

密集波分复用器慢光效应仿真研究

吴蓉, 胡延伟*, 岳云龙

兰州交通大学电子信息与工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 在传统的并联微环结构中,可通过改变相干距离来实现慢光效应的调谐,但动态调谐无法实现。在包层中嵌入加热器的改进型微环阵列,利用热光调谐相邻环之间的相移器,实现连续调节任意信道的慢光效应。利用传输矩阵法建立密集波分复用器(DWDM)的函数模型,Matlab 仿真分析 1×4 密集波分复用器的慢光效应。仿真结果表明:改变相应微环之间的附加相移,DWDM 具有可调谐光延迟信道的特性,输出信道频谱强度的半峰全宽(FWHM)约为 0.05 nm,信道间隔为 100 GHz。该方法具有光延迟信道可切换、可动态调谐的特性,增强了光学器件的灵活性。

关键词 光纤光学; 相干距离; 密集波分复用器; 矩阵传输法; 附加相移

中图分类号 TN256 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040605

Simulation on Slow Light Effect of Dense Wavelength Division Multiplexer

Wu Rong, Hu Yanwei, Yue Yunlong

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

Abstract In the traditional parallel micro-ring structure, we can achieve the slow light effect tuning by adjusting the coherence distance, but cannot achieve dynamic tuning. Improved micro-ring array, embedding the heater in the cladding, uses thermo-optical tunability to adjust the adjacent ring between the phase shifter, in order to achieve continuous adjustment of any channel slow light effect. We use the transfer matrix method to establish the function model of dense wavelength division multiplexing (DWDM) and simulate the slow light effect of 1×4 DWDM by Matlab. The simulation results show that the DWDM with tunable optical delay channel is obtained by changing the additional phase shift between the corresponding microcircuits, the full width at half maximum (FWHM) of spectral intensity for out channel is about 0.05 nm, and the channel spacing is 100 GHz. The method can switch and dynamically adjust optical delay channel, and enhance the flexibility of the optical device.

Key words fiber optics; coherent distance; dense wavelength division multiplexer; matrix transfer method; additional phase shift

OCIS codes 060.4230; 050.2770; 350.2770; 350.5500; 350.6090

1 引言

近年来,光通信应用前景广阔^[1],基于微环谐振器的光学延迟线受到广泛关注。已被证明能够实现光延迟的器件有:微环谐振器、阵列波导光栅^[2]、级联马赫-曾德尔干涉仪^[3]和光子晶体^[4]。由于微环

拓扑多样^[5-6],在耦合谐振系统中基于色散介质的慢光产生技术受到了越来越多的关注,该技术可以通过调节介质的结构和尺寸实现其慢光延迟带宽和延迟时间的调谐,达到光延迟线优化的目的。

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^[7]。基于环形

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61366006)

作者简介: 吴蓉(1968—),女,教授,硕士生导师,主要从事半导体器件与集成光电子技术方面的研究。

E-mail: 759165367@qq.com

* 通信联系人。E-mail: 18894490662@163.com

耦合谐振系统的慢光结构,及其在高灵敏度、高集成化的光学转动传感器和光学陀螺方面的应用已经成为光通信的研究热点之一^[8],传统的慢光延迟器件伴随着低的传输强度,DWDM技术利用耦合谐振腔诱导透明(CRIT)效应,产生慢光的同时可以保持光的强度^[9-10]。Mancinelli等^[11]利用7环并联结构设计了 1×4 波分复用器,通过改变特定的微环间距来实现波分复用功能,并列出了各参数取值范围,但该方法不能灵活切换慢光信道。为了实现光的调制,2012年,Masilamani等^[12]设计和实验证明了一种新型微环谐振器,级联组成的微环通过 π 移相元件连接,从而改变光积累的有效相移,实现了可调制的滤波器。2016年,Ehteshami等^[13]通过非线性热效应实现了相移在 2π 范围内的可调谐移相器。为了实现连续调制,可以在包层中嵌入加热器,利用热光调谐在相邻环之间施加连续可变的附加相移^[14-15]。

本文用传输矩阵法推导了并联多微环结构直通端和下载端函数,利用4个并联7微环结构级联,通过在连接2个相邻微环的波导上添加附加相移,设计了基于微环谐振的 1×4 密集波分复用器,利用

Matlab对满足100 GHz频率间隔的DWDM的参数进行了仿真优化,并对仿真输出频谱进行了分析。结果显示:对双波导平行耦合微环谐振器任意慢光效应信道实现调节的同时,不会对其他信道产生太大影响。

2 传输矩阵建立

图1(a)为并联多微环结构示意图,由两条波导和 $i+1$ 个并联微环构成, R_{i+1} 表示第 $i+1$ 个微环, N 表示微环总个数。令所有微环半径为 r , L 表示相邻微环的间距, L 足够大,则相邻微环之间的耦合可以忽略。 a_0 、 b_0 分别为并联微环阵列的输入端和下载端信号, a_{i+1} 、 b_{i+1} 分别是并联微环阵列的直通端和加载端信号。图1(b)为微环传输矩阵 \mathbf{A}_{i+1} 与波导传输矩阵 \mathbf{M}_i 级联的原理图。其中, a_i 、 b_i 是第 i 个微环的输入端和下载端信号, a_{i+1} 、 b_{i+1} 是第 $i+1$ 个微环的输出端和加载端信号。微环及波导中发生微环谐振和布拉格谐振,其中,布拉格谐振类似于布拉格光栅中各反射波发生谐振^[16]。微环谐振和布拉格谐振分别满足独立的谐振条件^[17-18]。

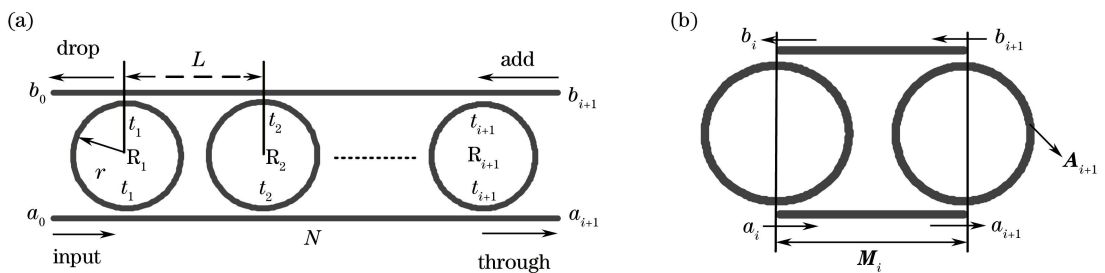


图1 并联多微环结构与传输矩阵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel multi-microring structure and transmission matrix

光在微环中传播一周的相位为 $\Phi = 2\pi r\beta$,其中 $\beta = 2\pi n/\lambda$ 为光传播常数, r 为微环的半径, λ 为自由空间波长, n 为系统折射率。设光在微环中传播一周的增益为 g ,则 $g = \exp(-i\Phi)$ 。若每个并联微环半径以 Δr 递增,下一个微环的增益将扩大 X 倍,其中 $X = \exp(-i2\pi\beta\Delta r)$,则每个微环增益可表示为 gX_{i-1} 。因此并联单环的直通端和下载端传输函数分别为^[19]

$$T_i = \frac{t_i(1 - gX_{i-1})}{1 - t_i^2 gX_{i-1}}, \quad (1)$$

$$R_i = \frac{-k_i^2 g^{0.5} X_{i-1}^{0.5}}{1 - t_i^2 gX_{i-1}}, \quad (2)$$

$$|t_i|^2 + |k_i|^2 = 1, i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

式中: t_i 和 k_i 分别为归一化传输耦合系数和交叉耦合系数,下标 i 代表每一个微环。由图1(b)得到,由微环传输矩阵 \mathbf{A}_{i+1} 和波导传输矩阵 \mathbf{M}_i 级联推导出第 i 个传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} b_{i+1} \\ a_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{i+1} \mathbf{M}_i \begin{bmatrix} b_i \\ a_i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{A}_{i+1} = T_{i+1}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -R_{i+1} \\ R_{i+1} & T_{i+1}^2 - R_{i+1}^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} g_i^{-1} & 0 \\ 0 & g_i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $g_i = \exp(-iL_i\beta)$, L_i 为第 i 对相邻微环的间距。并联7环传输矩阵 \mathbf{M} 由7个微环传播矩阵和

6 个波导传输矩阵级联组成,即

$$\begin{bmatrix} b_7 \\ a_7 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} b_0 \\ a_0 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_7 \mathbf{M}_6 \mathbf{A}_6 \mathbf{M}_5 \mathbf{A}_5 \mathbf{M}_4 \mathbf{A}_4 \mathbf{M}_3 \mathbf{A}_3 \mathbf{M}_2 \mathbf{A}_2 \mathbf{M}_1 \mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} b_0 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ a_0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} 、 m_{22} 是总传输矩阵 \mathbf{M} 的矩阵元素。因为加载端无输入,即 $b_{i+1} = 0$,所以直通端频谱强度 I 可表示为

$$I = \left| \frac{a_7}{a_0} \right|^2 = \left| \frac{\det(\mathbf{M})}{m_{11}} \right|^2, \quad (8)$$

式中 $\det(\cdot)$ 表示取行列式,并联 7 环结构的直通端传输函数为

$$T_7 = \frac{a_7}{a_0} = \frac{\det(\mathbf{M})}{m_{11}}. \quad (9)$$

在谐振附近,相位响应经历快速变化。如此快的相位变化导致更大的群指数,产生较大的群延时。直通端输出光的有效相移为

$$\Phi_{\text{eff}} = \arg T_7. \quad (10)$$

系统积累的慢光延迟量为

$$\Delta\tau = \frac{\partial \Phi_{\text{eff}}}{\partial(\omega - \omega_R)}, \quad (11)$$

式中: ω 为入射光的频率; ω_R 为共振频率。共振频率处有很强的吸收,使得输出光强很小,难以应用。为此,可以用多微环并联结构 CRIT 效应获得比较稳定的光延迟。

3 密集波分复用器慢光效应仿真分析

3.1 相干距离调谐

在双波导并联 7 微环谐振器阵列的基础上,利用双波导并联 7 微环谐振器阵列,可以产生 6 个 CRIT 信道,设置微环 R_1 半径 $r = 10 \mu\text{m}$,微环半径依次增加 $\Delta r = 5 \text{ nm}$,传输耦合系数 $t = 0.87^{[20]}$,关闭左右信道作为隔离频带,可以得到 4 个 CRIT 信道。把 4 个双波导 7 微环阵列级联,通过依次打开每个阵列的不同 CRIT 信道,获得 1×4 密集波分复用器的光延迟信道。

图 2 为 1×4 密集波分复用器结构图。密集波分复用器由 4 个改进型微环阵列构成,按从下往上的顺序标记为阵列 1、阵列 2、阵列 3 和阵列 4,每个改进型微环阵列由 7 个微环构成。每个阵列被设计为仅有 2 个微环发生 CRIT 相长干涉,其余微环发生相消干涉,虚线表示发生 CRIT 相长干涉的 2 个

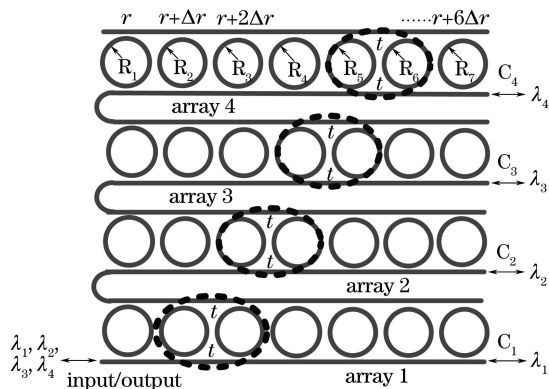


图 2 1×4 密集波分复用器结构图

Fig. 2 1×4 DWDM structure diagram

微环。 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为 4 个信道,所有信道都是双向的。

图 3 为密集波分复用器的仿真频谱图。可以看到各输出波长信道串扰小于 -25 dB ,信道间隔为 100 GHz ,可以对 4 个波长进行(解)复用。

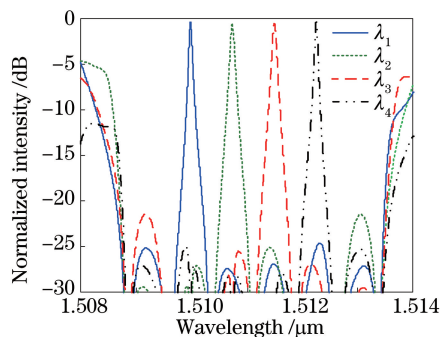


图 3 密集波分复用器的仿真频谱图

Fig. 3 Simulation spectrum of DWDM

表 1 为密集波分复用器的性能参数。利用 CRIT 信道设计的密集波分复用器,由于各微环相干距离和微环半径不同,各信道频谱强度的半峰全宽 (FWHM) 不同。 C_1 与 C_4 信道频谱强度的 FWHM 略小于 C_2 与 C_3 , C_2 与 C_3 信道频谱强度的 FWHM 比 C_1 信道大 0.02 nm , C_1 与 C_4 信道的串扰小于 C_2 与 C_3 信道的串扰。

表 1 密集波分复用器性能参数

Table 1 DWDM performance parameters

Channel	FWHM of		Insertion loss / dB	Stopband crosstalk / dB
	spectral intensity / nm	Bandwidth / GHz		
C_1	0.05	6.25	-0.4	-25
C_2	0.07	8.75	-0.6	-26
C_3	0.07	8.75	-0.6	-25
C_4	0.06	6.25	-0.4	-24.5

图4为各信道光延迟仿真图。仿真结果表明, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 4个信道的光延迟分别为73, 60, 67, 106 ps, 光延迟的FWHM分别为0.10, 0.13, 0.15, 0.30 nm。光依次经过阵列1、阵列2、阵列3和阵列4后延迟会积累;阵列4的光经过阵列1、阵列2、阵列3后,有效相移积累,延迟量最大,受前面阵列的影响很大。对比图3可知,慢光信道与CRIT信道一一对应,打开一个信道时,其他信道串扰小于-25 dB,换算成归一化强度可得归一化强度小于0.01,光信道几乎关闭,因此打开一个信道时,其他信道的光延迟可以忽略。不足之处为后一个阵列的慢光效应受前面阵列的影响很大,阻带串扰的累积也增大。

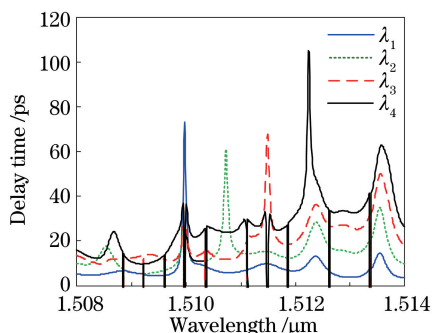


图4 各信道光延迟仿真图

Fig. 4 Optical delay simulation of each channel

3.2 附加相移调谐

在7微环谐振器阵列的基础上,关闭左右信道作为隔离频带,可以得到4个CRIT信道。图5为可调谐密集波分复用器结构图,阵列中的虚线表示该CRIT信道被打开。通过设置阵列1波导上附加相移 $\phi_1 = \pi$,使第1对微环不再满足相长干涉条件,第1个输出信道关闭,但不影响其余信道的状态。同理,设置其余阵列上的附加相移为 π ,可以对输出

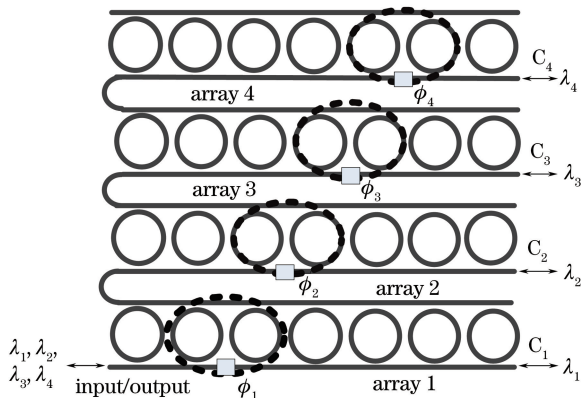


图5 可调谐密集波分复用器结构图

Fig. 5 Tunable DWDM structure

波长进行选择,伴随CRIT信道产生的慢光效应也随着发生变化。可调谐密集波分复用器具有光延迟信道可切换、可动态调谐的特性,增强了波分复用器的灵活性。

图6为调谐 $\phi_4 = \pi$ 时,密集波分复用器仿真频谱图。仿真结果表明,通过设置附加相移 ϕ_4 为 π ,可以关闭阵列4的CRIT信道,抑制波长 λ_4 的输出。与图3对比,附加相移调谐后的密集波分复用器输出频谱中,波长 λ_1 信道串扰减小2 dB,波长 λ_2 信道串扰增大0.5 dB,波长 λ_3 信道中的串扰保持不变,各信道间隔不改变,仍为100 GHz。

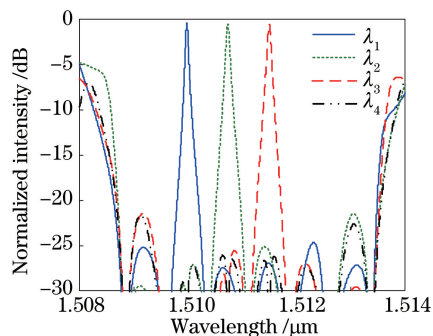


图6 可调谐密集波分复用器仿真频谱图

Fig. 6 Simulation spectrum of tunable DWDM

图7为附加相移 $\phi_4 = \pi$ 后出射光累积有效相移变化图。从图7可以看到,令相移 ϕ_4 为 π , C_4 信道的有效相移变得平滑很多, C_1 、 C_2 、 C_3 3个信道有效相移斜率保持不变,这是因为附加相移改变了有效相移的变化。仿真结果表明,对比图6可知,附加相移可以改变输出光的有效相移斜率,并且与CRIT信道一一对应。

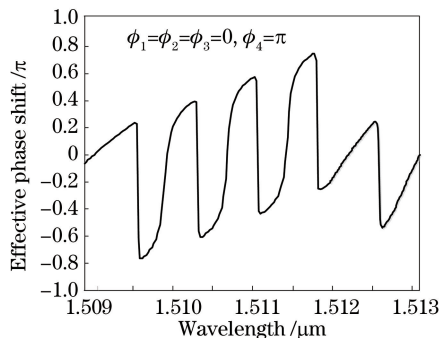


图7 调谐 $\phi_4 = \pi$ 时各信道的有效相移变化

Fig. 7 Effective phase shift of each channel when $\phi_4 = \pi$

图8为调谐 $\phi_4 = \pi$ 时,密集波分复用器信道的慢光效应仿真图。仿真结果表明,通过设置附加相移 $\phi_4 = \pi$,波长 λ_4 的慢光效应被抑制。 C_1 、 C_2 、 C_3 3个信道的光延迟分别为73, 56, 56 ps, 光延迟的

FWHM 分别为 0.10, 0.15, 0.15 nm。与图 4 对比, 每一个阵列的光延迟没有上一个阵列光延迟的积累, 性能更好。

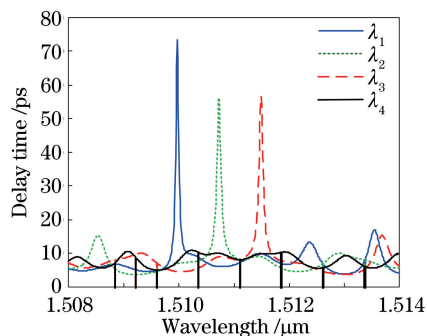


图 8 调谐 $\phi_4 = \pi$ 时各信道的慢光效应

Fig. 8 Slow light effect of each channel when $\phi_4 = \pi$

图 9 为附加相移 $\phi_1 = \pi, \phi_3 = \pi$ 后出射光累积有效相移变化图。从图 9 可以看出, 令附加相移 ϕ_1, ϕ_3 为 π, C_1, C_3 两个信道的有效相移变得平滑很多, C_2, C_4 两个信道的有效相移斜率保持不变。从而 C_1, C_3 两个信道的慢光效应得到抑制, C_2, C_4 两个信道的慢光效应正常, 这样相当于关闭 C_1, C_3 两个信道, 打开 C_2, C_4 两个信道。

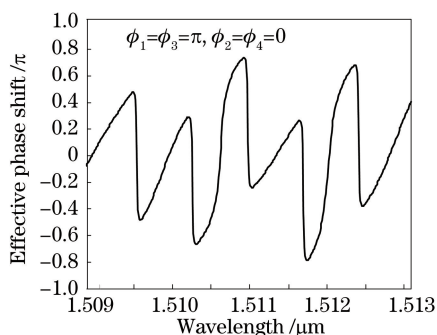


图 9 调谐 $\phi_1 = \pi, \phi_3 = \pi$ 时各信道的有效相移变化

Fig. 9 Effective phase shift of each channel when

$$\phi_1 = \pi, \phi_3 = \pi$$

图 10 为调谐 $\phi_1 = \pi, \phi_3 = \pi$ 时, 密集波分复用器信道的慢光效应仿真图。仿真结果表明, 通过设置附加相移 ϕ_1, ϕ_3 为 π , 波长 λ_1, λ_3 的慢光效应被抑制。 C_2, C_4 两个信道光延迟的 FWHM 分别为 0.10 nm 和 0.15 nm, 光延迟分别为 56 ps 和 73 ps。通过设置附加相移可以打开或者关闭任意单个信道或者多个信道, 可以在基本不影响密集波分复用器性能的基础上, 对光延迟信道进行选择, 得到具有可调谐滤波特性的慢光效应频谱。

结果表明: 对微环阵列设计的密集波分复用器增加附加相移, 不仅可以选择慢光信道, 还可以对复用慢光波长的数量进行控制。改变波导相应微环之

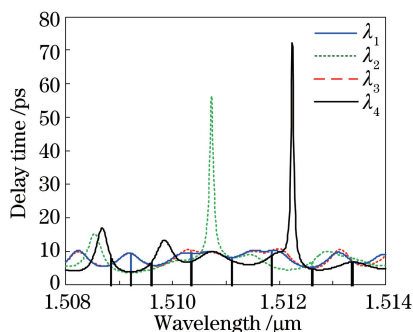


图 10 调谐 $\phi_1 = \pi, \phi_3 = \pi$ 时, 各信道的慢光效应

Fig. 10 Slow light effect of each channel when

$$\phi_1 = \pi, \phi_3 = \pi$$

间的附加相移, 可以灵活地选择光延迟信道和信道的数量。改进型微环阵列结构紧凑、可靠、可调谐, 对于密集波分复用(DWDM)系统中的光开关具有潜在的应用价值。

4 结 论

改进型微环阵列实现了密集波分复用器光延迟路径的灵活调制。仿真分析附加相移对密集波分复用器慢光效应的影响, 可得以下结论:

1) 相干距离改变光延迟路径, 打开一个信道时, 单个信道的光延迟受其他信道的影响很大, 阻带串扰的累积也增大。

2) 对直通端波导添加移相单元, 可调谐密集波分复用器输出信道间隔仍为 100 GHz。关闭光延迟信道 4, 波长 λ_1 信道串扰减小 2 dB, 波长 λ_2 信道串扰增大 0.5 dB, 波长 λ_3 信道中的串扰保持不变, 各信道受到的影响很小。

3) 附加相移调谐与相干距离改变光延迟信道相比, 每一个信道的光延迟不受其他信道光延迟的积累的影响, 性能更好。

4) 对直通端波导添加附加相移, 可以灵活控制每个慢光信道的开关状态。附加相移调谐, 不仅可以选慢光信道, 还可以对慢光信道的数量进行选择。

参 考 文 献

- [1] Song X Q, Zhao Z X, Chen K W, *et al.* Visible light communication: potential applications and challenges [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2015, 52 (8): 080004.
宋小庆, 赵梓旭, 陈克伟, 等. 可见光通信应用前景与发展挑战 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52 (8): 080004.
- [2] Liu S, Han X Y, Xiong Y C, *et al.* Distributed

- vibration detection system based on weak fiber Bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0210001.
- 刘胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0210001.
- [3] Liu C J, Yang C S, Lian L, *et al.* Cladding-modulation bragg grating with asymmetric structure [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0505002.
- 刘春娟, 杨超山, 连乐, 等. 非对称包层调制型布拉格光栅[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0505002.
- [4] Gu Q Z, Li Q H. Novel photonic crystal fiber with high birefringence and low loss [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 060603.
- 谷芊志, 励强华. 一种高双折射、低损耗的新型光子晶体光纤[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 060603.
- [5] Deng L L, Shi Q, Zhang H, *et al.* Investigation on the sensing performances of strip and rib SOI waveguides microring structures [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 752-757.
- 邓丽莉, 石强, 张辉, 等. 条形和脊型 SOI 波导微环结构传感性能研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 752-757.
- [6] Zheng X L, Sun Q S, Han Z, *et al.* Fiber length measurement method based on Sagnac interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106003.
- 郑祥亮, 孙权社, 韩忠, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的光纤长度测量方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0106003.
- [7] Ying Y H. Design of new kind of tunable micro ring resonator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 0620002.
- 应毓海. 新型的可调谐微环谐振器的设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0620002.
- [8] Dai D, Wang J, Chen S, *et al.* Monolithically integrated 64-channel silicon hybrid demultiplexer enabling simultaneous wavelength- and mode-division-multiplexing [J]. Laser & Photonics Review, 2015, 9(3): 339-344.
- [9] Zhou J, Gu L L, Yu W K, *et al.* Study of the coupled-resonator slow light structures and their applications[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120607.
- 周瑾, 谷玲玲, 于伟坤, 等. 基于耦合谐振系统的慢光结构及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 120607.
- [10] Smith D D, Lepeshkin N N, Schweinsberg A, *et al.* Coupled-resonator-induced transparency in a fiber system[J]. Optics Communications, 2006, 264(1): 163-168.
- [11] 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.
- [12] Masilamani A P, Van V. Design and realization of a two-stage microring ladder filter in silicon-on-insulator[J]. Optics Express, 2012, 20(22): 24708-24713.
- [13] Ehteshami N, Zhang W, Yao J. Optically tunable full 360° microwave photonic phase shifter using three cascaded silicon on insulator microring resonators[J]. Optics Communications, 2016, 373: 53-58.
- [14] Zhuang L, Beeker W, Leinse A, *et al.* Novel wideband microwave polarization network using a fully-reconfigurable photonic waveguide interleaver with a two-ring resonator-assisted asymmetric Mach-Zehnder structure[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3114-3124.
- [15] Liu Y, Zhang G A. Study on modulation scheme of visible light communications and its performance[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090601.
- 刘洋, 章国安. 可见光通信调制方式及其性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090601.
- [16] Liang J F, Jing S M, Meng A H, *et al.* Integrated optical sensor based on a FBG in parallel with a LPG [J]. Chinese Optics, 2016, 9(3): 329-334.
- 梁居发, 敬世美, 孟爱华, 等. 基于光纤布拉格光栅与长周期光栅并联的集成光学传感器[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 329-334.
- [17] 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.
- [18] Bogaerts W, de Heyn P, van Vaerenbergh T, *et al.* Silicon microring resonators[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(1): 47-73.
- [19] Chen W Y, Van V, Herman W N, *et al.* Periodic microring lattice as a bandstop filter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(19): 2041-2043.
- [20] Mancinelli M, Guider R, Masi M, *et al.* Optical characterization of a SCISSOR device [J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13664-13674.