

# 并联五微环谐振器频带的输出频谱研究与应用

连乐, 付杰, 杨超山, 韩根亮

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 提出了一种并联五微环谐振器模型, 利用传输矩阵法对并联微环的输出函数进行建模, 采用 Matlab 仿真软件对输出频谱强度进行分析; 设置微环间距与微环周长比分别为 0.25 和 0.50, 研究谐振器频带和叠加频带的频谱输出特性。通过优化传输耦合系数、系统折射率、微环半径等参数获得形状因子超过 0.85, 阻带串扰小于  $-25$  dB 的谐振器频带, 并级联 4 个并联微环阵列, 实现  $1 \times 4$  密集波分复用器。

**关键词** 光学器件; 并联五微环; 布拉格谐振; 密集波分复用器; 传输矩阵法

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.032302

## Research and Application of Output Spectrum of Parallel Five-Microring Resonator Frequency Band

Lian Le, Fu Jie, Yang Chaoshan, Han Genliang

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract** A parallel five-microring resonator model is proposed. The output function of parallel microring is modeled by transmission matrix method, and Matlab simulation software is used to analyze the output spectrum intensity. The spectral output characteristics of resonator bands and superposition bands are researched when ratio between microring spacing and microring circumference are 0.25 and 0.50, respectively. By optimizing the coupling coefficient of transmission, system refractive index, microring radius and other parameters, the resonator frequency bands whose shape factor is larger than 0.85 and stopband crosstalk is less than  $-25$  dB are obtained. Four parallel microring arrays are cascaded to achieve  $1 \times 4$  dense wavelength division multiplexer.

**Key words** optical devices; parallel five-microring; Bragg resonance; dense wavelength division multiplexer; transmission matrix method

**OCIS codes** 230.5750; 050.2770; 350.2770; 350.5500; 350.6090

## 1 引言

在光通信系统中, 密集波分复用器(DWDM)技术可以有效提高系统的传输容量<sup>[1]</sup>。近年来, 已被证明能够实现 DWDM 的方法有: 微环、阵列波导光栅、级联马赫-曾德尔干涉仪和光子晶体。由于微环拓扑多样, 便于在光网络中集成, 滤波性能优越, 因此得到广泛研究。Cho 等<sup>[2]</sup>设计了微环间距与微环周长比值为 0.5 的五环并联结构, 其输出频谱为 1550 nm 的矩形盒状通带(RB)与布拉格带(BB)叠加带, 设置微环有效折射

率差为 0.002 时可实现波分复用功能, 但其形状因子较低, 通带不平坦; 近期 Yan 等<sup>[3]</sup>设计了微环子母环型结构的 DWDM, 利用母环与子环的二次谐振输出二阶滤波波响应, 其消光比为  $-18$  dB, 形状因子为 0.4, 母环周长为  $133 \mu\text{m}$ ; Mancinelli 等<sup>[4]</sup>利用七环并联结构设计了  $1 \times 4$  波分复用器, 通过改变特定的微环间距实现波分复用功能, 但是增加了系统的复杂度; Heebner 等<sup>[5]</sup>分析了五环并联微环中的局部式反馈和分布式反馈, 将微环间距与微环周长比优化为 0.75, 使输出频谱出现单个 RB, 但 RB 周围依然存在布拉格谐振带, 导致波分

收稿日期: 2017-09-14; 收到修改稿日期: 2017-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(61366006)、甘肃省自然科学基金(1610RJZA046)、甘肃省建设科技攻关项目(JK2016-7)、甘肃省高等学校科研项目(216132)

作者简介: 连乐(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体器件与集成光电子技术方面的研究。E-mail: 1229739617@qq.com

导师简介: 王永顺(1958—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事新型半导体器件等方面的研究。E-mail: 79187957@qq.com

复用器的信道串扰增大。五环并联增大了输出频谱的形状因子,却带来了强度为 0.5 的旁瓣。传统的并联型波分复用器通常是基于 RB 与 BB 的叠加带设计的,带宽较宽且易受传输耦合系数的影响。

两个平行波导与多个微环耦合构成的并联微环阵列的相邻微环之间无耦合,避免了谐振波长的分裂,因此输出的频谱具有优良的滤波特性。此外,并联微环阵列的直波导会发生布拉格谐振,通过改变微环间距可以使频谱具有不同的滤波特性<sup>[6]</sup>。本文通过 Matlab 仿真分析并联五微环在叠加频带和谐振器频带上的滤波特性;通过优化传输耦合系数、系

统折射率、微环半径等参数,获得高达 0.85 的形状因子,并根据这一滤波特性设计了新型 DWDM。

## 2 并联微环阵列传输矩阵

图 1 是并联微环阵列示意图。并联微环阵列是由两条平行信道和  $i+1$  个并联微环构成,  $MR_{i+1}$  表示第  $i+1$  个微环。令微环半径为  $R$ ,  $L_s$  表示相邻微环的间距。仿真中最小微环半径为  $10 \mu\text{m}$ , 则最小微环间距为  $15.7 \mu\text{m}$ , 相邻微环间的耦合完全可以忽略。  $a_1, b_1$  是并联微环阵列的输入端和下载端,  $a_{i+1}, b_{i+1}$  是并联微环阵列的直通端和加载端。

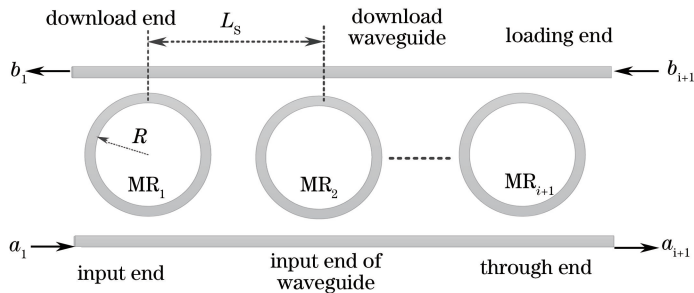


图 1 并联微环阵列示意图

Fig. 1 Schematic of parallel microring array

图 2 是并联微环阵列分解后的传输单元示意图,每个传输单元由微环单元和直波导单元构成。其中,  $a_i, b_i$  是传输单元的输入端和下载端,  $a_{i+1}, b_{i+1}$  是传输单元的直通端和加载端,  $R$  是微环  $MR_{i+1}$  的半径,  $\mathbf{A}_{i+1}$  是微环单元的传输矩阵,  $\mathbf{M}_i$  是微环间距为  $L_s$  的直波导单元的传输矩阵。

图 2 是传输单元模型图。它展示了传输单元的分解。左侧是一个直波导单元 (straight waveguide unit)，由两个平行的波导组成，间距为  $L_s$ 。右侧是一个微环单元 (microring unit)，由一个半径为  $R$  的微环与波导耦合而成。总传输矩阵单元  $\mathbf{A}_{i+1}\mathbf{M}_i$  由直波导单元传输矩阵  $\mathbf{M}_i$  和微环单元传输矩阵  $\mathbf{A}_{i+1}$  组成。输入端口为  $a_i$  和  $b_i$ ，输出端口为  $a_{i+1}$  和  $b_{i+1}$ 。

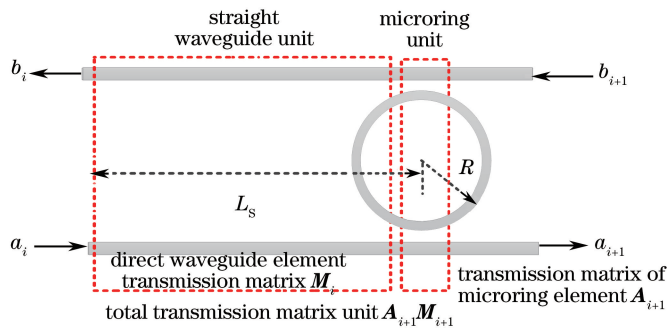


图 2 传输单元模型图

Fig. 2 Diagram of transmission unit model

光在微环中传播一周的相位  $\phi = 2\pi R_{i+1}\beta$ 。设光在微环中传播一周的增益为  $Z$ , 则  $Z = BQ$ 。其中,  $B = \exp(-j\phi)$  为光在微环中传播一周的相位变化引起的增益,  $Q = \exp(-\alpha\pi R)$  为光在微环中传播一周的振幅衰减因子,  $\alpha$  为损耗系数。设微环与波导间的传输耦合系数  $t_1 = t_2$ , 微环  $MR_{i+1}$  的直通端频谱强度  $T_{i+1}$  和下载端频谱强度  $D_{i+1}$  为:

$$T_{i+1} = \frac{t_{i+1}(1-Z)}{1-t_{i+1}^2 Z}, \quad (1)$$

$$D_{i+1} = \frac{-k_{i+1}^2 Z^{0.5}}{1-t_{i+1}^2 Z}. \quad (2)$$

微环单元传输矩阵  $\mathbf{A}_{i+1}$  可表示为:

$$\mathbf{A}_{i+1} = T_{i+1}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -R_{i+1} \\ R_{i+1} & T_{i+1}^2 - R_{i+1}^2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

直波导传输矩阵  $\mathbf{M}_i$  可以表示为:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} Y_i^{-1} & 0 \\ 0 & Y_i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $Y_i = \exp(-jL_s\beta)$ 。总传输矩阵为  $\mathbf{A}_{i+1}\mathbf{M}_i$ , 各

端口之间的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} b_{i+1} \\ a_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{i+1} \mathbf{M}_i \begin{bmatrix} b_i \\ a_i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

总传输矩阵  $\mathbf{M}$  满足:

$$\begin{bmatrix} b_{i+1} \\ a_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{i+1} \mathbf{M}_i \mathbf{A}_i \mathbf{M}_{i-1} \cdots \mathbf{A}_2 \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$ ,  $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $m_{21}$ 、 $m_{22}$  是矩阵  $\mathbf{M}$  的元素。因为加载端无输入, 即  $b_{i+1} = 0$ , 所以直通端频谱强度  $T$  和下载端频谱强度  $D$  可分别表示为:

$$T = \left| \frac{a_{i+1}}{a_1} \right|^2 = \left| \frac{\det[\mathbf{M}]}{m_{11}} \right|^2, \quad (7)$$

$$D = \left| \frac{b_{i+1}}{a_1} \right|^2 = \left| -\frac{m_{12}}{m_{11}} \right|^2. \quad (8)$$

### 3 并联五环的输出频谱仿真

#### 3.1 谐振条件分析

微环谐振和布拉格谐振分别满足独立的谐振条件。布拉格谐振条件是微环环心之间的光路  $L_S N_{\text{eff}}$  等于半波长的整数倍:

$$M_B \lambda_B = 2L_S N_{\text{eff}}, \quad (9)$$

式中  $M_B$  为布拉格谐振级数, 取正整数,  $\lambda_B$  为布拉

格波长,  $N_{\text{eff}}$  为系统折射率。

根据(1)式有:

$$M_R = \frac{2\pi R N_{\text{eff}}}{\lambda_R}, \quad (10)$$

$$M_B = \frac{2L_S N_{\text{eff}}}{\lambda_B}. \quad (11)$$

由(10)~(11)式可知,  $M_R$  与  $\lambda_R$  成反比,  $M_B$  与  $\lambda_B$  成反比。设置微环间距为  $L_S = 0.5\pi R$ , 在同一波长处有  $M_R = 2M_B$ , 独立的谐振器频带和叠加频带在整个频谱上交替出现; 设置微环间距为  $L_S = \pi R$ , 在同一波长处有  $M_R = M_B$ , 谐振器频带和布拉格频带在整个频谱上完全重合, 输出频谱为叠加频带。下面分别研究五微环并联阵列下载端的谐振器频带、叠加频带及布拉格频带的分布, 并重点研究谐振器频带与叠加频带的滤波特性。

#### 3.2 并联五环结构模型

图3是五微环并联阵列的结构示意图,  $MR_1 \sim MR_5$  为5个微环, 加载端无输入,  $t_1 \sim t_5$  表示各微环与波导间的传输耦合系数, 令微环对称耦合单元的传输耦合系数相等。波导在下载端发生布拉格谐振, 类似于布拉格光栅中各反射波发生谐振<sup>[7]</sup>, 输出频谱为布拉格频带, 布拉格频带的频谱特性易受传输耦合系数的影响<sup>[8]</sup>。

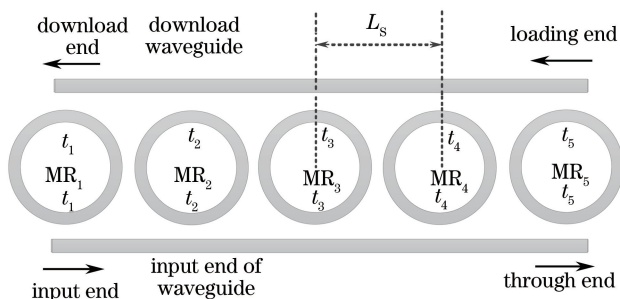


图3 并联五微环阵列结构示意图

Fig. 3 Schematic of parallel five-microring array

#### 3.3 输出频谱仿真

##### 1) $L_S$ 为 $0.5\pi R$

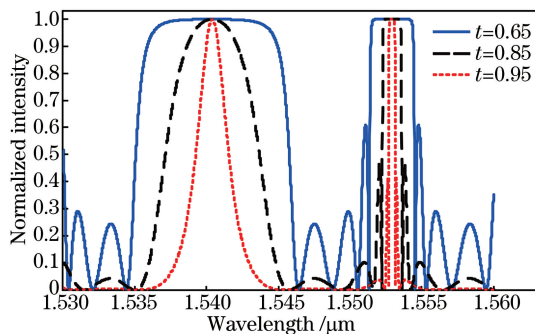
为简便起见, 令传输耦合系数  $t_1 \sim t_5$  均为  $t$ 。图4是微环间距为  $0.5\pi R$  时, 传输耦合系数  $t$  对下载端频谱的影响。微环半径为  $10 \mu\text{m}$ , 系统折射率为 3.04。频谱中有两种不同的通带, 对应的谐振波长分别为  $1.5405 \mu\text{m}$  和  $1.5525 \mu\text{m}$ 。

仿真结果表明, 当  $t$  为 0.65 时, 谐振器频带的半峰全宽(FWHM)为 3.2 nm, 形状因子为 0.98, 阻带串扰归一化强度为 0.62; 当  $t$  为 0.85 时, 谐振器频带 FWHM 为 1.38 nm, 形状因子为 0.96, 阻带串

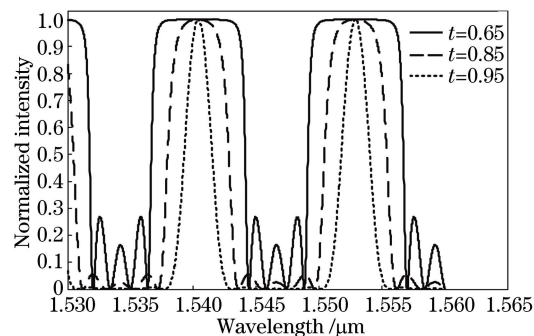
扰归一化强度为 0.48; 当  $t$  为 0.95 时, 谐振器频带 FWHM 为 0.46 nm, 形状因子为 0.95, 阻带串扰归一化强度为 0.41。因此, 随着传输耦合系数的增大, 谐振器频带的通带由平坦变尖锐, 形状因子缓慢减小, FWHM 变窄, 阻带串扰归一化强度减弱, 滤波性能增强。

##### 2) $L_S$ 为 $\pi R$

图5是微环间距为  $\pi R$  时, 传输耦合系数  $t$  对下载端频谱的影响。仿真结果表明, 当  $t$  为 0.65 时, 叠加频带 FWHM 为 7.7 nm, 形状因子为 0.95, 阻带串扰归一化强度为 0.28; 当  $t$  为 0.85 时, 叠加

图4 传输耦合系数不同时的下载端频谱 ( $L_s = 0.5\pi R$ )Fig. 4 Downloaded frequency spectra with different transmission coupling coefficients ( $L_s = 0.5\pi R$ )

频带 FWHM 为 5 nm, 形状因子为 0.81, 阻带串扰归一化强度为 0.10; 当  $t$  为 0.95 时, 叠加频带 FWHM 为 2.3 nm, 形状因子为 0.48, 阻带串扰归一化强度为 0.01。因此, 随着传输耦合系数的增大, 叠加频带由平坦变尖锐, 形状因子急剧降低, FWHM 变窄, 阻带串扰归一化强度减弱, 滤波性能急剧降低, 叠加频带在整个频谱上呈周期等通带分布。

图5 传输耦合系数不同时的下载端频谱 ( $L_s = \pi R$ )Fig. 5 Downloaded frequency spectra with different transmission coupling coefficients ( $L_s = \pi R$ )

### 3.4 谐振器频带输出频谱研究

微环半径为  $10 \mu\text{m}$ , 微环损耗系数为  $0 \text{ dB/cm}$ ,  $N_{\text{eff}}$  取 3.04 时, 对传输耦合系数进行优化, 当  $t_1 = 0.95, t_2 = 0.90, t_3 = 0.89, t_4 = 0.90, t_5 = 0.95$  时, 滤波器仿真频谱如图 4 所示。

图 6 为优化后的谐振器通带频谱图。从图 6 可以看出, 频带平坦, 通带的 FWHM 为  $0.9 \text{ nm}$ , 形状因子高达 0.9, 其频谱图中阻带的波纹强度为  $-27 \text{ dB}$ , 满足实际使用中对阻带串扰小于  $-25 \text{ dB}$  的要求。

#### 1) 系统折射率

图 7 是系统折射率对谐振器频带的影响。其中, 微环半径为  $10 \mu\text{m}$ , 微环损耗系数为  $0 \text{ dB/cm}$ ,  $N_{\text{eff}}$  分别取 3.040、3.043、3.046、3.049, 传输耦合系数取  $t_1 = 0.95, t_2 = 0.9, t_3 = 0.89, t_4 = 0.9, t_5 = 0.95$ 。

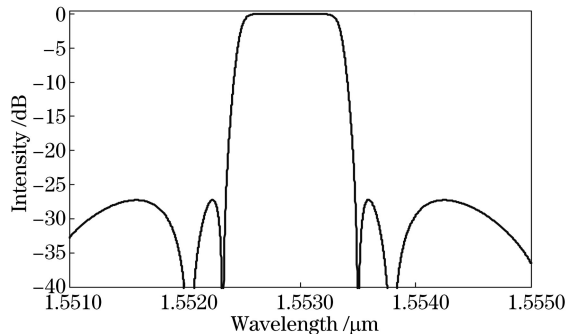


图6 优化后的谐振器频带的频谱图

Fig. 6 Spectrogram of the optimized resonator frequency band

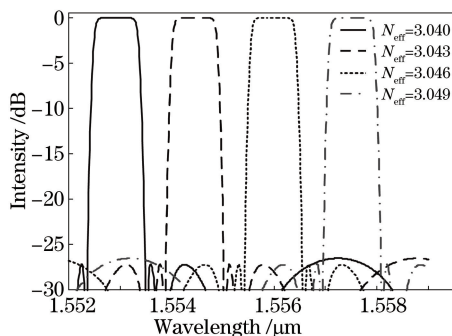


图7 系统折射率不同时的谐振器频带

Fig. 7 Frequency bands of resonator with different system refractive indexes

仿真结果表明, 系统折射率每增大 0.003, 谐振波长右移  $1.5 \text{ nm}$ 。谐振器频带为“箱型”, FWHM 为  $0.9 \text{ nm}$ 。随着系统折射率的增大, 各谐振器频带谐振波长频率间隔为  $187.5 \text{ GHz}$ , 阻带串扰小于  $-25 \text{ dB}$ 。

#### 2) 微环半径

图 8 是微环半径对谐振器频带的影响。仿真结果表明, 微环半径为  $10 \mu\text{m}$  时, 谐振器频带 FWHM 为  $0.9 \text{ nm}$ , 形状因子为 0.9; 微环半径为  $30 \mu\text{m}$  时, 谐振器频带 FWHM 为  $0.3 \text{ nm}$ , 形状因子为 0.89; 微环半径为  $50 \mu\text{m}$  时, 谐振器频带 FWHM 为  $0.17 \text{ nm}$ , 形状因子为 0.85。单个谐振器频带为“箱型”, 阻带串扰基本不变。微环半径对谐振器频带的 FWHM 影响较大。

#### 3) 微环损耗系数

表 1 为仿真参数对比。仿真结果表明, 当微环半径为  $40 \mu\text{m}$  时, 增大微环损耗系数, 会使谐振器频带插入损耗增大, 形状因子降低, 阻带串扰增大, 带宽变窄。在器件制造时要降低工艺的误差, 减小微环的损耗系数。可以通过使用互补金属氧化物半导体 (CMOS) 兼容的深紫外 (UV) 光刻法或电子束 (E 束) 光刻使微环的波导侧壁粗糙度最小化, 以减小

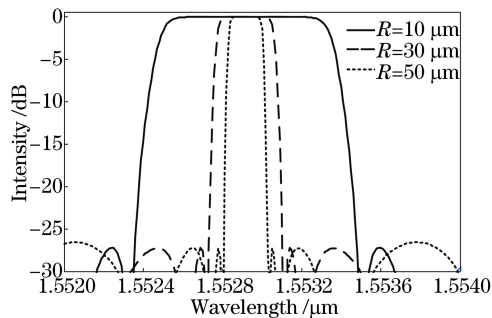


图 8 微环半径不同时的谐振器频带

Fig. 8 Frequency bands of resonator with different microring radii

微环损耗系数<sup>[9]</sup>。事实上(图9旨在进一步说明损

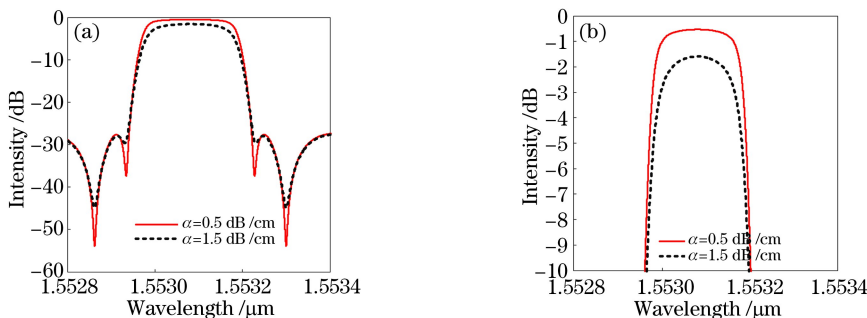


图 9 (a)微环损耗系数和(b)分部增益对谐振器频带的影响

Fig. 9 Influence of (a) loss coefficient of microring and (b) fractionated gain on frequency band of resonator

表 1 仿真参数对比

Table 1 Simulation parameter comparison

Microring radius / $\mu\text{m}$	Loss coefficient of microring / $(\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1})$	Tape width /GHz	Insertion loss /dB	Stopband crosstalk /dB	Form factor
40	0.5	26.25	-0.5	-26.5	0.86
40	1.5	25.00	-1.6	-27.0	0.83

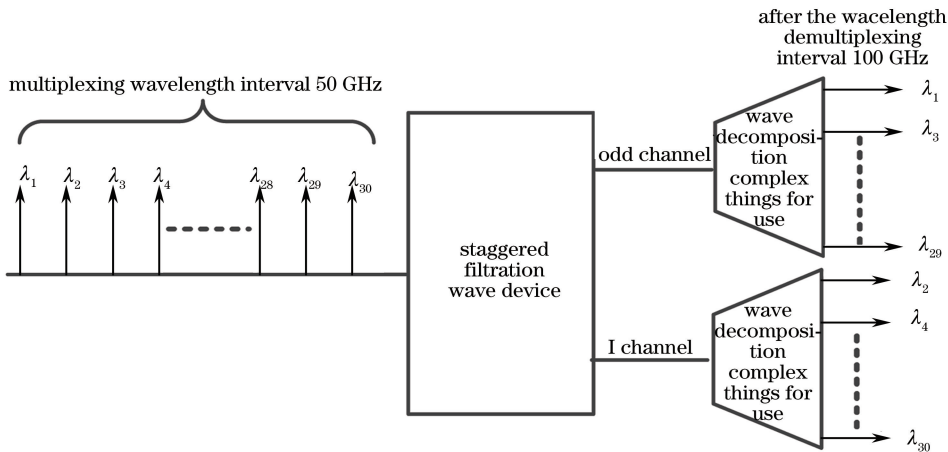


图 10 波长解复用原理图

Fig. 10 Diagram of wavelength demultiplexing

4.2 DWDM 设计

将 4 个并联微环阵列级联,通过电光(EO)调制微环阵列的系统折射率改变  $1 \times 10^{-4}$ ,可实现  $1 \times 4$

耗以及直观展示表 1 结论)已经可以达到 1.7 dB/cm,可以减小通带的插入损耗,如图 9 及表 1 所示。

4 谐振器频带应用

4.1 DWDM

目前,信道间隔为 100 GHz 的 32 路和 40 路 DWDM 系统已得到了普遍应用,在信道数目不断增加的同时,为了提高带宽利用率,DWDM 系统的信道间隔已经从 100 GHz 向 50 GHz 乃至 12.5 GHz 的超密集波分复用发展<sup>[4]</sup>。图 10 所示为波长解复用原理图,将多个波长从解复用器的输出端输入,可以实现波分复用的功能。

DWDM<sup>[10]</sup>。如图 11 所示,微环半径  $R = 42 \mu\text{m}$ ,损耗系数为 0.5 dB/cm,并联微环阵列中,所有微环间距  $L_s = 0.5\pi R$ 。各微环阵列按从下到上顺序分别标



记为阵列 1、阵列 2、阵列 3 和阵列 4。 $N_1 \sim N_4$  为谐振器阵列 1~阵列 4 的系统折射率,分别取 3.0425、3.0429、3.0433、3.0437。当波长  $\lambda_1 \sim \lambda_4$  从 input/output 端输入时,在  $C_1$  信道输出  $\lambda_1$ ,在  $C_2$  信道输出  $\lambda_2$ ,在  $C_3$  信道输出  $\lambda_3$ ,在  $C_4$  信道输出  $\lambda_4$ ,实现解复用功能;当波长从  $C_1 \sim C_4$  信道输入时,4 个波长全部从 input/output 端口输出,实现波长复用功能,所有信道都是双向的。

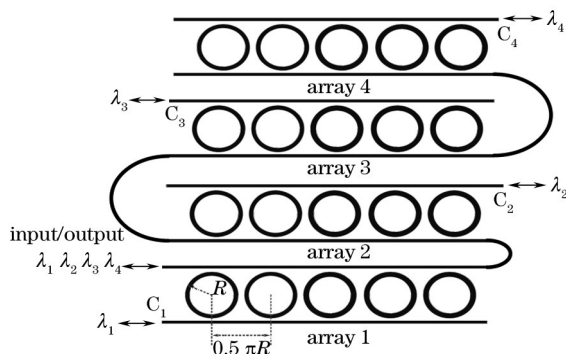


图 11  $1 \times 4$  的 DWDM 示意图

Fig. 11 Schematic of  $1 \times 4$  DWDM

图 12 是 DWDM 各信道输出频谱图。其中,传输耦合系数设置为  $t_1 = 0.95, t_2 = 0.90, t_3 = 0.89, t_4 = 0.90, t_5 = 0.95$ 。仿真结果表明,各相邻通带有均匀的信道间隔,第 1 条信道通带几乎不受相邻信道串扰的影响,第 2 条信道相邻信道串扰是

第 1 条信道带来的。由于受前面阵列输入信号的影响,第 4 条信道通带内串扰最多,包含其余信道带来的串扰。

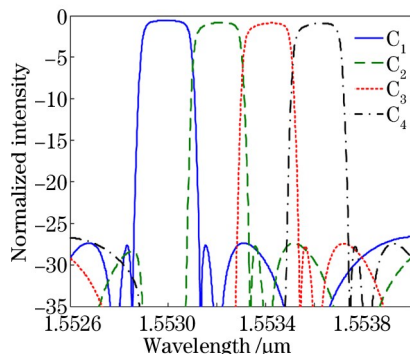


图 12 DWDM 信道输出的频谱图

Fig. 12 Frequency spectra of DWDM channel output

表 2 为 DWDM 各信道参数。随着波长从信道  $C_1 \sim C_4$  输出,各信道的插入损耗不断增大,阻带串扰不断增大<sup>[11]</sup>。这是由于信号总是在前一阵列处理后才输入到下一阵列,使下一信道插入损耗和阻带串扰增大<sup>[4]</sup>。仿真结果表明,DWDM 信道间隔约为 25 GHz(0.2 nm),信道串扰均小于 -25 dB,形状因子大于 0.85,基本达到密集波分复用系统的要求<sup>[12]</sup>。利用改进型微环阵列的波长路由的特性,可以实现丰富的光学路由功能,并设计多种光学器件,如光开关、光路由器等。

表 2 DWDM 各信道参数

Table 2 Parameters of different DWDM channels

Channel	FWHM /nm	Tape width /GHz	Form factor	Insertion loss /dB	Stopband crosstalk /dB
$C_1$	0.20	25.0	0.85	-0.50	-28.4
$C_2$	0.19	23.8	0.86	-0.80	-27.6
$C_3$	0.19	23.8	0.86	-0.85	-27.4
$C_4$	0.19	23.8	0.86	-0.90	-27.3

## 5 结 论

基于微环间距与微环周长比为 0.25 的并联五微环谐振器,研究了谐振器频带的滤波特性,提出了谐振器频带的  $1 \times 4$  DWDM,并对输出信道的性能进行仿真分析。与传统并联微环阵列相比,改进的并联五微环优化了传输耦合系数、系统折射率、微环半径等参数,获得超过 0.85 的形状因子,并利用这一滤波特性设计实现了新型  $1 \times 4$  DWDM。综上所述可得:1) 并联五微环谐振器的形状因子高于 0.85; 2) 当微环间距与微环周长比值为 0.25 时,单个 RB 最稳定,不受布拉格谐振的影响,旁瓣强度最低; 3) 随着传输耦合系数的增大,单个 RB 的 3 dB 带宽减

小,旁瓣强度降低,形状因子基本不变,且不受布拉格谐振的影响; 4) 随着系统折射率的增大,单个 RB 会向右移动,可以通过设置折射率差来实现 RB 均匀信道,通过降低  $1 \times 4$  DWDM 的系统折射率差,可使信道密集度增加一倍,虽然消光比增加了 9 dB,但信道串扰降低了 3.3 dB; 5) 设计的  $1 \times 4$  DWDM,信道间隔约为 25 GHz(0.2 nm),信道串扰均小于 -25 dB,形状因子大于 0.85,通带更平坦。

## 参 考 文 献

- [1] Liao L, Samara-Rubio D, Liu A, *et al.* High speed metal-oxide-semiconductor capacitor-based silicon optical modulators [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(8): 6603-6608.

- [2] Cho S Y, Soref R. Apodized SCISSORs for filtering and switching [J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 19078-19090.
- [3] Yan H, Feng X, Zhang D, *et al.* Compact optical add-drop multiplexers with parent-sub ring resonators on SOI substrates [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(15): 1462-1465.
- [4] Mancinelli M, Guider R, Bettotti P, *et al.* Coupled-resonator-induced-transparency concept for wavelength routing applications [J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12227-12240.
- [5] Heebner J E, Chak P, Pereira S, *et al.* Distributed and localized feedback in microresonator sequences for linear and nonlinear optics [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(10): 1818-1832.
- [6] Bai S, Wang J Y, Zhang L, *et al.* Development progress and trends of space optical communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070001.  
白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 070001.
- [7] Zhang X B. Theoretical and experimental study on microring resonators and applications [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.  
张小贝. 微环谐振器及应用的理论与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [8] Tong C Z, Wang L J, Tian L C, *et al.* Study on Bragg reflection waveguide diode laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 480-498.  
佟存柱, 汪丽杰, 田思聪, 等. 布拉格反射波导半导体激光器的研究 [J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 480-498.
- [9] Ma J, Wu X Y, Liu X J, *et al.* Research on the absorption property of defect layer in photon crystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0306002.  
马季, 吴向尧, 刘晓静, 等. 光子晶体缺陷层吸收特性的研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0306002.
- [10] Liu W, Romeira B, Li M, *et al.* A Wavelength tunable optical buffer based on self-pulsation in an active microring resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(14): 3466-3472.
- [11] Yuan Y L, Zheng X B, Wu H Y, *et al.* A intensity modulated spectro-polarimetric analyzer based on Fourier transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1223001.  
袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪 [J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1223001.
- [12] Xu Q, Shakya J, Lipson M. Direct measurement of tunable optical delays on chip analogue to electromagnetically induced transparency [J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6463-6468.