

·信息与信号处理·

全光纤串联双环谐振器的滤波特性研究

陈飞, 裴丽, 刘超

(北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 基于传输矩阵法, 分析了串联双环谐振滤波器传输特性, 推导出了通路和下话路的传输函数表达式及最佳耦合条件。在忽略损耗情况下, 计算分析了耦合系数和微环半径对滤波特性的影响, 并进行了参数优化。计算结果表明: 当串联双环半径分别为 $40\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 、微环与直波导耦合系数为 0.2 时, 滤波器的自由光谱范围能够达到 22 nm 且 3 dB 带宽仅为 0.27 nm, 从而能够在 50 GHz 间隔的密集波分复用系统中仅对某一特定波长进行滤波。

关键词: 集成光学; 微环谐振器; 串联双环; 滤波特性; 耦合系数

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-02-0046-05

Research on Filtering Characteristics of All-fiber Series Coupled Dual Micro-ring Resonator

CHEN Fei, PEI Li, LIU Chao

(Key Laboratory of the Ministry of Education of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: According to transmission matrix method, the transmission characteristics of series coupled dual micro-ring resonator filter are analyzed. The transmission function formula, the best coupling conditions of channels and drop channels are deduced. At the condition of neglecting loss, the influence of coupling coefficients and micro-ring radius on filtering characteristics is calculated and analyzed. And parameters are optimized. The calculation results show that when the radius are $40\ \mu\text{m}$ and $50\ \mu\text{m}$, the coupling coefficient of micro-ring and line waveguide is 0.2, the free spectral range of the filter is 22 nm and 3dB bandwidth is just 0.27 nm, therefore, only a special wavelength is filtered in dense wave division multiplex (DWDM) system with 50 GHz internal.

Key words: integrated optics; micro-ring resonator; series coupled dual micro-ring; filtering characteristics; coupling coefficient

光滤波器作为密集波分复用(DWDM)系统中的关键器件之一,其滤波特性对系统的波分复用效果和带宽的利用率有着直接的影响,而微环谐振滤波器以其体积小、结构简单、易于集成等优点成为了人们的研究热点^[1-3]。由于单环滤波器的滤波曲线为洛伦兹型,与DWDM系统所要求的平坦滚降式“箱型”滤波器不符,可以采用多环级联的方式构成多环谐振滤波器,这样能使通带更平坦,极大地改善了滤波性能^[4-5],而且3 dB带宽较单环结构更窄,更有利于对波长间隔较窄的系统进行滤波。在利

用微环谐振滤波器对DWDM系统多波长的信道进行滤波时,应该使滤波器的自由光谱范围(FSR)尽量大于DWDM系统的总波长范围,这样可以保证在复用信号的波长范围内,只有一个波长的信号发生谐振,同时可以避免信道间的串扰从而提高通信质量。单微环谐振器的自由光谱范围是与微环半径成反比的,因此想要得到较大的自由光谱范围必须要减小微环半径,但在实际应用中,小半径的微环制作比较困难,同时产生损耗也更大,因此可以利用“Vernier效应”^[6],即通过串联不同半径的微环来

收稿日期: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(61275076;61177069)

作者简介: 陈飞(1989-),男,黑龙江大庆人,硕士研究生,主要研究方向为光微环谐振器。

扩展滤波器的自由光谱范围。

通过传输矩阵法^[7],对串联双环谐振滤波器的传输函数进行详细推导,着重分析耦合系数和半径对滤波特性的影响,并且根据ITU-T定义的DWDM系统波长使用原则,选定合适的参数设计出一种能够适用于目前商用50 GHz间隔的DWDM系统的滤波器。

1 理论分析

图1是串联双环谐振器的结构示意图,它由两个微环和两条平行的直波导耦合而成。光从 a_1 端输入,经过耦合区域后,一部分光耦合进微环,从 b_2 透射出,不满足谐振的光则从 b_1 反射而出。令 t_n 为第 $n-1$ 个微环和第 n 个微环之间的传输系数, k_n 为第 $n-1$ 个微环和第 n 个微环之间的耦合系数,并且满足 $t_n^2 + k_n^2 = 1$,可得

$$\begin{bmatrix} b_{2n-1} \\ b_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_n & jk_n \\ jk_n & t_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{2n-1} \\ a_{2n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

经矩阵变换得

$$\begin{bmatrix} b_{2n} \\ a_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_n & -1 \\ jk_n & -jk_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{2n-1} \\ a_{2n-1} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_n \begin{bmatrix} b_{2n-1} \\ a_{2n-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

当光在第 n 个微环中传输时,其相位变化为

$$\begin{bmatrix} b_{2n+1} \\ a_{2n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \tau_n^{1/2} \exp(-i\phi_n) \\ \tau_n^{1/2} \exp(i\phi_n) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{2n} \\ a_{2n} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_n \begin{bmatrix} b_{2n} \\ a_{2n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\tau_n^{1/2}$ 为光沿微环传输半周的损耗; $\phi_n = \beta \frac{L}{2}$ 为光沿微环传输半周的相位变化。因此将耦合器的传输矩阵 \mathbf{M}_n 和半环波导的传输矩阵 \mathbf{G}_n 级联相乘,便可得到串联微环谐振器的传输函数如下

$$\begin{bmatrix} b_{2n+2} \\ a_{2n+2} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{n+1} \mathbf{G}_n \mathbf{M}_n \mathbf{G}_{n-1} \cdots \mathbf{G}_1 \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{n+1} \prod_{i=1}^n \mathbf{G}_i \mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

一般情况下认为下话路光信号输入,即 $a_{2n+2} = 0$ 时,此时串联微环谐振滤波器的通路和下话路传输函数分别为

$$T = \frac{b_1}{a_1} = -\frac{M_{22}}{M_{21}} \quad (6)$$

$$D = \frac{b_{2n+2}}{a_1} = M_{12} - \frac{M_{11} M_{22}}{M_{21}} \quad (7)$$

相对于其他结构,串联双环谐振滤波器虽然结构简单,但可以有效改善单环滤波器的性能,如扩展FSR或是得到更平坦的通道带宽等,因此分析串联双环滤波器有重要的意义。

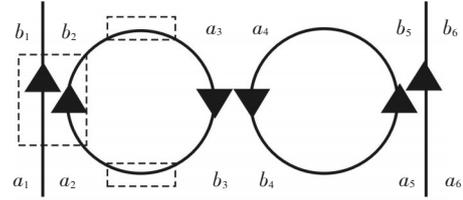


图1 串联双环谐振器结构图

将 $n=2$ 代入式(7),可得串联双环滤波器的下话路输出函数为

$$D = \frac{b_6}{a_1} = \frac{-jk_1 k_2 k_3 \tau_1^{1/2} \tau_2^{1/2} \exp(i\phi_1 + i\phi_2)}{1 - \tau_1^{1/2} t_1 t_2 \exp(2i\phi_1) - \tau_2^{1/2} t_2 t_3 \exp(2i\phi_2) + \tau_1^{1/2} \tau_2^{1/2} t_1 t_3 \exp(2i\phi_1 + 2i\phi_2)} \quad (8)$$

图2为单环滤波器和串联双环滤波器的输出光谱,其中单环滤波器和双环滤波器的耦合系数及环半径都相同。从图中可看出,串联双环的滤波性能明显优于单环结构,其3 dB带宽更窄,通带更平坦,滤波曲线更接近于平顶陡边。

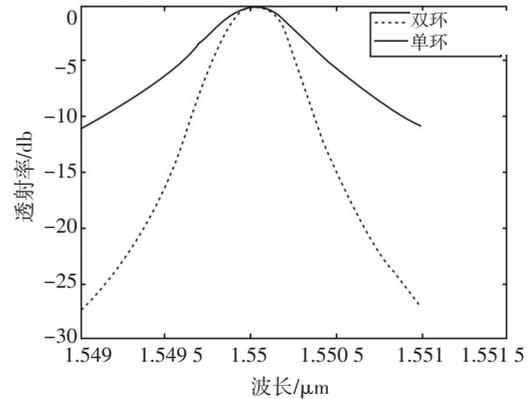


图2 单环滤波器和串联双环滤波器的输出光谱比较

2 参数优化

2.1 耦合系数对滤波特性的影响

串联双环结构中的三个耦合系数决定了通带宽度、通带平坦度、输出端光强等滤波特性。只有同时满足两环谐振条件的光才能在整个串联结构中谐振,并且能够全部从下信道输出,所以下信道的主谱

振峰即为系统的通带,出现在能同时满足两环谐振条件的波长处。在式(8)中取 ϕ_1 和 ϕ_2 为整数 π ,即得到同时满足两环谐振的主谐振峰的透射率为

$$|D|^2 = \frac{k_1^2 k_2^2 k_3^2 \tau_1 \tau_2}{|1 - \tau_1^{1/2} t_1 t_2 - \tau_2^{1/2} t_2 t_3 + \tau_1^{1/2} \tau_2^{1/2} t_1 t_3|^2} \quad (9)$$

对 $|D|^2$ 求极值可以使串联双环谐振滤波器主谐振峰透射率达到最大,此时求得最佳耦合条件为^[8]

$$k_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{1 - k_1^2} \tau_1^{1/2} + \sqrt{1 - k_3^2} \tau_2^{1/2}}{1 + \sqrt{1 - k_1^2} \sqrt{1 - k_3^2} \tau_1^{1/2} \tau_2^{1/2}} \right)^2} \quad (10)$$

在仿真中,假设理想状况下,光在传输过程中没有损耗。图3给出了 k_2 不同取值时,输出光强的比较,取 $k_1=k_3=0.5$,此时根据式(10) $k_2=0.1429$ 为最佳耦合系数。从图中可以看出,当 k_2 取最佳耦合系数时,输出光强达到最大且为单谐振峰,当耦合系数 k_2 小于最佳耦合值时,谱线形状没有太大改变,但是峰值降低非常明显,并且通带也不够平坦;当耦合系数 k_2 大于最佳耦合系数时,光谱由单谐振峰转化成双谐振峰。这就说明了当微环与波导间的耦合系数确定后,微环之间的耦合系数越大就越容易出现双谐振峰现象,这是因为微环之间的耦合能产生一个等效的相移,两环中的模式在耦合区域会存在对称模式和非对称模式,它们对应不同的谐振波长,所以会出现双谐振峰,而当微环之间的耦合系数较小时,由耦合区域产生的相移不能形成这两种形式,只能为半对称模式,所以输出光谱为单谐振峰。

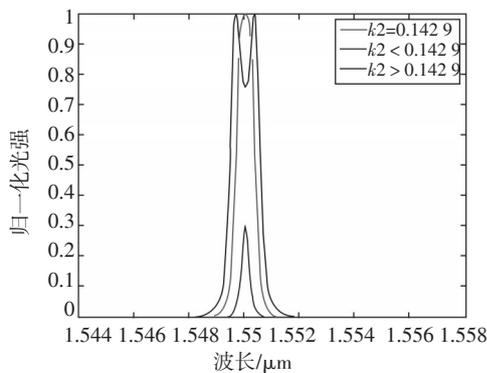


图3 耦合系数 k_2 对主谐振峰透射率的影响

由最佳耦合条件可知,当两环之间的耦合系数 k_2 确定时, k_1 与 k_3 的取值不再独立,所以当 k_1 为固定值时,改变 k_3 也会影响主谐振峰的输出特性。图4给出不同 k_3 取值下的主谐振峰输出光谱,其中 $k_1=k_2=0.1429$ 。从图中可看出,当 $k_3=0.5$ 时为最佳

耦合; $k_3 < 0.5$ 时,谱线出现了双谐振峰现象,并且峰值也小于最佳耦合时谐振波长处的峰值;当 $k_3 > 0.5$ 时,谱线虽然还是单谐振峰,但输出较最佳耦合时明显降低,因此在设计串联双环谐振滤波器时,其耦合系数一定要符合最佳耦合条件。

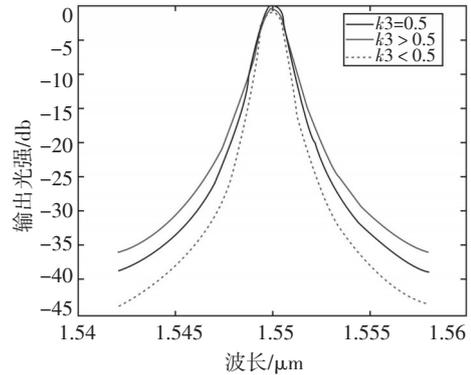


图4 k_3 对主谐振峰透射率的影响

在理想耦合条件下,主谐振峰的峰值透射率为100%,但耦合系数的选取对带宽和边沿陡峭程度都有影响。图5给出了理想耦合条件下,3组不同的耦合系数时主谐振峰透射率的比较。从图中可以看出,耦合系数越小,主谐振峰传输特性越尖锐,光谱串扰越小,使得频谱非常接近理想的“箱型”频谱。耦合系数越大,谐振峰变得越宽,非谐振信号的光强就變得越大,串扰增加,器件的滤波性能就越差,因此谐振峰不能过宽,也就是说耦合系数要尽量取小。但是谐振峰也不能过窄,过窄的话,会因为材料、工艺、温度的变化,使谐振峰产生漂移^[9],这样器件就不能很好地滤波。所以在实际应用中要取合理的耦合系数,根据实际需求获得理想的频谱响应。

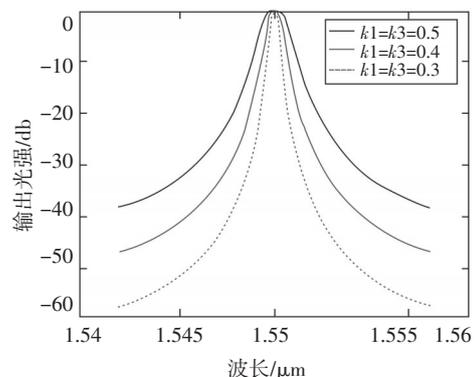


图5 不同耦合系数下串联双环谐振器主谐振峰的透射谱

3 dB 带宽是衡量滤波器滤波响应的重要参量,

图6给出了理想耦合条件下,3 dB带宽随耦合系数 k_1 的变化曲线,从图中可以看出, k_1 越小,3 dB带宽越窄。计算结果表明,当 $k_1=k_3=0.2, k_2=0.0204$ 时,滤波器的3 dB带宽约为0.27 nm,目前商用DWDM系统最新标准中的频率间隔是50 GHz,根据ITU-T定义的DWDM波长使用原则,50 GHz的频率间隔反应到波长上,就是0.4 nm的波长间隔,因此根据上述计算结果设计的串联双环谐振器滤波器是可以满足该滤波条件的,并且耦合系数符合理想耦合,能够得到理想的滤波效果。

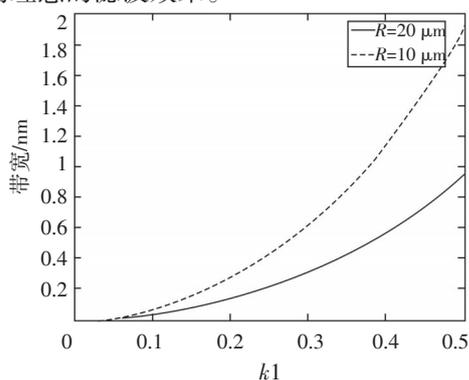


图6 3 dB带宽随耦合系数 k_1 的变化

2.2 微环半径对FSR的影响

对于单微环结构,扩展FSR最常用的办法就是缩小微环半径,图7验证了FSR与微环半径的变化关系。但是微环半径的减小会使得3 dB带宽略有增加,这是不利于滤波的,并且在仿真中并没有考虑到损耗的影响,实际制作中微环半径越小,制作复杂度越高,带来的损耗也越大,因此可以考虑采用串联两个不同半径的微环来拓宽自由光谱范围。

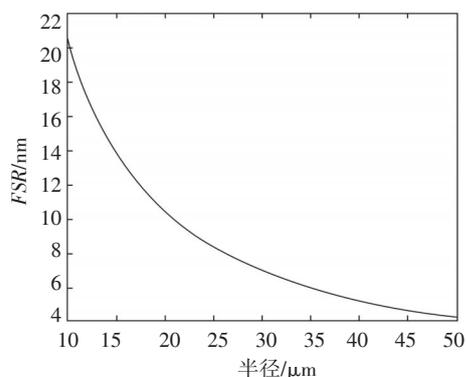


图7 FSR与微环半径的变化关系

根据Vernier效应,当串联两微环半径不同时,如果单环谐振滤波器的FSR分别为 FSR_1 和 FSR_2 ,

那么串联不同半径后的双环谐振滤波器的FSR等于 FSR_1 和 FSR_2 的最小公倍数,即 $FSR=m \cdot FSR_1=n \cdot FSR_2$ (m, n 为正整数)。图8中实线为半径为40 μm和50 μm时的单环滤波器透射率曲线,虚线为串联一个半径40 μm和50 μm时的双环滤波器透射率曲线。从图8中可看出,当串联两个半径不同的微环时,FSR大致为微环1的4倍,微环2的5倍。对于两环半径不同的串联结构,两环半径的改变不一定会改变系统总体的FSR。从图9中可看出,三组由不同半径微环串联形成的滤波器的FSR是相同的,因此在实际制作过程中便可以选用半径较大的一组,即保证了FSR足够大,又降低了制作中带来的损耗。此外,在双环串联结构的透射谱中,每个单环的谐振波长处还有残余的透射峰,即伪模。伪模的存在影响微环谐振器的性能,在设计时需要对其抑制^[10]。

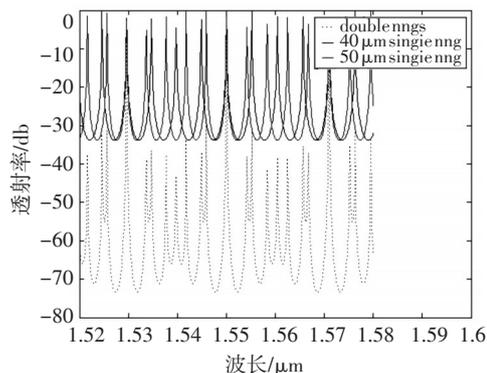


图8 两个单微环及其串联双环结构的输出光谱

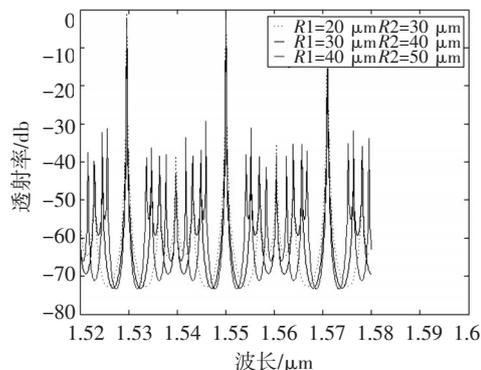


图9 三组不同半径组合的串联结构输出光谱比较

根据ITU-T对DWDM系统的波长分配表可知,带宽为50 GHz的DWDM系统的中心波长为1550.12 nm,波长范围为1528.77~1560.61 nm,因此在设计滤波器时,FSR应不小于21.35 nm,才可以在

带宽范围内只有一个谐振波长。当串联双环半径分别为 $40\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 时,根据 *FSR* 计算公式,*FSR* 大约达到 $22\ \text{nm}$,可以满足该系统。

3 结论

对串联双环谐振滤波器的滤波特性进行了详细分析。通过传输矩阵法推导了双环结构的传输函数及理想耦合条件,在微环无损耗条件下,分析了耦合系数和微环半径对滤波特性的影响。计算结果表明,当满足理想耦合条件并且耦合系数比较小时,滤波效果较为理想,并且当串联两环半径不同时,滤波器的自由光谱范围较单微环谐振滤波器有很大的拓展。根据 ITU-T 对密集波分复用系统的规定进行了参数优化,选择合适的耦合系数和微环半径设计出一种滤波器能够实现在 $50\ \text{GHz}$ 间隔的 DWDM 系统中进行特定波长滤波,为将来的实验应用奠定理论基础。

参考文献

- [1] Popovic A, Barwicz T, Dahlem M S, et al. Tunable fourth-order silicon micro-ring-resonator add-drop filters [C]//

ECOC 2007-33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication, 2007.

- [2] Xu Q, Manipatruni S, Schmidt B, et al. 12.5 Gbit/s carrier-injection-based silicon micro-ring silicon modulators [J]. Opt. Express, 2007, 15(2): 430-436.
- [3] Little B E, Chu S T, Pan W, et al. Vertically coupled glass micro-ring resonator channel dropping filters [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 11(2):215-217.
- [4] 杨建义,江晓清,王明华,等.采用单环谐振器的光滤波特性及局限性[J].光电子·激光,2003,14(1):12-16.
- [5] 杨建义,江晓清,王明华.串联双环光微环谐振器的滤波特性[J].光学学报,2003,23(10):1191-1195.
- [6] Schwelb O. The nature of spurious mode suppression in extended FSR micro-ring multiplexers [J]. Opt. Commun., 2007, 271(2):424-429.
- [7] Yariv A. Universal relations for coupling of optical power between micro-resonators and dielectric waveguides [J]. Electronics Letters, 2000, 36(4):321-322.
- [8] 高震森,李淳飞.串联微环谐振器的光学特性[J].中国激光,2008,35(5):675-679.
- [9] 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.
- [10] 刘鑫,孔梅,文权.耦合系数对串联双微环谐振器滤波特性影响的分析[J].中国激光,2010,37(11):2885-2890.

(上接第42页)

5 结论

通过分析比较跨导型峰值保持电路和电压型峰值保持电路的特点,选择性能更优越的跨导型保持电路进行设计。利用 NI 公司的 Multisim9 软件,对以 MAX436 为设计核心的跨导型峰值保持电路进行了仿真分析,电容数值的选取及其性能稳定度,是最终影响峰值精度的一个重要因素。给出实地电路设计时容值选取的简化参考公式。最后通过实验,验证了该电路可对窄脉冲电压峰值进行较精确的保持,此电路对窄脉冲峰值检测有重要参考价值。

参考文献

- [1] 郭永新,焦青.新型跨导型脉冲峰值保持器[J].青岛大学学报,2001,16(4):104-106.

- [2] 李东仓.一种超长时间的峰值保持器[J].兰州大学学报,2012,6(48):132-135.
- [3] 陈勇,李延国.新型高性能脉冲峰值保持电路[J].核电子学与探测技术,1997,17(4):241.
- [4] 胡显龙,翁东山.核电子学与探测技术,2009,29(1):42-45.
- [5] 方佩敏.超小型音频功率放大器 MAX436X 系列及其应用[J].电子元件应用,2013,5(1):31-42.
- [6] 白玉栋,张守才.电子倍增 CCD 驱动电路设计[J].光电技术应用,2013,3(28):51-54.
- [7] Texas Instruments. Wide bandwidth operational transconductance amplifiers MAX436 [Z]. Texas Instruments, 1995.
- [8] 冯刚.用于重频窄脉冲激光检测的峰值保持电路[J].2009,17(12):27-30.
- [9] 熊焱,陆耀东.窄脉冲激光信号峰值保持电路设计[J].激光与红外,2012,42(12):1379-1380.