

doi:10.3788/gzxb20154408.0823003

马赫曾德环腔相位调制器的研究

陈曜^{1,2}, 何鹏程², 卜天容², 丁玉丽²

(1 广州民航职业技术学院 飞机维修工程学院, 广州 510000)

(2 华东交通大学 电气与电子工程学院, 南昌 330013)

摘要:为提高相位调制器的调制效率,结合单直波导光学环腔与带反馈的马赫曾德,提出用环形谐振腔等效为马赫曾德的上、下臂的新结构.采用耦合模理论推导了该模型的输出相位及归一化光强输出公式,数值分析了传输损耗因子、耦合角度对归一化输出光强及输出相位的影响.分析表明,输出光相位谱线随敏感环相位改变呈周期性变化,当耦合角度逐渐增大时,输出光相位谱线变尖锐,此时若要使输出相位产生 π 的相位差,敏感环的相位调制角度需较大.当传输因子较小时,相位谱线变化比较平缓,其最大值与最小值之间的差值不满足 π 的相位差.根据分析结果对结构参量进行优化,发现通过调节敏感环结构的耦合系数可以提高调制效率,仿真结果表明,当敏感环相位变化 0.1π 时,可以输出 π 的相位变化,同时归一化光强保持在0.9,满足了差分相移键控所需要的相位变化和信号幅度一致的要求,为进一步研究相位调制器提供理论依据.

关键词:耦合系数;差分相移键控;过耦合;欠耦合;临界耦合

中图分类号:TN256

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)08-0823003-5

Study on Mach-Zehnder Microring Resonator Phase Modulator

CHEN Yao^{1,2}, HE Peng-cheng², BU Tian-rong², DING Yu-li²

(1 Aircraft Maintenance Engineering College of Guangzhou Civil Aviation School, Guangzhou 510000, China)

(2 School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To improve the efficiency of phase modulator, the ring resonator which is equivalent to Mach-Zehnder's upper and lower arm was proposed by combining the advantages of the optical microring and Mach-Zehnder. The normalized output intensity and output phase were derived by coupled-mode theory. The effects of the transmission loss factor and the coupling angle on the normalized optical intensity and phase were numerically analyzed. The analysis results show that the output light spectrum cyclical changes as phase-sensitive ring phase changes. When the coupling angle increases, the output light spectrum becomes more acute, the output of π need the greater phase modulation. When the transmission factor is small, the phase change is relatively flat spectrum, the difference between maximum and minimum values is not met π . By optimizing structure parameters of Mach-Zehnder microring resonator, sensitive ring structure can improve the modulation efficiency. Simulation results show that when the phase shift of the sensitive ring is 0.1π , the output phase shift can be achieved π , and the normalized intensity can be kept 0.9 at the same time. The consistent requirements of phase shift and signal amplitude in differential phase shift keying is implemented, which providing a theoretical basis for further study of phase modulator.

Key words: Coupling coefficient; Differential phase shift keying; Over coupling; Under coupling; Critical coupling

OCIS Codes: 230.3120; 280.1415; 230.3990; 230.7370; 230.0230

基金项目:北京大学开放课题(No. 2012GZKF031214)和广西自然科学基金(No. 2012GXNSFBA053164)资助

第一作者:陈曜(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向为光学微环相位调制及生物传感器. Email: yaochen9898@163.com

收稿日期:2014-12-03;录用日期:2015-05-08

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

0 引言

相位调制是一种用载波相位表示输入信号的调制方式,其具有较好的抗干扰特性,在有衰落的信道中也能获得很好的效果.其中差分相移键控与幅移键控相比,接收端灵敏度可以提高 3 dB,且能够有效抑制光纤的非线性效应^[1],引起广泛关注.在实现差分相移键控的结构中,高 Q 值的光学环腔调制器件因其尺寸小^[2-3]、功耗低^[4]成为一种重要的相位调制结构.

光学环腔调制器通过电光效应改变环形波导的有效折射率,对谐振波长进行调制,控制其输出相位^[5],但谐振波长调制极为敏感,在应用中很难使器件稳定谐振在需要的波长^[6],而且较低的调制效率限制了器件的尺寸及功耗^[7].近年来有学者提出通过改变光学环腔和波导间耦合系数进行调制^[8-9],使谐振状态在过耦合和欠耦合两种状态间转换,实现输出相位的改变^[10].比较这两种调制方式,耦合系数调制可以较好控制输出相位 π 的变化,减小调制的相位啁啾问题,因此,具有较高的稳定性和广阔的应用前景.

单直波导光学环腔^[11-12]在过耦合和欠耦合状态下满足输出相位差为 π ,但存在输出光强较弱的缺点.带反馈的马赫曾德(Mach-Zehnder, MZ) 环形结构^[13-14]可以增大输出光强,但 MZ 两臂需要较大的相位变化才能使输出达到差分相移键控的相位要求.将单直波导光学环腔结构和带反馈的 MZ 环形结构结合,提出了敏感环调制的马赫曾德结构,用环形谐振腔等效为 MZ 的上、下臂,通过敏感环的相变改变 MZ 下臂的相位,使结构的等效耦合系数在过耦合和欠耦合状态间相互转化,实现高效的耦合调制方式.敏感环只需变化很小的角度 0.12π ,就能使输出相位和输出信号幅度达到差分相移键控所需的要求,且输出光强始终保持在归一化光强的 0.8 以上.

1 模型与理论分析

1.1 单直波导光学环腔结构

单直波导光学环腔结构如图 1.

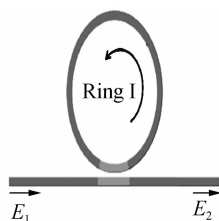


图 1 单直波导光学环腔结构

Fig. 1 The structure of single micro-ring resonator

根据耦合模理论,单直波导光学环腔的输出场强和相位变化表达式分别为

$$E_2 = \frac{t - ae^{i\theta}}{1 - ta e^{i\theta}} E_1 \quad (1)$$

$$\phi = \pi + \theta + \arctan \left(\frac{t \sin \theta}{a - t \cos \theta} \right) + \arctan \left(\frac{at \sin \theta}{1 - at \cos \theta} \right) \quad (2)$$

式中 E_1 和 E_2 分别表示直波导的输入和输出光场, t 为自耦合因子, a 为传输因子, θ 为光在环中绕行一圈经历的相变.

由输出相位式(2)易知,单直波导光学环腔在欠耦合($t > a$)和过耦合($t < a$)两种状态下输出光场的相位特性如图 2.当器件工作在谐振波长时,两种状态输出光场会有 π 的相变,这一特性可以用来实现差分相移键控所需的相变.

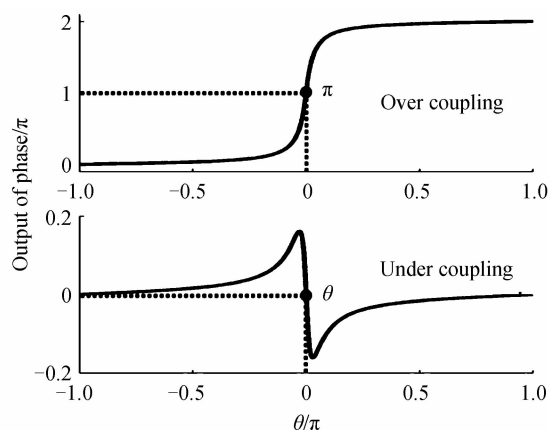


图 2 过耦合和欠耦合状态下的光场的输出相位

Fig. 2 Phase of output light in over-coupling and under-coupling

1.2 引入带反馈环的马赫曾德结构

由式(1)可以看出,在谐振波长下,当 $t = a$ 时,输出光场为 0,若要提高输出光场,则需远离临界耦合状态,但 θ 需改变很大的角度.为解决单直波导光学环腔输出光场较弱的问题,引入带反馈环的 MZ 结构^[10],如图 3.

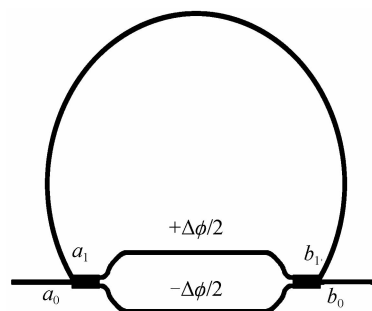


图 3 带反馈环的 MZ 结构

Fig. 3 Mach-Zehnder structure with feedback

当结构工作在谐振波长时,即 $\theta = 2n\pi + \frac{\pi}{2}$

($n=0, 1, 2, \dots$) 时,输出光场 b_0 为

$$b_0 = j e^{-i\beta} \left(\frac{\sigma_1 - \sin \frac{\Delta\phi}{2}}{1 - \sigma_1 \sin \frac{\Delta\phi}{2}} \right) a_0 \quad (3)$$

式中 σ_1 为大环的传输损耗因子, θ 为光在 MZ 上臂的大环中绕行一圈经历的相变. L_x 为 MZ 的臂长, 取值为 $L_x = 3/4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 30 \mu\text{m}$, $\sigma_1 = 9 \text{ dB/cm}$, 通过改变 $\Delta\phi$, 可使器件的输出光强和相位发生变化, 如图 4.

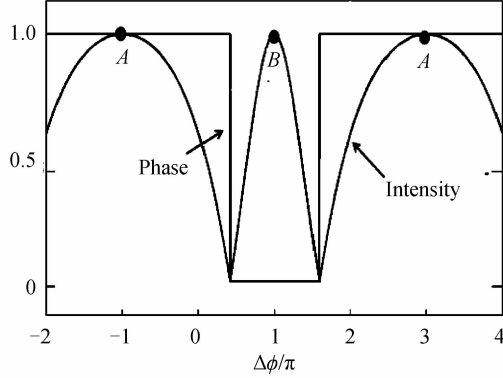


图 4 马赫曾德环形结构的输出光强和相位与两臂的相位差的关系

Fig. 4 The relationship of the output light intensity and the phase of Mach-Zehnder micro-ring resonator with the phase difference of two arms

图 4 中, 点 A 和 B 为调制器的工作点, 这两点的输出光场强度几乎一致, 且相位差为 π . 当输出光场强度为峰值时, 调制中 $\Delta\phi$ 需变化 2π . 若能以更小的 $\Delta\phi$ 变化, 实现工作点在 A 和 B 间变化, 则能提高结构的调制效率.

2 敏感环结构

由图 2 相变曲线可以得出, 若取 $t = 0.95$, $a = 0.9$, 则 θ 变化 0.12π , 就能实现图 4 中工作点在 A 和 B 间变化, 提高调制器的调制效率. 因此, 在图 3 的基础上引入敏感环结构, 如图 5.

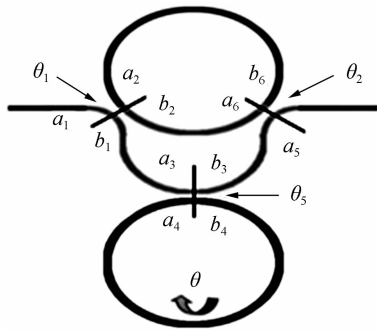


图 5 敏感环调制器结构图

Fig. 5 The structure of sensitive ring modulator

设入射光的场强为 a_1 , 中间半环与上环左端之间的耦合角为 θ_1 (此区域简称 I 区), 中间半环与上环右端之间的耦合角为 θ_2 (此区域简称 II 区), 中间半环与敏感环之间的耦合角为 θ_3 (此区域简称 III 区), 分别令 $t_1 = \cos \theta_1$, $k_1 = \sin \theta_1$; $t_2 = \cos \theta_2$, $k_2 = \sin \theta_2$; $t_3 = \cos \theta_3$, $k_3 = \sin \theta_3$. 三个耦合区的场强可表示为

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & -jk_1 \\ -jk_1 & t_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 & -jk_2 \\ -jk_2 & t_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_3 & -jk_3 \\ -jk_3 & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 b_1, b_2 分别为中间半环、上环在 I 区域输出端的场强, a_1, a_2 为此区域输入端的场强; b_5, b_6 分别为中间半环右端、上环右端在 II 区域输出端的场强, a_5, a_6 为此区域输入端的场强; b_3, b_4 分别为中间半环、敏感环在 III 区域输出端的场强, a_3, a_4 为此区域输入端的场强.

假设上环的传输系数为 σ_1 , 中间半环的传输系数为 σ_2 , 下环的传输系数为 σ_3 , 则上环、中间半环、下环中传输的场强关系可表示为

$$\begin{cases} a_2 = b_6 \sigma_1 e^{-j\beta_1} \\ a_6 = b_2 \sigma_1 e^{-j\beta_1} \\ a_3 = b_1 \sigma_2 e^{-j\beta_2} \\ a_5 = b_3 \sigma_2 e^{-j\beta_2} \\ a_4 = b_4 \sigma_3 e^{-j\beta_3} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \theta$ 分别为 b_6 与 a_2 , b_2 与 a_6 , b_1 与 a_3 , b_3 与 a_5 , b_4 与 a_4 的相位关系. 将式(4)~(7)联立, 解得敏感环调制结构的场强传输函数为

$$\frac{b_5}{a_1} = ABt_2\sigma_2 e^{-j\beta_2} - jk_2\sigma_1 e^{-j\beta_1} C \quad (8)$$

式中,

$$\begin{aligned} A &= \frac{t_3\sigma_2 e^{-j\beta_3} - t_3^2\sigma_2\sigma_3 e^{-j(\beta_3+\theta)} - k_2^2\sigma_2\sigma_3 e^{-j(\beta_1+\theta)}}{1 - t_3\sigma_3 e^{-j\theta}} \\ B &= \frac{t_1 - t_1^2 t_2 \sigma_1^2 \sigma_3 e^{-j(\beta_1+\beta_2)} - k_1^2 \sigma_1^2 t_2 e^{-j(\beta_1+\beta_2)}}{1 - t_1 t_2 \sigma_1^2 \sigma_3 e^{-j(\beta_1+\beta_2)} + Ak_1 k_2 \sigma_1 \sigma_2 e^{-j(\beta_1+\beta_2)}} \\ C &= \frac{-jk_1 - ABjk_2 t_1 \sigma_1 \sigma_2 e^{-j(\beta_1+\beta_2)}}{1 - t_1 t_2 \sigma_1^2 \sigma_3 e^{-j(\beta_1+\beta_2)}} \end{aligned}$$

2.1 调制器的输出相位随敏感环的相位变化的关系

θ_3 分别为 $0.6\pi, 0.8\pi, 0.95\pi$ 时, 调制器的输出相位 Φ 随敏感环相位 θ 变化的关系如图 6.

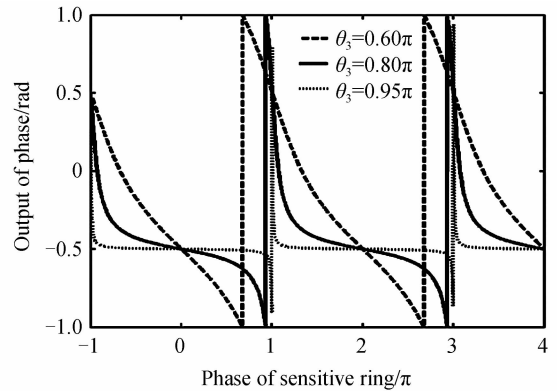


图 6 不同的耦合角度下敏输出光相位随敏感环的相位变化的关系

Fig. 6 The relationship of output phase change with sensitive ring phase in different coupling angle

从图 6 中可知, 输出光相位谱线随敏感环相位 θ

的改变呈周期性变化,当 θ_3 逐渐增大时,输出光相位谱线变得越尖锐。 $\theta_3 = 0.6\pi$ 时的谱线如齿状般改变,此时若要使输出相位产生 π 的相位差,敏感环的相位需改变约 $\pi/2$,调制角度大。 $\theta_3 = 0.95\pi$ 时的输出相位谱线过于尖锐,敏感环相位 θ 改变的角度过小,不易控制。选择 $\theta_3 = 0.8\pi$,其输出相位谱线比较适合实际应用。

敏感环的 σ_3 取不同值时,输出相位 Φ 随相位 θ 变关系如图7。

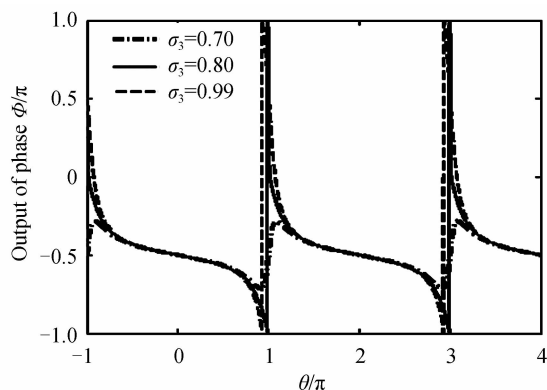


图7 不同敏感环传输因子输出光相位随敏感环的相位变化关系

Fig. 7 The relationship of output phase change with sensitive indifferent transmission factor of sensitive ring

从图7中可知,传输因子较小时,如 $\sigma_3 = 0.70$ 时,相位谱线变化比较平缓,其最大值与最小值之间的差值不满足 π 的相位差。当 σ_3 为0.80时,可以满足相位差为 π 的要求,但对应的输出相位在 $0 \sim \pi$ 之间的上升和下降的相位谱线几乎重合,调制角度太窄,难以控制 θ 的变化,当 $\sigma_3 = 0.99$ 时,调制幅度为 0.1π ,输出相位满足差分相位键控所需要,且此时光在敏感环中的传输损耗较小。

2.2 优化的敏感环结构的光强和相位输出

综合图6、图7的分析,设定结构的参量: $\theta_1 = 0.5\pi$ 、 $\theta_2 = 1.99\pi$ 、 $\theta_3 = 0.8\pi$ 、 $\sigma_1 = 0.999$ 、 $\sigma_2 = 0.9999$ 、 $\sigma_3 = 0.99$ 、 $\beta_2 = 0.5\pi$ 、 $\beta_1 = \pi$ 、 $\beta_3 = 0.5\pi$ 、 $\beta_4 = 0.5\pi$ 。敏感环调制器输出光强 T 和输出相位 Φ 随相位 θ 的变化如图8。

图8中A点 $\theta = 0.95\pi$,其输出光强 $T = 0.9$ 、输出相位 $\Phi = \pi$;图中B点 $\theta = 1.05\pi$,其输出光强 $T = 0.9$ 、输出相位 $\Phi = 0$ 。敏感环只需变化 0.1π ,可使A、B两点输出相位差 π ,并且这两点的输出光强保持不变,这正是差分相移键控所需要的,且A、B两点输出光强均为归一化光强0.9,如果采用电光调制的敏感环周长为 $100 \mu\text{m}$,使敏感环的相变 0.1π ,此时的驱动电压小于 100 mV ,比目前硅基调制器在Gbit/s量级调制速率的最小驱动电压 $150 \text{ mV}^{[15]}$ 减小了30%以上,实现了器件的低功耗。

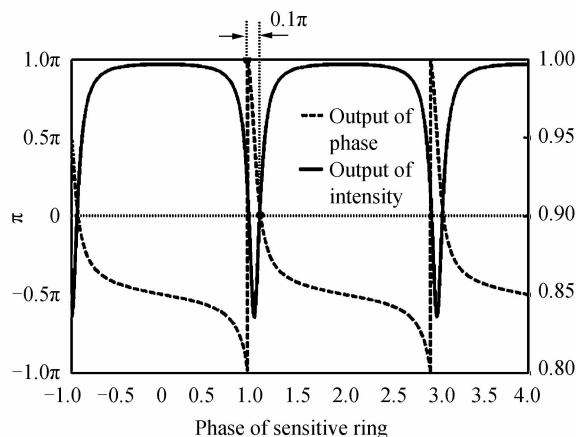


图8 敏感环调制器输出光强和相位

Fig. 8 The output intensity and phase of sensitive ring modulator

3 结论

单直波导光学环腔在过耦合和欠耦合状态下满足输出相位差为 π ,但存在输出光强较弱的缺点。带反馈的MZ环形结构可以增大输出光强,但MZ两臂需要较大的相位变化才能使输出达到差分相移键控的相位要求。相比于单直波导光学环腔和带反馈的MZ环形结构,敏感环调制结构只需很小的相位变化就可以有更好的输出光强,同时完成差分相移键控所需的幅度和相位变化。仿真结果表明,敏感环的相位只需变化 0.1π ,可实现差分相移键控所需的相位差,且归一化输出光强保持在0.9,为高效相位调制研究提供了理论结构模型。

参考文献

- [1] GNAUCK A H, WINZER P J. Optical phase-shift-keyed transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(1): 115-130.
- [2] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 325-327.
- [3] XU Q, MANIPATRUNI S, SCHMIDT B, et al. 12.5 Gbit/s carrier-injection-based silicon micro-ring silicon modulators[J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 430-436.
- [4] ROSENBERG J C, GREEN W M, ASSEFA S, et al. Low-power 30 Gbps silicon microring modulator[C]. CLEO: Applications and Technology. Optical Society of America, 2011: PDPB9.
- [5] DONG P, LIAO S, FENG D, et al. Low V_{pp}, ultralow-energy, compact, high-speed silicon electro-optic modulator[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22484-22490.
- [6] PADMARAJU K, OPHIR N, XU Q, et al. Error-free transmission of DPSK at 5 Gb/s using a silicon microring modulator[C]. European Conference and Exposition on Optical Communications. Optical Society of America, 2011: Th. 12. LeSaleve. 2.
- [7] PADMARAJU K, OPHIR N, MANIPATRUNI S, et al. DPSK modulation using a microring modulator[C]. CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2011: CTuN4.

- [8] SACHER W, GREEN W M, ASSEFA S, *et al.* Coupling-modulated microrings for DPSK modulation [C]. CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2013: CTu2F. 3.
- [9] SACHER W D, GREEN W, ASSEFA S, *et al.* 28 Gb/s silicon microring modulation beyond the linewidth limit by coupling modulation [C]. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2012: OM3J. 2.
- [10] YE T, ZHOU Y, YAN C, *et al.* Chirp-free optical modulation using a silicon push-pull coupling microring[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(6): 785-787.
- [11] LOU Xiao-wei, CUI Jin-jiang, DONG Ning-ning, *et al.* Analysis of sharpness fano resonance line based on eye-like resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 0113002.
娄小伟, 崔锦江, 董宁宁, 等. 基于眼型谐振的 Fano 谐振曲线尖锐度的分析[J]. *光子学报*, 2015, **44**(1): 0113002.
- [12] GAO Lei, WANG Tao. Time delay characteristics of microring resonator device base on optical kerr effect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0523004.
高磊, 王涛基于 Kerr 效应的微环谐振腔延时器件[J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 0523004.
- [13] ZHANG Qi, ZHOU Jun, CHEN Jin-ping, *et al.* Temperature sensing characteristics of all-fiber Mach-Zehnder interferometer based on bitaper-LPPG-bitaper structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **42**(3): 308-310.
张琪, 周骏, 陈金平, 等. 基于 Bitaper-LPPG-Bitaper 结的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的温度传感特性[J]. *光子学报*, 2013, **42**(3): 308-310.
- [14] BU Tian-rong, CHEN Yao, HE Peng-cheng, *et al.* Study on the transducer sensitivity of racetrack optical micro-ring resonator with feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0823005.
卜天容, 陈曜, 何鹏程, 等. 反馈式跑道型光学微环的传感灵敏度研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 0823005.
- [15] MANIPATRUNI S, PRESTON K, CHEN L, *et al.* Ultra-low voltage, ultra-small mode volume silicon microring modulator[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(17): 18235-18242.