

# 一维光子晶体槽型微环谐振器及其传感特性

刘春娟<sup>1</sup>, 桑常林<sup>1\*</sup>, 吴小所<sup>1,2</sup>, 穆洲<sup>1</sup>, 蔡佳丽<sup>1</sup>, 贾文娟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;

<sup>2</sup>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** 为了使折射率传感器具有高品质因子和高灵敏度, 提出一种基于槽型光波导的一维光子晶体微环谐振器。该结构中两种不同状态的光模式在不同的光路上相互干涉而产生 Fano 共振, 这种非对称线型的结构能够获得更高的消光比和品质因子, 在折射率传感方面也有更好的灵敏度。采用时域有限差分法对结构进行分析和模拟仿真。仿真结果表明, 所提结构的品质因子达到 30950, 比传统微环谐振器提高 4 倍以上; 消光比为 29.08 dB, 比传统微环谐振器高出 16.89 dB。在折射率传感特性的分析中, 所提结构的灵敏度达到 344 nm/RIU, 比传统微环谐振器提高 3 倍; 灵敏度检测下限为  $1.4 \times 10^{-4}$  RIU。

**关键词** 集成光学; 微环谐振器; Fano 共振; 槽型波导; 折射率传感器

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2413002

## One-Dimensional Photonic Crystal Groove Microring Resonators and its Sensing Characteristics

Liu Chunjuan<sup>1</sup>, Sang Changlin<sup>1\*</sup>, Wu Xiaosuo<sup>1,2</sup>, Mu Zhou<sup>1</sup>, Cai Jiali<sup>1</sup>, Jia Wenjuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract** In order to make the refractive index sensor has high quality factor and high sensitivity, a one-dimensional photonic crystal microring resonator based on a grooved optical waveguide is proposed. In this structure, the light modes of two different states interfere with each other in different optical paths to produce in Fano resonance. This asymmetric linear structure can obtain higher extinction ratio and quality factor, and it also has better sensitivity in refractive index sensing. The structure is analyzed and simulated by using finite-difference time domain method. The simulation results show that the quality factor of the proposed structure reaches 30950, which is more than 4 times higher than the traditional microring resonator, and the extinction ratio is 29.08 dB, which is 16.89 dB higher than that of the traditional microring resonator. In the analysis of refractive index sensing characteristics, the sensitivity of the proposed structure reaches 344 nm/RIU, which is 3 times higher than of traditional microring resonators, and the lower limit of sensitivity detection is  $1.4 \times 10^{-4}$  RIU.

**Key words** integrated optics; microring resonators; Fano resonance; groove waveguide; refractive index sensor

**OCIS codes** 130.3120; 130.6010; 130.5296

## 1 引 言

随着绝缘体上硅(SOI)技术的迅速发展, 基于 SOI 平台的光学器件因其具有响应速度快和抗电磁干扰能力强等优点而得到了人们的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。科研人员提出了很多基于 SOI 平台的光学传感器件, 例如马赫-曾德尔干涉仪传感器<sup>[4]</sup>、法布里-珀罗

共振传感器<sup>[5]</sup>、表面等离子体传感器<sup>[6-7]</sup>、微环/微盘谐振器<sup>[8-11]</sup>、光子晶体传感器<sup>[12]</sup>和光栅传感器<sup>[13]</sup>等, 其中微环谐振器(MRR)因其具有品质因数高、损耗低、集成方便及结构紧凑等诸多优点而备受关注<sup>[14]</sup>, 目前在生物医学、环境监测和食品安全等方面具有广泛的应用<sup>[15]</sup>。

传统微环谐振器的感测性能通常受到对称洛伦

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-09-15

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: 1430015833@qq.com

兹线型的限制<sup>[16]</sup>,所以这种低灵敏度的结构很难满足大多数传感应用的需求。为了获得更高的灵敏度和品质因子  $Q$ ,科研人员提出了很多新的结构。文献[17]提出了基于相移 Bragg 光栅的槽型微环谐振器,得到的灵敏度为 297.13 nm/RIU,但是  $Q$  值为 2000。文献[18]提出了用于无标记传感的紧凑型内壁光栅槽微环谐振器,虽然该谐振器具有较好的灵敏度,但  $Q$  值为 1200,消光比为 15 dB。文献[19]得到的  $Q$  值为 32000,但折射率灵敏度为 67 nm/RIU,与同尺寸微环谐振器的 43 nm/RIU 相比,只有较小的提升。因此在保证体积较小和结构简单的情况下,如何获得  $Q$  因子与灵敏度的平衡成为微环谐振器传感的重要问题之一。

为了保证较高的  $Q$  值和灵敏度,本文提出一种系统简单和结构紧凑的新型一维光子晶体(1DPHC)微环谐振器,该结构中的波导与光子晶体的高折射率差会导致连续态波形发生畸变,与微环离散态波形发生耦合后形成 Fano 共振<sup>[20-21]</sup>;采用传输矩阵法分析结构的传输特性,研究其工作原理

以及物理尺寸参数对器件性能的影响,并与相关文献中提出的基于 MRR 的折射率传感器<sup>[22]</sup>进行比较,证明新型 1DPHC 微环谐振器的高容差性。这种微环谐振器除了可以应用于折射率传感方面外,在光学开关和滤波器等其他研究领域也可以进行应用和研究。

## 2 基本原理

### 2.1 结构设计

基于 1DPHC 的槽型微环谐振器(PSMRR)的立体和平面结构如图 1 所示,其中  $L_r$  为中间缺陷的长度, $R$  为微环半径, $W$  为槽型单波导的宽度, $W_{\text{gap}}$  为耦合间距, $\Delta$  为晶体间隔, $W_{\text{slot}}$  为槽宽, $r$  为晶体半径,基底  $\text{SiO}_2$  和波导芯层  $\text{Si}$  的厚度分别为  $2 \mu\text{m}$  和  $220 \text{ nm}$ 。从图 1 可以看到,该结构由一个带有 1DPHC 的谐振腔槽型波导和槽型微环谐振器构成,在槽型波导的上、下表面对称刻蚀尺寸一致的半圆空气孔,两边的空气孔关于耦合中心点对称。

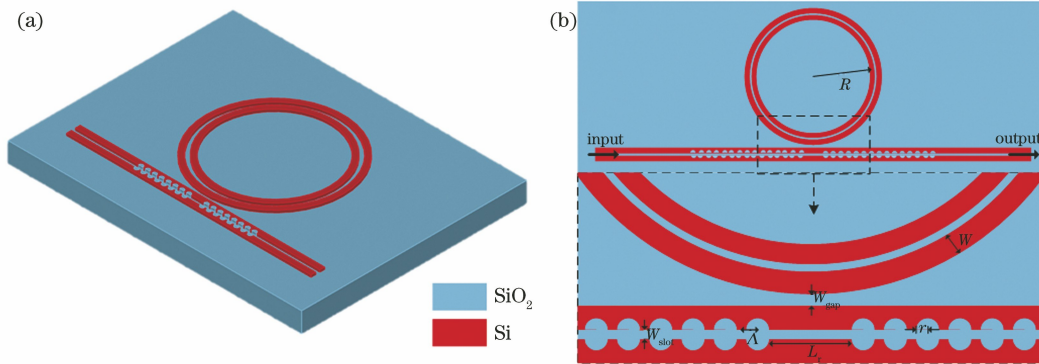


图 1 PSMRR 结构。(a) 立体结构;(b) 俯视图及耦合区域放大图

Fig. 1 PSMRR structure. (a) Three-dimensional structure; (b) top view and enlarged view of coupling area

当光在狭缝中传播时,结构中的波导与光子晶体的高折射率差会导致波形发生畸变,为此可以实现对光子在纳米尺度范围内进行限制和调控。根据槽型波导将光模式限制在空气狭缝中的特性,以及由总线波导缺陷两边分布的周期性布拉格反射镜造成的光子带隙效应,则直波导中连续态与微环中的离散态发生破坏性干涉而产生 Fano 共振。Fano 共振是一种会产生非对称线型的散射共振现象,其可以得到更高的  $Q$  值,还可以检测由环境介质折射率变化而引起的较小共振波长偏移和透射强度变化。

### 2.2 理论分析

微环谐振器的谐振方程可以表示为

$$Ln_{\text{eff}} = m\lambda_{\text{res}}, \quad (1)$$

式中: $L$  表示微环的周长, $L = 2\pi R$ ;  $n_{\text{eff}}$  表示有效折射率; $m$  表示微环谐振的级数, $m = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\lambda_{\text{res}}$  表示微环谐振的波长。

对于全通型微环谐振器,传输函数可以表示为

$$t_{\text{ring\_thru}} = \frac{-a + t \exp(-j\varphi)}{-at^* + \exp(-j\varphi)}, \quad (2)$$

式中: $\varphi$  表示光信号往返一周所产生的相位差, $\varphi = 4\pi^2 n_{\text{eff}} R / \lambda$ ,  $\lambda$  表示波长; $t$  表示传输系数, $t = \sqrt{1 - |k|^2}$ ,  $k$  表示耦合系数; $t^*$  表示  $t$  的共轭; $a$  表示光在微环中的传输系数, $a = \exp(-\alpha L)$ ,  $\alpha$  表示传输损耗的系数; $j$  表示光信号在波导中互相耦合所产生的相位变化。

当光信号在由不同介电常数构成的周期性结构中传播时,会受到调制而形成带隙。在 1DPHC 的带隙中,因将空气孔作为反射元件,所以微环的传输矩阵应该考虑这部分的反射光,则传输矩阵可以表示为

$$\mathbf{T}_{\text{ring}} = \begin{bmatrix} t_{\text{ring\_thru}} & 0 \\ 0 & t_{\text{ring\_thru\_inv}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $t_{\text{ring\_thru\_inv}}$  表示微环谐振器的逆传输函数。对于 1DPHC 波导来说,其可以看作由空气孔与波导段组成的周期性结构,传输矩阵可以表示为

$$\mathbf{T}_{\text{pg}} = (\mathbf{T}_{\text{Air}} \cdot \mathbf{T}_{\text{Air\_to\_wg}} \cdot \mathbf{T}_{\text{wg}} \cdot \mathbf{T}_{\text{wg\_to\_Air}})^N, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{T}_{\text{Air}}$  和  $\mathbf{T}_{\text{wg}}$  分别表示空气孔和波导段处的传输矩阵,  $\mathbf{T}_{\text{Air}} = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_{\text{Air}}2r) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta_{\text{Air}}2r) \end{bmatrix}$ ,

$$\mathbf{T}_{\text{wg}} = \begin{bmatrix} \exp[-j\beta_{\text{wg}}2(\Lambda-r)] & 0 \\ 0 & \exp[j\beta_{\text{wg}}2(\Lambda-r)] \end{bmatrix},$$

其中  $\beta_{\text{Air}}$  和  $\beta_{\text{wg}}$  分别表示空气孔和波导段处的传播常数;  $\mathbf{T}_{\text{Air\_to\_wg}}$  和  $\mathbf{T}_{\text{wg\_to\_Air}}$  分别表示空气孔到波导面和波导面到空气孔的反射传输矩阵;  $N$  表示 1DPHC 的周期个数。

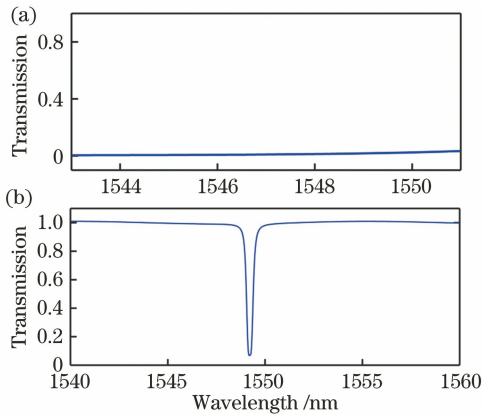
在定义所有组件的情况下,将上述传输矩阵进行组合以得到基于 1DPHC 槽型波导的耦合谐振方程,可表示为

$$\mathbf{T}_{\text{in}} = \mathbf{T}_{\text{pg}} \cdot \mathbf{T}_{\text{slot}} \cdot \mathbf{T}_{\text{ring}} \cdot \mathbf{T}_{\text{slot}} \cdot \mathbf{T}_{\text{pg}} \cdot \mathbf{T}_{\text{out}}, \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{T}_{\text{slot}}$  表示波导中心缺陷的传输矩阵,  $\mathbf{T}_{\text{slot}} = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_{\text{wg}}L_r/2) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta_{\text{wg}}L_r/2) \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{T}_{\text{out}}$  表示微环耦合入直波导的传输矩阵。

由于 Fano 线型具有不对称性,不能直接使用洛伦兹线型的微环谐振器来计算半峰全宽,所以需要 Fano 线型进行拟合,表达式为

$$T_{\text{Fano}} = |a_1 + ja_2 + b/(\omega - \omega_0 + j\gamma)|^2, \quad (6)$$



式中:  $a_1$ 、 $a_2$  和  $b$  表示实数;  $\omega_0$  表示共振频率;  $\gamma$  表示共振腔的阻尼系数,半峰全宽  $\lambda_{\text{FWHM}} = 2\gamma$ ;  $\omega$  表示共振谱线的线宽。由(6)式可知,Fano 共振的  $Q$  值可以通过  $Q = \lambda/\lambda_{\text{FWHM}}$  来计算得到。

在后文的分析中,需要关注的参数有灵敏度  $S$  和检测下限  $L_{\text{LOD}} = \Delta\lambda/QS$ 。

### 3 仿真结果的分析 and 器件结构的优化

采用三维时域有限差分(3D-FDTD)方法对所提结构中的传输频谱及模场分布进行模拟仿真。因为 1DPHC 微腔与微环谐振器耦合会发生很强的谐振,所以在模拟仿真的过程中采用尽可能小的网格来网格化计算区域,从而获得高精度的仿真结果。在波导中心将两个空气孔的间距设为  $2.4\Lambda$ ,用来破坏光子晶体结构在传播方向的平移对称性。1DPHC 波导中心产生的缺陷和两侧对称的空气孔结构可以使中心波导处的有效折射率增大,这会导致缺陷模之间出现 U 型透射谱。当共振波长的共振峰在 U 型谱中时,缺陷模和微环谐振平衡后的光波会发生破坏性干涉,从而形成不对称的 Fano 线型。

为了更清楚地理解 1DPHC 微腔和微环谐振器之间的相互干涉情况,分别对 1DPHC 微腔和微环谐振器的透射光谱进行仿真,仿真结果如图 2 所示。从图 2 可以看到,在相同尺寸的前提下,在 1DPHC 微腔的光子能带之间存在光子禁带,即 1DPHC 微腔的光谱出现 U 型的线型,在对应的频率段内,光子处在禁带范围内;微环谐振器的透射光谱中出现对称的洛伦兹线型;在 1522.71~1523.92 nm 的波长范围内,两种光模式会在不同的路径上相互作用以及相互干扰,从而产生类似电磁诱导透明现象的共振分裂效应;在 1536.02~1540.06 nm 的波长范

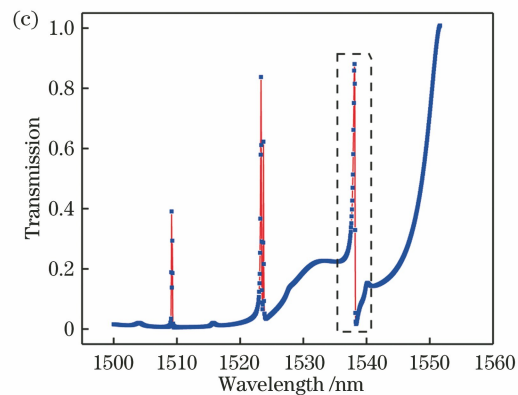


图 2 不同器件的透射光谱。(a) 1DPHC;(b) MRR;(c) PSMRR

Fig. 2 Transmission spectra of different devices. (a) 1DPHC; (b) MRR; (c) PSMRR

围内,两种光模式相互作用会满足连续态和离散态的相互耦合条件,从而形成 Fano 共振。

此时需要指出的是,所提结构的透射光谱不仅仅是光子禁带线型和洛伦兹线型的简单叠加。由(1)式可知,当 1DPHC 微腔与微环耦合时,1DPHC 微腔的反射光和透射光都会与微环的谐振波发生干

涉耦合,导致有效折射率发生变化,此时结构将不会继续保持传统微环谐振器的谐振频率,而是产生新的谐振频率,结果如图 3 所示。从图 3 可以看到,PSMRR 的  $Q$  值为 30950,比微环谐振器提高了 4 倍以上,消光比达到 29.08 dB,比微环谐振器提高了 16.89 dB。

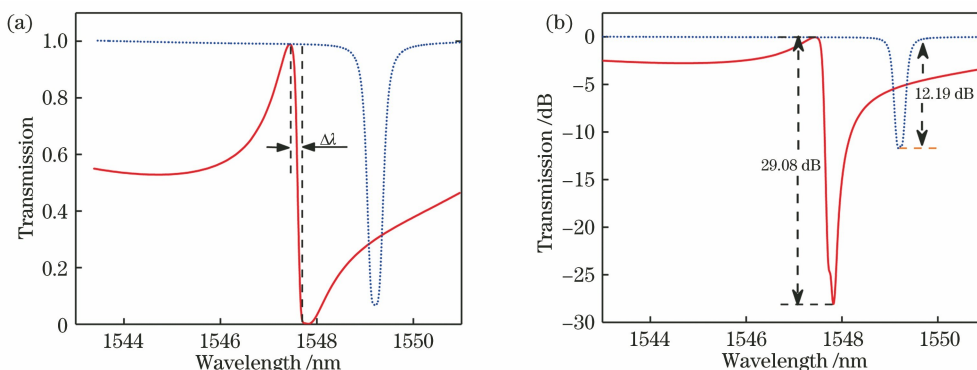


图 3 PSMRR 和 MRR 谐振区域的透射光谱。(a)透射率;(b)透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of PSMRR and MRR resonance region. (a) Transmittance; (b) transmission spectra

模拟仿真过程中,Si 材料在谐振点附近的折射率为 3.4757<sup>[23]</sup>,SiO<sub>2</sub> 的折射率为 1.444<sup>[24]</sup>,表明所选材料具有电磁属性。光源波长为 1500 ~ 1600 nm,所有的波导高度为 220 nm,微环的半径为 8.58 μm。在直波导中引入宽度为 62 nm 的狭缝结构,这种狭缝结构将光模式局限在空气狭缝中进行传输。

相同尺寸下,传统的矩形波导和槽型波导的模式分布,如图 4 所示。从图 4 可以看到,在低折射率的狭缝区域中,槽型波导可以提供更强的光限制能力,并且具有更低的光耗散,这种独特的特性使得槽型波导比传统的条形波导具有更高的  $Q$  值和灵敏度。在光学折射率传感器中,这种槽型结构是裸露在外界中的,而被探测物质完全覆盖和填充在狭缝之中,这将会增强光与外界环境的相互作用,增大器件的传感灵敏度。

目前,纳米级硅基材料的制作工艺仍有很大的进步空间,一些复杂的结构在光刻过程中仍存在一定的制作误差,在这种工艺下得到的结果有可能会背离预期的结果。实验过程中,为了优化 Fano 非对称线型的透射光谱以及保证结构的可实现性和可靠性,分析 1DPHC 狭缝波导中空气孔半径和狭缝宽度  $W_{\text{slot}}$  在最优值 ±8 nm 的范围内波动的消光比和  $Q$  值,结果如图 5 所示。

在保证其他参数处于最优值的情况下,当  $r = 101$  nm 和  $W_{\text{slot}} = 62$  nm 时,PSMRR 具有最大的  $Q$

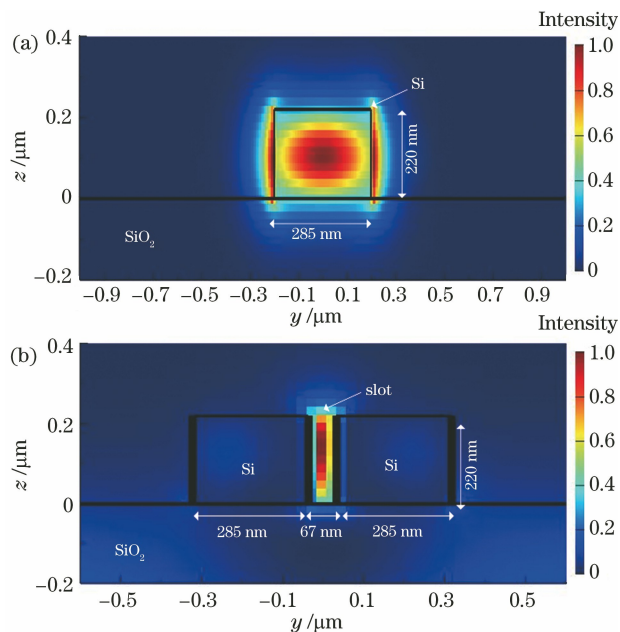


图 4 不同波导在相同尺寸中的模式分布示意图。

(a)矩形波导;(b)槽型波导

Fig. 4 Schematic of mode distribution of different waveguides in the same size. (a) Rectangular waveguide; (b) groove waveguide

值和消光比。当晶体半径在 93 ~ 109 nm 之间波动时,随着晶体半径的增大, $Q$  值呈先增大后减小的趋势。但是最小  $Q$  值为 20635,消光比为 17.56,结果仍在工艺容差值的范围内,直波导内仍然保持正常的谐振连续态,并与离散态(微环谐振器的谐振波长)发生耦合以形成 Fano 共振。槽宽度影响着光与环

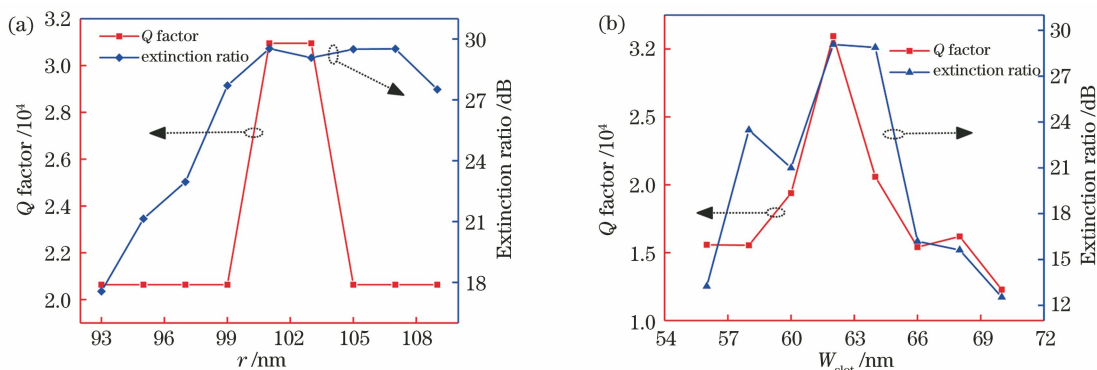


图 5 不同参数优化后的结果。(a) 晶体半径；(b) 槽宽度

Fig. 5 Optimized results of different parameters. (a) Crystal radius; (b) groove width

境的作用面积,当槽宽度在 54~70 nm 之间波动时,结构同样表现出较好的可靠性。因此提出的新型微环谐振器结构有着良好的工艺容差性和可实现性,可以较容易地制备具有高品质因子和高灵敏度的 1DPHC 槽型微环谐振折射率传感器<sup>[25]</sup>。

#### 4 折射率传感特性

基于优化后的最佳结构参数,本节进一步研究 PSMRR 的折射率传感性能。将光学折射率传感器完全放置在折射率变化的介质中,用来监测由环境引起的谐振峰波长漂移和透射光谱突变。在不同

环境的折射率下,透射光谱及波长变化如图 6 所示,模拟仿真过程中,环境的折射率变化范围为 1.3332~1.3432。水溶液的折射率变化会影响结构狭缝中光模式与周围环境的相互作用,从而导致有效折射率发生变化。根据共振方程,有效折射率的变化会引起共振波长的偏移,因此可以建立有效折射率的变化量与共振波长偏移之间的关系。

对于传感的应用,灵敏度可以表示为

$$S = \Delta\lambda / \Delta n, \quad (7)$$

式中: $\Delta n$  表示有效折射率的变化量。由(7)式可知,当  $\Delta n$  变化时,共振波长随之变化。

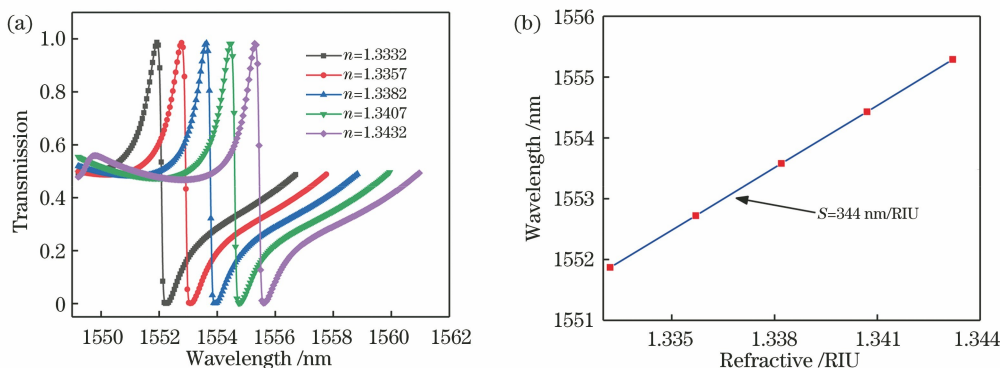


图 6 折射率传感的分析结果。(a) 不同环境折射率下的透射光谱；(b) 波长随环境折射率的变化曲线

Fig. 6 Analysis results of refractive index sensing. (a) Transmission spectra under different environmental refractive index; (b) variation curve of wavelength with environmental refractive index

图 6(b) 为环境折射率与共振波长之间的函数曲线。从图 6(b) 可以看到,波长与折射率具有良好的线性关系。表 1 为 1DPHC 槽波导微环谐振传感器与相关文献提出的基于 MRR 的折射率传感器关于  $Q$ 、 $S$ 、 $L_{LOD}$  和消光比几个参数的比较。

从表 1 可以看到,所提结构的灵敏度为 344 nm/RIU,  $L_{LOD}$  为  $1.4 \times 10^{-4}$  RIU,说明所提结构在具有较高品质因数的同时还能够保证良好的灵敏度。此外由于具有低 LOD 和较小尺寸等优势,

该结构作为折射率传感器可广泛应用于生物和化学等领域,通过调整波导宽度、孔半径和槽宽度等参数对结构进行优化,可以满足不同应用的需求。

#### 5 结 论

提出一种新的基于 1DPHC 槽型微环谐振器的传感器,其具有高品质因子和高折射率的优点,在该结构中可以通过直波导和微环两条不同路径光模式的相互干涉来产生 Fano 共振。采用传输矩阵法分

表 1 基于 MRR 的折射率传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison of refractive index sensors based on MRR

Refractive index sensor	Q	S / (nm · RIU <sup>-1</sup> )	Extinction ratio /dB	L <sub>LOD</sub> /RIU
Ref. [17]	2000	297.13	20.00	1.1 × 10 <sup>-4</sup>
Ref. [26]	—	500.00	21.53	2.0 × 10 <sup>3</sup>
Ref. [18]	1085	559.50	12.70	—
Ref. [27]	—	180.00	30.00	1.1 × 10 <sup>-5</sup>
Ref. [19]	32000	67.00	23.00	7.2 × 10 <sup>-4</sup>
Proposed structure	30950	344.00	29.08	1.4 × 10 <sup>-4</sup>

析器件的物理尺寸参数对器件性能的影响,并使用 FDTD 软件对其进行仿真。通过分析 1DPHC 槽型波导中的空气孔半径和槽宽度在最优值 ±8 nm 的范围内的消光比和 Q 值,结果表明该结构具有可靠性和可实现性。仿真结果表明,由于具有 Fano 波形非对称的结构具有更小的带宽,在折射率传感方面,该结构的 Q 值达到 30950,相比传统的微环谐振器而言提高 4 倍以上;消光比达到 29.08 dB,相比传统的微环谐振器而言增大 16.89 dB;灵敏度为 344 nm/RIU, L<sub>LOD</sub> 为 1.4 × 10<sup>-4</sup> RIU,说明该结构具有良好的工艺容差性,能够在环境监测和生物传感等方面有很好的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1999, 54(1/2): 3-15.
- [2] Debackere P, Scheerlinck S, Bienstman P, et al. Surface plasmon interferometer in silicon-on-insulator: novel concept for an integrated biosensor [J]. Optics Express, 2006, 14(16): 7063-7072.
- [3] Zhou Y, Zhang M X, Guo Z N, et al. Recent advances in black phosphorus-based photonics, electronics, sensors and energy devices[J]. Materials horizons, 2017, 4(6): 997-1019.
- [4] Dai D X, He S L. Highly sensitive sensor based on an ultra-high-Q Mach-Zehnder interferometer-coupled microring [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(3):
- [5] Yuan G H, Gao L, Chen Y R, et al. Efficient optical biochemical sensor with slotted Bragg-grating-based Fabry-Perot resonator structure in silicon-on-insulator platform [J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(2): 247-255.
- [6] Nemova G, Kashyap R. Theoretical model of a planar integrated refractive index sensor based on surface plasmon-polariton excitation [J]. Optics Communications, 2007, 275(1): 76-82.
- [7] Chang Y, Jiang Y Y. Highly sensitive plasmonic sensor based on Fano resonance from silver nanoparticle heterodimer array on a thin silver film [J]. Plasmonics, 2014, 9(3): 499-505.
- [8] Zamora V, Lützwow P, Weiland M, et al. A highly sensitive refractometric sensor based on cascaded SiN microring resonators [J]. Sensors, 2013, 13(11): 14601-14610.
- [9] Wei H M, Krishnaswamy S. Polymer micro-ring resonator integrated with a fiber ring laser for ultrasound detection [J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2655-2658.
- [10] Grist S M, Schmidt S A, Flueckiger J, et al. Silicon photonic micro-disk resonators for label-free biosensing [J]. Optics Express, 2013, 21(7): 7994-8006.
- [11] Amiri I S, Ariannejad M M, Daud S, et al. High sensitive temperature sensor silicon-based microring resonator using the broadband input spectrum [J]. Results in Physics, 2018, 9: 1578-1584.
- [12] Zhang X W, Zhou G, Shi P, et al. On-chip integrated optofluidic complex refractive index sensing using silicon photonic crystal nanobeam cavities [J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1197-1200.
- [13] Ruan Z S, Shen L, Zheng S, et al. Subwavelength grating slot (SWGS) waveguide on silicon platform [J]. Optics Express, 2017, 25(15): 18250-18264.
- [14] Mu Z, Liu C J, Wu X S, et al. Feedback-coupled waveguide microring resonator based on slot structure [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1213001. 穆洲, 刘春娟, 吴小所, 等. 基于 slot 结构的反馈耦合波导微环谐振器 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1213001.
- [15] Fan X, White I M. Optofluidic microsystems for chemical and biological analysis [J]. Nature Photonics, 2011, 5(10): 591.
- [16] Wang S L, Liu Y H, Zhao D Y, et al. Optofluidic Fano resonance photonic crystal refractometric sensors [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(9): 091105.
- [17] Zhao C Y, Zhang L, Zhang C M. Compact SOI optimized slot microring coupled phase-shifted Bragg grating resonator for sensing [J]. Optics Communications, 2018, 414: 212-216.
- [18] Gu H J, Gong H, Wang C X, et al. Compact inner-wall grating slot microring resonator for label-free

- sensing[J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 5038.
- [19] 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): 17680600.
- [20] Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts [J]. *Physical Review*, 1961, 124(6): 1866-1878.
- [21] Chen Y, Gao X B, Xu Y M, et al. Fano resonance-sensing mechanism of photonic crystal nanobeam side-coupling aperture chirped photonic crystal nanobeam cavity structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1123002.  
陈颖, 高新贝, 许扬眉, 等. 光子晶体纳米梁侧耦合孔径啁啾光子晶体纳米梁腔结构的 Fano 共振传感机理 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1123002.
- [22] Xiao G L, Yang X H, Yang H Y, et al. Plasma refractive index sensor with tunable cross tie-shaped graphene array structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0728011.  
肖功利, 杨秀华, 杨宏艳, 等. 可调谐交叉领结形石墨烯阵列结构等离子体折射率传感器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0728011.
- [23] Li H. Refractive index of silicon and germanium and its wavelength and temperature derivatives [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1980, 9(3): 561-658.
- [24] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [25] Li T Y. Silicon based one-dimensional photonic crystal waveguide cavities and its applications [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 31-40.  
李庭宇. 硅基一维光子晶体波导微腔及其应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 31-40.
- [26] 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.
- [27] Sun L, Yuan J H, Ma T, et al. Design and optimization of silicon concentric dual-microring resonators for refractive index sensing [J]. *Optics Communications*, 2017, 395: 212-216.