

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.04.012

SiGe-OI 微环谐振器的滤波特性分析

冯松^{1,2}, 高勇^{1,2}

(1. 西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: SiGe-OI 微环谐振器是一种新型半导体材料的谐振器。本文根据传输矩阵法得到微环谐振器的传递函数,研究了上下滤波器和上、下载端口的性能,分析了 SiGe-OI 微环谐振器的滤波特性,以及耦合特性对滤波特性的影响。通过模拟软件建立 SiGe-OI 微环谐振器模型,主要对其结构参数、耦合系数、3 dB 带宽和消光比等参数进行了分析,仿真了波导宽度、耦合间距、波长与耦合系数的关系,以及耦合系数对 3 dB 带宽和消光比的影响。最终给出了耦合系数的范围以及不同耦合系数下的滤波特性,为 SiGe-OI 微环谐振器的研究提供了理论参考。

关键词: 绝缘层上锗硅; 微环谐振器; 滤波特性; 耦合系数

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2016)04-0443-06

Analysis of the filtering property of SiGe-OI micro-ring resonator

FENG Song^{1,2}, GAO Yong^{1,2}

(1. School of Sciences, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: SiGe-OI micro-ring resonator is a new type of resonator with semiconductor material. In this paper, according to the transfer function of micro-ring resonator by the transfer matrix method, the typical curve of the intensity transfer function of the drop channel and main channel are researched. The filtering property of SiGe-OI micro-ring resonator is analyzed with the filtering property influenced by coupling coefficient. The model of SiGe-OI micro-ring resonator is built by the simulation software, with the structure parameters, coupling coefficient, 3 dB bandwidth and extinction ratio being mainly analyzed. The relationships between wave guide width, coupling gap, wavelength and coupling coefficient are simulated, and the influences of 3 dB bandwidth and extinction ratio are analyzed from the coupling coefficient. Finally, the range of coupling coefficient is accessed, and the filtering property is obtained in the condition of different coupling coefficients, providing a theoretical reference for research on SiGe-OI micro-ring resonator.

Key words: SiGe-OI; micro-ring resonator; filtering property; coupling coefficient

SiGe-OI(Silicon Germanium on Insulator)材料是近几年兴起的一种新型半导体材料,它是在绝缘层的衬底上,通过分子束外延等方式制作出的一种类似 SOI(Silicon on Insulator)的新材料,具有折射率高、禁带宽度小、传输损耗小、对光波限制能力强、便于光电集成等优点,因此 SiGe-OI 材料是代替 SOI 制作光电器件的理想材料。

微环谐振器是一种耦合特性好、谐振速度快、体

积小的谐振单元,常用于滤波器、电光调制器、光开关等器件中,应用领域非常广泛^[1-3]。目前微环谐振器的最快传输速度可达 60 Gb/s^[4],器件尺寸仅为 10 μm^2 ^[5],谐振效率可达 253 pm/mW^[6],可以应用于 80 Hz 的密集型光波复用(DWDM)中^[7],功耗仅为 0.1 pJ/bit^[7]。

表征微环谐振器性能有两个非常重要的参数:3 dB 带宽和消光比(ER)。3 dB 带宽是指当谐振器中

收稿日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61204080);陕西省教育厅科研计划资助项目(15JK1292);西安工程大学博士科研启动基金资助项目(BS1128,BS1436);西安工程大学研究生教育“质量工程”资助项目(15yzl10);陕西省普通高校重点学科建设专项资金建设项目((2008)169)

作者简介: 冯松,男,副教授,博士,研究方向为新型光电子器件。E-mail: vonfengs@163.com

的归一化光功率减少到峰值的一半时,所对应的频谱宽度,它表示在该带宽内集中了一半的功率。3 dB 带宽可以反映滤波曲线的开口大小,随着 3 dB 带宽的减小,滤波曲线的开口变小,谐振峰变尖,当外加电信号后,谐振峰的改变更加容易,速率变快。在谐振滤波器里,消光比被定义为谐振状态下的光功率与非谐振状态下的光功率比值的负对数。消光比越大,光在谐振器中的损耗越小,误码率越低,输出端的光识别更加容易,谐振器质量越高。为了得到性能优越的微环谐振器,需要对微环谐振器的滤波特性进行分析。

本文中研究的 SiGe-OI 微环谐振器的滤波特性是基于 SiGe-OI 微环谐振器结构,根据传输矩阵法得到的微环谐振器传递函数,分析了上下滤波器的的工作原理和上、下载端口的性能。通过模拟软件建立 SiGe-OI 微环谐振器模型,主要对其结构参数、耦合系数、3 dB 带宽和消光比等参数进行分析,得到了耦合特性对滤波特性的影响。

1 微环谐振器的结构和工作原理

微环谐振器的结构如图 1 所示,其中直波导和环形波导可以设计成脊形或者矩形,本文谐振器的

剖面结构采用如图 1(b)所示的脊形结构。这种微环谐振器的结构最早是由 Marcatili 于 1969 年提出的^[8],由于微环谐振器对平面工艺要求非常高,在当时的工艺水平下,微环谐振器的制作存在很大的困难,因此并未得到广泛的关注和研究。随着平面工艺水平的不断提高,对微环谐振器的研究也日渐增多,由于微环谐振器具有结构简单、扩展性强、集成度高的优点,目前已被广泛应用于半导体激光器、光波导滤波器和光调制器等器件的设计中^[9-10]。

微环谐振主要通过直波导与环形波导的耦合进行工作^[11],微环谐振器的谐振条件可以表示为^[12]:

$$2\pi n_{\text{eff}}R = m\lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为波导的有效折射率, R 为光微环谐振器的半径, m 为谐振级数, λ 为输入光的波长。

当输入光的波长与微环半径满足式(1)的谐振条件时,该波长的光波在微环中发生谐振,如图 2(a)所示;当输入光的波长与微环半径不满足谐振条件时,光波在微环中传输一周后同样也会与左侧直波导中的光波发生干涉效应,使得左侧直波导中的光波相干相长,而微环中的光波相干相消,光波将沿着左侧直波导传输,微环中几乎没有光波传输,此时称光波在微环中处于非谐振状态,如图 2(b)所示。

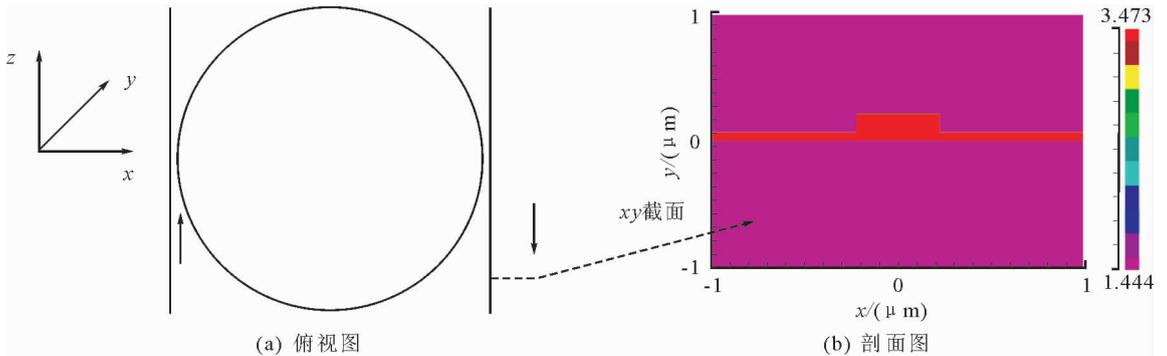
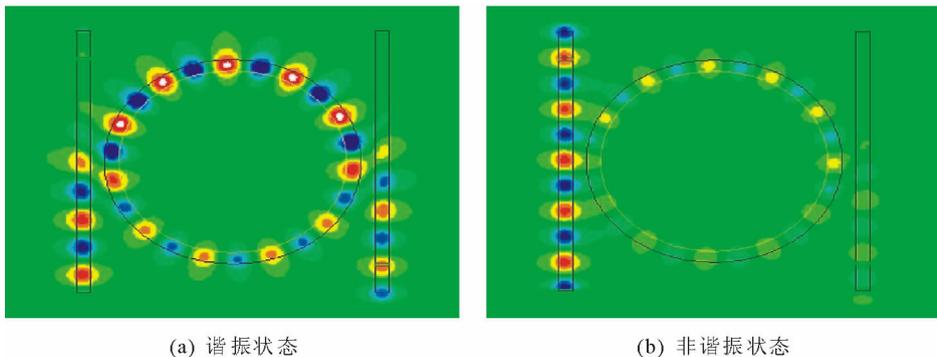


图 1 微环谐振器结构

Fig. 1 The structure of micro-ring resonator



(a) 谐振状态

(b) 非谐振状态

图 2 微环谐振器原理图

Fig. 2 The working principle of micro-ring resonator

2 微环滤波特性

对于微环谐振器这种四端口器件,可以采用传输矩阵法对其进行分析^[13-14],这种方法是 J. A. Wheeler 于 1937 年提出的^[15],根据这种方法可以得到微环谐振器主通道和下通道的传递函数:

$$|E_{\text{throughout}}|^2 = |a_2|^2 = \frac{t_1^2 + (\alpha t_2)^2 - 2\alpha t_1 t_2 \cos\theta}{1 + (\alpha t_1 t_2)^2 - 2\alpha t_1 t_2 \cos\theta} \quad (2)$$

$$|E_{\text{drop}}|^2 = |a_4|^2 = \frac{\alpha k_1^2 k_2^2}{(1 - \alpha t_1 t_2)^2 - 4\alpha t_1 t_2 \sin^2(\theta/2)} \quad (3)$$

式中, $E_{\text{throughout}}$ 和 E_{drop} 分别为主通道和下通道的输出端光场能量, a_2 和 a_4 分别为主通道和下通道的输出端光场振幅, t_1 和 t_2 分别主通道和下通道的透过系数, α 为微环的衰减因子, θ 为光传输一周后的相位延迟。

根据主通道的传递函数式(2)可得波长与归一化光强的关系曲线,如图 3 所示。从图中可以看到,当光在微环中传输一周后,除了几个峰值点处的波长被滤掉以外,其他波长的光波仍然沿着主通道传输,这些不处于峰值点处的光波波长均不满足谐振要求,不能在微环与直波导间发生谐振。

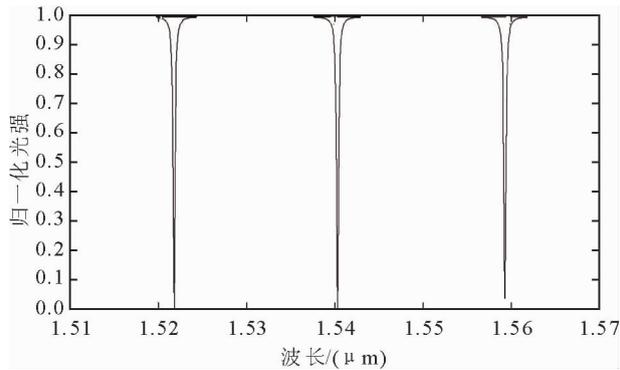


图 3 主通道光强的典型传递曲线

Fig. 3 The typical curve of the intensity transfer function of the main channel

同理,根据下通道的传递函数式(3)也可得到波长与归一化光强的关系曲线,如图 4 所示。从图中可以看到,当光在微环中传输一周后,除了几个峰值点处的波长耦合到下通道中,其他波长的光波均被滤掉,此时峰值点处的光的波长满足谐振要求,可以在微环与直波导间发生谐振。

结合主通道的传递函数式(2)和下通道的传递函数式(3)可以得到单个微环归一化光强输出曲线,如图 5 所示。从图中可以看到,主通道的峰值点与下通道的峰值点处于同一波长上,从而满足了谐振滤波的要求。

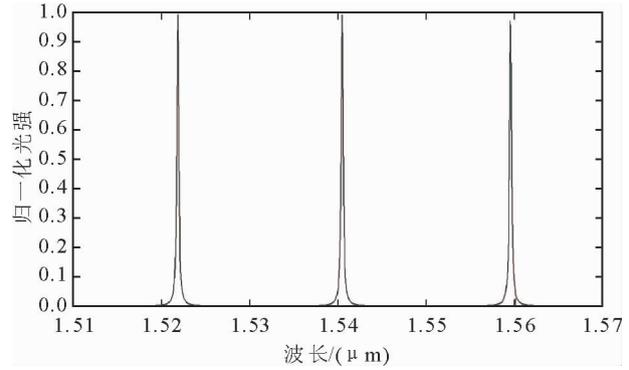


图 4 下通道光强的典型传递曲线

Fig. 4 The typical curve of the intensity transfer function of the drop channel

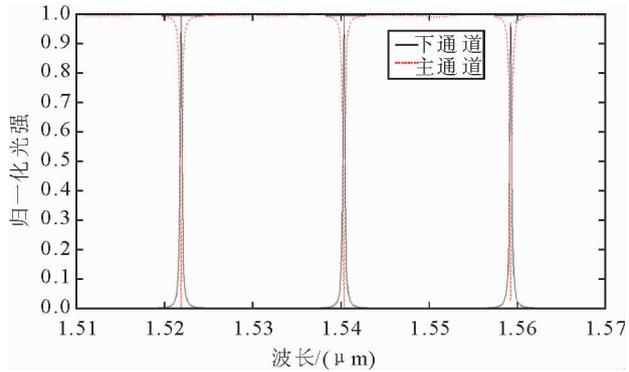


图 5 主通道与下通道光强曲线

Fig. 5 The typical curve of the intensity transfer function of the drop channel and main channel

3 耦合系数对微环滤波特性的影响

耦合系数是对耦合特性进行表征的一个物理量,而耦合特性的好坏直接影响着微环滤波特性。

微环谐振器的耦合系数可以表示为:

$$k = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \quad (4)$$

式中, E_{in} 为直波导中输入的能量, E_{out} 为耦合进入微环中的能量。

根据前期 SiGe-OI 光波导的分析^[16-17],选取谐振器内脊高为 220 nm,外脊高为 50 nm,通过模拟计算可以得到波导宽度与耦合系数的关系曲线,如图 6 所示。图中随着波导宽度的逐渐减小,波导截面逐渐减小,波导对光场的限制能量减弱,从直波导中耦合到弯曲波导中的光场增加,从而使得耦合系数增大。当波导尺寸一定时,耦合间距与耦合系数的关系曲线如图 7(a)所示。从图中可以看出,随着耦合间距的增加,直波导与弯曲波导的模场叠加变小,耦合强度减弱,从而导致耦合系数降低。图 7(b)为不同耦合间距下波长与耦合系数的关系曲线,从图中可以看出,随着波长的增大,分布于波导

外部的光场增加,耦合系数也随之增大。

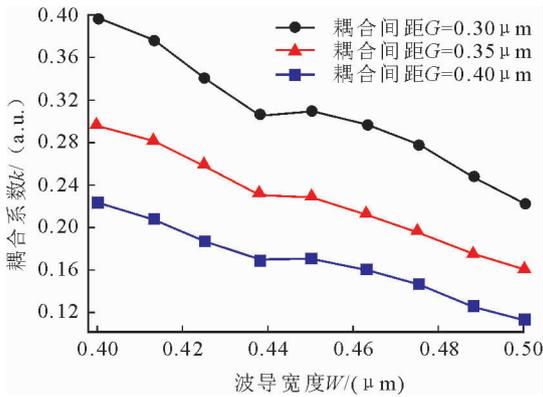
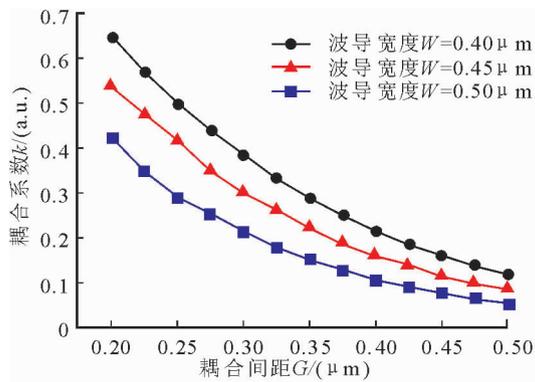
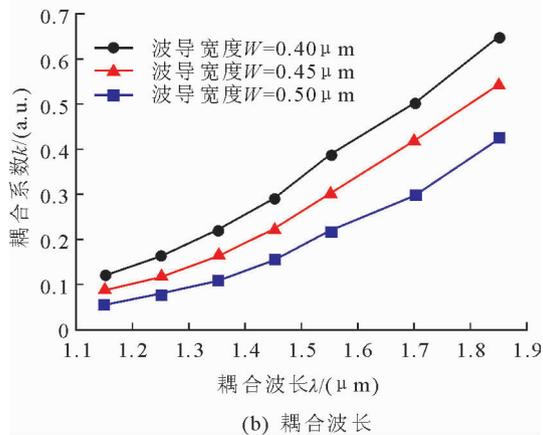


图6 耦合系数随波导宽度变化曲线

Fig. 6 The curve of coupling coefficient varying with wave guide width



(a) 耦合间距



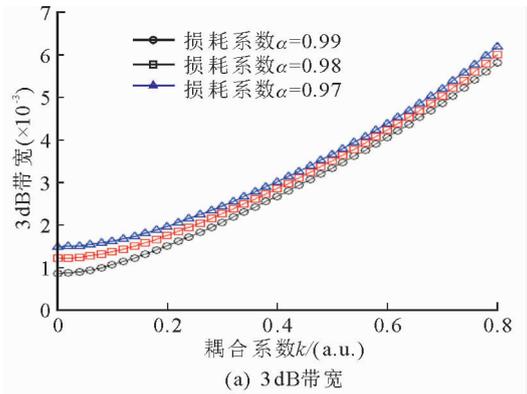
(b) 耦合波长

图7 耦合系数与耦合间距和耦合波长的关系曲线

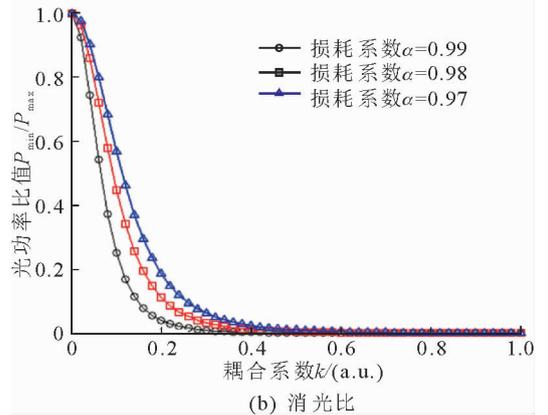
Fig. 7 The relationship curve between coupling coefficient and coupling gap and coupling wavelength

不同衰减因子下,耦合系数与3 dB带宽的关系曲线如图8(a)所示。从图中可以看出,当衰减因子一定时,3 dB带宽随着耦合系数的增加而增加;当耦合系数一定时,衰减因子越大,3 dB带宽越小。电光调制器的性能与3 dB带宽成反比,带宽越窄,电光调制器的性能越好,也可以精确定位它的谐振

波长,而且也更加容易调制,因此,可以通过减小耦合系数,增大衰减因子来降低它的3 dB带宽。



(a) 3 dB带宽



(b) 消光比

图8 不同损耗系数下耦合系数与3 dB带宽和消光比的关系曲线

Fig. 8 The relationship curve between coupling coefficient and the 3 dB bandwidth,extinction ratio at different loss coefficients

耦合系数与消光比的关系曲线如图8(b)所示。根据消光比的定义可知,为了得到一个大的消光比,就需要非谐振状态下的光功率与谐振状态下的光功率比值 P_{\min}/P_{\max} 越小越好。从图中可以看出,随着耦合系数的增加, P_{\min}/P_{\max} 值逐渐减小,因此耦合系数越大,消光比越高。而且当耦合系数一定时,随着衰减因子的增加, P_{\min}/P_{\max} 值逐渐减小,消光比增大。

电光调制器的性能与消光比成正比,消光比越大,电光调制器的性能越好,因此通过增大耦合系数可以有效提高它的消光比。根据前面的分析可知,随着耦合系数的减小,3 dB带宽逐渐减小,因此,需要折中考虑消光比和3 dB带宽。首先将损耗降低,因此需要提高衰减因子,然后调节耦合系数,使它在一定的范围之内可以得到消光比的峰值。选择图8(a)中 $\alpha=0.99$ 的曲线,然后根据消光比的公式确定对应耦合系数的范围 ($0.15 < k < 0.25$),在此范围内,既能得到较小的3 dB带宽又能得到较大的消光比。

本文中模拟的耦合系数与滤波特性的关系曲线如图 9(a)所示,文献中实测的微环滤波特性^[18]如图 9(b)所示。从图 9(a)中可以看出,耦合系数越小,调制峰越尖,开口越小。从图 9(b)中可以看出,耦合间距越大,调制峰越尖,开口越小。根据前面的分析可知,耦合间距越大,耦合系数越小,因此模拟数据和测试数据都证实了耦合系数越小,调制峰越尖,开口越小,即 3 dB 带宽越小,越利于谐振。本文中的模拟数据与文献中的测试数据趋势一致,从而验证了本文中 SiGe-OI 微环谐振器滤波特性分析的正确性。

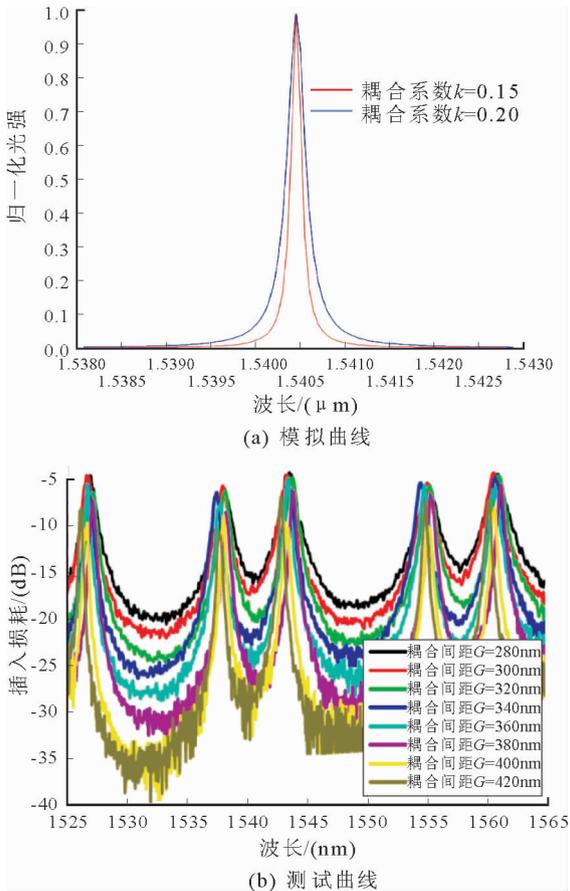


图9 耦合系数与滤波特性的关系曲线

Fig. 9 The relationship curve between the coupling coefficient and the micro-ring filtering property

4 结 语

本文从 SiGe-OI 微环谐振器的原理出发,根据传输矩阵法得到微环谐振器的传递函数,分析了上、下载滤波器的工作原理和上、下载端口的性能。通过模拟软件建立了 SiGe-OI 微环谐振器模型,仿真了波导宽度、耦合间距、波长与耦合系数的关系,以及耦合系数对 3 dB 带宽和消光比的影响。仿真结果表明:波导宽度越大,耦合间距越大,波长越小,谐振器的耦合系数越小;耦合系数越小,3 dB 带宽越

小;耦合系数越大,消光比越高。根据消光比的公式确定了对应耦合系数的范围($0.15 < k < 0.25$),在此范围内,既能得到较小的 3 dB 带宽又能得到较大的消光比。最终模拟了耦合系数对微环滤波特性的影响:耦合系数越小,调制峰越尖,开口越小,即 3 dB 带宽越小,越利于电学调制。

参考文献:

- [1] 安宁丽, 方长青. PVDF/TiO₂ 纳米复合薄膜的电学性能研究 [J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(3): 288-292.
AN Ningli, FANG Changqing. The study on electrical properties of the PVDF/TiO₂ nano-composite film [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(3): 288-292.
- [2] 陈锦妮, 柯熙政. 弱湍流状态下空间光-多模光纤耦合效率分析 [J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(3): 326-330.
CHEN Jinni, KE Xizheng. Analysis of space optical-multimode fiber coupling efficiency in weak turbulence [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(3): 326-330.
- [3] 巩鑫, 华灯鑫, 李仕春, 等. 时分复用光纤光栅传感系统的高速采集技术研究 [J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(3): 293-298.
GONG Xin, HUA Dengxin, LI Shichun, et al. The study of high-speed acquisition technique for fiber gratings sensing system with time-division multiplex [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(3): 293-298.
- [4] RAPHAËL D D, CHUL S P, SOPHIE L R, et al. 60 Gb/s PAM-4 operation with a silicon microring modulator [C]// IEEE International Conference on Group IV Photonics, Vancouver, BC, 2015: 153-154.
- [5] RAKTIM H, ABHIK D B, SANATHANAN M S. Compact athermal electro-optic modulator design based on SOI off-axis microring resonator [C]// Conference on Lasers & Electro-optics, San Jose, CA, 2014: 1-2.
- [6] MA Y J, XUAN Z, LIU Y, et al. Silicon microring based modulator and filter for high speed transmitters at 1310 nm [C]// IEEE Optical Interconnects Conference, San Diego, CA, 2014: 23-24.
- [7] CHEN C H, HUANG T C, LIVSHITS D, et al. A comb laser-driven DWDM silicon photonic transmitter with microring modulator for optical interconnect [C]// Conference on Lasers & Electro-optics, San Jose, CA, 2015: 1-2.
- [8] EAJ M. Optical frequency filters using disc cavity: US patent, 3558213[P]. 1971-6-12.

- [9] MULHAM K, GUY V S, JAN D. Effect of external optical feedback on tunable micro-ring lasers using on-chip filtered feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(9): 959-962.
- [10] TANAY C. All-optical reversible network design using microring resonators [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 51(4): 1-8.
- [11] SAIKA M B, MAINUL H, RIFAT N E, et al. Design and simulation of silicon micro-ring for optical mode converter [C]// 2015 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, Taipei, 2015: 69-70.
- [12] AMNON Y. Critical coupling and its control in optical waveguide-ring resonator systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14(3): 483-485.
- [13] HSU Y J, CHENG B H, LAI Y, et al. Classical analog of electromagnetically induced transparency in the visible range with ultra-compact plasmonic micro-ring resonators [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(4): 1-6.
- [14] BAN Y, YU B M, RHIM J, et al. Modeling of self-heating effect for depletion-type Si micro-ring modulator [C]// 2015 IEEE Optical Interconnects Conference, San Diego, 2015: 134-135.
- [15] JOHN A W. On the mathematical description of light nuclei by the method of resonating group structure [J]. *Phys. Rev.*, 1937, 52: 1107-1122.
- [16] 高勇, 冯松, 杨媛, 等. 基于 Optiwave 的脊形 SiGe-OI 光波导结构设计 [J]. *光子学报*, 2009, 38(7): 1692-1696.
- GAO Yong, FENG Song, YANG Yuan, et al. The structure design of ridged SiGe-OI optical waveguide based on optiwave [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7): 1692-1696.
- [17] FENG Song, GAO Yong, YANG Yuan, et al. Mode analysis and structure parameter optimization of a novel SiGe-OI rib optical waveguide [J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, 30(8): 90-94.
- [18] 耿敏明. 硅基集成化可重构光插分复用器的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- GENG Minming. Research on silicon-based integrated reconfigurable optical division multiplexing apparatus [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2009.

(责任编辑 周 蓓)