

基于 slot 结构的反馈耦合波导微环谐振器

穆洲¹, 刘春娟^{1*}, 吴小所^{1,2}, 郑丽君¹

¹兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;

²兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

摘要 为了优化微环谐振器的性能, 提出了一种 slot 结构的反馈耦合波导微环谐振器。该结构通过在上下型微环的基础上引入一个附加光场及采用 slot 波导来改善谐振器的性能参数。利用传输矩阵法分析了该改进型结构对相位、自由光谱范围及输出性能的影响, 并用三维有限差分软件 FDTD 进行了模拟仿真。结果表明: 基于微环谐振器的改进型结构的自由光谱范围由 14.5 nm 增大到了 29 nm, 消光比的绝对值从 21 dB 增大到了 32 dB, 有助于实现对应传感器测量范围及灵敏度的提升。

关键词 集成光学; 微环谐振器; 传输矩阵法; 反馈波导; slot 波导

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1213001

Feedback-Coupled Waveguide Microring Resonator Based on Slot Structure

Mu Zhou¹, Liu Chunjuan^{1*}, Wu Xiaosuo^{1,2}, Zheng Lijun¹

¹*School of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;*

²*Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China*

Abstract In this study, a slot-structured feedback-coupled waveguide microring resonator is proposed to optimize the performance of a microring resonator. Further, the performance parameters of the resonator are considerably improved by the introduction of an additional light field based on the add/drop-type microring and the usage of a slot waveguide. The effect of the improved structure on the phase, free spectral range, and output performance is analyzed using the transfer matrix method, and simulation analysis is performed using the three-dimensional finite difference method software named FDTD. The results denote that the free spectral range of the improved structure increases from 14.5 to 29 nm and that the absolute value of the extinction ratio increases from 21 to 31 dB, which is helpful to improve the measuring range and sensitivity of the corresponding sensor.

Key words integrated optics; microring resonator; transfer matrix method; feedback waveguide; slot waveguide

OCIS codes 130.3120; 130.3990; 130.7408

1 引 言

光学谐振器是目前被广泛使用的微型光学元件之一^[1-3]。微型光学谐振器的种类较多, 其中的微环谐振器具有结构紧凑、功能多样、制作方便等优点^[4-7], 已被广泛应用于传感、滤波、光调制、光开关等方面^[8-13]。经过多年的发展, 研究人员对微环及其复合结构在传感方面的应用研究取得了很

多成果, 例如: 文献[14]基于光栅和微环相结合的结构提出了生物传感器, 其灵敏度较高, 而且探测极限达到了 3.9×10^{-4} RIU; 文献[15]中设计了采用负热光系数聚合物覆盖层的热稳定性折射率传感器。这些器件均取得了较好的效果, 但器件结构和制造工艺相对复杂。此外, 关于如何增大这些器件测量范围的文献报道还比较少, 因此, 如何利用较为简单的器件结构在保证灵敏度的基础上

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-08-19; 录用日期: 2019-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61762057)、甘肃省自然科学基金(18JR3RA123)

* E-mail: liuchj@mail.lzjtu.cn

实现较大的测量范围有待进一步研究。

为了提高基于微环及其复合结构的传感器的性能,本文在传统上下载型微环谐振器的基础上加入反馈波导,利用 slot 波导对光的限制能力较强的优点^[16-17],提出了 slot 型反馈耦合波导(FCW)谐振器。该谐振器不仅具有更大的自由光谱范围,而且具有带宽窄、消光比大、散射损耗小等优点,这使得该结构能更好地被应用到光信号处理以及改善光学器件性能中。

2 基本原理

2.1 结构设计

Slot 型反馈耦合波导谐振器的平面结构和立体结构分别如图 1(a)、(c)所示。该谐振器由双边微环谐振器和 U 型反馈波导构成,其中 R 为微环半径,微环与直波导的间距为 200 nm,波导芯层(硅)的高度为 220 nm,基底 SiO_2 的厚度为 $2\ \mu\text{m}$,通过增加一段反馈波导来引入附加光场。

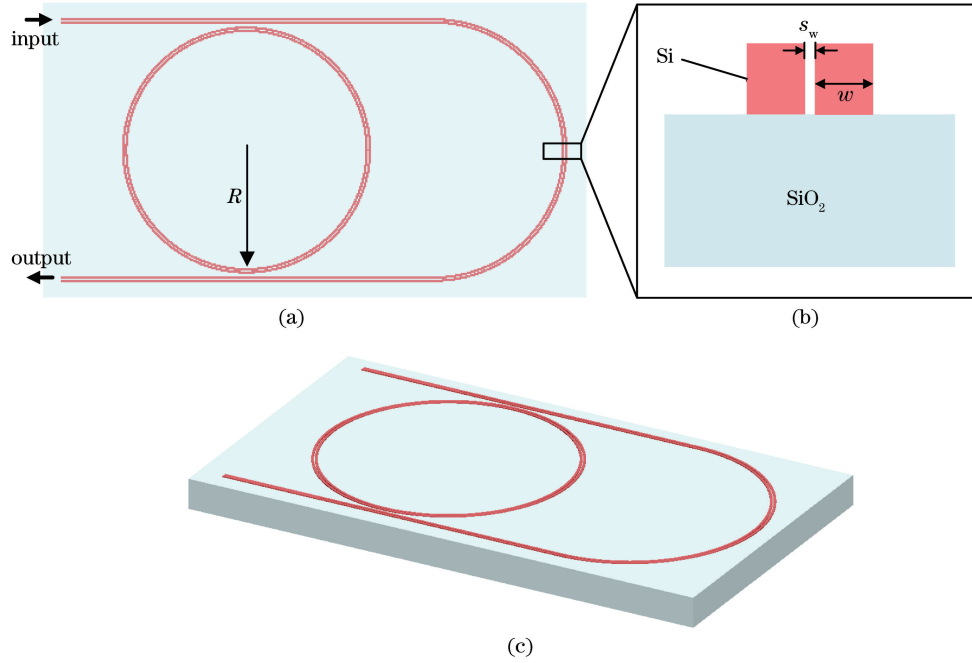


图 1 Slot 型反馈耦合波导微环谐振器结构图。(a)结构俯视图;(b)slot 波导结构;(c)结构立体图

Fig. 1 Structural diagram of slot-type feedback-coupled waveguide microring resonator. (a) Top view of structure; (b) slot waveguide structure; (c) structural stereogram

图 1(b)给出了 slot 波导横切面示意图, w 为条形波导的宽度, s_w 为狭缝宽度。如图 1(b)所示,slot 波导由两个折射率较高的条形波导和夹在两者中间的纳米尺寸的低折射率介质构成。由于两个条形波导电场的叠加,slot 波导能够将光很好地限制在中间折射率较低的部分。Slot 波导于 2004 年由 Almeida 等^[18]提出。通常波导部分和狭缝介质的折射率相差较大,因此,SOI(silicon-on-insulator)对于 slot 波导来说是较为理想的材料,其中的低折射率介质也可以是空气。Slot 波导整体由 SiO_2 基底和顶部的硅层组成。

2.2 理论分析

反馈耦合波导微环谐振器的结构如图 2 所示,其中: L_1 表示 U 型反馈波导的长度; E_i 代表各个端点的光场($i=1,2,3,4$); t 和 k 分别为微环和上下信道间的振幅透射系数和耦合系数,对称耦合区 I、

II 的 t 和 k 相等,且在损耗为零时,满足 $k^2+t^2=1$ 。设 \mathbf{M}_1 、 \mathbf{M}_2 为微环与波导的两个耦合区 I、II 处的传输矩阵, \mathbf{M}_t 为反馈波导与微环间的传输矩阵,则

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} -t & 1 \\ ik & ik \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} 0 & \tau^{\frac{1}{2}} p \\ (\tau^{\frac{1}{2}} p)^{-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

总传输矩阵为: $\mathbf{M} = \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_t \cdot \mathbf{M}_1$,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\tau = \exp(-\alpha L)$ 为光在微环内的传输系数,其中 $L = 2\pi R$, α 为传输损耗系数; $p = \exp(i\varphi/2)$ 为光在微环内传输一半周长时的相位因子,其中 $\varphi = \beta L$

为光信号绕微环传输一周产生的相位差, $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为传播常数。

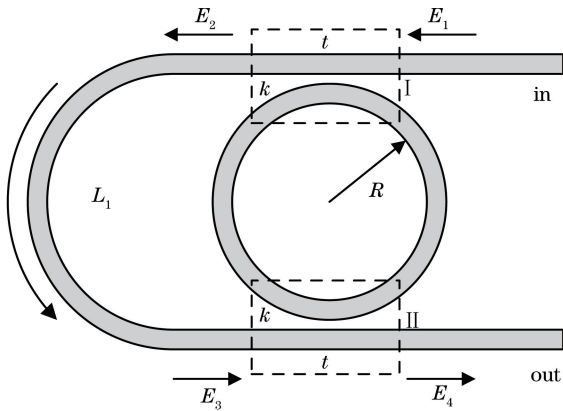


图 2 反馈耦合波导微环谐振器结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of feedback-coupled waveguide microring resonator

由传输矩阵法可得

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

光场 E_3 和 E_2 间的关系为

$$E_3 = \tau_1 p_1 E_2, \quad (5)$$

式中: E_1, E_2, E_3, E_4 为光场; $\tau_1 = \exp(-\alpha L_1)$ 为光在长为 L_1 的 U 型反馈波导内的传输系数; $p_1 = \exp(i\varphi_1)$ 为光在长为 L_1 的反馈波导内传输时的相位因子, 其中 $\varphi_1 = \beta L_1$ 为光信号从反馈波导一端传输到另一端产生的相位差。

求得输出端的光场为

$$E_4 = \left(M_{21} - \frac{M_{11} \cdot M_{22}}{M_{12} - \tau_1 p_1} \right) E_1, \quad (6)$$

无反馈波导时输出端的光场为

$$E_o = \left(M_{21} - \frac{M_{11} \cdot M_{22}}{M_{12}} \right) E_1, \quad (7)$$

因此,

$$E_4 = E_o + \frac{-\tau_1 p_1 M_{11} M_{22}}{M_{12} (M_{12} - \tau_1 p_1)} E_1 = E_o + E_f, \quad (8)$$

式中: E_f 为附加光场。

输出端的归一化传递函数为

$$\frac{E_4}{E_1} = \frac{-k^2 \tau^{1/2} p + t^2 \tau_1 p_1 - \tau p^2 \tau_1 p_1}{1 - t^2 \tau p^2 + k^2 \tau^{1/2} p \tau_1 p_1}, \quad (9)$$

输出端的输出光谱表达式为

$$D = \frac{|E_4|^2}{|E_1|^2} = \frac{|E_o|^2 + |E_f|^2 + 2|E_o||E_f|\cos\delta}{|E_1|^2}, \quad (10)$$

式中: δ 为 E_o 与 E_f 之间的相位差。

从(9)式可以看出, 输出端归一化传递函数分母中有 $k^2 \tau^{1/2} p \tau_1 p_1$ 项, 根据前面的公式可得此项即为 $k^2 \exp[-\alpha(L/2 + L_1) + i\beta(L/2 + L_1)]$, 当 L_1 为 $L/2$ 的整数倍时, 输出保持规则性, 但倍数不同时, 呈现的周期不同。

3 分析与讨论

采用基于有限差分法的三维仿真软件 FDTD 对微环谐振器及反馈耦合波导谐振器进行模拟仿真。为了研究波导结构参数对其性能的影响, 分别仿真了条形波导宽度 w 、狭缝宽度 s_w 与波导损耗之间的关系, 结果如图 3 所示。从图 3(a) 中可以看出: 随着 w 增大, 损耗先是稍有减小, 然后直线增大。原因是当 w 较大时, 大部分能量聚集在条形波导中, 而当它减小到一定程度时, 更多的能量分布到了狭缝区域。从图 3(b) 中可以看出, 随着 s_w 增大, 损耗先降低到一定值然后又稍有增大。这是因为 s_w 增加会使聚集在此区域的能量增加,

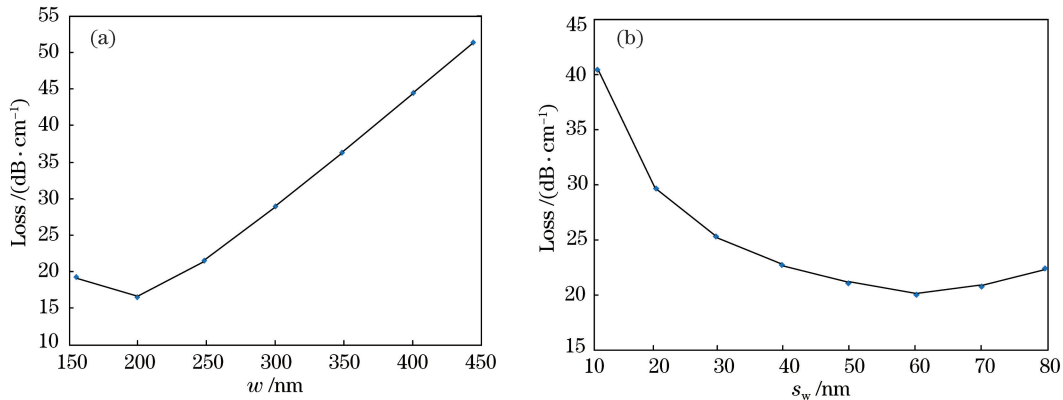


图 3 波导参数对其性能的影响。(a) 波导宽度对损耗的影响; (b) 狭缝宽度对损耗的影响

Fig. 3 Influences of waveguide parameters on performance. (a) Effect of waveguide width on loss; (b) effect of slot width on loss

而当 s_w 增大到一定值后,就会有部分能量在波导与包层的界面处耗散掉,因此损耗会稍有增加。综上所述,当 $w=200\text{ nm}$, $s_w=60\text{ nm}$ 时损耗较小。

为了了解改进型结构与普通波导在传输光性能

方面的差别,模拟了光信号在波导芯层传播时波导内部的模场分布,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在相同的条件下,slot 型波导芯层的传输光强度比普通矩形波导结构增强了,说明传输光波在包层中的耗散减少了。

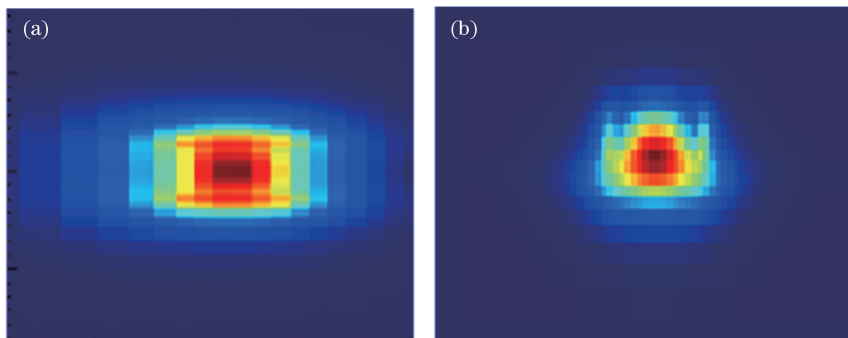


图 4 不同波导内部的模场分布。(a)矩形波导;(b) slot 波导

Fig. 4 Mode field distributions inside the waveguide. (a) Rectangular waveguide; (b) slot waveguide

此外,本文仿真了 FCW 结构中反馈波导长度对整体传输特性的影响。输入光波长在 $1530\sim 1590\text{ nm}$ 之间变化,反馈波导的长度分别设为微环环长一半的奇数倍和偶数倍。相同结构参数下双边微环谐振器下载端的输出光谱如图 5 所示。仿真结果表明:当反馈波导的长度为微环一半环长的偶数倍时,即 $2n\pi R$ ($n=1,2,3,\dots$) 时,结果如图 6 所示,自由光谱范围 FSR 从 14.5 nm 增加到了 29 nm ,实现了 FSR 的加倍;当反馈波导的长度为 $n\pi R$ ($n=1,3,5,\dots$) 时,结果如图 7 所示,自由光谱范围未发生改变。

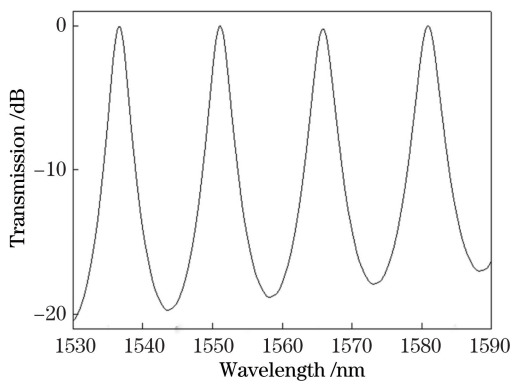


图 5 微环谐振器的输出光谱图

Fig. 5 Output spectrum of microring resonator

对比分析了 slot 型 FCW 谐振器和传统上下载型微环谐振器的输出光谱及输出端口功率。由图 8 所示的输出光谱图可知:当光波长为 $1545\sim 1560\text{ nm}$ 时,传统上下载型微环的消光比绝对值为 21 dB ,FCW 结构的消光比绝对值最大可达 32 dB ,改进型结构的消光比相对传统型提高了 11 dB 。消

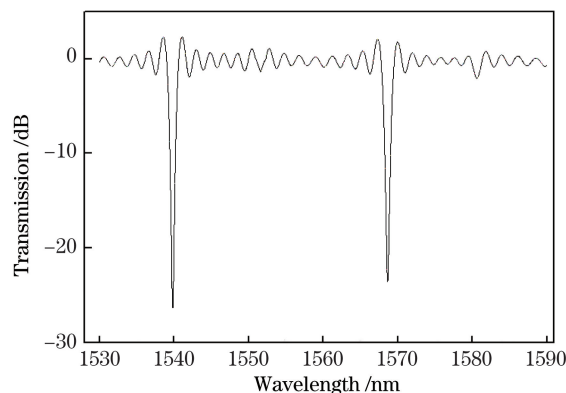


图 6 反馈波导长度为 $2\pi R$ 时 FCW 结构的输出光谱

Fig. 6 Output spectrum of FCW structure with feedback waveguide length of $2\pi R$

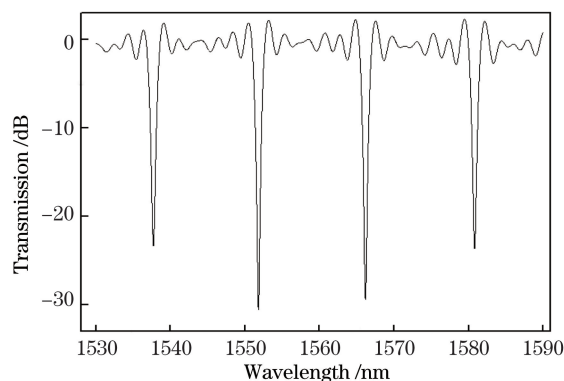


图 7 反馈波导长度为 $3\pi R$ 时 FCW 结构的输出光谱

Fig. 7 Output spectrum of FCW structure with feedback waveguide length of $3\pi R$

光比越大,说明器件的滤波特性越好,灵敏度越高。由图 9 所示的输出端口功率图可知,在改进型结构光谱最强的波长范围内,slot 型反馈耦合波导微环

谐振器输出端功率最大为 7.4×10^{-6} W, 而微环的只有 1.5×10^{-6} W, 进一步说明了改进型结构较好地提高了光的传输效率。为了进一步优化谐振器的性能, 模拟得到了微环与直波导之间的间距分别为 0.2, 0.18, 0.16 μm 时的输出光谱。从图 10 所示的仿真结果可以看出, 随着间距增大, 带宽逐渐减小, 消光比逐渐提高, 当间距为 0.2 μm 时, 改进型结构的反射带宽减小到了 1 nm, 而微环的为 2 nm, 改进型结构的带宽只有原来的 1/2, 品质因数 Q 也相应增强了。在窄带滤波器中, 自由光谱范围的提高可以减小信道间的串扰, 消光比的提升和带宽的减小能够进一步提高滤波性能。

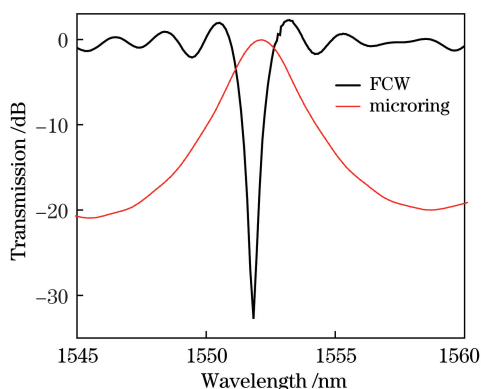


图 8 FCW 谐振器和传统微环谐振器的输出光谱
Fig. 8 Output spectra of both FCW and traditional microring resonators

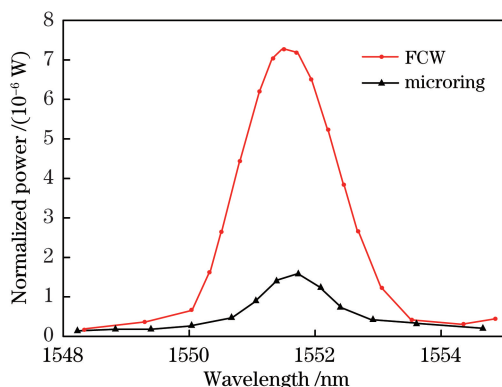


图 9 FCW 谐振器和传统微环谐振器的输出端口功率
Fig. 9 Output powers of FCW and traditional microring resonators

4 结 论

为了提高传感器件的自由光谱范围和灵敏度, 本文提出了一种 slot 结构的反馈耦合波导微环谐振器。利用传输矩阵法分析了该改进型结构对相位、自由光谱范围及输出性能的影响, 并用三维有限差分软件 FDTD 进行了仿真, 得到了光在 slot 波导

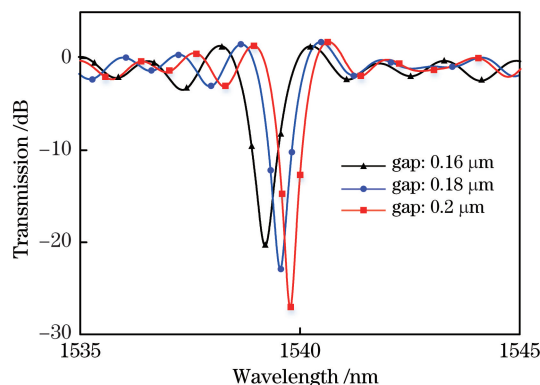


图 10 间距对输出光谱的影响

Fig. 10 Effect of gap on output spectrum

芯层传播时波导内部的模场分布图。结果表明, 在相同的参数下, slot 型波导芯层中传输的光强度比矩形波导结构的增强了, 传输光波在包层中的耗散也相应减少了。分析了波导宽度 w 、狭缝宽度 s_w 、反馈波导长度对输出性能的影响, 结果表明: 当 $w = 200$ nm、 $s_w = 60$ nm 时, 波导的损耗较低; 当反馈波导的长度为微环周长一半的偶数倍时, 谐振器的自由光谱范围得到了提高。此外, 对比了 slot 型 FCW 结构和上下载型微环谐振器的输出光谱与输出端口的功率, 改进型结构的消光比、品质因数和输出端口功率较微环谐振器都有所提升, 而消光比、品质因数和自由光谱范围的提升表明传感器件的灵敏度和测量范围也得到了提升。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Zhang S L. Silicon-based optical microcavities and their applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 1-9.
张森林. 硅基光学微腔的特性及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 1-9.
- [3] Wu L H, Wang M H. Photonic crystal optical signal splitter based on micro resonator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031301.
吴立恒, 王明红. 基于微谐振器的光子晶体光信号分离器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031301.
- [4] Little B E, Chu S T, Hryniewicz J V, et al. Filter synthesis for periodically coupled microring resonators [J]. Optics Letters, 2000, 25(5): 344-346.
- [5] Gui L, Zuo J C, Wu Z L, et al. A steady model of silicon based microring including nonlinear optical

- effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0419001.
- 桂林, 左健存, 吴中林, 等. 一种包含非线性光学效应的硅基微环稳态模型[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0419001.
- [6] Gui C C. Optical signal processing using silicon-based optical waveguides[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 6-10.
- 桂成程. 基于硅基光波导的光信号处理[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 6-10.
- [7] Zhou L J, Sun X M, Li X W, *et al.* Miniature microring resonator sensor based on a hybrid plasmonic waveguide[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2011, 11(7): 6856-6867.
- [8] Dong B Q, Chen S Y, Zhang Z, *et al.* Photoacoustic probe using a microring resonator ultrasonic sensor for endoscopic applications[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4372-4375.
- [9] Kui L F, Uddin M R. Photonic microring resonator modulated resonance response analysis [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(8): 275.
- [10] Wei B, Dai T G, Wang G C, *et al.* High-sensitivity photonic current sensor based on Si dual-ring resonator[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2017, 28(2): 128-132.
- 魏兵, 戴庭舸, 王根成, 等. 基于硅基双微环谐振腔的高灵敏度电流传感器[J]. *光电子·激光*, 2017, 28(2): 128-132.
- [11] Pelc J S, Rivoire K, Vo S, *et al.* Picosecond all-optical switching in hydrogenated amorphous silicon microring resonators[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3797-3810.
- [12] Masri N M H, Uddin M R, Kui L F. WDM system based on radius variation of photonic microring resonators[C]//2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCORED), December 13-14, 2017, Putrajaya, Malaysia. New York: IEEE, 2017: 243-246.
- [13] Chen P X, Chen S T, Guan X W, *et al.* High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6304-6307.
- [14] Yan H, Huang L J, Xu X C, *et al.* Unique surface sensing property and enhanced sensitivity in microring resonator biosensors based on subwavelength grating waveguides[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29724-29733.
- [15] Ma T, Yuan J H, Li F, *et al.* Microdisk resonator with negative thermal optical coefficient polymer for refractive index sensing with thermal stability[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 4900212.
- [16] Xiong Y L, Ye W N. Silicon MMI-coupled slotted conventional and MZI racetrack microring resonators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(19): 1885-1888.
- [17] Kargar A, Chao C Y. Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring sensors[J]. *Josa A*, 2011, 28(4): 596-603.
- [18] Almeida V R, Xu Q F, Barrios C A, *et al.* Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(11): 1209-1211.