光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023101004

基于单个槽波导微环谐振器法诺共振的折射率传感

李鑫雨，徐　强，孙士博，孔　梅，徐亚萌*

（长春理工大学 物理学院 光电信息科学与技术系，长春 130022）

摘　要： 法诺线型的不对称和窄线宽特性有利于实现具有高传感灵敏度和低可探测极限的折射率传感。采用三维时域有限差分法，基于槽波导设计了微环谐振器和法布里-珀罗腔的耦合结构，实现了法诺线型谱线，并利用其提升折射率传感器的性能。不同于已报道的多微环级联等复杂结构，基于单个槽波导微环实现了法诺线型谱线，并在波长探测传感方案下得到传感灵敏度为 500 nm/RIU，可探测极限为 4.00×10^{-5} RIU；在强度探测传感方案下，传感灵敏度为 7.24×10^{4} dB/RIU，可探测极限为 5.52×10^{-6} RIU。

关键词： 集成型传感器；槽波导；微环谐振器；法诺；折射率传感

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0056－06

Refractive Index Sensing Based on the Fano Resonance of A Single Slot Waveguide Microring Resonator

LI Xinyu, XU Qiang, SUN Shibo, KONG Mei, XU Yameng

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN)

Abstract: The asymmetry and narrow linewidth properties of the Fano line shape are conducive to the realization of refractive-index sensing with high sensitivity and low detection limit. In this study, the coupled structure of the microring resonator and the Fabry-Perot cavity was designed based on the slot waveguide, using the three-dimensional time-domain finite-difference method. The Fano line shape resonance was realized and utilized to improve the performance of refractive index sensors. In contrast to reported complex structures such as multiple micro-ring cascades, a sensitivity of 500 nm/RIU and detection limit of 4.00×10^{-5} RIU were achieved under the wavelength tracking scheme based on the Fano lineshape resonance of the single-slot waveguide microring resonator. The sensitivity was 7.24×10^{4} dB/RIU for a detection limit of 5.52×10^{-6} RIU under the intensity tracking scheme.

Key words: Integrated sensors; slot waveguide; microring resonator; Fano; refractive index sensing

0　引言

基于绝缘体上硅(SOI)的平面波导回路具有许多优势，如体积小、功耗低，并且与微电子加工工艺相兼容，有利于实现大规模器件的单片集成。因此，SOI 平台使下一代片上传感实验室成为可能。硅基微环谐振器(Microring Resonator，MRR)结构紧凑，谐振性能优异，通过追踪其谐振峰随待测溶液的变化可实现传感功能[1-5]，已成为片上传感系统中关键传感器件的有力候选。然而，其谐振峰为洛伦兹线型，线宽较大，即透射谱线强度变化较慢，限制了传感器的传感灵敏度和可探测极限性能。与洛伦兹

收稿日期：2023－10－10.

基金项目：吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20220725KJ)；国家自然科学基金项目(61905022).

* **通信作者：**徐亚萌

谱线相比，法诺(Fano)线型在谐振波长处具有不对称的尖锐峰，线宽明显减小[6]，即透射谱线强度变化迅速。因此，Fano 线型有利于传感灵敏度和可探测极限等传感器性能指标的提升。

目前，Fano 线型主要基于多 MRR 嵌套结构[7-9]、多 MRR 级联结构[10]、MRR 耦合马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer，MZI)结构[11-14]等来实现，这些器件尺寸较大，且结构较为复杂，加工精度要求较高。也有学者利用单个 MRR 产生 Fano 线型[15-20]，如条波导 MRR 与总线波导中波导错位腔的耦合结构[19]，条波导 MRR 与总线波导中光子晶体腔的耦合结构[20]等。但是，受限于器件的波导结构类型，这些方案的传感灵敏度较低。因此，一种利用单个 MRR 形成 Fano 线型的高性能折射率传感方案亟待提出。

本文拟基于单个槽波导 MRR 实现 Fano 线型，并利用其实现高传感灵敏度和低可探测极限的折射率传感。本文工作安排如下：首先，介绍了基于单个 MRR 产生 Fano 共振的原理；然后，基于槽波导分别设计 MRR 和法布里-珀罗(Fabry-Perot，FP)腔，以及 MRR 和 FP 腔的耦合结构，从而实现 Fano 谱线；最后，利用设计的 FP-MRR 器件进行折射率传感仿真。

1　工作原理

Fano 共振由连续态与离散态的干涉形成。总线波导中引入部分反射单元可构成 FP 腔，该腔中的模式可作为连续态，MRR 腔中的模式作为离散态，若两者发生干涉，MRR 的谱线从对称的洛伦兹线型变为不对称的 Fano 线型。

图 1 是 FP 腔与 MRR 耦合器件(FP-MRR)的理论模型示意图，它由两部分组成，一部分是总线波导上引入部分反射单元构成的 FP 腔，另一部分是 MRR。E_1，E_2，E_3 和 E_4 分别是总线波导两端入射和出射的光场振幅，它们之间的关系为：

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{T}$ 为整个 FP-MRR 结构的传输矩阵，可以表示为其中每部分传输矩阵的乘积：

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{T}_{\mathrm{r}} \cdot \boldsymbol{T}_L \cdot \boldsymbol{T}_{\mathrm{MRR}} \cdot \boldsymbol{T}_L \cdot \boldsymbol{T}_{\mathrm{r}} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{T}_{\mathrm{r}}$ 为单个反射单元的传输矩阵，$\boldsymbol{T}_L$ 为长度为 L 的波导的传输矩阵，$\boldsymbol{T}_{\mathrm{MRR}}$ 为 MRR 的传输矩阵，这里可认为两侧的反射单元大小和位置一样。各部分传输矩阵如下：

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{r}} = \frac{\mathrm{j}}{\sqrt{1-r^2}} \begin{bmatrix} 1 & r \\ -r & -1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{T}_L = \begin{bmatrix} \alpha_L \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi} & 0 \\ 0 & \alpha_L^{-1} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{MRR}} = \begin{bmatrix} t_{\mathrm{MRR}} & 0 \\ 0 & t_{\mathrm{MRR}}^{-1} \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中，r 是部分反射单元的反射系数，α_L 是光传播长度 L 的振幅传递因子，$\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}$ 是光传播长度 L 的相位传递因子，t_{MRR} 是光通过整个 MRR 后的振幅传输函数。值得注意的是，$\alpha_L^{-1}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}$ 是光反向通过波导 L 的振幅传输函数，t_{MRR}^{-1} 是光反向通过 MRR 的振幅传输函数。经前期研究发现，反向光的存在直接影响线型的类型[21]，这是由于正向光和反向光发生耦合会导致谐振分裂现象，不考虑反向光时的电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency，EIT)谱线会变成电子诱导吸收(Electromagnetically Induced Absorption，EIA)谱线，洛伦兹谱线会变成 EIT 谱线，Fano 谱线会变成有侧峰的 Fano 谱线。将方程(3)～(5)代入方程(2)中，可得到：

$$T = \left| \frac{-(1-r^2)\alpha_L \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi} t_{\mathrm{MRR}}}{1-r^2(\alpha_L \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi})^2 t_{\mathrm{MRR}}^2} \right| \tag{6}$$

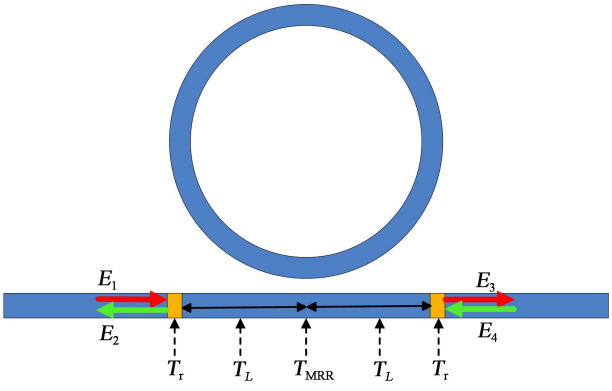


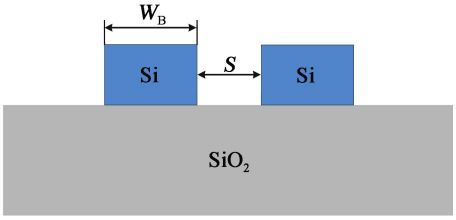
图 1　FP 腔与 MRR 耦合器件(FP-MRR)示意图

输入端的光波通过总线波导传输到耦合区，其中一部分光将通过倏逝场耦合进入 MRR 中，并在 MRR 中进行谐振。此时，MRR 中的模式作为离散态，FP 腔中的模式作为连续态，两者发生干涉，使输出谱线从对称的洛伦兹线型变为不对称的 Fano 线型。需要注意的是，若 MRR 的谐振峰出现在 FP 腔谐振峰的峰值/峰谷，出现的是 EIT/EIA 线型，所以

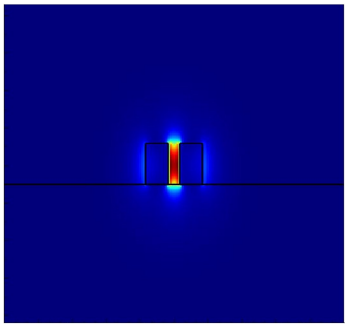
设计器件结构的时候，需要避免 MRR 的谐振波长和 FP 腔的谐振峰/谷位置重合。

2 槽波导 FP-MRR 结构设计

整个 FP-MRR 结构设计基于 SOI 平台，衬底层的材料为二氧化硅(SiO_2)，厚度为 2 μm，波导层的材料为硅(Si)，厚度为 220 nm。波导结构采用槽波导，即在条波导的横向上引入槽结构，如图 2(a)所示。与条波导相比，槽波导在横向上释放了原条波导中的光场，其光场被限制在填充了待测物质的槽中，如图 2(b)所示，此时光与待测物的相互作用被增强，有利于提升器件的传感灵敏度。为了保证槽波导的光场释放性能，本研究所采用槽波导的硅条宽度(W_B)为 200 nm，槽宽(S)为 100 nm。



(a) 结构示意图



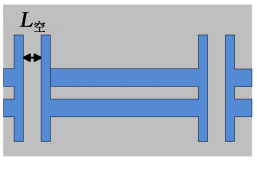
(b) 电场图

图 2 槽波导截面结构示意图和电场图

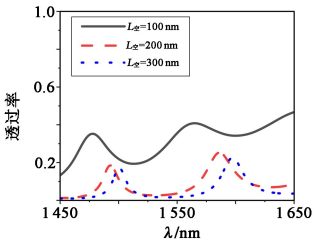
整个 FP-MRR 结构包括封闭式环形结构和总线波导中的 FP 腔两部分，均采用槽波导构建，下面基于槽波导分别设计 FP 腔结构、MRR 结构及其耦合结构。

2.1 FP 腔结构设计

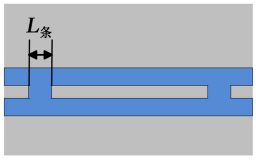
在总线波导中构成 FP 腔，关键在于部分反射单元的引入。图 3 所示是不同类型反射单元构成的槽波导 FP 腔及其传输谱线。空气隙型 FP 腔结构是在槽波导传播方向引入两个空气隙构成的，如图 3(a)所示。利用三维时域有限差分法，可得到不同空气隙宽度 $L_{空}$ 下的 FP 腔传输谱线，如图 3(b)所示。由图可见，当空气隙的宽度 $L_{空}$ 从 100 nm 逐渐增大至 300 nm，FP 腔传输谱线的透过率明显降低。最优的情况是 $L_{空}$ 为 100 nm，但是此时 1 550 nm 附近的最大透过率仍较小，仅为 0.4 左右。再继续减小 $L_{空}$ 有可能会让透过率增大，但是会增加工艺难度。



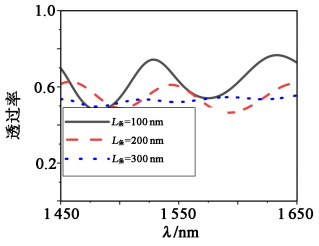
(a) 空气隙型 FP 腔结构



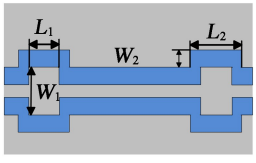
(b) 空气隙型 FP 腔的输出谱线



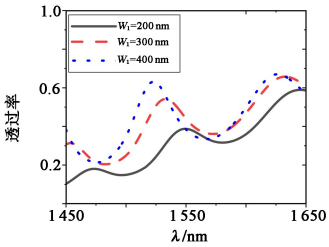
(c) 条波导阻断型 FP 腔结构



(d) 条波导阻断型 FP 腔的输出谱线



(e) 空气孔型 FP 腔结构



(f) 空气孔型 FP 腔的输出谱线

图 3 各种 FP 腔结构及其输出谱线图

条波导阻断型 FP 腔结构如图 3(c)所示，它是在槽波导的槽中引入两处条波导阻断形成的。不同条波导宽度 $L_{条}$ 下的 FP 腔传输谱线如图 3(d)所示，当条波导宽度 $L_{条}$ 从 100 nm 逐渐增大至 300 nm 时，输出谱线的透过率变小，消光比明显变差。最优的情况是 $L_{条}$ 为 100 nm，此时透过率较高，但是消光比仍较差。

为了同时提高 FP 腔的透过率和消光比，本文又提出了空气孔型 FP 腔，结构如图 3(e)所示，它是在总线波导中引入空气孔作为部分反射单元构成的。不同空气孔宽度 W_1 下的 FP 腔传输谱线如图 3(f)所示。由图可知，当空气孔宽度 W_1 从 200 nm 增加到 400 nm 时，线型的最小透射率变化不大，最大透射率逐渐上升，器件消光比也逐渐增大，故 W_1 的大小确定为 400 nm。另外，通过研究发现，该空气孔型 FP 腔的其他结构参数对线型的消光比影响不大，故在本实验中不展开分析，直接给出设计参

数：空气孔内侧长度(L_1)、空气孔外侧长度(L_2)和空气孔外侧波导宽度(W_2)分别为 250，500 和 200 nm。此种空气孔型 FP 腔输出谱线的透过率和消光较好，所以被应用在本文后续工作中。

2.2　MRR 结构设计

MRR 结构如图 4 所示，为圆形环状波导结构，与总线波导间为点耦合。结构参数主要包括 MRR 的弯曲半径 R，以及环状波导与总线波导之间的耦合间距 g。从器件的紧凑性来考虑，MRR 的半径应该尽可能取小，但是较小的半径会带来较大的弯曲损耗，但如果 MRR 的半径过大，又会使其自由光谱范围(FSR)过小，限制传感器的可测量范围。综合考虑后，此处 MRR 的半径 R 取 20 μm。

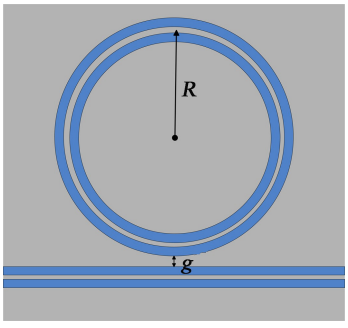


图 4　槽波导 MRR 结构示意图

环状波导与总线波导之间的耦合间距 g 与 MRR 的耦合状态密切相关。MRR 有临界耦合状态、过耦合状态和欠耦合状态，MRR 在不同耦合状态下的输出谱线谐振峰深度和消光比不同，其中临界耦合状态下 MRR 输出谱线的消光比最大，所以在设计器件时要使 MRR 处于临界耦合状态，以有利于提升器件的传感性能。为使 MRR 在 1 550 nm 波长附近处于临界耦合状态，本文利用三维时域有限差分方法，得到了多个间距下的输出谱线，结果如图 5 所示。由图可知，当耦合间距分别取 540，580 和 620 nm时，谱线的透射率最小位置分别为 1 507.3，1 552.3 和 1 610.5 nm，说明间距在 580 nm 时该 MRR 在 1 550 nm 附近达到临界耦合状态。综上，确定 MRR 与总线波导的耦合间距为 580 nm。

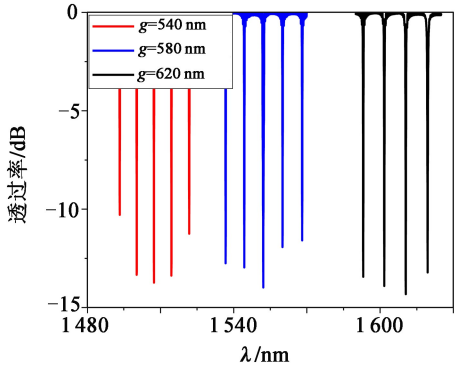
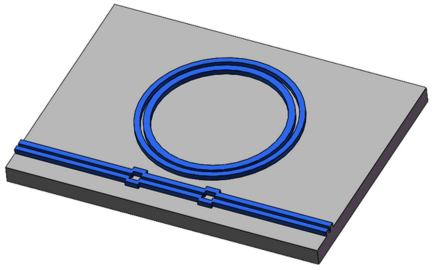


图 5　不同耦合间距下 MRR 的输出谱线

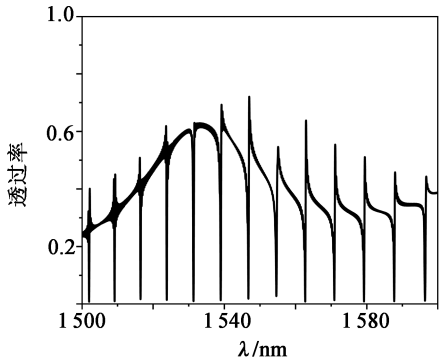
2.3　FP 腔和 MRR 耦合结构设计

将上述设计的 MRR 与 FP 腔耦合，即 MRR 与总线波导的耦合位置处于 FP 腔内，得到如图 6(a)所示的槽波导 FP-MRR 器件。对于 FP 腔来说，两孔内侧距离决定其自由光谱范围，考虑到 MRR 的半径为 20 μm，这里 FP 腔腔长选取为 4.75 μm。

利用三维时域有限差分法，得到 FP-MRR 器件的输出谱线图，如图 6(b)所示。可以清楚地看到，谱线的包络为 FP 腔的谐振谱线，MRR 的原洛伦兹谐振峰处出现了尖锐且不对称的 Fano 型谐振峰。以波长为 1 562.7 nm 处的 Fano 谱线为例，其消光比为 18.50 dB，斜率为 77.08 dB/nm。



(a) 槽波导 FP-MRR 示意图



(b) 器件的传输谱线

图 6　槽波导 FP-MRR 示意图及其传输谱线

3　折射率传感

槽波导 FP-MRR 器件在外界折射率为 1.333 0 和 1.333 2 下的传输谱线如图 7 所示，为了显示清晰，仅给出了峰谷位置在 1 562.7 nm 波长处的 Fano 峰。由图可见，当外界折射率从 1.333 0 变为 1.333 2 时，输出谱线明显向右移动，谐振峰峰谷位置漂移至 1 562.8 nm，可得到波长探测传感方案下的传感灵敏度 S_λ（$S_\lambda = \Delta\lambda/\Delta n$，$\Delta\lambda$ 为谐振峰波长的

变化量，Δn 为外界折射率的变化量）为 500 nm/RIU，可探测极限 DL_λ（$DL_\lambda = \Delta a / S_\lambda$，$\Delta a$ 为仪器的检测精度，这里 Δa 为 0.02 nm）为 4.00×10^{-5} RIU。

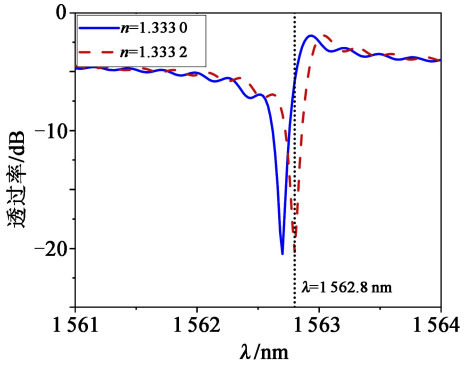


图 7 不同待测物折射率下槽波导 FP-MRR 的 Fano 型谱线

另外，固定波长为 1 562.8 nm，比较该器件在外界折射率分别为 1.333 0 和 1.333 2 情况下的输出谱线的强度变化，可得到强度探测传感方案下的传感灵敏度 S_I（$S_I = \Delta I / \Delta n$，$\Delta I$ 为固定波长下的透射光强的变化）为 7.24×10^4 dB/RIU，可探测极限 DL_I（$DL_I = \Delta a / S_I$，Δa 为仪器的检测精度，这里 Δa 为 0.4 dB）为 5.52×10^{-6} RIU。

本文与其他基于单个 MRR 的 Fano 线型谱线的折射率传感性能对比见表 1。可以看出，在波长检测传感方案下，本文提出的器件的传感灵敏度明显优于已报道的器件。这是因为已报道的工作均基于条波导 MRR 实现，而本文基于槽波导 MRR 实现，槽波导可明显增强光与物质相互作用，提高器件的传感灵敏度。在强度检测传感方案下，本文提出的器件的传感灵敏度更高，可探测极限也更低。综上，与已报道的单个 MRR 结构的结果相比，本文提出的器件的传感灵敏度和可探测极限均更优。

表 1 基于单个 MRR 的 Fano 线型谱线的折射率传感性能

机理	器件结构	传感灵敏度	可探测极限
波长探测	MRR 和空气孔波导耦合[22]	125 nm/RIU	—
	MRR 和单个 T 型波导耦合[23]	143.45 nm/RIU	—
	本文 FP-MRR	500 nm/RIU	4.00×10^{-5} RIU
强度探测	MRR 和渐变空气孔腔耦合[20]	1.76×10^4 dB/RIU	7.20×10^{-4} RIU
	本文 FP-MRR	7.24×10^4 dB/RIU	5.52×10^{-6} RIU

4 结论

综上所述，本文利用单个槽波导 MRR 产生了 Fano 线型谱线，并利用其实现了高传感灵敏度和低可探测极限的折射率传感。一方面，由于光在槽波导中以限制在槽中的槽模式传播，极大地增强了光与待测物的相互作用，使传感灵敏度得到提升；另一方面，Fano 线型相比于洛伦兹线型的线宽更窄，所以透射率在较小的波长范围内改变较大，使可探测极限得到降低。本文提出的槽波导 FP-MRR 器件在波长检测和强度检测下的传感灵敏度分别达到 500 nm/RIU 和 7.24×10^4 dB/RIU，可探测极限分别为 4.00×10^{-5} 和 5.52×10^{-6} RIU。不同于已报道的多微环级联等复杂结构，本文基于单个槽波导微环实现了法诺线型谱线，并利用其实现了高传感灵敏度和低可探测极限的折射率传感。本工作可为集成型折射率传感器的性能提升提供一种紧凑型方案，可为片上传感系统的关键部件提供有力候选。

参考文献：

[1] Claes T, Molera J G, De Vos K, et al. Label-free biosensing with a slot-waveguide-based ring resonator in silicon on insulator[J]. IEEE Photon. J., 2009, 1(3): 197-204.

[2] Lo S M, Hu S, Gaur G, et al. Photonic crystal microring resonator for label-free biosensing[J]. Opt. Express, 2017, 25(6): 7046-7054.

[3] Yao K Y, Shi Y C. High-*Q* width modulated photonic crystal stack mode-gap cavity and its application to refractive index sensing[J]. Opt. Express, 2012, 20(24): 27039-27044.

[4] Zhang Y G, Han S B, Zhang S L, et al. High-Q and high-sensitivity photonic crystal cavity sensor[J]. IEEE Photon. J., 2015, 7(5): 1-6.

[5] Shakoor A, Grant J, Grande M, et al. Towards portable nanophotonic sensors[J]. Sensors (Basel), 2019, 19(7): 1715.

[6] Fan S H. Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems[J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(6): 908-910.

[7] Qiu C, Yu P, Hu T, et al. Asymmetric Fano resonance in eye-like microring system[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 101(2): 021110.

[8] Wang G C, Dai T G, Jiang J F, et al. Slope tunable Fano resonances in asymmetric embedded microring resonators[J]. J. of Opt., 2017, 19(2): 025803.

[9] 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 J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2014, 20(3): 35-44.

[10] Zhou X, Zhang L, Andrea M A, et al. An integrated photonic gas sensor enhanced by optimized Fano effects in coupled microring resonators with an athermal waveguide[J].

J. of Lightwave Technol., 2015, 33(22): 4521-4530.

[11] Lu Y, Yao J Q, Li X, et al. Tunable asymmetrical Fano resonance and bistability in a microcavity-resonator-coupled Mach-Zehnder interferometer[J]. Opt. Lett., 2005, 30(22): 3069-3071.

[12] Ruege A C, Reano R M. Sharp Fano resonances from a two-mode waveguide coupled to a single-mode ring resonator[J]. J. of Lightwave Technol., 2010, 28(20): 2964-2968.

[13] Zheng S, Cao X P, Wang J. Multimode Fano resonances for low-power mode switching[J]. Opt. Lett., 2020, 45(4): 1035-1038.

[14] Zhou L J, Poon A W. Fano resonance-based electrically reconfigurable add-drop filters in silicon microring resonator-coupled Mach-Zehnder interferometers[J]. Opt. Lett., 2007, 32(7): 781-783.

[15] Zhang W, Li W, Yao J. Optically tunable Fano resonance in a grating-based Fabry-Perot cavity-coupled microring resonator on a silicon chip[J]. Opt. Lett., 2016, 41(11): 2474-2477.

[16] Zhao G L, Zhao T, Xiao H F, et al. Tunable Fano resonances based on microring resonator with feedback coupled waveguide[J]. Opt. Express, 2016, 24(18): 20187-20195.

[17] Gu L P, Fang H L, Li J T, et al. A compact structure for realizing Lorentzian, Fano, and electromagnetically induced transparency resonance lineshapes in a microring resonator [J]. Nanophotonics, 2019, 8(5): 841-848.

[18] Wang S, Lu W D, Lai X H, et al. Silicon waveguide-based single cavity Fano resonance temperature sensor[J]. Optoelectronics Lett., 2023, 19(3): 139-143.

[19] Lu L D, Wang S, Zeng Z M, et al. Single silicon waveguide MRR based Fano resonance in the whole spectral bands[J]. Optoelectronics Lett., 2022, 18(7): 398-403.

[20] Peng F C, Wang Z R, Guan L, et al. High-sensitivity refractive index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity-coupled microring resonator[J]. IEEE Photon. J., 2018: 10(2): 6600808.

[21] Xu Y M, Li J X, Kong M. Various resonance lineshapes available in a single microring resonator[J]. J. of Opt., 2021, 23(4): 254-260.

[22] Gao J, Zhang D L, Lu L D, et al. Design and sensing characterization of Fano resonant devices based on a runway-type micro-ring resonant cavity[J]. J. of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 24-30.

[23] Lu L D, Zhu L Q, Zeng Z M, et al. Fano resonance ion sensor enabled by 2D plasmonic sub-nanopores-material[J]. IEEE Sensors J., 2021, 21(13): 14776-14783.

作者简介：

李鑫雨(1998—)，男，硕士研究生，主要研究方向为硅基波导器件及其传感技术；

徐亚萌(1987—)，女，博士，副教授，博士生导师，主要从事集成光电子器件及其传感技术的研究。