

自由光谱范围加倍的单微环谐振滤波器

李志全 李晓云* 孙宇超 李 莎 郑文颖

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 基于两点耦合和光波干涉控制相移思想提出 U 型波导耦合单微环的谐振滤波器结构。利用传输矩阵法推导了此结构的数学模型, 采用 Matlab 模拟了输出端口谱线形状。当微环与 U 型波导的两个耦合点之间的距离为微环周长的整数倍时, 此新型微环谐振滤波器比传统的双直波导耦合单微环滤波器的自由光谱范围增加 1 倍。针对该结构参数, 同时讨论了耦合系数对输出谱线的影响, 得出当耦合系数为 0.018 时, 输出谱线具有最佳的消光比, 同时保持窄的带宽和高的品质因子。

关键词 集成光学; 微环谐振滤波器; 传输矩阵法; 自由光谱范围

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0723001

Doubled Free Spectral Range of Single Micro-Ring Resonator Filter

Li Zhiquan Li Xiaoyun Sun Yuchao Li Sha Zheng Wenying

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A U-shaped waveguide-coupled single micro-ring resonator filter structure is proposed based on two-point coupling and optical interferences controlling phase shift. The mathematical model of this structure is inferred by using the transfer matrix method, and the simulation of the spectral line shape of the output port can be obtained by Matlab. By adjusting the distance of two coupling points between U-shaped waveguide and micro-ring, in contrast to traditional two-straight waveguide-coupled single micro-ring filter, the free spectral range (FSR) of the new structure can be doubled when the distance is integer multiples of the circumference of micro-ring. Aimed at the parameters of this structure, the influence of coupling coefficient on the output line is discussed as well, and the perfect extinction ratio of the output spectrum is gained while a narrow bandwidth and a high quality factor are maintained, as the coupling coefficient is 0.018.

Key words integrated optics; micro-ring resonator filter; transfer matrix method; free spectral range

OCIS codes 230.3120; 230.4555; 230.7408

1 引 言

近几年,集成光学加工工艺技术不断提高,基于微环谐振滤波器的密集波分复用技术成为目前研究热点^[1~4]。由于波分复用系统中理想的微环谐振腔不仅要具有较高的锐度,较大的品质因子,还需要有宽自由光谱范围和大消光比,因此对于微环谐振滤波器性能的提高是其应用的重要基础和前提。在波分复用系统中,为了在下载某一信道时不影响其他信道,微环谐振器的自由光谱范围必须大于系统的

总带宽,因此拓宽有限的自由光谱范围(FSR)是一个重要的研究方向。

FSR 是指两相邻谐振波长(频率)之差,目前提高 FSR 的方法有很多种,最基本的方法是减小微环半径^[5~7],由于微环半径与 FSR 成反比关系,通过在绝缘硅(SOI)上使用一个半径为 1.5 μm 的微环,实现了 62.5 nm 的 FSR^[7],但是半径的减小会引起更大的弯曲损耗,而品质因子的大小又取决于光在环中传输时的损耗^[8],对于硅微环谐振腔,一个典

收稿日期: 2012-01-04; 收到修改稿日期: 2012-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(61172044)和河北省自然科学基金(F2010002002)资助课题。

作者简介: 李志全(1954—),男,博士,教授,主要从事光纤传感及非线性光电检测等方面的研究。

E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: dongxue57350@163.com

型的例子就是三维时域有限差分法(FDTD)模拟显示半径每减小 $0.1 \mu\text{m}$, 品质因子 Q 会衰减一半。第二种方法是利用维尔纳效应, 串联不同半径的微环来实现大的 FSR^[9,10], 但是该方法会带来许多伪模, 伪模的存在会影响到微环谐振器的性能, 因此还需要对耦合系数进行精确控制来抑制伪模^[10]。第三种方法是使用两点耦合来实现 FSR 的加倍^[11,12], 通过一系列圆弧合理的连接, 将传统的双直波导用圆弧组合来代替, 可以实现 22 dB 的消光比和 40.8 nm 的 FSR^[12], 但需要对圆弧角度及错位距离进行精确控制。第四种方法是使用光波干涉控制相移来实现单微环的 FSR 加倍, 并保持一个高的 Q 值^[13], 但仍需要对波导进行多次弯曲, 这会造成更大的弯曲损耗, 同时需使用结合器才能实现最后的输出。

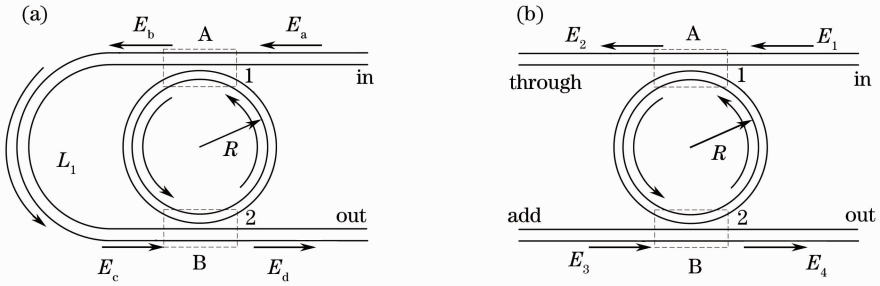


图 1 微环谐振滤波器的结构。(a) 新型结构; (b) 传统结构

Fig. 1 Structures of micro-ring resonator filters. (a) New structure; (b) traditional structure

本文采用传输矩阵法^[14~16]来推导结构的数学模型, 设耦合区 1, 2 处的振幅自耦合因子分别为 t_1, t_2 , 振幅互耦合因子分别为 ik_1, ik_2 , 在不考虑耦合损耗的情况下有 $|k_1|^2 + |t_1|^2 = 1, |k_2|^2 + |t_2|^2 = 1$ 。微环的半径为 R , 环周长 $L = 2\pi R$, U 型波导的两个耦合点间的距离为 L_1 。光沿着微环传输一周的环程传输系数 $\tau = \exp(-\alpha L)$, 其中 α 是损耗系数。光沿着微环传输半周的相位因子 $p = \exp(i\phi)$, 其中 ϕ 为光传输半周产生的相位变化, $\phi = \beta L/2, \beta$ 为传输常数。光沿着 U 型波导在两耦合点传输距离 L_1 的相位因子 $p_1 = \exp(i\phi_1)$, 其中 ϕ_1 为传输距离 L_1 后的相位变化, $\phi_1 = \beta L_1 \cdot n_{\text{eff}}$ 为介质有效折射率, E_i 为各端口的光场复振幅, I_i 为光场强度, $I_i = |E_i|^2$ (i 分别代表 a, b, c, d, 1, 2, 3, 4)。

设耦合区 1 处的传输矩阵为 \mathbf{M}_1 , 耦合区 2 处的传输矩阵为 \mathbf{M}_2 , 微环间传输矩阵为 \mathbf{M}_t , 则微环的总传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_t \mathbf{M}_1. \quad (1)$$

输入光场 E_1 与 E_a 相等, 均为归一化光场, 其中

本文基于两点耦合与光波干涉控制相移思想提出一种新型结构, 通过调节此结构中 U 型波导与微环耦合点之间的距离, 能够使得 FSR 加倍, 相比其他能够使自由光谱范围加倍的结构, 该结构更加简单, 更容易实现。

2 模型的建立

图 1(a) 是 U 型波导耦合单微环新型结构, 图 1(b) 是传统双直波导耦合单微环结构。相比传统结构, 此新型结构相当于在原来的 add 端口有了光的输入, 通过此光场对原来的 out 端口的光进行干涉作用, 最终相长干涉消除了原来谐振波长的一半, 因此自由光谱范围就会加倍。

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} -t_1 & 1 \\ ik_1 & ik_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} -t_2 & 1 \\ ik_2 & ik_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} 0 & \tau^{1/2} p \\ (\tau^{1/2} p)^{-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

因此有

$$\begin{bmatrix} E_c \\ E_d \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$E_c = \tau_1 p_1 E_b, \quad (4)$$

由(3)、(4)式可以推导出

$$E_d = \left(M_{21} - \frac{M_{11} M_{22}}{M_{12} - \tau_1 p_1} \right) E_a. \quad (5)$$

而对于图 1(b) 所示的传统结构输出端的光场复振幅 E_4 为

$$E_4 = \left(M_{21} - \frac{M_{11} M_{22}}{M_{12}} \right) E_1 = \left(M_{21} - \frac{M_{11} M_{22}}{M_{12}} \right) E_a, \quad (6)$$

因此(5)式还可以表示为

$$E_d = E_4 + \frac{-\tau_1 p_1 M_{11} M_{22}}{M_{12}(M_{12} - \tau_1 p_1)} E_a = E_4 + E_f, \quad (7)$$

输出光谱强度传输函数为

$$D = \frac{I_d}{I_a} = \frac{|E_4|^2 + |E_f|^2 + 2|E_4||E_f|\cos\delta}{|E_a|^2}, \quad (8)$$

$$\delta = \pi + \phi - \phi_1 - \arctan\left(\frac{t_1 \tau \sin 2\phi}{t_1 \tau \cos 2\phi - t_2}\right) - \arctan\left(\frac{t_2 \tau \sin 2\phi}{t_2 \tau \cos 2\phi - t_1}\right) + \arctan\left[\frac{\tau_1 \tau^{1/2} k_1 k_2 \sin(\phi + \phi_1) - t_1 t_2 \tau \sin 2\phi}{1 + \tau_1 \tau^{1/2} k_1 k_2 \cos(\phi + \phi_1) - t_1 t_2 \tau \cos 2\phi}\right], \quad (9)$$

式中 $E_f = \frac{-\tau_1 p_1 M_{11} M_{22}}{M_{12}(M_{12} - \tau_1 p_1)} E_a$, 可看作是 U 型波导对输出端口的干涉光场, δ 是 E_4 和 E_f 之间的相位差。

3 滤波特性分析

为了便于分析, 取两个耦合系数相等, 即 $k_1 = k_2 = k$ 。

3.1 距离 L_1 对输出光谱的影响

图 2(a)、(b) 分别是弧长 L_1 为 $L/2$ 的偶数倍条件下的光谱图。图 3(a)、(b) 分别是弧长 L_1 为 $L/2$ 的奇数倍条件下的光谱图。I 是传统结构 out 端口的光谱图, II 是 U 型波导对 out 端口的干涉光场图, III 是光场 E_4 和干涉光场 E_f 相位差的余弦, IV 是新型结构的 out 端口的光谱图。

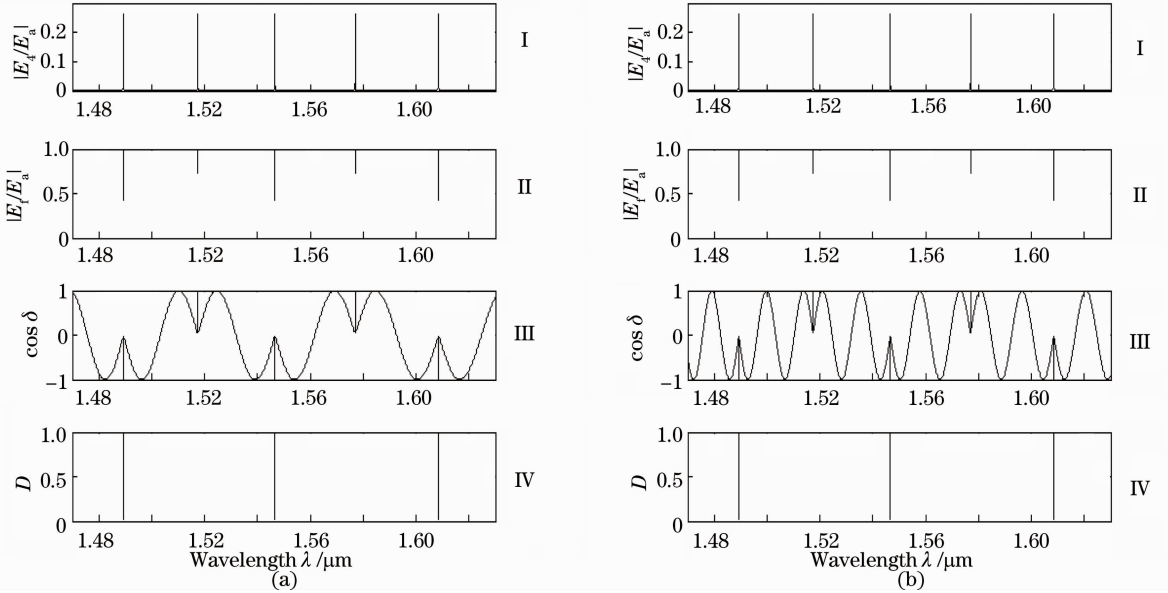


图 2 L_1 为 $L/2$ 的偶数倍条件下的光谱图。(a) $L_1 = L$; (b) $L_1 = 2L$

Fig. 2 Optical spectra when L_1 is even multiple of $L/2$. (a) $L_1 = L$; (b) $L_1 = 2L$

从图 2 中可以看出, 当 L_1 为 L 的整数倍, 即 L_1 为 $L/2$ 的偶数倍时, 干涉光场 E_f 对应的谐振波长处的透射率存在两个值, 且交替出现。 L_1 的改变没有对其形状产生明显的影响, 由于损耗的存在, 谐振波长处对应的透射率略有不同, 然而 L_1 对光场 E_4 和干涉光场 E_f 相位差的余弦影响比较明显, 随着 L_1 的变大, 在一个周期内, 可以看到曲线的波峰波谷数目都在有规律的增加, 但整体上曲线形状一致。由图 2 中 III 可以看出, 相长干涉和相消干涉在谐振波长处交替出现, 相长干涉使得谐振波长处的谐振

滤波被抑制, 而相消干涉使得谐振波长处产生明显的消光, 因此在这种情况下, 新型结构的输出光谱相对传统结构的 FSR 增加了 1 倍, 并且消光也比较大。

图 3 是当 L_1 为 $L/2$ 的奇数倍时的输出曲线图, 可以看到干涉光场 E_f 在每个谐振波长处的透射率均相等, L_1 的改变只影响透射率的大小, 当损耗很小时透射率变化并不明显。 L_1 对光场 E_4 和干涉光场 E_f 相位差的余弦也有影响, 在一个周期内, 曲线的波峰波谷数目都在有规律的增加, 但是总体上变

化后形状基本相似。由图 3 中 III 可以看出,相消干涉出现在每个谐振波长处,这使得在谐振波长处产生更大消光,由于谐振波长处没有出现相长干涉,因

此不能通过相长干涉产生谐振波长的抑制,因此不能使 FSR 增倍。

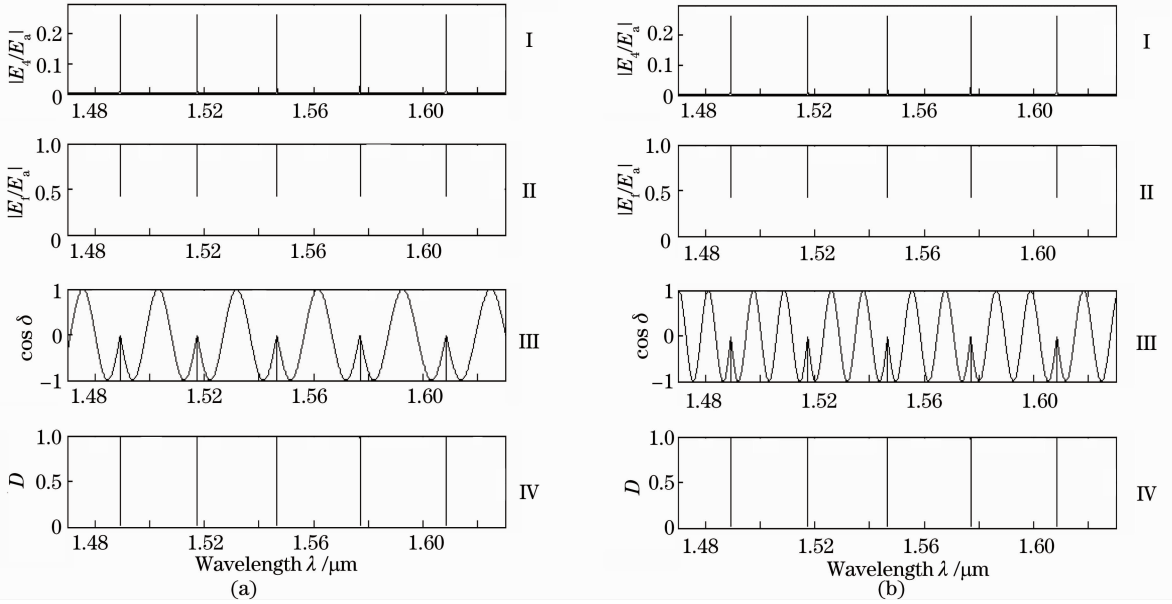


图 3 L_1 为 $L/2$ 的奇数倍条件下的光谱图。(a) $L_1 = 1.5L$; (b) $L_1 = 2.5L$

Fig. 3 Optical spectra when L_1 is odd multiple of $L/2$. (a) $L_1 = 1.5L$; (b) $L_1 = 2.5L$

3.2 耦合系数 k 对输出光谱的影响

图 4 是在 $L_1 = L$ 条件下,耦合系数 k 取不同数值时新型结构 out 端口的光谱图。此新型结构可用 GaInAsP/InP 材料制作,其参数取值分别为 $n_{\text{eff}} =$

$3.2, R = 4 \mu\text{m}, \alpha = 0.25 \text{ dB/cm}$ 。

从图(4)中可以看出,out 端输出光谱呈周期性分布,当耦合系数取值较大,如图 4(a)~(c)所示,输出光谱的消光较差,在一个周期内有两次消光,随着耦合

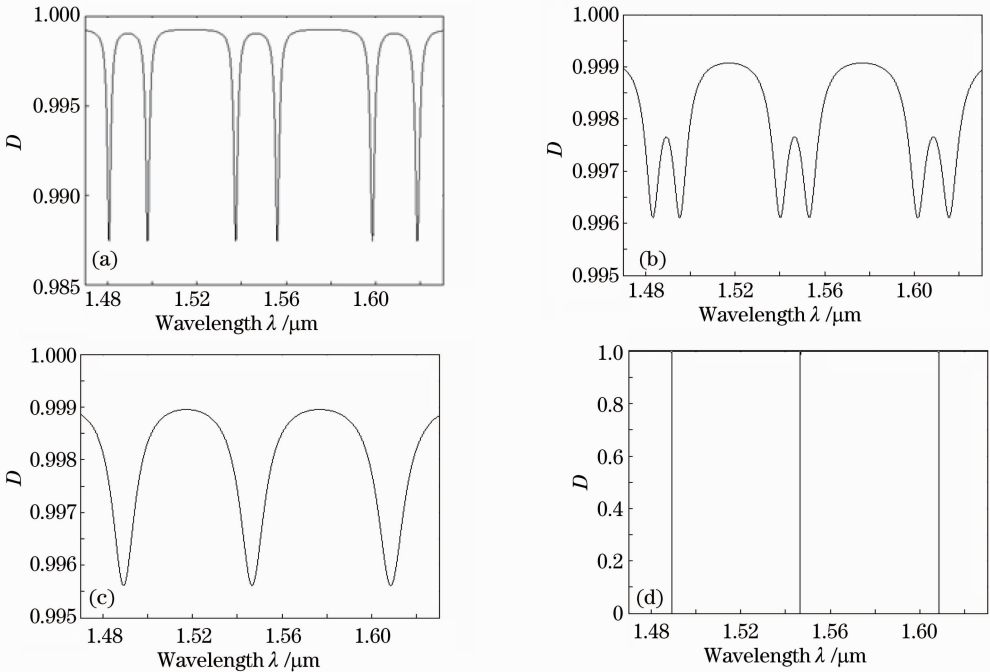


图 4 新型结构在 $L_1 = L$ 条件下 k 取不同数值的 out 端口光谱图。(a) $k = 0.9$; (b) $k = 0.65$; (c) $k = 0.5$; (d) $k = 0.018$

Fig. 4 Optical spectra of out port when k is different in the condition of $L_1 = L$. (a) $k = 0.9$; (b) $k = 0.65$;

(c) $k = 0.5$; (d) $k = 0.018$

系数的减小两次消光逐渐变成一次消光,从图 4(c)中可以看到在一个 FSR 内只有一个谐振波长被滤除,当耦合系数取值较小时,如图 4(d)所示,耦合系数取为 0.018,滤波器的 3 dB 带宽为 0.0121 nm,输出端透射率仅为 2.688×10^{-4} ,此时具有很明显的消光,滤波器几乎处于临界耦合状态,谐振波长处的光几乎全部被滤除,此时的滤波效果很好,并且耦合系数的减小使得阻带带宽变窄,更有利于选频。

对于 $L_1 = 2L$ 的情况下, out 端的曲线图如图 5 所示,由图可以看出当耦合系数较大时,与图 4 的不同之处在于一个周期内消光次数变为原来的 2 倍,消光程度不同。相似之处是随着耦合系数的增加,一些消光点逐渐消失,最后变为平坦。但是,如图 5(c)所示,当 $k = 0.12$ 时才出现这种情况,对比图 4(c)发现, $k = 0.5$ 时已经出现此情况,这是因为 L_1 越大,如果要对 out 端口起到同样的滤波效果,就需要更强的光对其进行干涉,因此只有耦合系数更小,才能使波导中的传输系数变大,才会有更强的光进入到 U 型波导中。

经过计算,发现在 $L_1 = 2L$ 的情况下,最佳消光产生时的耦合系数也为 0.018。通过改变 L_1 值,发现

最佳的消光处依然是在耦合系数为 0.018 时,如图 6 所示。为了显示清楚,只画出了耦合系数从 0 ~ 0.02 时的输出谱线。数据 1,2,3,4,5,6,7 分别选取了 $L_1 = L, L_1 = 5L, L_1 = 10L, L_1 = 15L, L_1 = 20L, L_1 = 25L, L_1 = 30L$,可以看出对应的输出端的最小值都出现在耦合系数为 0.018 时。以 $L_1 = L$ 为例,在耦合系数为 0.018 时,通过数值计算可得出在谐振波长 1546.6303 nm 处的透射率为 2.688×10^{-4} , 3 dB 带宽为 0.0121 nm,品质因子 Q 为 1.28×10^5 。当耦合系数取值在 0.018 附近,如 $k = 0.016$ 时,计算可得,透射率为 1.038×10^{-2} , 3 dB 带宽为 0.0108 nm,品质因子 Q 为 1.43×10^5 ; $k = 0.02$ 时,计算可得,透射率为 1.452×10^{-2} , 3 dB 带宽为 0.0134 nm,品质因子 Q 为 1.15×10^5 。从数据可以看出,当耦合系数取在 0.018 左右时,滤波器都保持一个很窄的带宽,同时保持很高的品质因子,但是其消光程度相差 2 个数量级,因此综合考虑带宽、品质因子以及消光程度,耦合系数应取为 0.018。在实验设计中,确定微环半径、波导宽度、波导厚度以后,可以通过优化设计直波导与微环间的间距来控制耦合系数,使其达到 0.018。

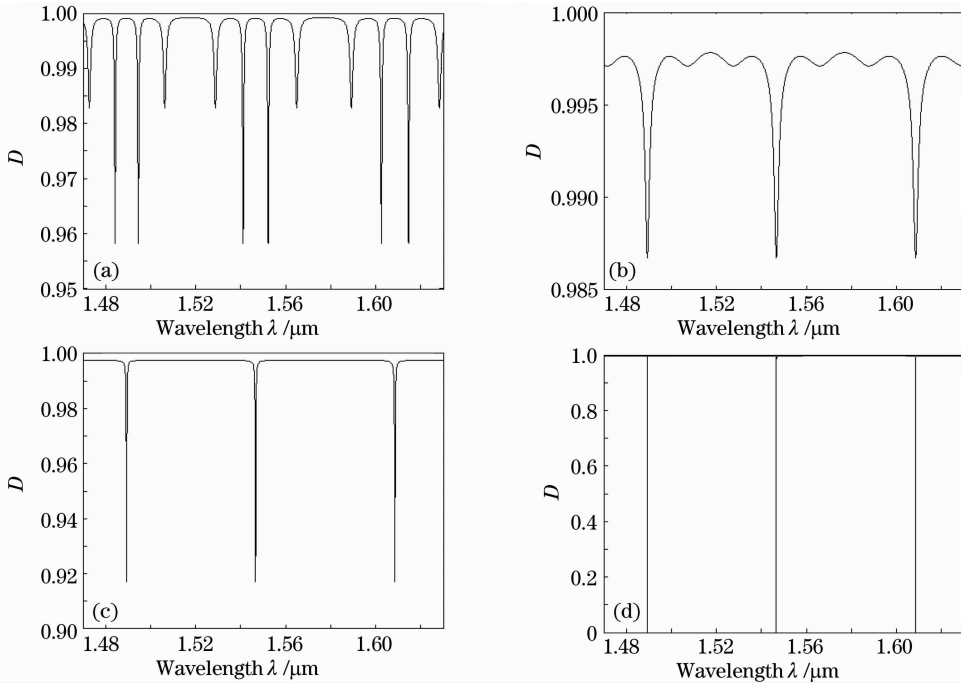


图 5 新型结构在 $L_1 = 2L$ 条件下 k 取不同数值的 out 端口光谱图。(a) $k = 0.9$; (b) $k = 0.3$; (c) $k = 0.12$; (d) $k = 0.018$

Fig. 5 Optical spectra of out port when k is different in the condition of $L_1 = 2L$. (a) $k = 0.9$; (b) $k = 0.3$; (c) $k = 0.12$; (d) $k = 0.018$

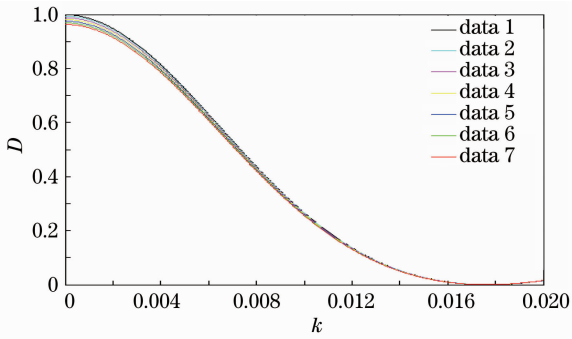


图 6 L_1 取不同数值条件下谐振波长处透射率与耦合系数的关系图

Fig. 6 Relation between the transmission ratio in the resonance wavelength and the coupling coefficient when L_1 is different

4 结 论

提出了不同于传统结构的 U 型波导耦合单微环结构,与传统结构相比,自由光谱范围加倍,损耗相差不大,且可以通过减小波导长度降低损耗,同时品质因子可以达到 10^5 量级;此结构与其他可以使自由光谱范围加倍的结构相比更加简单,并且可以调节 U 型波导两个耦合点的间距使得自由光谱范围加倍,增加了设计的冗余度。通过对结构的理论分析和数值计算,发现 U 型波导两个耦合点的间距是微环周长的整数倍的情况下可以使输出端自由光谱范围加倍。通过对耦合系数的讨论,得出当此结构选取有效折射率 $n_{\text{eff}} = 3.2$,微环半径 $R = 4 \mu\text{m}$,损耗系数 $\alpha = 0.25 \text{ dB/cm}$, L_1 为 L 的整数倍,且耦合系数 $k = 0.018$ 时,输出端口具有最佳消光,能够很好地起到选频滤波作用。

参 考 文 献

- Zhang Xiaobei, Ding Yunhong, Zhang Xinliang *et al.*. Analytical study of spectral and delaying characteristics of lossy series cascaded dual microring resonators[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 147~154
张小贝,丁运鸿,张新亮等.有损串联双微环谐振器谱线与延迟特性的解析研究[J].中国激光,2010,**37**(1): 147~154
- Han Xiuyou, 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
- Li Weibin, Sun Junqiang. Analysis of characteristics of the interleaver based on a doubled 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
- Wang Xianyin, Ma Chunsheng, E. Shulin *et al.*. Theoretical analysis for transmission characteristics of polymer microring resonant wavelength multiplexer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 45~50
王现银,马春生,鄂书林等.聚合物微环谐振波分复用器传输特性的理论分析[J].光学学报,2005,**25**(1): 45~50
- M. S. Nawrocka, T. Liu, X. Wang *et al.*. Tunable silicon microring resonator with wide free spectral range[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **87**(7): 071110
- S. J. Xiao, M. H. Khan, H. Shen *et al.*. Silicon-on-insulator microring add-drop filters with free spectral ranges over 30 nm[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(2): 228~236
- Q. Xu, D. Fattal, R. G. Beausoleil. Silicon microring resonators with 1.5- μm radius[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 4309~4315
- Xiao Shijun, M. H. Khan, Shen Hao *et al.*. Modeling and measurement of losses in silicon-on-insulator resonators and bends[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(17): 10553~10561
- Y. Yanagase, S. Suzuki, Y. Kokubun *et al.*. Box-like filter response and expansion of FSR by a vertically triple coupled microring resonator filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8): 1525~1529
- Liu Xin, Kong Mei, Wen Quan. Influence of coupling coefficients on filtering characteristics of series coupled two-microring resonators[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2885~2890
刘鑫,孔梅,文权.耦合系数对串联双微环谐振器滤波特性的影响[J].中国激光,2010,**37**(11): 2885~2890
- Hogo L. R. Lira, Carl B. Poitras, Michal Lipson. CMOS compatible reconfigurable filter for high bandwidth non-blocking operation[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(21): 20115~20121
- M. R. Watt, T. Barwicz, M. A. Popović *et al.*. Microring-resonator filter with doubled free-spectral-range by two point coupling [C]. Baltimore; In Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonic Applications Systems Technologies, 2005. 273~275
- Junbo Feng, Qunqing Li, Zhiping Zhou. Single ring interferometer configuration with doubled free-spectral range[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(2): 79~81
- Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Transfer matrix method for analyzing the characteristics of multiple-ring higher order microring resonators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 929~932
董小伟,裴丽,简水生.传输矩阵法分析多环高阶谐振滤波器特性[J].中国激光,2005,**32**(7): 929~932
- Zhang Jianing, Han Xiuyou, Song Hongyan *et al.*. Study on time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2098~2103
张佳宁,韩秀友,宋红妍等.可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究[J].光学学报,2010,**30**(7): 2098~2103
- Zhang Xiaobei, Huang Deixiu, 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

栏目编辑:韩峰