

doi:10.3788/gzxb20144303.0313003

串联耦合切比雪夫微环滤波器的设计

刘文楷, 赵冉月, 董小伟

(北方工业大学 信息工程学院, 北京 100144)

摘 要: 基于电路的设计方法, 把 N 阶串联耦合微环谐振滤波器等价成为一个基带 LC 阶梯网络, 通过求解 LC 阶梯网络的元件参量, 求出微环滤波器的耦合系数. 在此基础上设计出具有切比雪夫响应的微环滤波器, 并传统耦合模式理论方法和理想的切比雪夫响应进行比较, 证明了这种方法的可靠性, 最后讨论了耦合系数和环数对切比雪夫微环滤波器输出特性的影响. 数值模拟表明, 耦合系数的偏差率越大, 通带的平坦性越差; 耦合系数的值增大, 通带的带宽加宽; 当环数增加时, 过渡带衰减速度变快, 通带形状更接近方形.

关键词: 集成光学; 微环滤波器; 切比雪夫滤波器; LC 阶梯网络; 耦合系数

中图分类号: TN252; TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)03-0313003-5

Design of Series-Coupled Chebyshev Microring Filters

LIU Wen-kai, ZHAO Ran-yue, DONG Xiao-wei

(College of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Based on the method of the circuit, N -order series-coupled microring resonator filters was equivalent to a baseband LC ladder network. By solving the element parameters of LC ladder network, the coupling coefficients of microring filters can be obtained. Using this method, microring filters with Chebyshev response were designed. To prove the reliability of this method, it was compared with the traditional coupled mode theory method and the ideal Chebyshev response. Finally, the effects of coupling coefficients and the ring number on the output characteristics of Chebyshev microring filters were discussed. Numerical simulation indicated that the passband flatness was worsened with the deviation of coupling coefficients increasing, and at the same time, the bandwidth of the passband would increase with the coupling coefficients. And a square passband shape was achieved for the larger ring number and the faster transition attenuation.

Key words: Integrated optics; Microring filters; Chebyshev filters; LC ladder network; Coupling coefficient

OCIS Codes: 130.7408; 130.3120; 130.5990; 130.3990

0 引言

随着光通信中密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)系统的不断发展, 平面工艺制作水平的不断提高^[1], 微环谐振器由于其成本低、结构紧凑、插入损耗小等优点, 在滤波、波分复用、解复用等方面都有广泛的应用^[2]. 由微环谐振器所组成的光滤波器因功能强大、结构简单、集成度高等, 已

经成为密集波分复用系统的研究热点^[3-4]. 由于单环谐振滤波器在结构上的固有局限性, 人们采用串联^[5]、并联^[6]或其它复杂结构^[7-8]的高阶微环滤波器, 可以得到近似方形的滤波效果.

目前, 基于串联耦合微环谐振滤波器的设计, 一种是传输矩阵法(Transfer Matrix Method, TMM), 直接分析微环里边的场, 计算结果比较准确, 但过程比较复杂^[9]; 另一种是耦合模式理论(Coupled-mode Theory,

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61007007, 61101110)、北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目、北京市委组织部优秀人才项目(No. 2012D005002000001)和北方工业大学科研人才提升计划项目(No. CCXZ201307)资助

第一作者: 刘文楷(1968—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光子器件及集成技术. Email: liuwk@ncut.edu.cn

收稿日期: 2013-06-04; **录用日期:** 2013-10-09

<http://www.photon.ac.cn>

CMT)法,通过耦合模式理论求出串联耦合微环谐振滤波器的传输矩阵,和理想滤波器的传递函数相比较,得出微环的相关参量,但只能针对某一特定谐振波长处的频率特性进行分析^[10].还有一种方法就是把串联耦合微环滤波器等价成一个带通振荡电路,再利用微波滤波器的设计方法就可以获得比较理想的滤波器响应^[11].此外,还有一些其他的方法^[12].

本文在窄带近似(即微环滤波器的带宽小于其自由频谱范围)条件下,把微环滤波器等价成为一个基带LC阶梯网络,通过LC阶梯网络和所给定的滤波器的传递函数的关系,以及LC阶梯网络和微环滤波器的耦合系数的关系,设计出具有任意频率响应(如,切比雪夫、巴特沃斯、贝塞尔等)的微环滤波器.

1 理论分析

N 阶串联耦合微环谐振滤波器的结构如图1,由两根直波导和 N 个微环串联组成.微环的半径为 R_k ,相邻的微环通过耦合系数 k_k 耦合到一起,第一个和最后一个微环通过耦合系数 k_0 和 k_N 分别耦合到输入和输出波导.光信号 s_i 从input端输入,当环个数 N 为奇数时,满足谐振条件的光从输出output(odd)端输出;当环个数 N 为偶数时,满足谐振条件的光从output(even)端输出,而不满足谐振条件的光从through端输出.光信号 s_i, s_t 代表能量波的幅度.

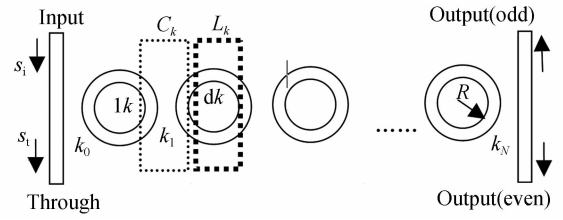


图1 N 阶串联耦合微环谐振滤波器

Fig. 1 N -order series-coupled microring resonator filter

串联耦合微环谐振滤波器可以分解为方向耦合器 C_k 和半环波导 L_k 的级联.不考虑微环的损耗,根据光波导的耦合模式理论,方向耦合器 C_k 的传输矩阵 G_k^C 和半环波导 L_k 的传输矩阵 G_k^L 分别为

$$\begin{cases} G_k^C = j \begin{bmatrix} 1/k_k & -t_k/k_k \\ t_k/k_k & -1/k_k \end{bmatrix} \\ G_k^L = \begin{bmatrix} \exp(j\beta d_k) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta d_k) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $k_k = \exp(j\beta l_k) \sin(c_k l_k)$, $t_k = \exp(j\beta l_k) \cos(c_k l_k)$ 分别为方向耦合器 C_k 的归一化耦合系数和传输系数,即 $k_k^2 + t_k^2 = 1$; c_k 和 l_k 分别为方向耦合器 C_k 的耦合系数和长度; $\beta = (\omega/c) \cdot n_{\text{eff}}$ 为传播常量, ω 为信号的角频率, n_{eff} 为有效折射率; d_k 为半环波导的长度.

根据传输矩阵法,把方向耦合器的传输矩阵 G_k^C 和半环波导的传输矩阵 G_k^L 级联相乘,就得到微环谐振滤波器的传输矩阵,即

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \prod_{k=1 \sim N} (G_k^C \cdot G_k^L) \cdot G_0^C = j^{N+1} \left\{ \prod_{k=1 \sim N} \begin{bmatrix} \exp(j\beta d_k)/k_k & -\exp(-j\beta d_k) \cdot t_k/k_k \\ \exp(j\beta d_k) \cdot t_k/k_k & -\exp(-j\beta d_k)/k_k \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} 1/k_0 & -t_0/k_0 \\ t_0/k_0 & -1/k_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

令 $\phi_k = \beta(l_k + l_{k-1} + 2d_k) = \beta \cdot 2\pi R_k$ 为光信号在微环谐振器环形一周的累积相位.这样,微环滤波器output端的传递函数 $|D(\omega)|^2$ 和through端的传递函数 $|T(\omega)|^2$ 就可以分别表示为 $|D(\omega)|^2 = |1/G_{22}|^2$ 和 $|T(\omega)|^2 = |-G_{21}/G_{22}|^2$.

由式(2),可以观察到微环滤波器的output端和through端的传递函数主要由耦合系数 k_k 决定.因此,要实现通带平坦度和过渡带陡峭度较好的滤波效果,应对耦合系数 k_k 进行优化.本文利用串联耦合微环滤波器的时域耦合微分方程来优化耦合系数.

根据文献^[13], N 阶串联耦合微环谐振滤波器的时域耦合微分方程为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} a_1 &= \left(j\omega_1 - \frac{1}{\tau_c} \right) a_1 - j\mu_1 a_2 - j\mu_0 s_i \\ \frac{d}{dt} a_2 &= j\omega_2 a_2 - j\mu_2 a_3 - j\mu_1 a_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} a_{N-1} &= j\omega_{N-1} a_{N-1} - j\mu_{N-1} a_N - j\mu_{N-2} a_{N-2} \\ \frac{d}{dt} a_N &= \left(j\omega_N - \frac{1}{\tau_d} \right) a_N - j\mu_{N-1} a_{N-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$a_1, a_2 \dots a_N$ 代表波的振幅, $\mu_1, \mu_2 \dots \mu_N$ 代表环间的能量耦合系数,每一个微环在其谐振频率 ω_i 处进行谐振, $1/\tau_c$ 和 $1/\tau_d$ 为微环的损耗.微环滤波器的输入信号 s_i 是一个幅度任意,时间为 $\exp(j\omega t)$ 的光信号,微环中的信号 $a_k(t) = a_k \exp(j\omega t)$.不考虑微环的损耗,可以求出第一个微环中波的振幅 a_1 ^[13].再由入射波 s_i 和透射波 s_t 的关系 $s_t = s_i - j\mu_0 a_1$,得到through端的传输响应 s_t/s_i .

$$\frac{s_t}{s_i} = 1 - \mu_0^2 / \left\{ \frac{\mu_0^2}{2} + j\Delta\omega_1 + \mu_1^2 / \left[j\Delta\omega_2 + \frac{\mu_2^2}{j\Delta\omega_3 + \dots + \mu_{N-1}^2 / (j\Delta\omega_N + \mu_N^2/2)} \right] \right\} \quad (4)$$

研究发现^[14],微环滤波器through端的传输响应

s_i/s_i 与基带 LC 阶梯网络散射矩阵里的反射系数 S_{11} 相类似,即

$$S_{11} = 1 - \frac{2}{sG_1 + 1 + \frac{1}{sG_2 + \dots + (sG_N + 1)^{-1}}} \quad (5)$$

式中, $G_1 = L_1, G_2 = C_2, G_3 = L_3 \dots G_N = L_N$ (N 为奇数) 或 C_N (N 为偶数), $s = j\omega', \omega' = \frac{\omega_0}{B} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \approx \frac{2\Delta\omega}{B}$, $\Delta\omega \ll \omega_0, \omega'$ 是基带 LC 阶梯网络的频率, ω 为微环滤波器的频率, ω_0 是微环滤波器的中心频率, B 为滤波器的带宽。

通过比较连分式(4)和(5),得到微环滤波器的能量耦合系数 μ_k 和基带 LC 阶梯网络的元件参量 G_k 之间的关系为

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{B}{G_1}}, \mu_k = \frac{B}{2\sqrt{G_k G_{k+1}}}, \mu_N = \sqrt{\frac{B}{G_N}} \quad (1 \leq k \leq N-1) \quad (6)$$

因此,可以通过求解 LC 阶梯网络的元件参量的方法,来设计 N 阶串联耦合微环滤波器。

能量耦合系数 μ_k 再转化成和实际制作相关的功率耦合系数 k_k ,其关系为

$$k_0 = \mu_0 \sqrt{\tau_1}, k_k = \mu_k \sqrt{\tau_k \tau_{k+1}}, k_N = \mu_N \sqrt{\tau_N} \quad (1 \leq k \leq N-1) \quad (7)$$

$\tau_k = 2\pi R_k / v_{g,k}$: 波在第 k 个微环中环形一周的时间, R_k : 第 k 个微环的半径, $v_{g,k}$: 第 k 个微环的群延迟。

2 数值计算

切比雪夫滤波器是在通带或阻带上频率响应幅度等波纹波动的滤波器。由于其过渡带衰减速度快,与理想滤波器的频率响应曲线之间的误差最小,已被广泛地使用。以切比雪夫滤波器为例,用基于电路的方法来设计切比雪夫微环滤波器。

首先设计一个 5 阶的切比雪夫微环滤波器,滤波器通带波纹的幅度为 0.01 dB,带宽 $B = 25$ GHz,微环的半径 R_k 取相同的值, $R_k = 40 \mu\text{m}$,中心波长为 1 550 nm,波导的有效折射率 n_{eff} 为 1.6,接下来求微环滤波器的耦合系数 k_k 。

根据切比雪夫滤波器的极点,其值引用参考文献[15], $p = [-0.512 0 \pm i0.587 9, -0.195 6 \pm i0.951 2, -0.632 8]$,求出传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{1}{a_N s^N + a_{N-1} s^{N-1} + \dots + a_1 s + 1} = \frac{1}{(2.757 2s^5 + 5.646 7s^4 + 7.849 5s^3 + 6.722 8s^2 + 3.68s + 1)Q(s)}$$

采用经典的滤波器实现技术—达灵顿方法^[14],用基带 LC 阶梯网络来实现这个传递函数,LC 阶梯网络的反射系数 S_{11} 为

$$S_{11}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = (2.757 2s^5 + 0.180 9s^4 + 2.073 2s^3 + 0.075 1s^2 + 0.310 7s) / (2.757 2s^5 + 5.646 7s^4 + 7.849 5s^3 + 6.722 8s^2 + 3.68s + 1)$$

式中 $P(s)P(-s) = Q(s)Q(-s) - 4$ 。

把反射系数 S_{11} 用连分式展开就可以求得元件参量 G_k 的值,即

$$S_{11} = 1 - \frac{2}{1.008 9s + \frac{1}{1.699 5s + \frac{1}{2.035 6s + \frac{1}{1.669 7s + (0.9463s + 1)^{-1}}}}}$$

对于给定的带宽 B ,根据式(6),由 G_k 就可以获得微环滤波器的能量耦合系数 μ_k ,再由式(7),得到串联耦合切比雪夫微环滤波器优化的功率耦合系数 $k_k = [0.4568, 0.0804, 0.0566, 0.0571, 0.0838, 0.4717]$ 。将优化的耦合系数 k_k 代入由传输矩阵法得到的微环滤波器的传输矩阵式(2),得到滤波器 output 端的输出频谱 $|D(\omega)|^2$,并与利用文献[13]中的时域耦合模式(17)计算的结果,以及理想的 5 阶切比雪夫响应进行比较,输出频谱如图 2 所示。可以看出,三者的响应曲线几乎重合,说明了所设计的微环滤波器满足切比雪夫响应,同时也证明了基于电路方法的准确性和可靠性。

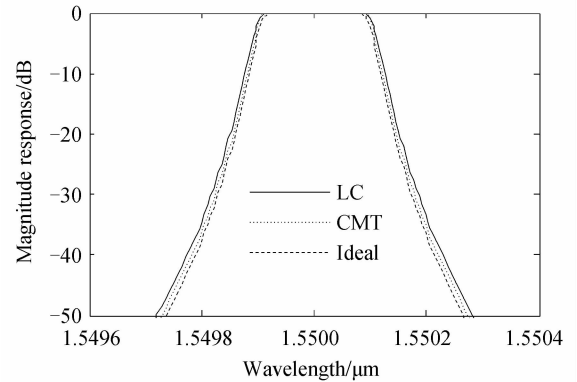


图 2 LC 电路方法、耦合模式理论方法和理想的切比雪夫响应输出频谱的比较

Fig. 2 Comparison of the transmission spectrum calculated by the LC circuit method, couple-mode theory method and ideal Chebyshev

上面求出的微环滤波器的功率耦合系数 $k_k = [0.456 8, 0.080 4, 0.056 6, 0.057 1, 0.083 8, 0.471 7]$ 是优化过的理想值,在实际的加工制作过程中,由于加工技术存在的误差、波导在结构上的不完整性^[16],以及损耗^[17]等原因,使实际所制作器件的耦合系数与优化的理想耦合系数之间不可避免地存在偏差,这会对实际所制作器件的滤波特性产生一定的影响。

用偏差率 α 代表实际制作器件的耦合系数与优化的理想耦合系数之间的偏差程度, k_k 为优化的耦合系

数, k_{kk} 为实际制作器件的带偏差的耦合系数, $\alpha = (|k_{kk} - k_k| / k_k) \cdot 100\%$. 取偏差率 α 分别为 0、2%、5%、10%, 来观察对微环滤波器输出特性的影响. 在这里, 我们取偏差为正值, 即 $k_{kk} - k_k > 0$. 把对应的 k_{kk} 代入微环滤波器 output 端的传递函数 $|D(\omega)|^2$, 输出频谱如图 3 所示. 由图可见, 随着偏差率 α 增大, 即耦合系数增大, 微环滤波器的通带的波纹幅度有一定的变化, 通带的平坦性变差. 因此, 应该在回路的准确度控制和波导品质等方面来加强工艺技术, 尽可能地减小偏差率 α . 可见, 经过优化的耦合系数 k_k , 可以实现较好的滤波特性. 表 1 列出了带偏差的功率耦合系数值.

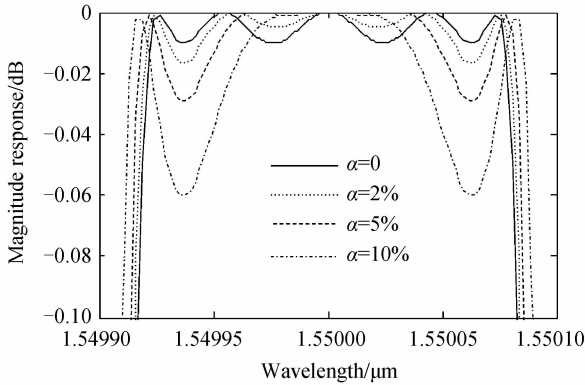


图 3 带偏差的功率耦合系数对微环滤波器输出频谱的影响
Fig. 3 Effect of power coupling coefficient with deviation on the transmission spectrum of microring filters

表 1 带偏差的功率耦合系数

Table 1 The power coupling coefficient with deviation

α	Power coupling coefficient k_{kk}
0	$k_{1k} = [0.456\ 8, 0.080\ 4, 0.056\ 6, 0.057\ 1, 0.083\ 8, 0.471\ 7]$
2%	$k_{2k} = [0.465\ 9, 0.082\ 0, 0.057\ 7, 0.058\ 2, 0.085\ 5, 0.481\ 1]$
5%	$k_{3k} = [0.479\ 6, 0.084\ 4, 0.059\ 4, 0.060\ 0, 0.088\ 0, 0.495\ 3]$
10%	$k_{4k} = [0.502\ 5, 0.088\ 4, 0.062\ 3, 0.062\ 8, 0.092\ 2, 0.518\ 9]$

图 3 分析的是带偏差的功率耦合系数对切比雪夫微环滤波器通带平坦性的影响, 切比雪夫滤波器另外一个显著的特点就是过渡带的陡峭性, 即通带带宽的变化. 改变滤波器的带宽 B , 分别取 25 GHz、30 GHz、35 GHz, 观察对功率耦合系数的影响. 表 2 为其功率耦合系数值, 将 k_{kk} 代入微环滤波器 output 端的传递函数 $|D(\omega)|^2$, 图 4 为其输出频谱. 可以看出, 带宽 B 增大, 对应的图 4 中的滤波器的通带带宽加宽, 表 2 中功率耦合系数的值也增大. 这个结论也可以从图 3 中得到证明, 偏差率 α 越大, 即功率耦合系数值越大, 对应的滤波器的带宽越宽. 因此, 为了保证良好的滤波特性, 耦合系数的值不应取得过大.

表 2 不同带宽 B 对应的功率耦合系数

Table 2 The power coupling coefficient corresponding to the different bandwidth B

B	Power coupling coefficient k_{kk}
25 GHz	$k_{1k} = [0.456\ 8, 0.080\ 4, 0.056\ 6, 0.057\ 1, 0.083\ 8, 0.471\ 7]$
30 GHz	$k_{2k} = [0.500\ 4, 0.096\ 5, 0.067\ 9, 0.068\ 5, 0.100\ 5, 0.516\ 7]$
35 GHz	$k_{3k} = [0.540\ 5, 0.112\ 6, 0.079\ 2, 0.079\ 9, 0.117\ 3, 0.558\ 1]$

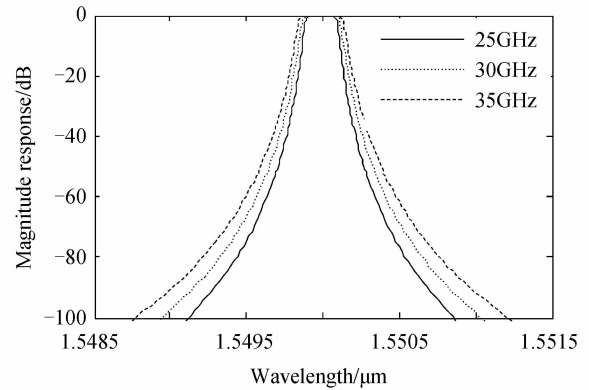


图 4 不同带宽 B 对应的微环滤波器的输出频谱
Fig. 4 Transmission spectrum of microring filters corresponding to the different bandwidth B

上面分析的都是 5 阶的切比雪夫微环滤波器, 接下来, 在保持其它参量不变的情况下, 我们改变微环的数目(即滤波器的阶数), 来观察对其输出特性的影响. 以 3、4、5 阶的切比雪夫微环滤波器为例, 极点值引用参考文献[15], 如表 3 所示. 把对应的耦合系数 k_{kk} 代入微环滤波器 output 端的传递函数 $|D(\omega)|^2$, 输出频谱如图 5 所示. 用带宽比来表征过渡带的陡峭性, 对 20 dB/3 dB 的带宽比进行数值计算, 3、4、5 阶的带宽比分别为 2.07、1.62、1.41. 可见, 微环的个数越多, 带宽

表 3 3、4、5 阶切比雪夫滤波器的极点值

Table 3 Poles of 3、4、5 order Chebyshev filters

The filter order	Chebyshev poles
3	$p_1 = [-0.423\ 3 \pm i0.866\ 3, -0.846\ 7]$
4	$p_2 = [-0.676\ 2 \pm i0.382\ 8, -0.280\ 1 \pm i0.924\ 1]$
5	$p_3 = [-0.512\ 0 \pm i0.587\ 9, -0.195\ 6 \pm i0.951\ 2, -0.632\ 8]$

表 4 3、4、5 阶切比雪夫微环滤波器的耦合系数

Table 4 The power coupling coefficient of 3、4、5 order Chebyshev microring filters

The filter order	Power coupling coefficient k_{kk}
3	$k_{1k} = [0.422\ 2, 0.072\ 3, 0.071\ 8, 0.419\ 4]$
4	$k_{2k} = [0.445\ 6, 0.085\ 2, 0.060\ 3, 0.075\ 4, 0.477\ 6]$
5	$k_{3k} = [0.456\ 8, 0.080\ 4, 0.056\ 6, 0.057\ 1, 0.083\ 8, 0.471\ 7]$

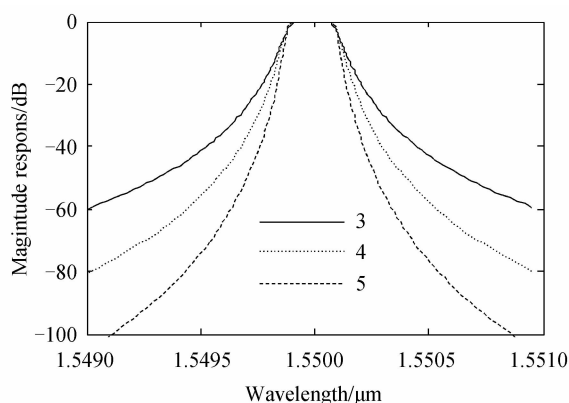


图5 3,4,5阶切比雪夫微环滤波器的输出频谱

Fig.5 Transmission spectrum of 3,4,5 order Chebyshev microring filters

比越小,过渡带衰减速度越快,通带形状更接近方形.表4列出了3,4,5阶切比雪夫微环滤波器的耦合系数值.

3 结论

基于电路的方法,设计出了具有切比雪夫响应的微环滤波器,并与耦合模式理论方法进行比较,证明可以实现和理想的切比雪夫响应几乎重合的输出频谱曲线.研究了耦合系数和环数对滤波特性的影响,结果表明,应适当地控制功率耦合系数的偏差率,保证良好的滤波特性;耦合系数值增大,滤波器带宽加宽;微环的个数越多,过渡带衰减速度越快,通带形状更接近方形.用这种方法,还可以设计出具有其它类型响应的微环滤波器,如,巴特沃斯,贝塞尔等.

参考文献

[1] DONG Xiao-wei, PEI Li, JIAN Shui-sheng. Transfer matrix method for analyzing the characteristics of multiple-ring higher order microring resonators[J]. *Chinese Journal of 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.

[2] SONG Kang, LI Yi-gui, CHEN Shui-liang. Micro-cavity filter based on MEMS micro-fabrication technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(6): 659-661.
宋康,李以贵,陈水良.基于微细加工技术的微谐振腔型滤波器[J].*中国激光*, 2004, **31**(6): 659-661.

[3] DONG Xiao-wei, PEI Li, JIAN Shui-sheng. Characteristic analyses of series-coupled multiple-ring resonator filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 207-211.
董小伟,裴丽,简水生.集成串联环型谐振光滤波器特性的数值分析[J].*光学学报*, 2006, **26**(2): 207-211.

[4] HOU Yu-wen, XIE Sheng. Semiconductor microring resonator and its application in optical filter[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2010, **25**(1): 33-37.
侯玉文,谢生.半导体微环谐振器及在光学滤波中的应用[J].*光电技术应用*, 2010, **25**(1): 33-37.

[5] GAO Zhen-sen, LI Chun-fei. Optical properties of the series-coupled microring resonators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(5): 675-679.
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.

[6] 马春生,刘式墟.光波导模式理论[M].长春:吉林大学出版社,2006.

[7] ALAN TASY, VIEN VAN. Analysis of coupled microring resonators in sheared lattices[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(18): 1625-1627.

[8] SHUICHI SUZUKI, YUTAKA HATAKEYAMA, YASUO KOKUBUN. Precise control of wavelength channel spacing of microring resonator add-drop filter array [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(4): 745-750.

[9] JOYCE K S POON, JACOB SCHEUER, GEOTGE T, et al. Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(1): 90-103.

[10] HSI-CHUN LIU, AMNON YARIV. Synthesis of high-order bandpass filters based on coupled-resonator optical waveguides (CROWs)[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(18): 17653-17668.

[11] ANDREA MELLONI, MARIO MARTINELLI. Synthesis of direct-coupled-resonators bandpass filters for WDM systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(2): 296-303.

[12] ZHANG Bin, ZHANG Shu-mei. Design method of optical filter based on semiconductor micro-ring resonator[J]. *Novel Semi-conductor Device*, 2012, **37**(1): 24-28.
张彬,张淑梅.基于半导体微环谐振器的光滤波器设计方法[J].*新型半导体器件*, 2012, **37**(1): 24-28.

[13] LITTLE B E, CHU S T, HAUS H A, et al. Microring resonator channel dropping filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(6): 998-1005.

[14] VIEN VAN. Circuit-based method for synthesizing serially coupled microring filters [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(7): 2912-2919.

[15] 亚瑟 B 威廉姆斯,弗雷德 J 泰勒.电子滤波器设计[M].宁彦卿,姚金科,译.4版.北京:科学出版社,2008.

[16] LI Shuai, WU Yuan-da, YIN Xiao-jie, et al. Tunable filters based on SOI microring-resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1143-1148.
李帅,吴远大,尹小杰,等.基于绝缘硅的微环谐振可调谐滤波器[J].*光子学报*, 2011, **40**(8): 1143-1148.

[17] LIU Xin, KONG Mei, WANG Xue-ping. Influence of loss on filtering characteristics of series coupled two-microring resonators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 247-250.
刘鑫,孔梅,王雪萍.损耗对串联双微环谐振器滤波特性的影响[J].*光子学报*, 2011, **40**(2): 247-250.