

# 基于光栅辅助微环结构的高斜率 Fano 谐振器

廖莎莎<sup>1,2,3\*</sup>, 包航<sup>1</sup>, 张甜甜<sup>1</sup>, 黄琮<sup>1</sup>, 冯玉婷<sup>1</sup>, 刘继伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆邮电大学通信与信息工程学院移动通信教育部工程研究中心移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065;

<sup>2</sup>东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 211189;

<sup>3</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 在集成光学回路中,相较于对称的洛伦兹线型,非对称的 Fano 谐振线型能实现光传输强度的急剧改变,从而有效提升光开关、调制器和传感器的灵敏度。提出了一种基于光栅辅助微环结构的 Fano 谐振器。该谐振器采用绝缘体上硅材料,通过在跑道微环内加入两组波导光栅结构实现 Fano 谐振。基于传输矩阵理论,推导了该谐振器的传输谱线,并分析了器件中不同结构参数对 Fano 谱线谐振峰位置、凹陷深度和斜率的影响,实现了最高斜率为  $-299.67$  dB/nm、凹陷深度为 9 dB、损耗为 6.4 dB 的 Fano 谐振谱线。该 Fano 谐振器具有斜率高、尺寸小、制造简单等优势,能广泛应用于光开关、光传感和光探测等领域。

**关键词** 集成光学; Fano 谐振器; 集成光学器件; 微环谐振器; 光栅; 硅光子学

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2213001

## High-Slope Fano Resonator Based on Grating-Assisted Microring Structure

Liao Shasha<sup>1,2,3\*</sup>, Bao Hang<sup>1</sup>, Zhang Tiantian<sup>1</sup>, Huang Cong<sup>1</sup>, Feng Yuting<sup>1</sup>, Liu Jiwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Engineering Research Center of Mobile Communications, Ministry of Education, School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Compared with the symmetric Lorentzian line shape, asymmetric resonant Fano line shape can realize dramatical variation of optical transmission intensity in the integrated optical circuits, which can effectively improve the sensitivity of optical switches, modulators, and sensors. A Fano resonator based on grating-assisted microring resonator is proposed. The resonator is made of silicon-on-insulator, and the Fano resonance is realized by adding two groups of waveguide grating structures in the runway microring. Based on the transfer matrix theory, the output spectra of the Fano resonator is deduced, the effects of variation of structural parameters in the resonator on the resonant wavelength, notch depth, and slope of the Fano spectra are analyzed. A Fano spectrum with the slope of  $-299.67$  dB/nm, notch depth of 9 dB, and insertion loss of 6.4 dB is realized. The Fano resonator has advantages of high slope, small size, and simple manufacture, which can be widely used in the fields of optical switching, optical sensing, and optical detection.

**Key words** integrated optics; Fano resonator; integrated optical device; microring resonator; grating; silicon photonic

**OCIS codes** 130.3120; 130.4815; 230.3120; 230.5750

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-05-24; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61801063)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201800605)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0597)、东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(K202005)、上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2021GZKF005)

通信作者: \*liaoss@cqupt.edu.cn

## 1 引言

在集成光学回路中, Fano 谐振器以独特的性能得到越来越多的关注。相较于对称的洛伦兹线型, Fano 谐振器能够产生更陡峭的非对称 Fano 谐振线型, 可以实现光传输强度的剧烈变化, 因而在全光开关<sup>[1-3]</sup>、调制器<sup>[4-6]</sup>、传感器<sup>[7-8]</sup>、滤波器<sup>[9-10]</sup>和非互易性光器件<sup>[11]</sup>等领域中被广泛使用。共振破坏性干涉是 Fano 谐振的基本特性之一, 在光学系统中, 离散态光束与连续态光束在一定的相位匹配条件下的相消干涉就可能产生非对称的 Fano 谐振, 其中离散态的光信号常用波长选择性高的谐振腔结构获得, 而连续态的光信号一般来自宽谱背景光源。在集成光学中, 常常采用微环结构来实现 Fano 谐振器, 这是由于微环的谐振峰  $Q$  值较高、波长选择性好, 可以充当十分优良的离散态光信号。Wang 等<sup>[12]</sup>利用跑道微环实现了 Fano 谱线输出, 该方案在传统跑道微环右侧嵌入了一个较小的微环, 该环对跑道微环施加一个额外相位变化, 从而控制 Fano 谱线的斜率, 斜率最高可达 93 dB/nm。Zheng 等<sup>[13]</sup>提出了多模马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 耦合微环方案, 该方案使 MZI 一臂与微环耦合, 提供离散态光信号, 而另一臂不做任何处理, 提供连续态光信号, 从而实现 Fano 谐振, 斜率最高可达 113 dB/nm。Wen 等<sup>[14]</sup>利用亚波长光栅构成的跑道微环结构实现了 Fano 谐振, 该方案将两个微环的直通端和下载端连接起来, 可实现最高斜率为 69.6 dB/nm 的 Fano 谱线。为了实现更高斜率的 Fano 谱线, 引入法布里-珀罗 (F-P) 腔来产生连续态光信号。Zheng 等<sup>[15]</sup>提出了 Sagnac 环反射镜耦合微环的方案, 该方案在微环总线波导中引入两个 Sagnac 环反射镜构建 F-P 腔, 可实现最高斜率为 252 dB/nm 的 Fano 谱线。但由于 Sagnac 环反射镜的使用, 该方案尺寸较大。Peng 等<sup>[16]</sup>提出了光子晶体腔耦合微环谐振器方案, 该方案在微环总线波导上集成一维光子晶体腔实现 Fano 谐振器。但光子晶体的制备对工艺要求较高, 增加了制作成本。此外, 还有一些不采用微环结构的 Fano 谐振器方案, Yu 等<sup>[17]</sup>提出了一种利用光子晶体纳米梁腔耦合光子晶体 F-P 腔实现 Fano 谐振器的方案, Bera 等<sup>[18]</sup>提出了一种利用槽波导实现 Fano 谐振器的方案。这些方案结构新颖, 但斜率通常较低。

为了实现更高斜率、更紧凑结构的 Fano 谐振器, 本文提出一种基于光栅辅助微环 (MRR-WG) 结

构的 Fano 谐振器方案。该方案在跑道微环内加入两组波导光栅结构, 将光栅的反射信号作为连续态光信号, 与原有微环谐振产生的具有对称洛伦兹线型的离散态光信号进行相消干涉, 从而产生高斜率的 Fano 谱线。本文推导了基于 MRR-WG 结构 Fano 谐振器的传输函数, 设计了 Fano 谐振器的尺寸结构参数, 分析了不同的结构参数对谐振峰位置、凹陷深度和 Fano 谱线斜率的影响, 并最终实现最高斜率为 -299.67 dB/nm、凹陷深度为 9 dB 以及损耗为 6.4 dB 的 Fano 谱线。该 Fano 谐振器具有尺寸小、质量轻、制造简单、损耗低等优势, 能应用于光开关、光传感和光探测等领域中, 有效地提升了灵敏度等性能。

## 2 基于 MRR-WG 结构 Fano 谐振器的理论推导

所提基于 MRR-WG 结构的 Fano 谐振器由一个上下载型跑道微环和两组波导光栅组成。波导光栅在跑道微环左右两侧, 即位于微环的非耦合区域, 会在跑道微环内部形成光栅反射光, 该反射光将作为背景连续态光信号与微环产生的离散态光信号相互干涉, 产生 Fano 谐振。基于 MRR-WG 结构的 Fano 谐振器示意图如图 1(a) 所示, 其中  $E_{in}$  为输入光场,  $E_{thr}$  和  $E_{drop}$  分别为直通端和下载端的输出光场,  $E_{cwj}$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) 为微环中顺时针传播的光场,  $E_{ccwj}$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) 为微环中逆时针传播的光场,  $E_{ref}$  为沿输入端口反射的光场,  $E_{add}$  为沿上载端输出的光场,  $t_i$  和  $k_i$  ( $i=1, 2$ ) 分别为上下总线波导和微环之间的透射系数和耦合系数,  $L_1$  和  $L_2$  分别为微环耦合区与两个波导光栅之间的距离。

图 1(b) 为微环和总线波导耦合区域之间的光场。由传输矩阵法<sup>[19]</sup>, 有

$$\begin{bmatrix} E_c \\ E_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_i & ik_i \\ ik_i & t_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$k_i = \frac{\omega\epsilon_0}{4} \iint E_a^*(x, y) \times \Delta n^2(x, y) \times E_b(x, y) dx dy, \quad (2)$$

式中:  $t_i^2 + k_i^2 = 1$ , 当上下两个耦合区域结构相同时,  $k_1 = k_2 = k$ ,  $t_1 = t_2 = t$ ;  $E_a$ 、 $E_b$  和  $E_c$ 、 $E_d$  分别为输入端口和输出端口的模式电场;  $\Delta n(x, y)$  为介质折射率变化。由于  $\Delta n^2(x, y)$  保持不变,  $k_i$  取决于模式重叠积分  $\iint E_a^*(x, y) \times E_b(x, y) dx dy$ , 而重叠积分的大小又取决于微环和直波导间耦合区域的间隔  $g$ ,

因此  $g$  越大,耦合系数  $k_i$  越小。

而光经过图 1(c)中的光栅区时,会产生透射  $E_{mt}$  和反射  $E_{mr}(m=a, b)$  两份光,因而光栅区域透射光场和反射光场<sup>[20]</sup>为

$$\begin{cases} E_t = t_g \times E_{at} + r_g \times E_{br} \\ E_r = t_g \times E_{bt} + r_g \times E_{ar} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} t_g = \frac{-i\kappa_{ab} \sin(qL)}{q \cos(qL) - i\Delta\beta \sin(qL)} \\ r_g = \frac{q}{q \cos(qL) - i\Delta\beta \sin(qL)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $t_g$  和  $r_g$  为光栅传输系数和反射系数;失谐量  $\Delta\beta = \beta - \pi/\Lambda$ ,传播常数  $\beta = 2 \times \pi \times n_{\text{eff}}/\lambda$ , $\lambda$  为波长,

$n_{\text{eff}}$  为波导有效折射率, $\Lambda$  为光栅周期长度;光栅长度  $L = N \times \Lambda$ , $N$  为周期个数; $q = \pm \sqrt{|\kappa_{ab}|^2 - |\Delta\beta|^2}$ 。 $\kappa_{ab}$  为光栅的模式耦合系数,表达式与(2)式相同,但在光栅中  $\kappa_{ab}$  主要受介质折射率变化  $\Delta n$  影响,通过仿真计算可知光栅微扰宽度  $\Delta w$  与  $\Delta n$  呈正相关,因此  $\kappa_{ab}$  和  $\Delta w$  呈正相关。而光由微环耦合区传播到光栅产生的相移为  $\exp(i\theta_n)$ , $\theta_n = 2 \times \pi \times n_{\text{eff}} \times L_n/\lambda$  ( $n=1, 2$ )。波导光栅具有一定长度,在微环总环长不变的情况下,当  $\Lambda$  和  $N$  发生变化时,光栅与微环耦合区之间的距离也会相应变化。不妨假设  $L_1$  的长度固定,那么当  $N$  或  $\Lambda$  增大时, $L_2$  会相应变小。

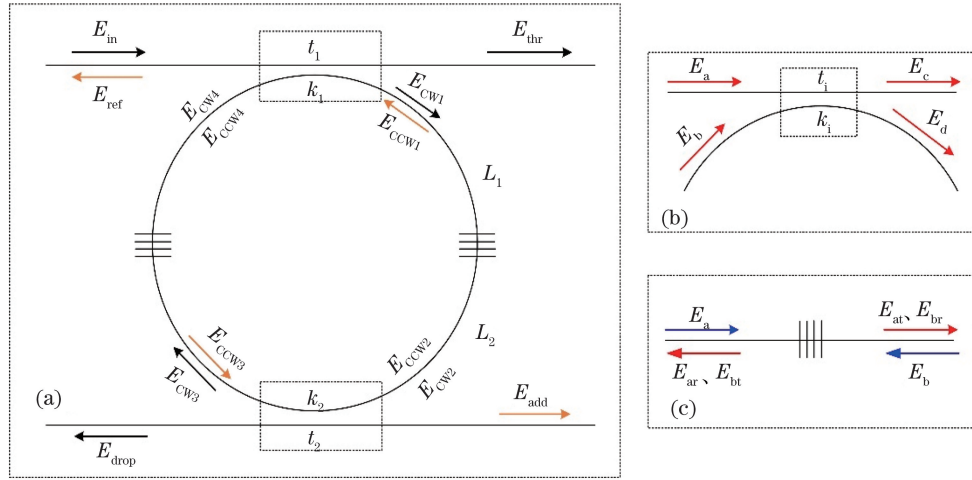


图 1 MRR-WG 型 Fano 谐振器中光传播的路径示意图。(a)整体;(b)MRR 耦合区;(c)光栅区域

Fig. 1 Schematic diagram of light propagation path in Fano resonator based on MRR-WG. (a) Whole resonator; (b) coupling region of MRR; (c) region of waveguide grating

由(1)、(3)式可以得到该结构直通端( $E_{\text{thr}}$ )和下载端( $E_{\text{drop}}$ )的输出光场与输入端光场( $E_{\text{in}}$ )的比值,表达式分别为

$$R_t = \frac{E_{\text{thr}}}{E_{\text{in}}} = \frac{t [r_g^2 (e^{4i\theta_1} + t^2 e^{4i\theta_2}) + (1+t^2)t_g^2 e^{2i(\theta_1+\theta_2)} - t^2 (r_g^2 - t_g^2)^2 e^{4i(\theta_1+\theta_2)} - 1]}{t^2 r_g^2 (e^{4i\theta_1} + e^{4i\theta_2}) + 2t^2 t_g^2 e^{2i(\theta_1+\theta_2)} - t^4 (r_g^2 - t_g^2)^2 e^{4i(\theta_1+\theta_2)} - 1}, \quad (5)$$

$$R_d = \frac{E_{\text{drop}}}{E_{\text{in}}} = \frac{k^2 t_g e^{i(\theta_1+\theta_2)} [t^2 (r_g^2 - t_g^2) e^{2i(\theta_1+\theta_2)} + 1]}{t^2 r_g^2 (e^{4i\theta_1} + e^{4i\theta_2}) + 2t^2 t_g^2 e^{2i(\theta_1+\theta_2)} - t^4 (r_g^2 - t_g^2)^2 e^{4i(\theta_1+\theta_2)} - 1}. \quad (6)$$

由(5)、(6)式可以推导出该结构直通端和下载端的传输谱  $T_t = |R_t|^2$  和  $T_d = |R_d|^2$ 。控制微环耦合系数  $k$ 、光栅周期个数  $N$ 、周期长度  $\Lambda$  和光栅的模式耦合系数  $\kappa_{ab}$  等参数可以改变输出谱线。为后续设计的便利,不妨设  $L_1$  的值为微环中 1/4 圆弧的长度,即  $L_1 = 33.29 \mu\text{m}$ 。相应地, $L_2$  为 1/2 微环周长减去光栅长度和  $L_1$ ,即  $L_2 = (63.30 - N \times \Lambda) \mu\text{m}$ 。通过仿真计算,可得  $n_{\text{eff}} = 2.552$ ,在 1545~1555 nm 波段,改变上述参数可以使 MRR-WG 结构实现几种不同的传输特性。

图 2(a)为改变微环耦合系数  $k$  时,MRR-WG 型 Fano 谐振器直通端和下载端的传输谱,此时  $\Lambda = 0.3 \mu\text{m}$ , $N = 90$ , $\kappa_{ab} = 0.026 \text{ cm}^{-1}$ 。由图 2(a)可以看出,当  $k$  由 0.1 缓慢增大至 0.4 时,下载端的传输谱出现了明显的 Fano 谐振现象。对图 2(a)中左侧的这组 Fano 谐振谱线进行分析,当  $k = 0.1$  时,Fano 谐振的中心波长  $\lambda_{\text{res}} = 1546.34 \text{ nm}$ ,相邻两个功率最大处波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为 1546.05 nm 和 1546.57 nm,功率差分别为 47.67 dB 和 47.68 dB,因此 Fano 谐振的斜率  $S_1$  和  $S_2$  分别为 -164.38 dB/nm 和



207.30 dB/nm。随着  $k$  的增大,  $\lambda_{\text{res}}$  几乎保持不变,  $\lambda_1$  与  $\lambda_{\text{res}}$ 、 $\lambda_2$  与  $\lambda_{\text{res}}$  的距离轻微增大,  $\lambda_{\text{res}}$  处功率大幅度上升, 导致 Fano 谐振的斜率下降。当  $k=0.4$  时,  $\lambda_{\text{res}}=1546.34$  nm,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为 1546.03 nm 和 1546.59 nm, 功率差分别为 3.72 dB 和 4.22 dB, 因此  $S_1$  和  $S_2$  分别为  $-12$  dB/nm 和  $16.88$  dB/nm。图 2(a) 中右侧的这组 Fano 谐振谱线随  $k$  有相似的变化趋势, 因此较小的微环耦合系数  $k$  能实现更高斜率的 Fano 谐振。

图 2(b) 为改变光栅周期个数  $N$  时, MRR-WG 型 Fano 谐振器直通端和下载端的传输谱, 其中的插图为左侧 Fano 谐振谱线的局部放大图, 此时  $k=0.1, \Lambda=0.3 \mu\text{m}, \kappa_{\text{ab}}=0.026 \text{ cm}^{-1}$ 。同样分析左侧这组 Fano 谐振谱线, 当  $N$  由 90 缓慢增加至 120 时,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间的距离先减小后变大, 凹陷深度也先变小后变大。当  $N$  由 90 增加至 110 时,  $\lambda_{\text{res}}$  变为 1546.35 nm,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  减小到 1546.28 nm 和 1546.44 nm, 功率差分别减小为 27.01 dB 和 26.80 dB, 此时  $S_1$  和  $S_2$  分别为  $-385.86$  dB/nm 和  $297.78$  dB/nm。而当  $N$  增加到 120 时,  $\lambda_{\text{res}}=1546.35$  nm,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为 1546.17 nm 和 1546.57 nm, 功率差分别为 43.95 dB 和 43.87 dB, 因此  $S_1$  和  $S_2$  分别为  $-244.17$  dB/nm 和  $199.41$  dB/nm。

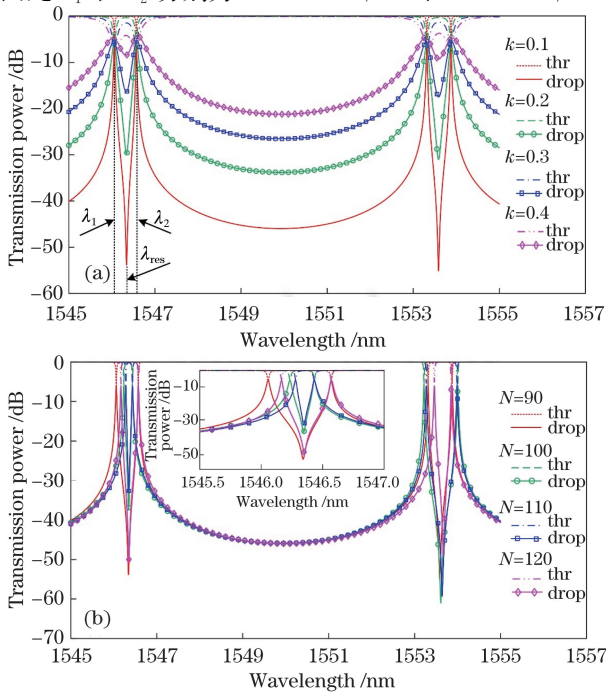


图 2 MRR-WG 型 Fano 谐振器输出谱。  
(a) 随  $k$  的变化情况; (b) 随  $N$  的变化情况

Fig. 2 Output spectra of Fano resonator based on MRR-WG. (a) Variation with  $k$ ; (b) variation with  $N$

而图 2(b) 中右侧的这组 Fano 谐振谱线展现出相反的变化趋势。因此可以看出,  $N$  对于 Fano 谱线斜率的影响呈周期性变化趋势, 并且对于不同谐振峰影响不同。

采用相似的方法, 研究了光栅周期  $\Lambda$  和光栅的模式耦合系数  $\kappa_{\text{ab}}$  对传输谱线的影响, 如图 3 所示。图 3(a) 为  $k=0.1, N=90, \kappa_{\text{ab}}=0.026 \text{ cm}^{-1}$  的情况下,  $\Lambda$  由  $0.3 \mu\text{m}$  变化到  $0.308 \mu\text{m}$  时, Fano 谐振器传输谱的变化情况。光栅周期  $\Lambda$  变化会引起光栅反射中心波长和相位同时发生变化, 因此 Fano 谐振产生的位置和凹陷深度都会发生较大变化。以图 3(a) 左边这组 Fano 谐振谱线为例, 当  $\Lambda$  由  $0.3 \mu\text{m}$  变化到  $0.308 \mu\text{m}$  时, Fano 谐振中  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间的距离先增加后减小。在  $\Lambda=0.308 \mu\text{m}$  时, Fano 谐振几乎消失, 此时  $\lambda_{\text{res}}=1545.97$  nm,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为 1545.94 nm 和 1546.00 nm, 功率差分别为 12.17 dB 和 12.18 dB, 因而  $S_1$  和  $S_2$  分别为  $-405.67$  dB/nm 和  $406$  dB/nm。图 3(a) 中右侧的这组 Fano 谐振谱线同样展现出相似的变化趋势。因此, 改变  $\Lambda$  可以调控  $\lambda_{\text{res}}$ 、 $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的位置, 随着  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  间距离减小, Fano 谐振的斜率会急剧增加。

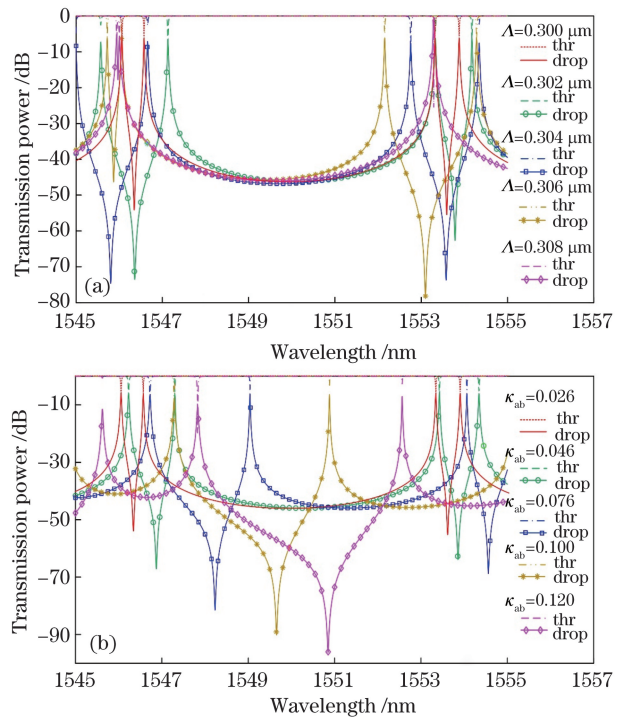


图 3 Fano 谐振器的输出谱。(a) 随  $\Lambda$  的变化情况;  
(b) 随  $\kappa_{\text{ab}}$  的变化情况

Fig. 3 Output spectra of Fano resonator.  
(a) Variation with  $\Lambda$ ; (b) variation with  $\kappa_{\text{ab}}$

图 3(b)为在  $k=0.1, \Lambda=0.3 \mu\text{m}, N=90$  的情况下,  $\kappa_{\text{ab}}$  由 0.026 增加到 0.12 时, 传输谱的变化情况。光栅的反射强度随  $\kappa_{\text{ab}}$  增加而增加, 使得光栅反射光与微环谐振光的干涉增强, 从而引起 Fano 谐振的波长差 ( $\lambda_2 - \lambda_1$ ) 增加。同时, 由于  $\kappa_{\text{ab}}$  和光栅微扰宽度  $\Delta w$  呈正相关,  $\kappa_{\text{ab}}$  的增加会使 MRR-WG 结构的整体有效折射率增加, 从而 Fano 谐振发生红移。以图 3(b)中左边的 Fano 谐振为例, 当  $\kappa_{\text{ab}}$  由 0.026 增加到 0.120 时, Fano 谐振位置由 1546.34 nm 红移到 1550.85 nm, 而  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别由 1546.06 nm 和 1546.57 nm 变化到 1547.83 nm 和 1552.56 nm, 功率差分别由 47.62 dB 和 47.75 dB 变化到 85.71 dB 和 88.84 dB, 由于波长差的增加,  $S_1$  和  $S_2$  分别由  $-170.07 \text{ dB/nm}$  和  $207.61 \text{ dB/nm}$  降低到  $-28.38 \text{ dB/nm}$  和  $51.95 \text{ dB/nm}$ 。因此, 调控  $\kappa_{\text{ab}}$  可大范围改变  $\lambda_{\text{res}}$  的位置, 同时引起 Fano 谐振斜率的变化。

综上所述, MRR-WG 结构能够产生 Fano 谐振, 通过改变微环耦合区的耦合系数  $k$ 、光栅周期个数  $N$ 、周期长度  $\Lambda$  以及光栅的模式耦合系数  $\kappa_{\text{ab}}$ , 能有效地改变 Fano 谐振谱线的谐振位置、凹陷深度和斜率, 实现高斜率的 Fano 谐振。

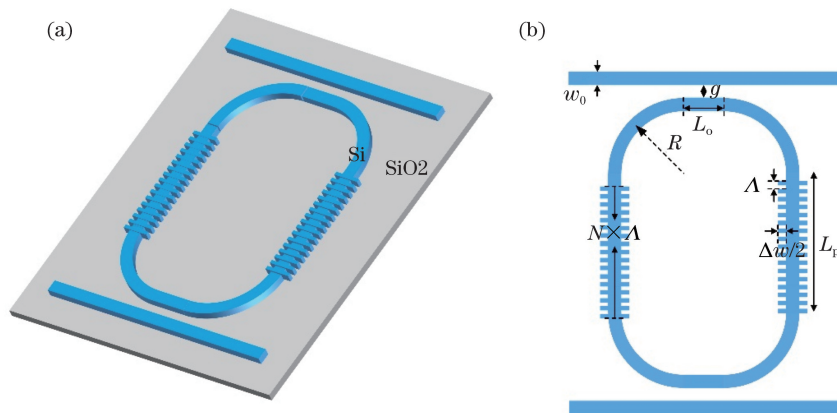


图 4 基于 MRR-WG 的 Fano 谐振器的结构示意图。(a)三维示意图;(b)俯视图以及相关结构参数

Fig. 4 Structural schematic diagram of Fano resonator based on MRR-WG. (a) 3D diagram; (b) top view and related structural parameters

通过调节  $g$  来实现耦合系数  $k$  的变化, 通过调节  $\Delta w$  实现光栅的模式耦合常数  $\kappa_{\text{ab}}$  的变化, 从而实现 Fano 谐振谱线中心波长  $\lambda_{\text{res}}$ 、波长差 ( $\lambda_2 - \lambda_1$ )、凹陷深度及 Fano 谐振的斜率 ( $S_1$  和  $S_2$ ) 的调控。

在  $\Lambda=0.3 \mu\text{m}, N=90$  和  $\Delta w=0.08 \mu\text{m}$  的情况下, 改变微环耦合区间隔  $g$ , Fano 谐振器的输出谱如图 5(a) 所示。从图中可以看出, 当  $g$  从  $0.10 \mu\text{m}$  增加到  $0.25 \mu\text{m}$  时, Fano 谐振谱线中心波

### 3 基于 MRR-WG 结构 Fano 谐振器的设计与优化

由上述理论分析可知, MRR-WG 结构能够产生 Fano 谐振, 但在实际的芯片制作中, 需要将上述推导中的参数转化为具体的结构参数。此外在上述推导中引入了一些近似, 为了进一步优化 Fano 谐振器的性能, 采用商用光学仿真平台 Lumerical 对该结构进行了设计和优化。

图 4 为基于 MRR-WG 的 Fano 谐振器的结构示意图, 其中图 4(a)为三维结构示意图, 图 4(b)为俯视图和相关结构参数。假设波导宽度为  $w_0$ , 微环和直波导间耦合区域的间隔为  $g$ , 耦合区域长度为  $L_c$ , 微环弯曲半径为  $R$ , 两个弯曲波导之间直波导的距离为  $L_p$ , 光栅周期长度为  $\Lambda$ , 光栅周期个数为  $N$ , 光栅微扰宽度为  $\Delta w$ 。光栅从直波导  $L_p$  的下方起点位置开始制作。该谐振器采用  $3 \mu\text{m}$  厚度  $\text{SiO}_2$  层和  $220 \text{ nm}$  厚度上硅层的绝缘体上硅 (SOI) 基片。根据以往硅基器件设计的经验, 提前设置了一些参数的取值, 令  $w_0=500 \text{ nm}, R=10 \mu\text{m}, L_p=30 \mu\text{m}$ , 剩余的参数中,  $g$  与  $L_c$  均会影响耦合系数  $k$ , 但  $L_c$  还会对微环谐振波长有影响, 因此将  $L_c$  设置为  $2.5 \mu\text{m}$ 。

长  $\lambda_{\text{res}}$  由  $1549.84 \text{ nm}$  轻微蓝移到  $1549.72 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别由  $1549.61 \text{ nm}$  和  $1550.05 \text{ nm}$  变化到  $1549.44 \text{ nm}$  和  $1549.92 \text{ nm}$ , 功率差则分别由  $12.71 \text{ dB}$  和  $12.82 \text{ dB}$  变化到  $43.77 \text{ dB}$  和  $43.46 \text{ dB}$ , 而  $S_1$  和  $S_2$  分别由  $-55.26 \text{ dB/nm}$  和  $61.05 \text{ dB/nm}$  变化到  $-156.32 \text{ dB/nm}$  和  $217.30 \text{ dB/nm}$ 。随着耦合区间隙  $g$  的增加, 微环耦合系数  $k$  降低, Fano 谐振的凹陷深度增大, Fano 斜率  $S_1$  和  $S_2$  增大, 与

理论推导变化趋势一致。但间隙  $g$  增加也使得谐振器损耗变大,因此在后续的仿真中选择  $g=0.18 \mu\text{m}$ 。

图 5(b)为在  $g=0.18 \mu\text{m}, \Lambda=0.3 \mu\text{m}, \Delta w=0.07 \mu\text{m}$  情况下,改变光栅周期个数  $N$  时,Fano 谐振器的仿真结果。从图中可以看出,当  $N=84$  时,图中左边的 Fano 谐振谱线中心波长  $\lambda_{\text{res}}$  为  $1548.48 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为  $1548.10 \text{ nm}$  和  $1548.73 \text{ nm}$ ,功率差则分别为  $37.96 \text{ dB}$  和  $37.73 \text{ dB}$ ,而  $S_1$  和  $S_2$  分别为  $-99.89 \text{ dB/nm}$  和  $150.92 \text{ dB/nm}$ ;当  $N$  增加到  $92$  时,图中左边的 Fano 谐振消失;而  $N$  继续增加为  $94$  时,Fano 谐振谱线中心波长  $\lambda_{\text{res}}$  变为  $1549.12 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为  $1549.09 \text{ dB}$  和  $1549.16 \text{ dB}$ ,功率差则分别为  $8.99 \text{ dB}$  和  $9.39 \text{ dB}$ ,此时  $S_1$  和  $S_2$  分别为  $-299.67 \text{ dB/nm}$  和  $204.13 \text{ dB/nm}$ 。仿真实验结果表明,改变光栅周期个数  $N$  时,下载端的 Fano 谐振谱线  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间的距离先减小后变大,凹陷深度也先变小后变大,与理论推导变化趋势一致。而中心波长  $\lambda_{\text{res}}$  红移,是由于随着光栅周期个数  $N$  的增加,MRR 结构的有效折射率增加引起整体传输谱发生红移。

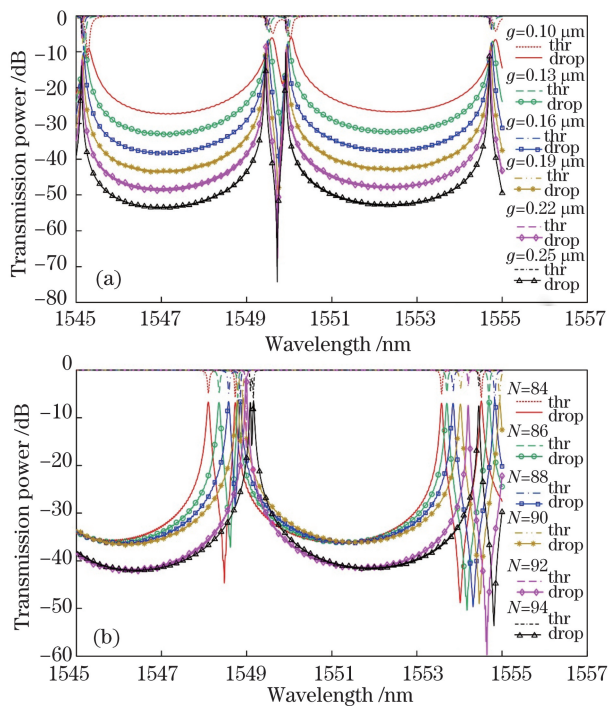


图 5 基于 MRR-WG 的 Fano 谐振器仿真输出谱。

(a)随  $g$  的变化情况;(b)随  $N$  的变化情况

Fig. 5 Simulated output spectra of Fano resonator based on MRR-WG. (a) Variation with  $g$ ; (b) variation with  $N$

光栅周期  $\Lambda$  和微扰强度  $\Delta w$  的变化对 Fano 谐振器传输谱的影响如图 6 所示。其中图 6(a)为  $g=$

$0.18 \mu\text{m}, N=90, \Delta w=0.07 \mu\text{m}$  的情况下,改变光栅周期  $\Lambda$  时 Fano 谐振器的仿真结果。在  $\Lambda=0.3 \mu\text{m}$  时,光栅反射峰与微环谐振峰接近,因此有相对较大的 Fano 谐振斜率。在  $\Lambda=0.3 \mu\text{m}$  情况下,图中左边的 Fano 谐振谱线的中心波长  $\lambda_{\text{res}}$  为  $1548.86 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为  $1548.79 \text{ nm}$  和  $1548.92 \text{ nm}$ ,功率差则分别为  $9.04 \text{ dB}$  和  $9.51 \text{ dB}$ ,而  $S_1$  和  $S_2$  分别为  $-115.87 \text{ dB/nm}$  和  $176.19 \text{ dB/nm}$ 。

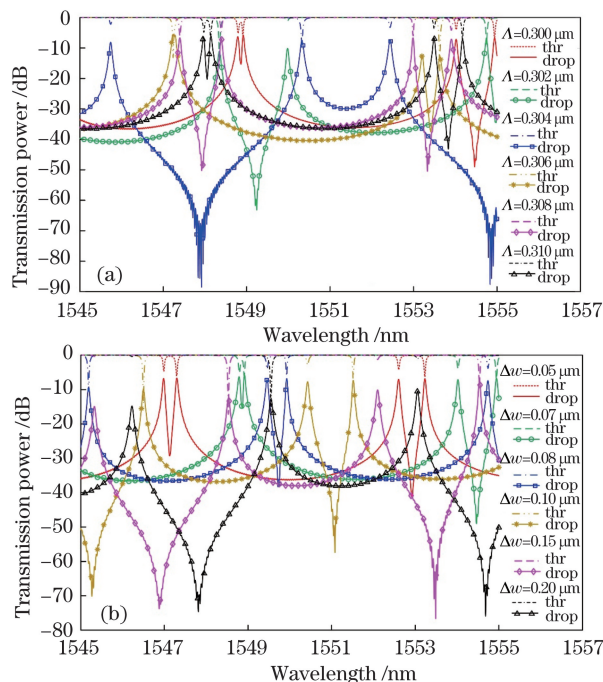


图 6 基于 MRR-WG 的 Fano 谐振器仿真输出谱。

(a)随  $\Lambda$  的变化情况;(b)随  $\Delta w$  的变化情况

Fig. 6 Simulated output spectra of Fano resonator based on MRR-WG. (a) Variation with  $\Lambda$ ; (b) variation with  $\Delta w$

图 6(b)为在  $g=0.18 \mu\text{m}, \Lambda=0.3 \mu\text{m}, N=90$  的情况下,改变光栅微扰强度  $\Delta w$  时,Fano 谐振器的仿真结果。从图中可以看出,当  $\Delta w$  由  $0.05 \mu\text{m}$  增加到  $0.07 \mu\text{m}$  时,左边的 Fano 谐振谱线中心波长  $\lambda_{\text{res}}$  由  $1547.13 \text{ nm}$  红移到  $1548.86 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别由  $1546.98 \text{ nm}$  和  $1547.29 \text{ nm}$  红移到  $1548.78 \text{ nm}$  和  $1548.92 \text{ nm}$ ,功率差则分别由  $22.40 \text{ dB}$  和  $22.48 \text{ dB}$  减小到  $8.85 \text{ dB}$  和  $9.48 \text{ dB}$ ,而  $S_1$  和  $S_2$  分别由  $-149.33 \text{ dB/nm}$  和  $140.5 \text{ dB/nm}$  变化到  $-110.63 \text{ dB/nm}$  和  $158 \text{ dB/nm}$ ;而当  $\Delta w$  继续增大到  $0.20 \mu\text{m}$  时,Fano 谐振谱线中心波长  $\lambda_{\text{res}}$  红移到  $1554.68 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1$  红移到  $1553.05 \text{ nm}$ ,功率差则增大到  $65.1 \text{ dB}$ ,对应的  $S_1$  减小到  $-39.94 \text{ dB/nm}$ 。仿真实验结果表明,改变光栅微



扰强度  $\Delta\omega$  时,下载端的 Fano 谐振谱线中心波长  $\lambda_{\text{res}}$  红移, $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间的距离先减小后变大,凹陷深度也先变小后变大,整体趋势和理论推导一致。

Fano 谐振器中陡峭的 Fano 谐振线型能急剧地改变光传输强度,在光开关、传感和滤波等应用中,高 Fano 斜率能极大地提升器件灵敏度,因而实现高 Fano 斜率是此实验追求的主要目标。图 7 为  $g=0.18 \mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.3 \mu\text{m}$ ,  $N=94$ ,  $\Delta\omega=0.07 \mu\text{m}$  情况下, Fano 谐振器的仿真结果,是通过调节上述 4 个参数,得到的具有高 Fano 斜率的传输谱,图中插图为左边 Fano 谐振谱线的局部放大图,中心波长  $\lambda_{\text{res}}$  为 1549.12 nm,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为 1549.09 nm 和 1549.16 nm,功率差则分别为 8.99 dB 和 9.39 dB,因此  $S_1$  和  $S_2$  分别为  $-299.67 \text{ dB/nm}$  和  $204.13 \text{ dB/nm}$ ,而此时 Fano 谐振的损耗为 6.4 dB。

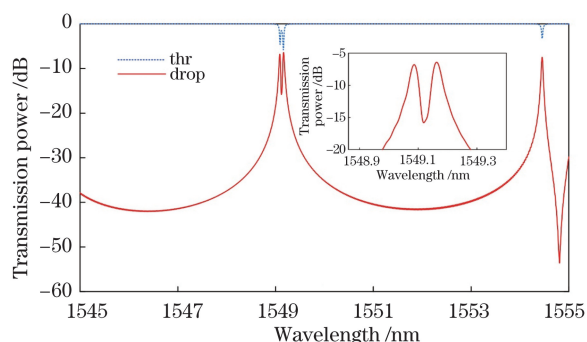


图 7 Fano 谐振器的仿真输出谱

Fig. 7 Simulated output spectra of Fano resonator

该方案所需的  $3 \mu\text{m}$  厚度埋氧层和  $220 \text{ nm}$  厚度上硅层的 SOI 材料,可在上海交通大学、华中科技大学等高校的硅光子集成制造平台制备。优化后的 Fano 谐振器结构最小特征尺寸为  $35 \text{ nm}$ ,根据以往制造经验,处于可制造范围。不同 Fano 谐振器方案的性能比较如表 1 所示。由表 1 可知,所提 Fano

表 1 不同 Fano 谐振器方案的性能比较

Table 1 Comparison of performances for different

Fano resonator schemes

Resonator	Size / $\mu\text{m}^2$	Notch depth / dB	Insertion loss / dB	Slope / (dB $\cdot\text{nm}^{-1}$ )
Resonator in Ref. [12]	$\sim 35.8 \times 10$	40	2	-93
Resonator in Ref. [13]	$\sim 65 \times 85$	15-33	1-2	113
Resonator in Ref. [14]	$\sim 78 \times 22$	21.5	3	69.6
Resonator in Ref. [15]	$\sim 80 \times 67$	11.2-17.6	10-17	252
Proposed resonator	$\sim 51 \times 22.5$	9	6.4	-299.67

谐振器的尺寸仅为  $51 \times 22.5 \mu\text{m}^2$ ,在 Fano 谐振器的多种方案中尺寸较小。虽然文献[12]方案的尺寸小于所提方案,但 Fano 斜率也远小于所提方案。在最关键的 Fano 斜率指标中,所提 Fano 谐振器可实现最大为  $-299.67 \text{ dB/nm}$  的斜率,相较其他方案有明显优势。

## 4 结 论

在集成光学回路中,非对称的 Fano 谐振由于能够实现光传输强度的剧烈改变,因而在光开关、传感器和调制器等应用中有着独特的优势。提出了一种基于 MRR-WG 结构的 Fano 谐振器。首先基于传输矩阵法,推导了 MRR-WG 结构 Fano 谐振器的传输函数,证明了该结构能产生 Fano 谐振,并且推导了不同 MRR-WG 的参数下 Fano 谱线的变化情况。随后对基于 MRR-WG 结构的 Fano 谐振器进行了设计和优化,将数值计算中的相关参数转化为器件的尺寸参数,并分析了不同结构参数对 Fano 谱线谐振峰位置、凹陷深度及斜率的影响,最终实现最高斜率为  $-299.67 \text{ dB/nm}$ 、凹陷深度为 9 dB 及损耗为 6.4 dB 的 Fano 谐振谱线。该 Fano 谐振器具有斜率高、尺寸小、质量轻、制造简单等优势,能广泛应用于光开关、传感器和调制器等领域。

## 参 考 文 献

- [1] Wu J H, Gao J Y, Xu J H, et al. Ultrafast all optical switching via tunable fano interference [J]. Physical Review Letters, 2005, 95(5): 057401-057404.
- [2] Cheng Z W, Dong J J, Zhang X L. Ultracompact optical switch using a single semisymmetric Fano nanobeam cavity [J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2363-2366.
- [3] Yao Y H, Cheng Z, Dong J J, et al. Performance of integrated optical switches based on 2D materials and beyond [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2020, 13(2): 129-138.
- [4] Chen S H, Zhou G Q, Zhou L J, et al. High-linearity fano resonance modulator using a microring-assisted Mach-Zehnder structure [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(13): 3395-3403.
- [5] Zhang J H, Leroux X, Durán-Valdeiglesias E, et al. Generating Fano resonances in a single-waveguide silicon nanobeam cavity for efficient electro-optical modulation [J]. ACS Photonics, 2018, 5(11): 4229-4237.
- [6] Xu Z, Zhou Y Y, Chen S H, et al. Optical generation of UWB pulses utilizing Fano resonance modulation [J].

- Frontiers of Optoelectronics, 2020: 1-12.
- [7] Zhou X Y, Zhang L, Armani A M, et al. On-chip biological and chemical sensing with reversed Fano lineshape enabled by embedded microring resonators [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(3): 35-44.
- [8] Tu Z R, Gao D S, Zhang M L, et al. High-sensitivity complex refractive index sensing based on Fano resonance in the subwavelength grating waveguide micro-ring resonator [J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20911-20922.
- [9] Zhou L J, Poon A W. Electrically reconfigurable silicon microring resonator-based filter with waveguide-coupled feedback [J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9194-9204.
- [10] Zhao Y H, Wang X, Gao D S, et al. On-chip programmable pulse processor employing cascaded MZI-MRR structure [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2019, 12(2): 148-156.
- [11] Li A, Bogaerts W. Reconfigurable nonlinear nonreciprocal transmission in a silicon photonic integrated circuit [J]. Optica, 2020, 7(1): 7-14.
- [12] Wang G C, Dai T G, Jiang J F, et al. Slope tunable Fano resonances in asymmetric embedded microring resonators [J]. Journal of Optics, 2017, 19(2): 025803-025808.
- [13] Zheng S, Cao X P, Wang J. Multimode Fano resonances for low-power mode switching [J]. Optics Letters, 2020, 45(4): 1035-1038.
- [14] Wen Y J, Sun Y, Deng C Y, et al. High sensitivity and FOM refractive index sensing based on Fano resonance in all-grating racetrack resonators [J]. Optics Communications, 2019, 446: 141-146.
- [15] Zheng S, Ruan Z S, Gao S Q, et al. Compact tunable electromagnetically induced transparency and Fano resonance on silicon platform [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25655-25662.
- [16] Peng F C, Wang Z R, Yuan G H, et al. High-sensitivity refractive index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity-coupled microring resonator [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-8.
- [17] Yu P, Hu T, Qiu H Y, et al. Fano resonances in ultracompact waveguide Fabry-Perot resonator side-coupled lossy nanobeam cavities [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(9): 091104.
- [18] Bera A, Kuittinen M, Honkanen S, et al. Silicon slot waveguide Fano resonator [J]. Optics Letters, 2018, 43(15): 3489-3492.
- [19] Yang T, Liao S S, Liu L, et al. Large-range tunable fractional-order differentiator based on cascaded microring resonators [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2016, 9(3): 399-405.
- [20] Kamali S M, Arbabi E, Goddard L L. The unperturbed structure in the coupled mode theory of waveguide gratings [C]//2014 IEEE Photonics Conference, October 12-16, 2014, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 611-612.