 600~602
- Sai T. Chu, Brent E. Little, Wugen Pan *et al.*. An eight-channel add-dropper filter using vertically coupled microring resonators over a cross grid[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 691~693
- Shuichi Sozaki, Yutaka Hatakeyama, Yasuo Kokubun *et al.*. Precise control of wavelength channel spacing of microring resonator add-drop filter array[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **20**(4): 745~747
- Wen-Bin Guo, Chun-Sheng Ma, Da-Ming Zhang *et al.*. Parameter optimization and structural design of polymer arrayed waveguide grating multiplexer[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **20**(1): 45~53
- Kazuhiro Oda, Norio Takato, Hiromu Toba. A wide-FSR waveguide double-ring resonator for optical FDM transmission system[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(6): 728~736
- E. A. J. Marcatili. Bends in optical dielectric guides[J]. *Bell System Technol. J.*, 1969, **48**(7): 2103~2132
- Yasuharu Suematsu, Kazuhito Furuya. Quasi-guided modes and related radiation losses in optical dielectric waveguides with external higher index surroundings[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1975, **MTT-23**(1): 170~175