

一种包含非线性光学效应的硅基微环稳态模型

桂林¹, 左健存¹, 吴中林², 王胜利²

¹上海第二工业大学工学部计算机与信息工程学院, 上海 201209;

²上海第二工业大学文理学部, 上海 201209

摘要 微环谐振器是集成光学中的关键器件, 它的实际滤波特性会受到输入光功率的影响, 但长期以来, 微环谐振器的稳态模型仅包含线性光学作用。考虑微环谐振器反馈波导中的光学非线性引入的损耗和相移, 以及微环耦合器中光学非线性引入的耦合比改变等因素, 推导了考虑自相位调制、双光子吸收和热光效应的微环谐振器的非线性模型。重点讨论了双光子吸收和光学非线性引入的耦合器耦合比改变对微环谐振器陷波深度的影响, 仿真结果表明, 在热光效应和自相位调制产生谐振谱线频移的同时, 功率相关的耦合器耦合比的改变对微环谐振器陷波深度的影响较大。

关键词 非线性光学; 硅光子学; 微环谐振器; 光波频率域模型

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0419001

A Steady Model of Silicon Based Microring Including Nonlinear Optical Effects

Gui Lin¹, Zuo Jiancun¹, Wu Zhonglin², Wang Shengli²

¹School of Computer and Information Engineering, College of Engineering,

Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

²College of Arts and Science, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China

Abstract Microring resonator is a key component in integrated optics, and its filtering characteristics in application are affected by the input optical power. However, the steady model of microring resonator only includes the linear optical effects for a long time. In this paper, a new steady model of microring resonator is deduced. The loss and phase shift in the feedback waveguide of the microring resonator and the modification of coupling ratio in the microring coupler induced by optical nonlinear effects are taking into account, and following nonlinear optical effects in silicon waveguide are included: self-phase modulation, two photon absorption and thermal-optical effect. Then the influences of two photon absorption and the modification of coupling ratio in the coupler induced by the optical nonlinearity on the depth of notch filter are emphatically discussed. Simulation results show that when the thermal-optical effect and the self-phase modulation generate the frequency shift of the resonance spectrum, the change of the coupling ratio of the power dependent coupler has a great influence on the notch filter depth of the microring resonator.

Key words nonlinear optics; silicon photonics; microring resonator; model of light wave frequency domain

OCIS codes 190.4380; 140.4780; 130.3120

1 引 言

硅光子学是近年来的热点研究领域^[1], 微米尺寸的微环谐振器(MRR)是硅基光子器件中的常见

结构, 国内外已有多个研究组利用该结构制作成了各种无源和有源光器件。其中无源光器件包括光滤波器^[2]、微波光子滤波器^[3]、微波光子移相器^[4]、光逻辑器件^[5]、可调谐硅基反射镜^[6]、可调谐光滤波

收稿日期: 2017-09-08; 收到修改稿日期: 2017-11-20

基金项目: 湖南省自然科学基金(11JJ6053)、上海第二工业大学内涵建设项目(A11NH170301)、上海第二工业大学校基金(EGD17XQD07)

作者简介: 桂林(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事面向光通信的硅基光子器件、无源光网络和 LED 通信等短距离光通信技术方面的研究。E-mail: guilin@sspu.edu.cn

器^[7]、光信号调制格式转换器^[8]、光学片上隔离器^[9]和生物传感器^[10]；有源器件包括光学调制器^[11]。微环谐振器已经成为硅基光子学领域研究人员常用的结构。

微环器件在光电子技术中的应用,不仅仅是材料的简单置换或者器件尺寸的缩小,而是构成了与传统器件有较大差异的新体系。在这个新体系中,由材料、波导结构和器件的光路结构共同决定了光学器件或者光电子器件的最终特性。与光纤、平面波导以及三五族半导体器件类似,在硅基微环器件中同样存在着光学非线性,但是光波在此器件中传播的特性是独特的^[12-13]。在硅基微环器件中有如下三种因素对光学非线性有贡献:1) 硅基材料本身较强的非线性;2) 微环谐振器波导横截面尺寸在纳米量级,在采用该波导结构的器件中传输光波,也会存在较强的光学非线性效应;3) 环形结构本身具有尖锐的滤波谱线,对微弱的非线性相移等因素比较敏感,最终导致了光学非线性增强。硅基材料、微环器件波导结构和器件的光路结构,这三重因素产生的光学非线性,使得光电子领域的研究人员不得不面对硅基微环类器件中的新问题,同时也激励研究人员应用新型器件的非线性特性拓展某些光电子技术。近十年来,研究人员通过微环中的光学非线性实现了光信号调制格式的转换^[8]、硅基全光二极管^[9]和光频率梳的产生^[14]、全光开关^[15]以及光学偏置光调制器^[16]。这些研究成果都巧妙地使用了硅基微环器件的非线性特性,使人们看到了这种新型集成光学器件的应用前景。

然而,在微环的理论模型研究方面,研究人员多采用仅仅包含线性传播因素的简单模型,没有考虑非线性光学效应的影响,或者通过简单的频移来理解微环中的复杂非线性过程;另一些研究人员采用微环的耦合模式理论进行求解,分析微环的动态过程;还有一些研究人员对输入微环的光信号按照时域有限差分法(FDTD)进行求解^[17],这些方法在时间域进行分析,缺乏对微环频率域的理解。

本文从光波在硅波导中传输的基本非线性薛定谔方程出发,考虑自相位调制(SPM)、双光子吸收(TPA)和热光效应,对微环中的反馈波导进行建模,同时将耦合器模型加入输入功率相关项,通过改进传统的微环线性模型,得到了包含微环谐振器中非线性光学效应的新模型。

2 硅基谐振结构中光传输的基本模型

因为微环谐振器结构中由非线性光学效应导致

的传播现象既涉及硅基波导中非线性光传输的基本原理,也与微环谐振器本身的结构密切相关,因此,本节首先讨论光波在硅波导中传输的非线性模型,然后利用此模型修正微环谐振器中反馈波导和光学耦合器的光传输模型,在此基础上,推导微环谐振器透射谱线的关键参数。

2.1 光波在硅波导中传输的非线性模型

根据硅基光学非线性研究的结论,当单个光波传输时,硅基波导中存在以下光学非线性效应:自相位调制、双光子吸收、自由载流子色散(FCA)以及三阶非线性极化率的各向异性和色散。由于光学作用的响应时间在1 ps以下,在建立稳态模型时可以认为这些因素是没有时间延迟的,即输入光波立即产生此影响。考虑单个光场输入微环谐振器的简单情况,光场在波导中传输满足如下非线性薛定谔方程^[12]:

$$\frac{\partial A_c(\omega)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A_c(\omega) - i\beta(\omega)A_c(\omega) + i\gamma \times |A_c(\omega)|^2 A_c(\omega) - \frac{\beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} |A_c(\omega)|^2 A_c(\omega), \quad (1)$$

式中 ω 为待分析的光波频率, $A_c(\omega)$ 为光波的复包络,满足 $P_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} |A_c(\omega)|^2 d\omega$, α 为单位长度波导的功率损耗系数, $\beta(\omega)$ 是线性传播常数, γ 是硅波导中的非线性系数, β_{TPA} 是硅材料中的双光子吸收系数, A_{eff} 是硅基波导的有效模场面积。 γ 是材料和波导共同起作用的结果,它可以表示为:

$$\gamma = 2\pi n_2 f_c / (cA_{\text{eff}}), \quad (2)$$

式中 n_2 是硅材料中的克尔非线性系数,只与材料有关, f_c 是输入光波频率, c 为真空中的光速。有效模场面积 A_{eff} 同时出现在自相位调制和双光子吸收项中,该参数由硅波导结构决定,横截面不同的硅波导将会产生差异较大的非线性系数和双光子吸收作用。对(1)式进行求解,可以得到:

$$A_c(\omega) = \sqrt{P_0} \exp[-\alpha L/2 - (\beta_{\text{TPA}}/A_{\text{eff}}) \times |A_c(\omega)|^2 L + i\gamma |A_c(\omega)|^2 L - i\beta(\omega)L], \quad (3)$$

式中 L 为波导长度。如果考虑输入光波为连续光,则输出光波的幅度 $a(P_0)$ 和相位 θ 分别为:

$$a(P_0) = \exp[-(\alpha/2 + P_0 \beta_{\text{TPA}}/A_{\text{eff}})L], \quad (4)$$

$$\theta = \theta_{\text{NLO}}(P_0) - \beta(\omega)L, \quad (5)$$

式中 $\theta_{\text{NLO}}(P_0)$ 为自相位调制效应引入的非线性相移,可以表示为:

$$\theta_{\text{NLO}}(P_0) = \gamma P_0 L. \quad (6)$$

(6)式是求解(1)式得到的结果,但(1)式没有考虑非

线性热光效应。事实上光波在传输过程中产生的热量会引起硅波导自身温度升高,温度升高导致波导折射率的改变,由于热光效应的存在,非线性相移会增加,将(5)式变为:

$$\theta = \theta_{\text{NLO}}(P_0) + \theta_{\text{NLTHO}}(P_0) - \beta(\omega)L, \quad (7)$$

式中 $\theta_{\text{NLTHO}}(P_0)$ 为稳态时热光效应引入的与温度相关的相移,可以表示为:

$$\theta_{\text{NLTHO}}(P_0) = K_{\text{TTHO}}\beta(\omega)L\Delta T, \quad (8)$$

式中 K_{TTHO} 为温度引起的折射率改变, ΔT 为波导热稳定时温度的增量,在硅材料中 $K_{\text{TTHO}} = 1.86 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

2.2 高功率条件下微环谐振器件的改进模型

微环是集成光学中的常用器件,如图 1 所示,它由如下两部分组成:一个 2×2 的光耦合器 F 和一段反馈波导 G。 2×2 光耦合器包含两个输入端口 A 和 B,两个输出端口 C 和 D,反馈波导 G 用来连接 C 和 B。

考虑光功率的影响,耦合器中输入与输出光场的关系可由如下方程描述:

$$\begin{bmatrix} E_D \\ E_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(P_0) & i\sqrt{1-r^2(P_0)} \\ i\sqrt{1-r^2(P_0)} & r(P_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \end{bmatrix}, \quad (9)$$

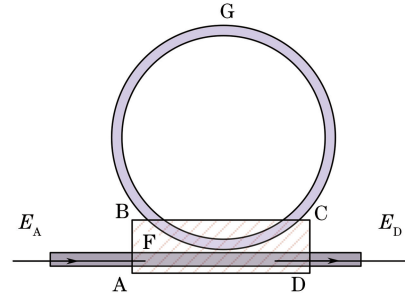


图 1 微环谐振器示意图

Fig. 1 Scheme of microring resonator

式中 $r(P_0)$ 是光功率作用下 2×2 光耦合器的端口 A 到 D(或 B 到 C)的耦合系数, $E_A \sim E_D$ 为各个端口的光场。该方程和以往仅仅考虑线性光传输的方程的最大区别在于,波导与波导之间的耦合系数变成了光功率的函数。在实际中,函数的具体形式取决于耦合器的设计。在反馈波导 G 中,光波满足如下方程:

$$E_B = E_C a(P_0) \exp(-i\theta). \quad (10)$$

考虑光波的稳态传输结论,即微环谐振器中真实的光场必然要同时满足(4)~(8)式。当光波在上述结构中达到稳定状态时,可以得到透射谱线 $T_{\text{NL}}^{\text{NF}}(P_0, \omega)$:

$$T_{\text{NL}}^{\text{NF}}(P_0, \omega) = \frac{E_D}{E_A} = \frac{r(P_0) - a(P_0) \exp\{-i[\theta_L(\omega) + \theta_{\text{NLO}}(P_0) + \theta_{\text{NLTHO}}(P_0)]\}}{1 - r(P_0)a(P_0) \exp\{-i[\theta_L(\omega) + \theta_{\text{NLO}}(P_0) + \theta_{\text{NLTHO}}(P_0)]\}}, \quad (11)$$

式中光波在反馈波导 G 中的相移为 $\theta_L(\omega)$ 。在弱光条件下,当反馈波导 G 的几何长度为 l 时, $\theta_L(\omega) = -\beta(\omega)l$ 。计算(8)式的关键在于两点:1)要得到耦合器耦合比随功率变化的具体关系;2)要得到热光相移 $\theta_{\text{NLTHO}}(P_0)$ 。

由于耦合器有多种形式,不同的耦合器光波耦合的原理也不相同。为了分析方便,采用最简单的耦合模型:即两个波导靠近时,光波同方向耦合的模型。将耦合器的耦合比表示为:

$$r_0 = \cos \theta_0, \quad (12)$$

$$\theta_0 = (K_{11} - K_{12})l_c, \quad (13)$$

式中 K_{11} 和 K_{12} 为光波在耦合区靠得很近的两个波导中传输时的线性传播常数, l_c 为耦合区长度。在高功率作用下, K_{11} 和 K_{12} 均会发生改变,从而引入额外的相移 $\theta_r(P_0)$, 耦合器的耦合比变为:

$$r(P_0) = \cos[\theta_0 + \theta_r(P_0)]. \quad (14)$$

2.3 微环谐振器的特征描述

微环谐振器的谐振状态是文献中分析较多的状

态,在谐振状态下,即 $f_c = f_0$, f_c 为输入光波频率, f_0 为微环谐振器的谐振频率,透射谱线的透射率 T 达到最小值 T_{min} 。在光功率较高时,谐振条件需满足如下方程:

$$\theta_{\text{NLO}}(P_0) + \theta_{\text{NLTHO}}(P_0) + \theta_L(2\pi f_c) = 2k\pi \Big|_{T=T_{\text{min}}}, \quad (15)$$

式中 k 为自然数,此时透射谱线的最小值 $T_{\text{min}}^{\text{NF}}$ 为:

$$T_{\text{min}}^{\text{NF}} \Big|_{\omega=\omega_c} = \frac{r(P_0) - a(P_0)}{1 - r(P_0)a(P_0)}. \quad (16)$$

在(15)式中,克尔光学非线性效应和热光效应均可以导致谐振频率发生平移,若仅仅考虑自相位调制的影响,微环谐振器透射谱线的平移可以表示为:

$$\Delta f = R_{\text{FS}}(\lambda)\theta_{\text{NLO}}(P_0)/(2\pi), \quad (17)$$

其中:

$$R_{\text{FS}}(\lambda) = c/[n_g(\lambda)l], \quad (18)$$

$$n_g(\lambda) = n_{\text{eff}}(\lambda) - \lambda dn_{\text{eff}}(\lambda)/d\lambda, \quad (19)$$

式中 R_{FS} 为微环谐振器中以波长 λ 表示的自由频谱

范围, n_g 为硅波导中的群折射率, n_{eff} 为硅波导中的有效折射率。由(7)、(8)、(17)和(18)式得到自相位调制在硅波导中引入的频率偏移 Δf_{SPM} 和热光效应引入的频率偏移 Δf_{THO} 为:

$$\Delta f_{\text{SPM}} = P_0 [n_2 f_c / (n_g A_{\text{eff}})], \quad (20)$$

$$\Delta f_{\text{THO}} = K_{\text{THO}} \Delta T f_c. \quad (21)$$

3 分析与讨论

尽管国内外已经有一些关于微环谐振器中非线性光学特性的研究,但是这些研究文献中多是仅仅给出实验结果^[16],即向微环中注入不同功率激光时微环谐振器谱线偏移的实验结果,或者仅分析单一因素的影响。这些实验结果得到的结论为:光学非线性效应对微环谐振器的主要影响在于,它能够使得微环的谐振频率发生漂移,同时改变微环谐振器透射谱线的最小值^[15-16]。结合本研究提出的微环谐振器透射模型,本节讨论不同非线性效应对微环谐振器的影响,包括:自相位调制和热光效应对微环透射谱线漂移的影响,以及输入光功率导致的耦合比改变和双光子吸收对微环透射谱线陷波深度的影响。

仿真中参数的取值如下: $n_2 = 1.3 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$, $n_{\text{eff}} = 3$, $n_g = 3.9$, $\beta_{\text{TPA}} = 5 \times 10^{-12} \text{ m/W}$, $\lambda_0 = 1552.2 \text{ nm}$, $l = 80 \text{ }\mu\text{m}$, $r_0 = 0.97$, 硅波导损耗为 3 dB/mm 。仿真时采用以频率偏移为单位的谱图,以 λ_0 为参考点, λ_0 为不考虑光学非线性效应时微环谐振器的一个谐振波长。

3.1 自相位调制和热光效应产生的非线性相移对微环透射谱线漂移的影响

当激光注入到微环谐振器时,首先起作用的是自相位调制效应,微环谐振器的谱线发生偏移,在这个过程中波导会被加热,随后在热光效应的作用下,波导的折射率发生改变,微环谐振器的谱线也会发生偏移。由于上述两个过程都发生在激光注入到微环谐振器之后,因此,在实验中很难界定最终的结果是怎样产生的。为了阐述自相位调制效应和热光效应对微环谐振器谱线的影响,本节分别分析这两种效应单独作用产生的结果。

首先仅仅考虑自相位调制,由于硅基克尔非线性不仅仅由材料的非线性决定,还依赖于波导的设计,尤其受到有效横截面积的影响。图2是由两种有效横截面积不同的硅波导构成的微环谐振器中自相位调制效应引起的谐振波长漂移,其中图2(a)的横截面积较大,非线性系数较小,而图2(b)的横截面积较小,非线性系数较大。由图2可以看出,即使

是非线性作用较强[图2(b)],在输入光功率达到 1 W 时,也仅仅引入 6.44 GHz 的相移。

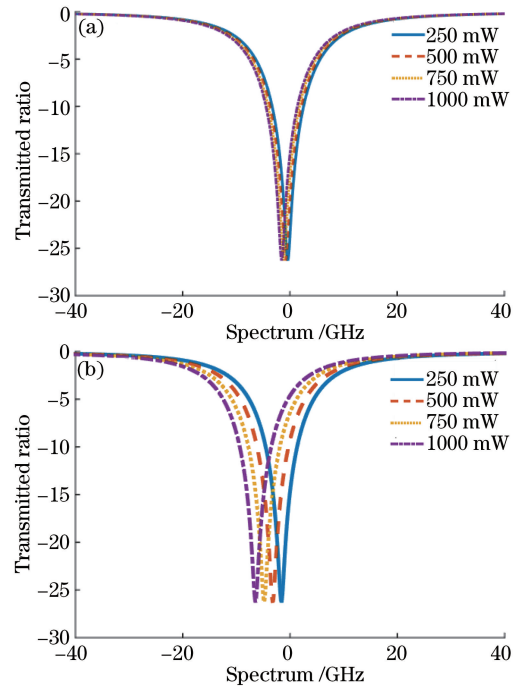


图2 由有效横截面积不同的两种硅波导构成的微环谐振器中自相位调制效应引起的谐振波长漂移。

(a) $A_{\text{eff}} = 0.4225 \text{ }\mu\text{m}^2$; (b) $A_{\text{eff}} = 0.1 \text{ }\mu\text{m}^2$

Fig. 2 SPM induced resonant wavelength shift in the microring resonators which are composed of two kinds of silicon waveguides with different effective cross section areas.

(a) $A_{\text{eff}} = 0.4225 \text{ }\mu\text{m}^2$; (b) $A_{\text{eff}} = 0.1 \text{ }\mu\text{m}^2$

若只考虑热光效应的影响,按照(21)式可以得到图3。由于考虑到输入光功率转换为温度的改变有一个复杂的热光动力学过程,该过程和硅波导及其衬底的具体设计有关,所以为了简化分析,图3中以两个稳态之间的温度变化来分析微环谐振波长的漂移。在所提模型中,最终温度和谐振波长漂移的

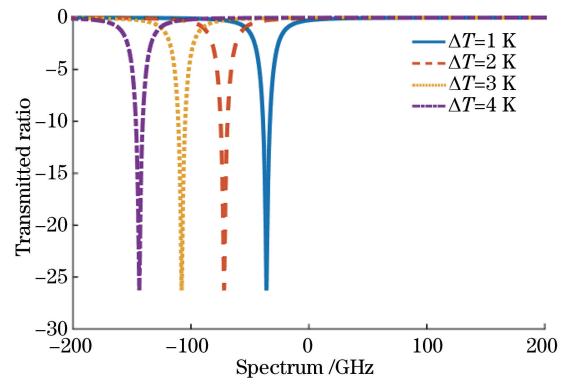


图3 微环谐振器中热光效应引起的谐振波长漂移

Fig. 3 Thermal-optical effect induced resonant wavelength shift in the microring

关系采用较为简单的(21)式来表示。图3的结论表明若仅按照材料的热光特性,波导温度升高1 K,将会导致35.9 GHz(0.2872 nm)的频率漂移,是图2中最大频率漂移的5.57倍。在实验中,波导温度升高1 K,所需要的光功率远低于1 W,若以20 mW计算,则热光效应产生的光谱漂移是自相位调制的278.5倍。

3.2 耦合比改变和双光子吸收对微环透射谱线陷波深度的影响

根据已有实验结论,注入光功率不仅会导致微环谐振器透射光谱漂移,而且会导致光滤波器的陷波深度发生改变^[13-14]。根据(3)和(14)式,在考虑非线性光学效应时,光功率可能引起波导损耗发生变化,同时也会影响微环谐振器中耦合器的耦合比。本节考虑微环谐振器中耦合器的耦合比改变和双光子吸收两种因素对微环透射谱线陷波深度的影响。

假设热光效应产生的光谱漂移为13.34 GHz(对应5°的相位改变),输入光波功率为100 mW,(14)式中耦合器产生的相移为 $\pi/180$,则有以下4种情况的陷波深度:1)线性传播的情况;2)仅考虑双光子吸收效应的影响;3)仅考虑光学非线性引起耦合器耦合比改变的影响;4)考虑2)和3)两种因素共同作用。上述4种情况如图4所示,由图4可知,由于光学非线性的种种作用,微环谐振器的陷波深度会发生改变,这与实验中的结论是吻合的^[10,13],但是不同类型的非线性作用也会导致微环谐振器的陷波深度有较大差异。对于双光子吸收,在100 mW时产生的陷波深度变化仅仅为1.39 dB(陷波深度增加),而这个结果是在线性光学作用产生陷波深度-26.25 dB时得到的。如果仅仅考虑光学非线性引

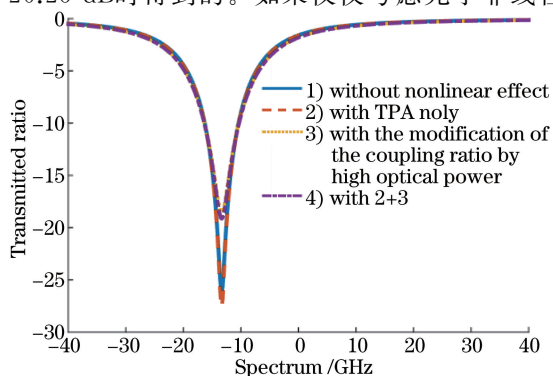


图4 微环谐振器模型中考虑不同光学非线性效应时陷波深度的变化

Fig. 4 Change of notch filter depth in consideration of different nonlinear optical effects in the model of microring resonator

起耦合器耦合比的改变,陷波深度将会减小7.66 dB,即透射率为-18.59 dB。由于耦合器的耦合比对热光效应比较敏感,同时热光效应不是直接改变光波幅度,而是通过改变(13)式中 K_{11} 和 K_{12} 的数值,进而改变(14)式中耦合器产生的相移,这种间接作用包含了耦合器结构设计的影响。由图4来看,(14)式所确定的耦合器模型对透射谱线的陷波深度有明显改变。

4 结 论

微环谐振器是集成光学中的关键器件,它的实际滤波特性会受到输入光功率的影响,但长期以来,微环谐振器的稳态模型多是仅仅包含线性光学作用的模型。本研究考虑微环谐振器反馈波导中的光学非线性引入的损耗和相移,以及微环耦合器中光学非线性引入的耦合比改变等因素,推导了考虑自相位调制、双光子吸收和热光效应的微环谐振器的非线性模型。通过数值仿真,分析了各种非线性效应对微环谐振器频率漂移和陷波深度改变的影响。通过该模型计算得出输入光功率对耦合器耦合比的影响是影响微环透射谱线的重要因素。

参 考 文 献

- [1] Hochberg M, Baehr-Jones T. Towards fabless silicon photonics[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 492-494.
- [2] Dong P, Feng N N, Feng D, *et al.* GHz-bandwidth optical filters based on high-order silicon ring resonators [J]. Optics Express, 2010, 18 (23): 23784-23789.
- [3] Chang Q, Li Q, Zhang Z, *et al.* A tunable broadband photonic RF phase shifter based on a silicon microring resonator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(1): 60-62.
- [4] Dong J, Liu L, Gao D, *et al.* Compact notch microwave photonic filters using on-chip integrated microring resonators[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 5500307.
- [5] Zhou P, Zhang L, Tian Y, *et al.* 10 GHz electro-optical OR/NOR directed logic device based on silicon micro-ring resonators [J]. Optics Letters, 2014, 39 (7):1937-1940.
- [6] Li X, Wang C, Yu H, *et al.* Tunable silicon reflection cavity mirror based on microring resonator [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1223002. 李霞,王超,余辉,等.基于微环谐振腔的可调谐硅基反射腔镜[J].光学学报,2016,36(12):1223002.
- [7] Wu D N, Wu Y D, Wang Y, *et al.* Research on

- tunable filter based on micro-ring resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0123002.
- 吴丹宁, 吴远大, 王玥, 等. 基于微环谐振腔的可调谐滤波器的研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0123002.
- [8] Ren Y, Song M P. Optical NRZ-to-RZ modulation format conversion based on cross phase modulation effects in silicon micro-ring resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706002.
- 仁艳, 宋牟平. 基于硅基微环谐振器交叉相位调制效应的非归零信号到归零信号光调制格式转换 [J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706002.
- [9] Fan L, Wang J, Varghese L T, *et al.* An all-silicon passive optical diode [J]. *Science*, 2012, 335(6067): 447-450.
- [10] Han X N, Han X Y, Shao Y C, *et al.* Study on polymer microring optical biosensor based on Slot waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0413001.
- 韩笑男, 韩秀友, 邵宇辰, 等. Slot 结构聚合物波导微环光学生物传感器研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0413001.
- [11] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, *et al.* Silicon optical modulators [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4: 518-526.
- [12] Lin Q, Painter O J, Agrawal G P. Nonlinear optical phenomena in silicon waveguides: modeling and applications [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16604-16643.
- [13] Tong X G, Liu J, Xue C Y. Thermal nonlinear effect in high Q factor silicon-on-insulator microring [J]. *Optics Communications*, 2017, 395: 207-211.
- [14] Kippenberg T J, Spillane S M, Vahala K J. Kerr-nonlinearity optical parametric oscillation in an ultrahigh-Q toroid microcavity [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(8): 083904.
- [15] Liu Y, Tong X G, Yu J L, *et al.* All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 0205006.
- 刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关 [J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205006.
- [16] Yan S Q, Dong J J, Zheng A L, *et al.* Optical-biased modulator employing a single silicon micro-ring resonator [J]. *Optics Communications*, 2016, 368: 58-62.
- [17] Shugayev R, Bermel P. Time-domain simulations of nonlinear interaction in microring resonators using finite-difference and coupled mode techniques [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19204-19218.