

文章编号: 1671-7449(2026)02-0230-10

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(2): 230-239.

反馈波导内嵌布拉格光栅微环谐振器的传感特性

朱彦杰¹, 梁龙学^{1*}, 吴小所^{1,2}, 刘春娟¹

(1. 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 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: 为使微环传感器同时具备高灵敏度和宽自由光谱范围, 提出了一种反馈波导内嵌布拉格光栅微环结构。该结构采用狭缝微环提高灵敏度, 在微环内壁刻蚀布拉格光栅, 利用布拉格光栅对特定波长的选择性滤除其余谐振峰以拓宽自由光谱范围。采用传输矩阵法分析结构的传输机理并推导归一化光谱表达式。利用时域有限差分法对结构仿真模拟, 得出结构的模场分布和透射频谱, 分析参数对器件性能的影响并优化参数。最后, 以不同折射率的背景分析传感性能。结果表明, 所提结构实现了电磁诱导透明效应, 同时具备高灵敏度和高品质因数, 在1 500~1 600 nm的入射光波下实现了无自由光谱范围, 可检测范围不再受限于自由光谱范围。在折射率传感应用中, 该结构品质因数为28 935, 折射率灵敏度为460 nm/RIU, 探测极限为 1.17×10^{-4} RIU。

关键词: 集成光学; 微环谐振器; 狭缝微环; 光栅; 折射率传感器

中图分类号: TN256

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026032

引用格式: 朱彦杰, 梁龙学, 吴小所, 等. 反馈波导内嵌布拉格光栅微环谐振器的传感特性[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 230-239.

ZHU Yanjie, LIANG Longxue, WU Xiaosuo, et al. Analysis of sensing characteristics of Bragg grating microring resonators embedded in feedback waveguides [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(2): 230-239.

Analysis of Sensing Characteristics of Bragg Grating Microring Resonators Embedded in Feedback Waveguides

ZHU Yanjie¹, LIANG Longxue^{1*}, WU Xiaosuo^{1,2}, LIU Chunjuan¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To achieve a microring sensor with both high sensitivity and a wide free spectral range (FSR), a feedback waveguide embedded with a Bragg grating microring structure is proposed. A slot microring employed in this structure to enhance sensitivity, with Bragg gratings etched on the inner wall of the microring to selectively filter out specific wavelengths, thereby broadening the FSR by eliminating other resonant peaks. The transmission mechanism of the structure is analyzed using the transfer matrix method, and the normalized spectral expression is derived. Finite-difference time-domain simulations are conducted to obtain the modal field distribution and transmission spectrum, and the influence of param-

【收稿日期】2025-03-05

【基金项目】甘肃省自然科学基金资助项目(21JR7RA289)

【作者简介】朱彦杰(1997—), 男, 硕士生, 主要从事光学传感器研究。E-mail: 2418054723@qq.com。

*【通信作者】梁龙学(1965—), 男, 副教授, 主要从事特种半导体器件研究。E-mail: llxue@mail.lzjtu.cn。

eters on device performance is analyzed to optimize the design. Finally, the sensing performance is evaluated by examining different background refractive indices. The results demonstrate that an electromagnetically induced transparency effect is achieved in the proposed structure, combining high sensitivity and high quality factor. Under incident light wavelengths of 1 500~1 600 nm, the FSR limitation is eliminated, allowing the detectable range to no longer be constrained by the FSR. In refractive index sensing applications, a quality factor of 28935, a refractive index sensitivity of 460 nm/RIU, and a detection limit of 1.17×10^{-4} RIU are exhibited in this structure.

Key words: integrated optics; microring resonator; slot microring; grating; refractive index sensor

0 引 言

基于绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)平台的光学器件具有结构紧凑、抗电磁干扰能力强等突出优势,在集成光子学领域受到了广泛关注与研究^[1-2]。近年来,科研人员基于SOI平台开发了多种高性能光学传感器,主要包括表面等离子体传感器^[3-4]、光子晶体传感器^[5-6]、光纤传感器^[7]、微环谐振器传感器(Microring Resonator, MRR)^[8-10]等。其中,MRR因其高品质因数(Quality factor, Q)、结构简单等显著特点,已成为光学传感领域最具发展前景的技术方案之一^[11-12]。

MRR的传感检测方法主要有光强法和波长法两种^[13-14]。其中,光强法虽然实现简单,但存在检测范围有限和测量精度不稳定的固有缺陷;相比之下,波长法不仅具有更大的动态检测范围,还能提供更稳定的测量精度,因而成为实际传感应用中的首选方法^[15]。然而,基于波长法的MRR检测范围受到自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)的限制,当外界环境参量发生较大变化时,可能导致谐振峰漂移超出FSR范围,产生谱峰混叠现象,严重影响测量准确性。为解决MRR的检测范围受限于FSR的问题,科研人员提出了许多新结构,如同心双微环^[16]、光栅耦合微环^[17]、角向光栅微环^[18]等来拓宽FSR,但它们的灵敏度较低。传统MRR的折射率灵敏度仅为70 nm/RIU,其原因是光场被限制在硅波导芯层中传输,光场和待测物质无法充分接触^[19]。要提高MRR的灵敏度必须让光场和待测物质充分接触。狭缝型MRR为此提供了有效解决方案:通过在波导中引入纳米级狭缝结构,使光场主要分布在低折射率的狭缝区域,从而大幅提升光场与待测物质的接触面积。为此,研究人员提出了不同类型的狭缝MRR结构,如Yuan等^[20]设计的结构实现了708 nm/RIU的高灵敏度,但其FSR仅为33 nm;Shi等^[21]提出的

结构虽获得403 nm/RIU的灵敏度,但FSR仅为22 nm。这些研究结果表明,现有狭缝型MRR在显著提升灵敏度的同时,往往以牺牲FSR为代价。因此,如何实现高灵敏度与宽FSR的协同优化,成为当前MRR研究中亟待解决的关键问题。

本文设计了一种反馈波导内嵌布拉格光栅微环谐振器。该结构采用狭缝微环来提高灵敏度,在微环内壁嵌入布拉格光栅结构,利用布拉格光栅对特定波长的选择性可以滤除其余谐振峰以拓宽FSR,同时布拉格光栅的反射光和微环耦合光相互影响产生相消干涉效应,进而使得透射谱线分裂为电磁感应透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)形,EIT线形的高斜率特性可提高 Q 值。本文首先对结构进行物理建模,使用传输矩阵法分析结构的归一化光谱表达式,并分析光在微环中的传输过程;其次,使用时域有限差分法对结构模拟仿真,研究其物理参数对器件性能的影响并优化参数;最后,分析该结构作为传感器时的折射率传感性能和溶液浓度传感性能。

1 基本原理

1.1 结构设计

所提结构由U型反馈波导和内嵌布拉格光栅的狭缝微环组成,该器件基于SOI平台实现,衬底为2 μm 厚的二氧化硅,波导芯层为高220 nm的硅材料。二氧化硅的折射率为1.444 4,硅的折射率为3.475 7。结构模型如图1所示,图1(a)为立体结构,图1(b)和1(c)为平面结构和狭缝区域细节图。直波导长度 $L_x=20 \mu\text{m}$;反馈波导长度 L_1 为半圆形波导一端到另一端的距离, $L_1=14 \mu\text{m}$;直波导宽度 $W_1=0.40 \mu\text{m}$;环波导宽度 $W_2=0.24 \mu\text{m}$;狭缝宽度 W_{slot} 为两个环波导间的距离, $W_{\text{slot}}=80 \text{ nm}$;光栅周期 $T=500 \text{ nm}$;直波导与环形波导外侧之间的耦合距离为 W_{gap} , $W_{\text{gap}}=194 \text{ nm}$;光栅角向刻蚀深度 $H_g=$

27 nm; 光栅硅宽度 $l_g=460$ nm; 占空比 F 定义为 l_g/T , $F=92\%$; 微环半径 R 为圆心到外环波导外侧的距离, $R=4.3 \mu\text{m}$ 。

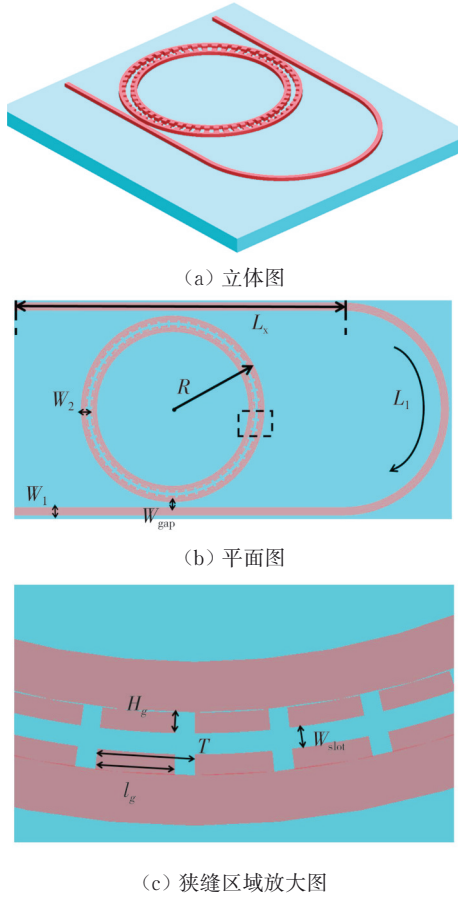


图 1 所提结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of proposed structure

1.2 理论分析

使用传输矩阵法推导结构的传输方程, 结构的理论分析模型如图 2 所示, A、B 为两个耦合区, 设两个耦合区完全对称, t 和 k 分别为微环与直波导间的透射系数和耦合系数, 在忽略微环所有损耗的前提下满足 $t^2 + k^2 = 1$ 。

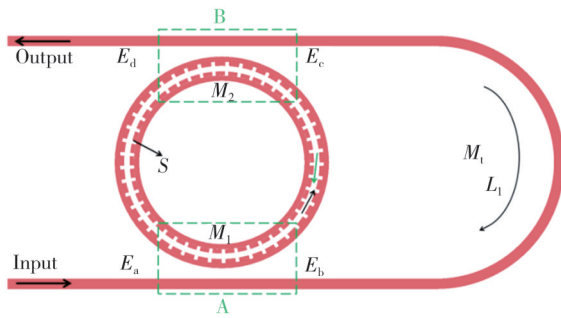


图 2 理论分析图

Fig. 2 Theoretical analysis diagram

M_1 、 M_2 为两个耦合区域中波导和微环间的传输矩阵, M_t 为 U 型反馈波导和微环间的传输矩阵, S 为布拉格光栅的散射矩阵, 由传输矩阵法^[22-24]可知

$$M_1 = M_2 = \begin{bmatrix} -t & 1 \\ ik & ik \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$M_t = \begin{bmatrix} 0 & \tau^{\frac{1}{2}} p \\ \left(\tau^{\frac{1}{2}} p\right)^{-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $\tau = \exp(-\alpha L)$ 为光在微环内的传输系数, $L = 2\pi R$ 为微环周长, α 为传输损耗系数; $p = \exp(i\varphi/2)$ 为光在微环内传输一半周长时的相位因子, $\varphi = \beta L$ 为光沿微环传输一周的相位差, $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为传播常数, n_{eff} 为有效折射率。

$$S = \begin{bmatrix} -ir e^{-i\varphi_2} & \tau_2 \\ \tau_2 & ir e^{-i\varphi_2} \end{bmatrix} e^{i\phi}, \quad (3)$$

式中: r 和 τ_2 为布拉格光栅的反射系数和传输系数; φ_2 和 ϕ 为 r 和 τ_2 对应的相位。结构总的传输矩阵为

$$M = M_1 M_t M_2 S = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

端口光场振幅关系为

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_c \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_b \\ E_a \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: E_a 、 E_b 、 E_c 、 E_d 为端口的光强。

光场 E_c 与 E_b 的关系为

$$E_c = \tau_1 p_1 E_b, \quad (6)$$

式中: $\tau_1 = \exp(-\alpha L_1)$ 为光在反馈波导中的传输系数; $p_1 = \exp(i\varphi_1)$ 为光在反馈波导中传输时的相位因子, $\varphi_1 = \beta L_1$ 为光从 U 型反馈波导的一端传输到另一端产生的相位差。

由式(5)和式(6)可得

$$E_d = \left(M_{21} - \frac{M_{11} M_{22}}{M_{12} - \tau_1 p_1} \right) E_{a0} \quad (7)$$

当结构没有反馈波导时, 输出端的光场振幅为

$$E_o = \left(M_{21} - \frac{M_{11} M_{22}}{M_{12}} \right) E_{a0} \quad (8)$$

因此, 式(7)还可以表示为

$$E_d = E_o + \frac{-\tau_1 p_1 M_{11} M_{22}}{M_{12}(M_{12} - \tau_1 p_1)} E_a = E_o + E_i, \quad (9)$$

式中: E_i 为反馈波导的附加光场。则结构输出端的光谱表达式为

$$D = \left| \frac{E_d}{E_a} \right|^2 = \frac{|E_o|^2 + |E_i|^2 + 2|E_o||E_i|\cos\delta}{|E_a|^2}, \quad (10)$$

式中: δ 为 E_o 和 E_i 之间的相位差。

器件的透射频谱形成机制如图 3 所示, 其传输过程可分解为两个级联的滤波阶段。首先, 总线波导中的光场通过倏逝耦合进入 MRR, 并沿狭缝结构传播。由于布拉格光栅的反射作用, 入射光被部分反射形成反向传输光场, 该反射光与原始耦合光发生相干干涉, 从而产生 EIT 效应。这种干涉过程最终形成具有尖锐谐振特性的光学模式(如图 3 绿色曲线所示)。在第二滤波阶段, 该谐振光通过布拉格光栅进行频谱整形(布拉格光栅透射谱为 U 型, 如图 3 红色曲线所示)。当微环谐振波长与布拉格光栅的中心波长达到相位匹配条件时, 对应的谐振峰作为主模态被选择性增强, 而其他谐振模式则被有效抑制形成边模(如图 3 橙色曲线所示)。这种双重滤波机制突破了传统光学传感器 FSR 的限制, 实现了工作带宽的显著拓展。在优化过程中, 通过精确调控 H_g 和 F 等参数来提升边模抑制比(Side Mode Suppression Ratio, SMSR), 该指标表征器件滤波性能的优劣, 将在后续参数优化中作为关键评价指标。

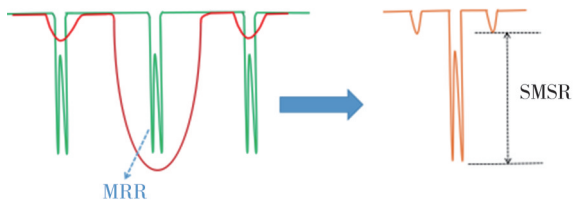


图 3 光谱原理
Fig. 3 Spectral principle

2 器件优化

采用光学仿真软件 Lumerical MODE Solutions 对所提结构仿真模拟, 从透射频谱、消光比(Extinction Ratio, ER)、 Q 值、SMSR 对器件进行优化分析。在参数优化过程中, 通过参数扫描的方式寻求参数最优值, 在其余参数保持不变的前提下优化 R 、 H_g 、 F 、 W_{gap} 4 个参数, 优化过程中使

用折射率为 1 的空气作为器件的上包层。采用输入波长为 1 500~1 600 nm 的模式光源, 以基模(TE_0)的形式注入 U 型反馈总线波导中。通过优化结构参数使器件同时获得高 Q 值、宽 FSR 及高灵敏度。

环波导半径是影响 MRR 弯曲损耗和传输损耗的关键参数, 较大的损耗会引起 Q 值的减小, 因此评估 R 对 Q 值的影响, 结果如图 4 所示。可以看出, 随着 R 的增大, Q 值先增大后减小, R 为 4.3 μm 时 Q 值达到最大; 当 R 小于 4.3 μm 时, 随着 R 的增大, 弯曲损耗逐渐减小, 从而引起 Q 值的增大。当 R 增大到一定值后, 会导致光在微环中的路程增加, 引起传输损耗的增大, 进而使得 Q 值减小。

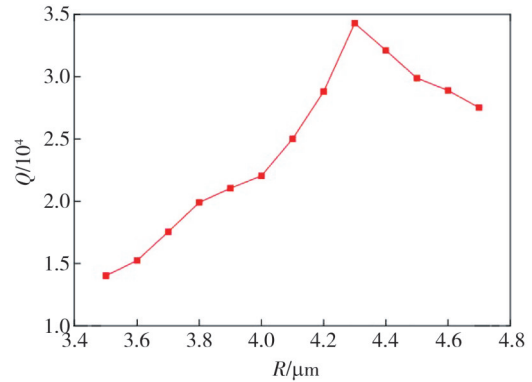
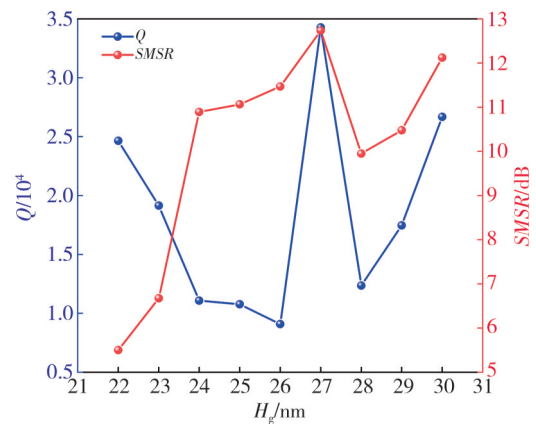
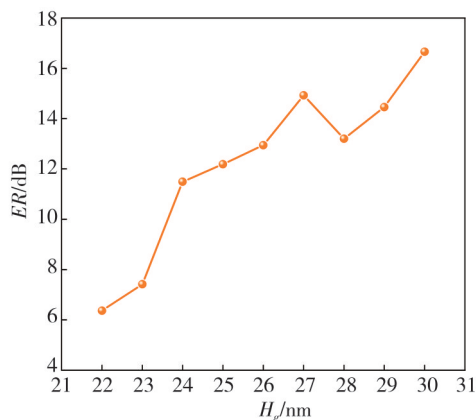


图 4 R 对 Q 的影响
Fig. 4 Effect of R on Q

布拉格光栅的尺寸是决定器件 SMSR 的重要因素, 因此在优化布拉格光栅的过程中应追求高 SMSR 以拓宽 FSR。在保持其他参数不变的前提下扫描优化 H_g , H_g 的变化范围为 22~30 nm, 每隔 1 nm 进行一次扫描, 分析 H_g 对器件 Q 值、ER 和 SMSR 的影响, 结果如图 5 所示。



(a) 刻蚀深度的影响



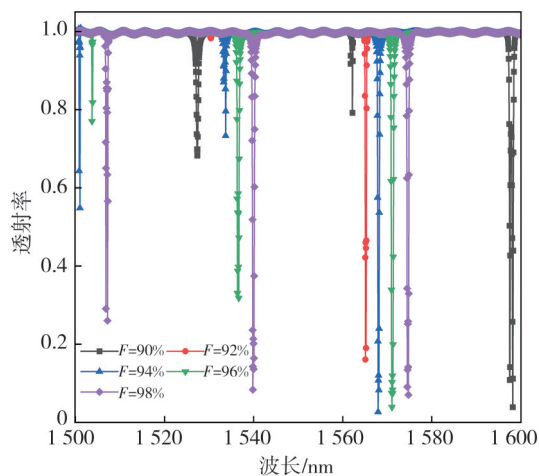
(b) 刻蚀深度对应的消光比

图5 刻蚀深度的影响

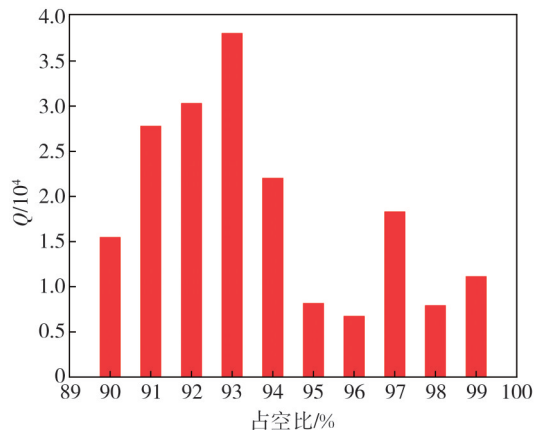
Fig. 5 Effect of etch depth

从图 5(a) 可以看出, H_g 从 22 nm 增大到 27 nm 过程中, SMSR 随 H_g 逐渐增大; 当 $H_g = 27$ nm 时, SMSR 和 Q 同时达到最大值, $Q = 34\,277$, $SMSR = 12.73$ dB。图 5(b) 为 H_g 对 ER 的影响, 可以看出 ER 和 SMSR 具有相同的变化趋势。从工艺角度来看, 在狭缝中刻蚀布拉格光栅结构较为复杂, 但 Shi 等^[25]设计并制作的基于跑道型 MRR 的光栅结构, 其刻蚀深度仅为 15 nm。因此, 就目前制作工艺而言, 27 nm 的尺寸完全可以实现。

光栅长度直接影响布拉格光栅的滤波效果。在保持其余参数不变的条件下扫描优化 F , F 的变化范围为 90~99%, 扫描步长为 1%, F 对器件的影响如图 6 所示。图 6(a) 为不同 F 对应的透射频谱, 可以看出 F 为 92% 时滤波效果最好, F 取其他值时边模较多。



(a) 不同占空比的透射频谱



(b) 占空比对应的品质因数

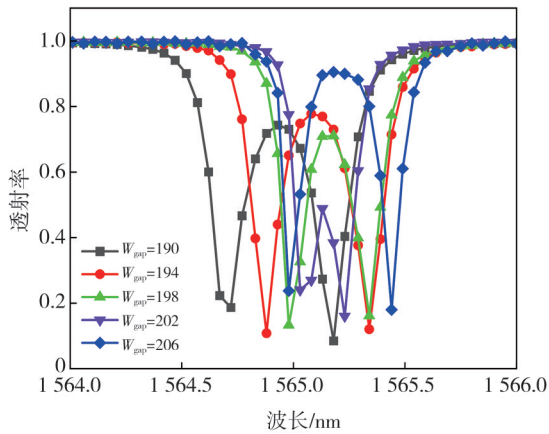
图6 占空比对器件的影响

Fig. 6 Effect of duty cycle on devices

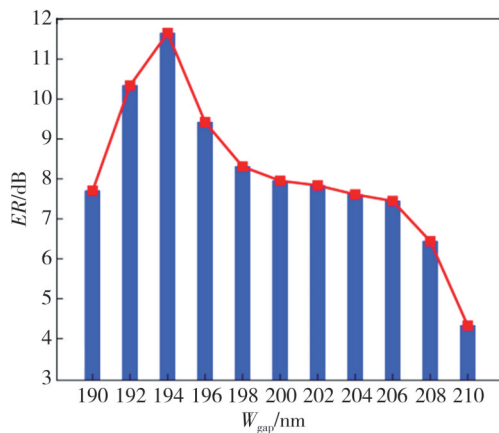
F 为 92% 时, 在 1 500~1 600 nm 波长范围内只有一个主谐振峰, 此时器件的可检测范围不受 FSR 的限制, 探测范围得到极大的拓宽。图 6(b) 为 F 对 Q 值的影响, 可以看出当 F 取 93% 时 Q 值最大, 但过高的 F 值会增加工艺难度, 综合考虑 F 为 92%。

W_{gap} 为调控 MRR 工作状态的核心参数, 直接影响器件的耦合效率和光学性能。 W_{gap} 太小会使 MRR 进入过耦合状态, 此时大部分光波耦合进入微环导致滤波效果减弱。 W_{gap} 太大又会使 MRR 处于欠耦合状态, 耦合强度较弱, 此时大部分光沿着直波导传输到输出端口。当 MRR 处于临界耦合时性能最好且 ER 最高, 同时 EIT 谱线最为显著, 因此, 对 W_{gap} 进行评估以确保器件处于或接近临界耦合。在保持其余参数不变的前提下, 对 W_{gap} 进行扫描优化, W_{gap} 的变化范围为 190~210 nm, 每隔 4 nm 进行一次扫描, 分析 W_{gap} 对器件透射线形和 ER 的影响, 结果如图 7 所示。图 7(a) 为不同 W_{gap} 下器件的透射频谱, 可以看出器件发生了 EIT 效应, 当 W_{gap} 为 194 nm 时, EIT 线形左右对称, 此时 EIT 效应最为显著。由图 7(b) 可知, ER 先增大后减小, 这是因为随着 W_{gap} 的增加, 器件从过耦合过渡到临界耦合, 再从临界耦合到欠耦合状态。当 W_{gap} 为 194 nm 时 ER 最高, 此时器件处于临界耦合状态。因此, W_{gap} 取 194 nm, 此时 Q 值为 28 935。

在器件制备过程中产生的误差会影响传感性能, 因而有必要对器件的关键参数做容差分析。考虑到刻蚀布拉格光栅较为困难, 因此对 H_g 进行容差分析。在参数取得最优值时, H_g 为 27 nm, 取制作误差为 ± 10 nm, 分析误差对器件 Q 值和 ER 的影响。



(a) 不同耦合间距下的EIT线形



(b) 耦合间距对应的消光比

图7 耦合间距对器件的影响

Fig. 7 Effect of coupling spacing on devices

容差分析结果如图8所示,可以发现, H_g 从17 nm增加到37 nm的过程中, Q 值也随之增加,在27~37 nm之间, Q 值和 ER 均呈上升趋势,这有利于器件性能的提升。

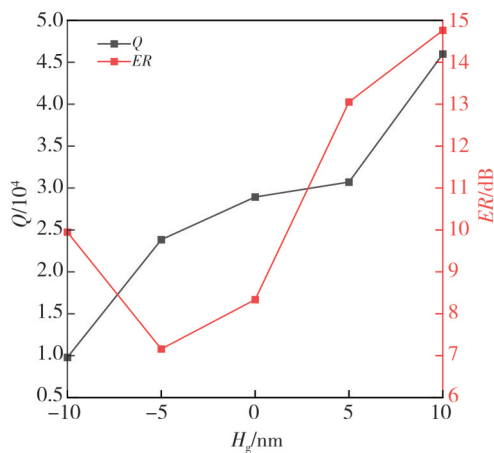


图8 容差分析

Fig. 8 Tolerance analysis

在制作过程中若可以将误差控制在0~10 nm间,器件将表现出良好的传感性能,制作误差在

-5~+5 nm间波动时 Q 值变化平稳, ER 最小为7.16 dB, Q 值最小为23 845,这种情况下器件的传感性能仍然可以接受。

3 结果分析

所提结构利用布拉格光栅的反射作用产生EIT效应,同时布拉格光栅对特定波长的选择性可拓宽MRR的检测范围,图9为参数优化后的透射频谱。由图9可以看出,器件的透射谱线为EIT形,且在1 500~1 600 nm的输入波长下只有一个主谐振峰,谐振波长为1 565 nm,实现了无FSR,此时器件作为传感器可探测范围不受FSR的限制。

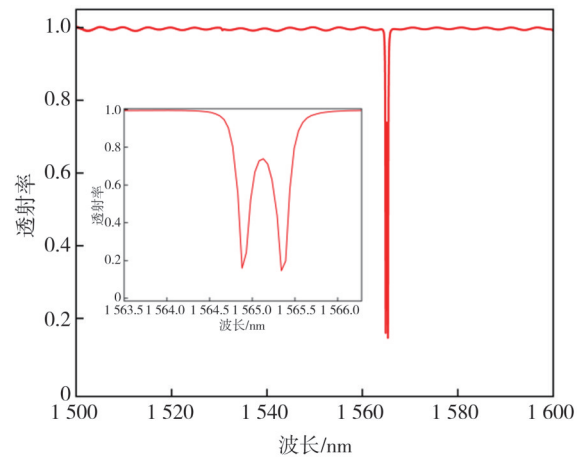


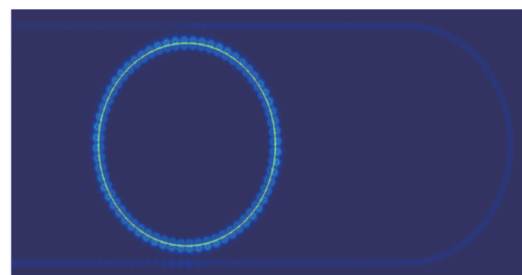
图9 结构最终的透射线形

Fig. 9 Final transmissive line shape of structure

图10为结构在不同状态下的光功率密度分布情况。



(a) 非谐振



(b) 谐振

图10 结构在不同状态的模场分布

Fig. 10 Mode field distribution of structures in different states

由图 10(b) 可以看出, 在谐振状态下谐振光基本都耦合进狭缝, 此外, 光功率密度分布图也表明耦合光和反射光反向传输产生了相消干涉。

在所有参数最优的前提下, 研究结构的折射率传感性能。折射率灵敏度(S_V)和探测极限(Limit of Detection, LOD)是衡量传感器性能的重要指标, 其表达式为

$$S_V = \frac{\Delta\lambda_{\text{res}}}{\Delta n}, \quad (11)$$

$$\text{LOD} = \frac{\lambda}{QS_V}. \quad (12)$$

在评估器件的折射率传感性能时, 将其放置在折射率为 1.00~1.03 范围的气体环境中, 折射率变化步长为 0.005 RIU。气体折射率的改变导致 MRR 有效折射率的改变, 进而引起谐振峰向右红移, 折射率传感分析如图 11 所示。

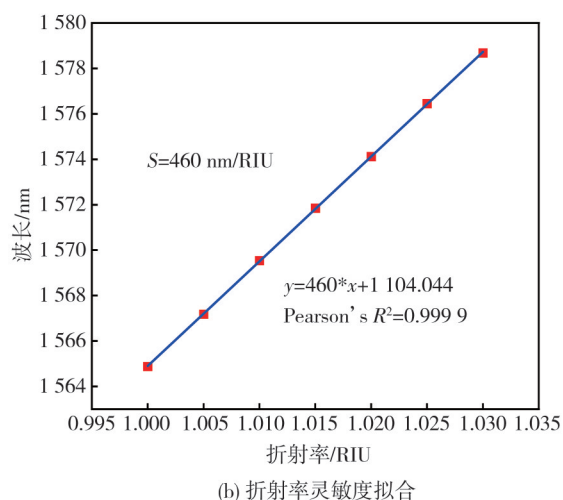
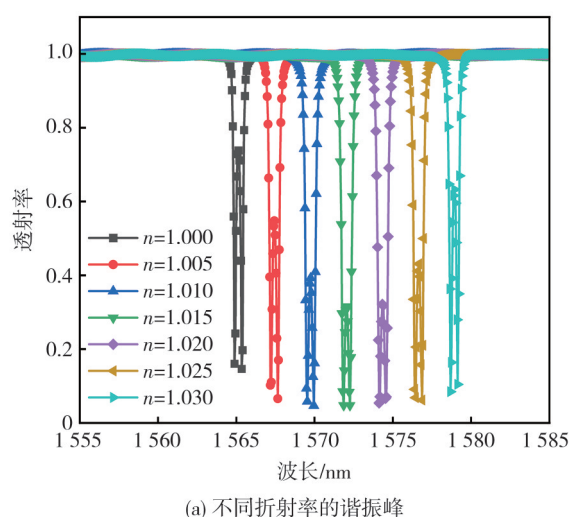


图 11 折射率传感分析

Fig. 11 Refractive index sensing analysis

从图 11(a) 可以看出, 随着气体折射率的增大, 谐振峰向右发生红移, 且透明窗的顶点先下降后上升。图 11(b) 为折射率灵敏度拟合曲线, 可以看出, 折射率和谐振波长之间呈现出良好的线性关系, 拟合率为 99.99%。由式 (11) 计算可得 S_V 为 460 nm/RIU, 由式 (12) 可知 LOD 为 1.17×10^{-4} RIU。

该传感器不仅可用于气体传感, 也可用于液体传感。在液体传感检测时, 自变量为液体浓度, 式 (13) 为浓度灵敏度表达式。该式定义为待测液体浓度每改变 1% 时谐振波长的变化量, 单位为 $\text{pm}/\%$ [26]。

$$S_C = \frac{\Delta\lambda_{\text{res}}}{\Delta C}, \quad (13)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{res}}$ 为谐振波长的变化量; ΔC 为液体浓度改变量。

为了检验器件的浓度传感性能, 以不同浓度的氯化钠溶液、葡萄糖溶液和蔗糖溶液为待测液体, 研究浓度和谐振波长间的关系, 并进行线性拟合和抛物线拟合, 用确定系数(R^2)来评估拟合效果。由式 (13) 可知, 线性拟合的斜率为传感器的浓度灵敏度。表 1 为室温下 (20 °C) 液体质量浓度和折射率间的对应关系 [27]。

表 1 溶液浓度和折射率关系

Tab. 1 Relationship between solution concentration and refractive index

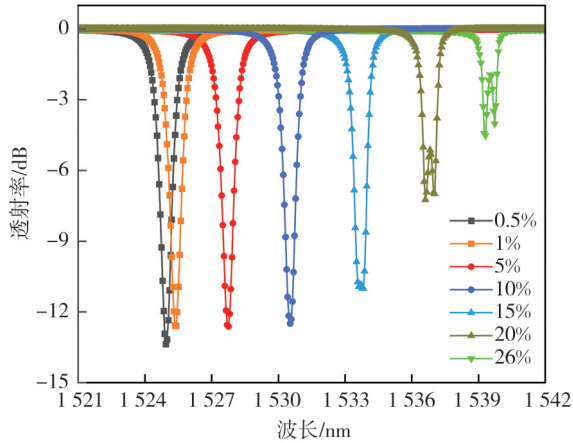
待测液体	质量浓度/%	折射率/RIU
氯化钠溶液	0.5~26	1.333 9~1.379 5
葡萄糖溶液	0~54	1.333 0~1.439 4
蔗糖溶液	0~50	1.333 0~1.420 0

图 12 为氯化钠溶液的传感分析。由图 12(a) 可以看出, 随着氯化钠溶液浓度的增加, 谐振峰向右发生红移且 ER 减小。这是因为溶液浓度的增加导致溶液折射率变大, 使得 MRR 的折射率差变小, 器件偏离临界耦合状态, 从而 ER 减小。图 12(b) 为氯化钠溶液的浓度灵敏度拟合, 可知线性拟合的确定系数为 0.999 95, 抛物线拟合的确定系数为 0.999 89, 因此, 对于低浓度的液体而言, 浓度和谐振波长间更符合线性关系。

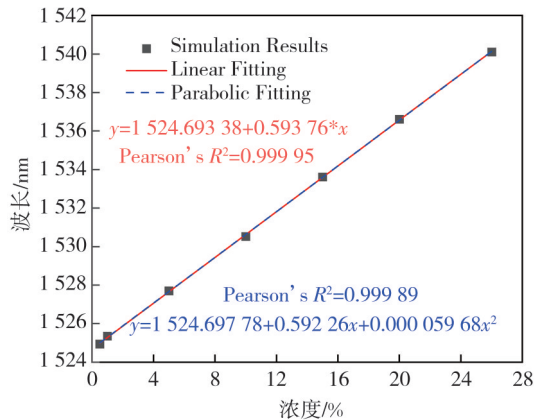
图 13 和图 14 为葡萄糖溶液和蔗糖溶液的传感分析, 其中, 葡萄糖溶液质量浓度为 0~54%, 蔗糖溶液质量浓度为 0~50%。

图 13(b) 和图 14(b) 为浓度灵敏度拟合, 由

拟合结果可知,对于葡萄糖溶液和蔗糖溶液,抛物线拟合的确定系数均大于线性拟合的确定系数。因此对于高浓度的溶液,溶液浓度和谐振波长间更符合二次抛物线函数关系。



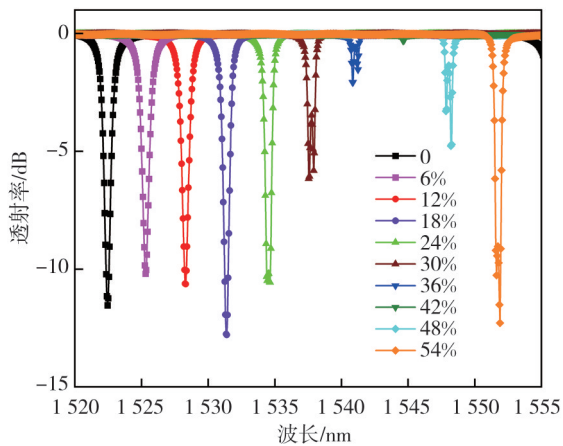
(a) 不同氯化钠浓度对应的谐振峰



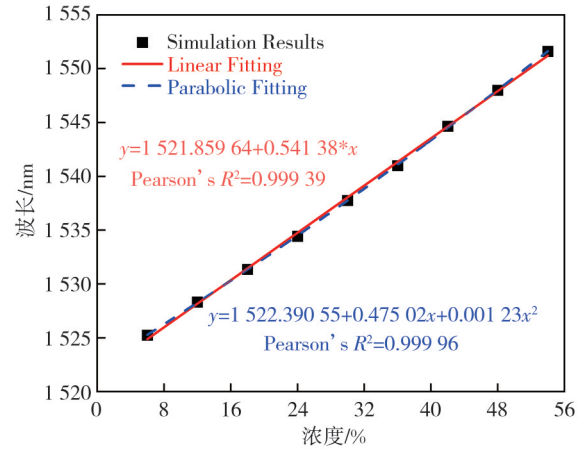
(b) 浓度灵敏度拟合

图 12 氯化钠溶液浓度传感特性分析

Fig. 12 Characterization of sodium chloride solution concentration sensing



(a) 不同浓度葡萄糖对应的谐振峰

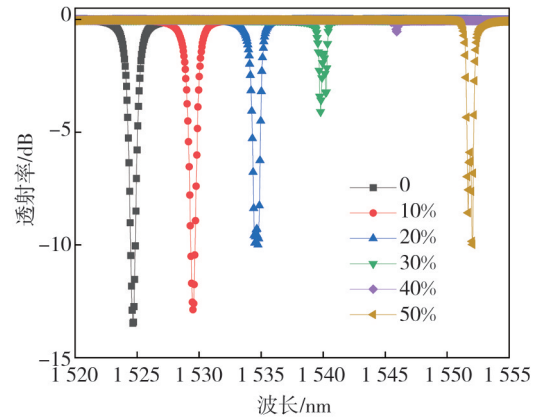


(b) 葡萄糖溶液浓度灵敏度拟合

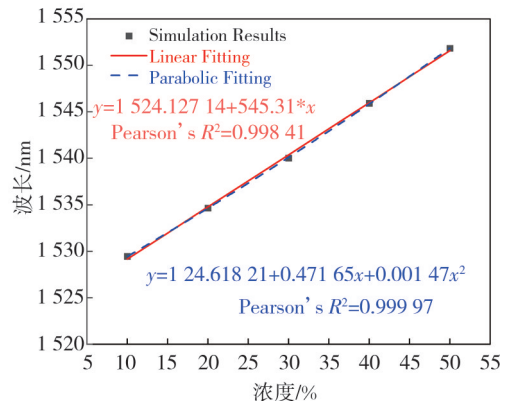
图 13 葡萄糖溶液浓度传感特性分析

Fig. 13 Characterization of glucose solution concentration sensing

由图 12~图 14 可知,对于低浓度的溶液可以用线性函数来描述液体浓度和谐振波长间的关系,然而,随着液体浓度的增加,浓度和谐振波长间不再完全满足线性关系,此时用二次抛物线函数描述两者间的关系更为恰当。



(a) 不同蔗糖浓度对应的谐振峰



(b) 浓度灵敏度拟合

图 14 蔗糖溶液浓度传感特性分析

Fig. 14 Characterization of sucrose solution concentration sensing

由式(13)可知,所提器件对于氯化钠溶液、葡萄糖溶液和蔗糖溶液的浓度灵敏度分别为593.76、541.38和545.31 pm/%。传统光学传感器只能探测浓度在20%以下的溶液,本文所提传感器可以实现较宽范围的溶液浓度检测。

表2为所提结构与其它文献设计的基于MRR传感器关于 Q 、 S_V 、 LOD 、 FSR 4个性能指标的比较。由表2可以看出,本文所设计的传感器具有较高的 Q 值和折射率灵敏度,同时具备较宽的检测范围,在生物医学和环境监测方面有广阔的应用前景^[28]。

表2 基于MRR传感器性能的比较

Tab. 2 Comparison of MRR sensor performance

来源	Q	$S_V/(\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1})$	LOD/RIU	FSR/nm
文献[2]	4 325	433	8.26×10^{-4}	Free
文献[29]	1 422	643	1.14×10^{-4}	—
文献[30]	5 200	620	1.40×10^{-4}	84.5
文献[31]	2 000	297	1.10×10^{-4}	30.1
本文	28 935	460	1.17×10^{-4}	Free

4 结 论

本文设计了一种反馈波导内嵌布拉格光栅微环传感器,使用时域有限差分法仿真分析了 R 、 H_g 、 F 、 W_{gap} 等参数对器件的影响并优化参数,同时进行容差分析证明器件的稳定性和可实现性。仿真结果表明,在折射率传感方面该结构实现了高 Q 值和高灵敏度以及宽测量范围,其灵敏度为460 nm/RIU, Q 值为28 935。该结构同时具备高灵敏度和宽FSR,适用于折射率变化较大的监测场合。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] ZHOU Y, ZHANG M, GUO Z, et al. Recent advances in black phosphorus-based photonics, electronics, sensors and energy devices [J]. Materials Horizons, 2017, 4(6): 997-1019.
- [2] LIU C, SANG C, WU X, et al. Grating double-slot micro-ring resonator for sensing [J]. Optics Communications, 2021, 499: 127280.
- [3] LIU Q, WANG K, SUN Y, et al. Surface plasmon resonance methane sensor based on the D-type photonic quasi-crystal fiber with double-layer films [J]. Optical Fiber Technology, 2024, 84: 103779.
- [4] LIU Y, LI S, CHEN H, et al. Surface plasmon resonance induced high sensitivity temperature and refractive index sensor based on evanescent field enhanced photonic crystal fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4): 919-928.
- [5] FALLAHI V, KORDROSTAMI Z, HOSSEINI M. Sensitivity and quality factor improvement of photonic crystal sensors by geometrical optimization of waveguides and micro-ring resonators combination [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 2001.
- [6] YANG Y, YU L, JIANG X, et al. Recent advances in photonic crystal-based chemical sensors [J]. Chemical Communications, 2024, 60(69): 9177-9193.
- [7] 张伟, 吴季航, 杜雨鑫, 等. 基于光纤无线融合的监测通信一体化系统 [J]. 测试技术学报, 2025, 39(1): 1-6.
ZHANG Wei, WU Jihang, DU Yuxin, et al. Integrated monitoring and communication system based on fiber wireless fusion [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(1): 1-6. (in Chinese)
- [8] UCHIDA Y, ARAKAWA T, HIGO A, et al. Silicon microring resonator biosensor for detection of nucleocapsid protein of SARS-CoV-2 [J]. Sensors, 2024, 24(10): 3250.
- [9] WANG G, DAI T, JIANG J, et al. Slope tunable Fano resonances in asymmetric embedded microring resonators [J]. Journal of Optics, 2017, 19(2): 025803.
- [10] XIONG J, TANG J, CHEN M, et al. Sensing performance of temperature insensitive microring resonators with double-layer U-shaped waveguide [J]. Optik, 2022, 262: 169236.
- [11] 徐亚萌, 孔梅. 基于硅基微环谐振器的折射率传感研究综述 [J]. 半导体光电, 2020, 41(4): 455-463.
XU Yameng, KONG Mei. Research progresses of refractive index sensing based on silicon-on-insulator microring resonators [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(4): 455-463. (in Chinese)
- [12] 邢恩博, 李江龙, 戎佳敏, 等. 超高品质因子晶体谐振腔制备及棱镜耦合封装 [J]. 测试技术学报, 2022, 36(4): 277-280.
XING Enbo, LI Jianglong, RONG Jiamin, et al. Fabrication of ultra-high optical quality factor crystalline resonator and prism coupling package [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2022, 36(4): 277-280. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] LO S M, HU S, GAUR G, et al. Photonic crystal microring resonator for label-free biosensing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 7046-7054.
- [15] CHENG W, SUN X, YE S, et al. Double slot microring resonators with inner wall angular gratings as ultra-sensitive biochemical sensors [J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 20034-20048.
- [16] HU W, SUN Y, GUO C, et al. A silicon micro-ring resonator with unprecedented large free spectral range *via* double injection [J]. *Optics Communications*, 2023, 546: 129767.
- [17] GU H, GONG H, WANG C, et al. Compact inner-wall grating slot microring resonator for label-free sensing[J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 5038.
- [18] ESTEVEZ M C, ALVAREZ M, LECHUGA L M. Integrated optical devices for lab-on-a-chip biosensing applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6 (4): 463-487.
- [19] DE VOS K, BARTOLOZZI I, SCHACHT E, et al. Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing [J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7610-7615.
- [20] YUAN G, GAO L, CHEN Y, et al. Improvement of optical sensing performances of a double-slot-waveguide-based ring resonator sensor on silicon-on-insulator platform [J]. *Optik*, 2014, 125 (2): 850-854.
- [21] SHI B, CHEN X, CAI Y, et al. Compact slot microring resonator for sensitive and label-free optical sensing [J]. *Sensors*, 2022, 22(17): 6467.
- [22] 张小贝, 黄德修, 洪伟, 等. 传输矩阵法分析微环谐振器阵列传输特性[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1585-1592.
ZHANG Xiaobei, HUANG Dexiu, HONG Wei, et al. Transfer matrix method for analyzing transmission characteristics of microring resonator arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1585-1592. (in Chinese)
- [23] XIE K H, ZHANG X, ZHANG X W, et al. A slot microring sensor with feedback spiral waveguide for trace gas CH₄ sensing in mid-infrared region[J]. *Opto-electronics Letters*, 2019, 15(1): 1-5.
- [24] KANG Y M, ARBABI A, GODDARD L L. A microring resonator with an integrated Bragg grating: a compact replacement for a sampled grating distributed Bragg reflector[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2009, 41(9): 689-697.
- [25] SHI W, WANG X, ZHANG W, et al. Grating-coupled silicon microring resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(12): 121118.
- [26] SANG X, YU C, MAYTEEVARUNYOO T, et al. Temperature-insensitive chemical sensor based on a fiber Bragg grating [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 120(2): 754-757.
- [27] GIRAULT P, LORRAIN N, POFFO L, et al. Integrated polymer micro-ring resonators for optical sensing applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(10): 104504.
- [28] 赵阳灿, 郝亚超, 陈书航, 等. 基于 ZIF 金属有机骨架材料的重金属离子电化学传感检测[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(6): 662-668.
ZHAO Yangcan, HAO Yachao, CHEN Shuhang, et al. Electrochemical sensing for heavy metal ions based on ZIF metal organic framework materials[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2023, 44(6): 662-668. (in Chinese)
- [29] ZHAO C Y, CHEN P Y, ZHANG C M. Numerical analysis of Bragg grating-based slot-micro-ring coupling resonator system for electromagnetically-induced transparency-like effect [J]. *Modern Physics Letters B*, 2020, 34(28): 2050307.
- [30] CHENG W, SUN X, YE S, et al. High sensitivity FSR-free sidewall grating slot waveguide microring resonator biochemical sensors [C]// 2024 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2024: 1-2.
- [31] 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.