

布拉格光栅辅助微环谐振器的光谱调控及传感应用的研究进展

张 驰, 孙士博, 袁轶群, 常美玉, 徐亚萌*

(长春理工大学 物理学院, 长春 130022)

摘要: 硅基集成光子平台凭借与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺的兼容性、高集成度及低成本优势, 已成为新一代光学器件的核心平台。布拉格光栅基于布拉格衍射原理, 通过周期性调制材料内部折射率, 实现对特定波长光的选择性反射或透射。硅基微环谐振器作为硅基光子器件库的重要组件, 具有结构简单、谐振性能优异的特点, 其典型输出频谱为洛伦兹线型的梳状谱。为突破单一光栅或微环器件在灵敏度、检测范围及光谱线型方面的局限, 实现光谱的灵活调控, 本文综述了布拉格光栅辅助微环谐振器的研究进展, 梳理了将布拉格光栅分别引入微环波导和总线波导的相关工作, 剖析了其光谱调控机制。重点阐述了类电磁诱导透明效应、Fano 共振、模式分裂及边模抑制等关键光谱效应的产生机理, 探讨了上述技术在提升传感器性能方面的作用, 包括利用线型调控实现超高灵敏度, 以及利用边模抑制突破自由光谱范围限制。本文工作可为高性能硅基集成光学传感器的设计与研发提供系统参考。

关键词: 微环谐振器; 布拉格光栅; 传输光谱; Fano 共振; 类电磁诱导透明; 折射率传感

中图分类号: TN256

文献标志码: A

DOI: 10.3724/jfmd.2604049

CSTR: 32180.14.jfmd.2604049

Research progress on spectral modulation and sensing applications of Bragg-grating-assisted microring resonators

ZHANG Chi, SUN Shibao, YUAN Yiqun, CHANG Meiyu, XU Yameng*

(Physics College, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Silicon-based integrated photonic platforms have become the core infrastructure for next-generation optical devices due to their CMOS compatibility, high integration density, and low cost. A Bragg grating is an optical device based on Bragg diffraction that achieves selective reflection or transmission at specific wavelengths through periodic modulation of the refractive index. As a key component in silicon photonics, the microring resonator features a simple structure and excellent resonant performance, typically exhibiting a Lorentzian-shaped comb spectrum. To overcome the limitations of standalone gratings or microring resonators regarding sensitivity, detection range, and spectral lineshape, and to enable flexible spectral modulation, this paper reviews research progress on Bragg grating-assisted

收稿日期: 2026-04-16; 修订日期: 2026-06-10

基金项目: 吉林省自然科学基金面上项目(No. 20240101338JC); 吉林省博士研究生托举工程(No. BST202515)

作者简介: 张 驰(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为基于布拉格光栅微环的器件设计(E-mail: 2023100028@mails.cust.edu.cn)

通信作者: 徐亚萌(1987—), 女, 副教授, 研究方向为硅基集成光子学器件及其传感应用(E-mail: yamengxu@cust.edu.cn)

microring resonators. We summarize studies on integrating Bragg gratings into ring and bus waveguides, respectively, and analyze their spectral regulation mechanisms. Emphasis is placed on the generation mechanisms of key spectral effects, such as the electromagnetically induced transparency (EIT)-like effect, Fano resonance, mode splitting, and side-mode suppression. The roles of these spectral regulation techniques in enhancing sensor performance are discussed, including achieving ultra-high sensitivity through lineshape modulation and overcoming free spectral range limitations via side-mode suppression. This work provides a systematic reference for designing and developing high-performance silicon-based integrated optical sensors.

Key words: microring resonator; Bragg grating; transmission spectrum; Fano resonance; EIT-like effect; refractive index sensing

0 引言

随着物联网、人工智能与生物医学技术的飞速发展,光学传感技术正朝着微型化、集成化、智能化和多参量并行检测的方向快速演进^[1-3]。传统光学传感器因体积庞大、成本高昂、难以批量生产且系统集成复杂,已无法满足便携式、可穿戴及片上实验室等新兴应用场景的需求^[4-6]。硅基平台利用硅材料制备器件,与现有微电子加工工艺兼容,具有高集成密度、高成品率和低成本等优势,持续推动了集成光学器件的创新与发展^[7-8]。在众多的硅基光子学器件中,布拉格光栅和微环谐振器备受关注。硅基布拉格光栅通过周期性折射率调制实现波长选择,凭借高精度、环境敏感性和稳定性,成为光通信、传感和激光系统的核心元件^[9-11]。然而,传统硅基布拉格光栅的长度通常在数百微米至毫米量级,严重限制了器件的集成密度^[12-14]。同时,单一布拉格光栅的谐振峰较宽,难以实现超高灵敏度的微弱信号检测,且其光谱调谐范围有限,难以满足多通道并行传感的需求。硅基微环谐振器结构简单,谐振性能优异,在光开关、传感器和光调制器等器件开发中发挥着至关重要的作用,在光通信、传感技术和信号处理等领域展示出巨大的应用潜力^[15-17]。但其典型的洛伦兹线型谐振峰斜率较低,限制了传感器的检测灵敏度;同时,微环谐振器的自由光谱范围(free spectral range, FSR)与器件半径成反比,为获得较大的FSR需减小器件半径,这会导致品质因子下降和弯曲损耗增加,形成了检测范围与检测精度之间的固有矛盾^[18]。为突破单一器件的性能瓶颈,研究者提出了将布拉格光栅与微环谐振器相融合的设计思路,通过两种器件的协

同作用实现光谱响应的灵活调控,从而同时解决灵敏度、检测范围和抗干扰能力等多个关键性能指标间的矛盾^[19-21]。

本文首先介绍布拉格光栅及微环谐振器的工作原理,随后按照布拉格光栅引入微环的方式,梳理国内外基于硅基布拉格光栅微环的研究进展,重点关注布拉格光栅对硅基微环谐振器频谱的调控作用及传感应用,最后展望布拉格光栅辅助微环谐振器在光谱调控及传感应用方面的发展趋势。本文首次从光栅与微环协同光谱调控视角开展系统性梳理,建立总线波导光栅微环与环形波导光栅微环的统一分类框架,旨在为硅基集成光学传感领域的科研人员提供全面参考,推动高性能片上光学传感器的进一步发展与实际应用。

1 布拉格光栅及微环的工作原理

1.1 布拉格光栅的工作原理

布拉格光栅是一种具有周期性折射率调制结构的光学器件^[22-25],其结构如图1(a)所示。当光波通过这种周期性结构时,反射光波会产生干涉作用;满足特定条件时,这些反射光波相互增强,形成强烈的反射峰。这一现象由布拉格条件精确描述:

$$\lambda = 2n\Lambda \cos\theta \quad (1)$$

式中: λ 为布拉格波长; n 为平均有效折射率,即图1(a)所示硅与其间隙的平均有效折射率; Λ 为光栅周期; θ 为入射光与光栅法线方向的夹角,本文仅关注光平行于布拉格光栅入射的情况; P 为布拉格光栅周期; D 为占空比; W 为光栅宽度; d 为单个光栅硅块宽度。当入射光满足布拉格条件时,周期性

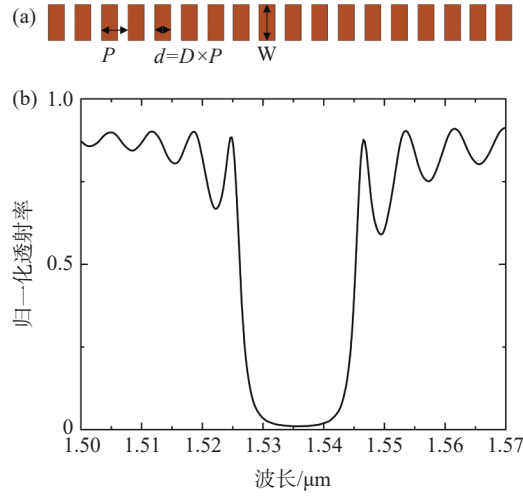


图1 布拉格光栅示意图及其传输光谱。(a)布拉格光栅结构;(b)布拉格光栅传输光谱

Fig.1 Schematic diagram of a Bragg grating and its transmission spectrum. (a) Structure of a Bragg grating; (b) transmission spectrum of the Bragg grating.

结构中的反射光发生相长干涉,导致特定波长被高效反射,反射率可达99.9%,而其他波长则几乎不受影响地透射。这种特性使其成为一种天然的“光学过滤器”^[26]。硅基布拉格光栅的传输光谱如图1(b)所示,图中可明显观察到布拉格光栅对特定带宽内波长的高反射率。

除基本周期结构外,布拉格光栅在性能优化中常采用切趾、啁啾与相位调制等关键技术。切趾技术通过渐变调整光栅的调制深度或占空比,抑制旁瓣反射与振荡,降低光谱波纹,从而提升滤波平坦度与信噪比。啁啾光栅采用沿传播方向渐变的光栅周期,使布拉格波长随位置连续变化,可实现宽光谱反射、色散调控及大带宽滤波,适用于宽带通信与可调谐器件。相位调制则在光栅周期中引入局部相位突变,在反射带内形成极窄的缺陷态透射峰,可用于窄带滤波、单模选择及高灵敏度传感。上述技术为光栅的光谱整形、带宽调控与模式优化提供了核心手段,也是光栅与微环谐振器耦合实现高性能光谱调控的重要基础。

1.2 微环谐振器的工作原理

微环谐振器凭借其紧凑的结构尺寸,已被广泛应用于集成光学器件中;特别是基于绝缘体上硅(SOI)平台制作的微环谐振器,其尺寸得到进一步缩减^[27-30]。一般而言,微环谐振器由一个封闭的环

形波导与直波导耦合而成,常见结构包括直通型与上下载型两种。图2(a)所示为直通型微环谐振器,由一条总线波导与一个闭合环状波导组成。当光从输入端进入总线波导后,部分光耦合进微环;满足谐振条件的光在微环内发生谐振,其余光则从总线波导输出端口输出。图2(b)为上下载型微环谐振器,由上下两条总线波导与一个闭合环状波导构成。光从一个总线波导输入后,经耦合区时,部分光从该总线波导输出端口输出,另一部分耦合进入微环;满足谐振条件的光在微环内谐振,其余光经另一耦合区后从另一总线波导的输出端口输出^[31]。

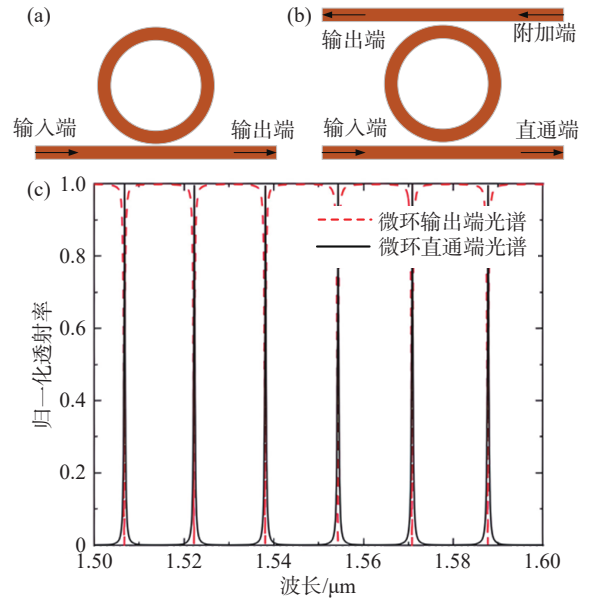


图2 微环谐振器示意图及其传输光谱^[31]。(a)直通型微环谐振器;(b)上下载型微环谐振器;(c)微环谐振器传输谱线

Fig.2 Schematic diagrams of microring resonators and their transmission spectra^[31]. (a) Through-port microring resonator; (b) add-drop microring resonator; (c) transmission spectrum of the microring resonator

以直通型微环谐振器为例,其透过率可表示为:

$$T(\lambda) = \frac{t^2 + a^2 - 2at \cos \delta}{1 + a^2 t^2 - 2at \cos \delta} \quad (2)$$

式中: t 为微环谐振器的振幅自耦合系数; a 为微环谐振器的环程振幅传递因子; $\delta = \beta L_R = 2\pi n_{\text{eff}} L_R / \lambda$, 为光在微环内传输一周的往返相位延迟; β 为传播常数; L_R 为微环谐振器的周长; n_{eff} 为波导模式的有效折射率; λ 为真空波长。当光在环内满足谐振条件时,

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{n_{\text{eff}} L_R}{m} \quad (3)$$

式中: m 为谐振级数,取正整数。谐振条件下的透射率为:

$$T_{\text{res}} = \frac{(t-a)^2}{(1-at)^2} \quad (4)$$

由此可见,谐振峰处的深度取决于微环的耦合状态:在欠耦合状态(at)下,谐振峰未降至零,消光比较低;在临界耦合状态($a=t$)下,谐振峰透射率为零,消光比达到最大;在过耦合状态($a>t$)下,谐振峰再次抬升,消光比下降。在临界耦合条件下,微环谐振器的传输谱线如图 2(c)所示,呈现为洛伦兹线型谐振峰的梳状频谱,透射深度降至 0^[32]。

通过将布拉格光栅与微环谐振器结合,光栅的周期性折射率调制会在微环原有谐振峰附近引发模式耦合与带隙效应,导致光谱中出现分裂峰或反射谷,从而抑制部分非目标谐振模式,等效扩展自由光谱范围。同时,光栅提供的缓变反射包络与微环的尖锐谐振峰叠加,形成“粗包络—细尖峰”的复合光谱结构,增强了光谱调控的灵活性。

在折射率传感中,微环谐振器的传感灵敏度 S 可通过谐振峰波长移动量 $\Delta\lambda$ 与外界折射率变化量 Δn 之间的关系进行量化,

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (5)$$

检测极限是评价传感器性能的重要指标,通常定义为传感器能可靠检测出的最小分析物浓度或物理量变化,可表示为:

$$\delta_\lambda = \frac{\Delta\lambda_{\min}}{S} \quad (6)$$

式中, δ_λ 为检测极限, $\Delta\lambda_{\min}$ 为谐振峰的半高全宽。自由光谱范围指微环谐振器中相邻两个谐振峰之间的波长间隔,可表示为

$$\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (7)$$

式中, $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$ 为微环的自由光谱范围, λ 为中心工作波长, n_g 为波导群折射率, L 为微环谐振器的周长。

1.3 布拉格光栅与微环谐振器耦合理论

布拉格光栅与微环谐振器结合后,会在总线波导中形成由光栅反射构成的等效法布里-珀罗腔,并与微环的离散谐振模式发生耦合及相干干涉,从而改变传统微环的洛伦兹线型传输谱。光栅在特定波长范围内形成宽反射阻带,微环谐振模式则嵌入该阻带中作为离散共振态。当微环谐振波长位于光栅阻带内时,两种模式间发生强烈相互作用,重构原本平滑的传输谱,表现为宽阻带背景下出现

极窄、高斜率的类 EIT 透明峰或非对称 Fano 共振峰。与传统微环相比,该耦合结构的谱线斜率显著增大,谐振峰半高全宽更窄,品质因子提升,因而对外部环境折射率变化的响应更灵敏,可实现高性能折射率传感。典型传输谱以光栅宽阻带为包络,中心叠加尖锐陡峭的窄带谐振峰,峰形的不对称度或窄带透明特性是判断耦合效应强弱的直观特征。具体光谱见第 3 部分。

2 基于光栅滤波技术的研究进展

布拉格光栅凭借波长选择性滤波特性,在硅基集成光子器件中得到广泛应用。早期研究主要围绕光栅滤波应用展开,从单波长滤波逐步向多通道、宽光谱、可调谐及多功能集成方向发展,为后续光栅与微环谐振器的耦合调控奠定了工艺与结构基础。2011 年,加拿大英属哥伦比亚大学研究小组^[33]利用单步 193 nm 深紫外光刻工艺制备了条形波导布拉格光栅滤波结构(图 3(a)),为光栅辅助滤波技术的实用化奠定了工艺基础。该设计通过条形波导侧壁的对称周期性波纹构建滤波光栅,利用布拉格条件实现波长选择性反射,将单波长滤波拓展为多波长梳状谱滤波,在绝缘体上硅平台实现了光栅辅助多波长分选功能。当波纹宽度为 10 nm 时,获得 0.8 nm 的最小带宽;取样光栅结构可产生 10 个等间隔反射峰,峰间距为 4.2 nm,工作波段覆盖 1470~1530 nm。该研究采用 CMOS 兼容的低成本工艺,填补了条形波导光栅滤波器件量产的空白,其双结构设计也为光栅辅助滤波从单通道向多通道升级提供了新范式。

2013 年,加拿大英属哥伦比亚大学研究团队^[34]实验验证了基于光栅辅助反向耦合器的硅基粗波分复用解复用器(图 3(b)),为总线波导的多通道滤波提供了紧凑型方案。该器件以绝缘体上硅为平台,采用 4 级级联反向耦合器结构,每级耦合器对应 1 个滤波通道,为后续总线波导滤波的小型化与高稳定性设计奠定了基础。随后,该团队提出了抗反射光栅辅助反向耦合器^[35](图 3(c)),突破了传统反向耦合器因背反射导致可用光谱范围窄的瓶颈,为总线波导宽光谱滤波奠定了基础。

2014 年,加拿大麦吉尔大学研究团队^[36]首次将亚波长光栅引入微环总线波导滤波设计,如图 4(a)所示。该研究利用硅与二氧化硅交替的亚波长

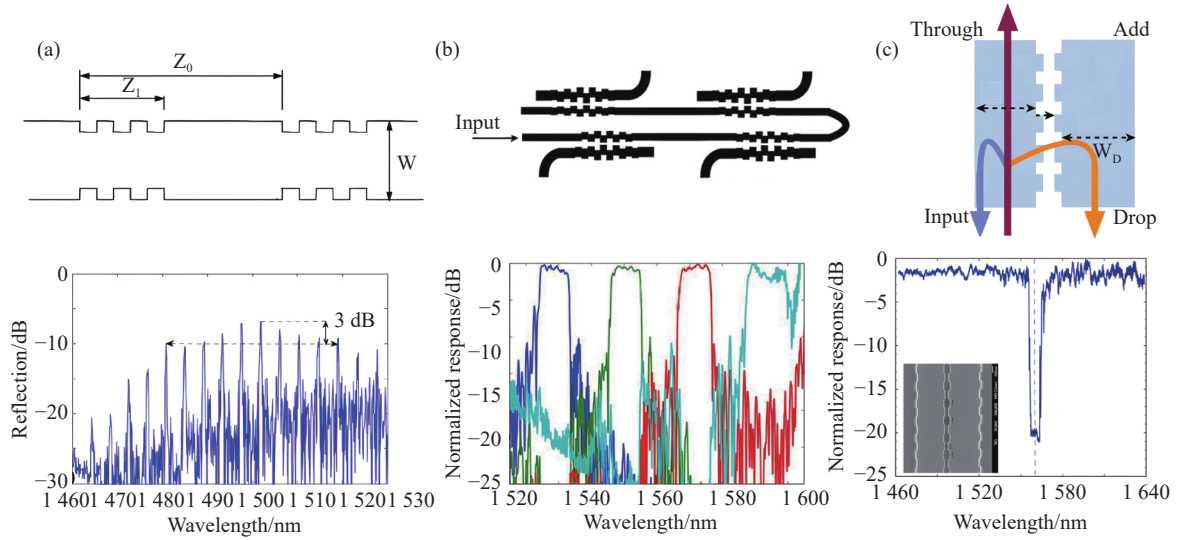


图3 布拉格光栅滤波器结构及传输谱线示意图。(a)条形波导布拉格光栅滤波结构及传输谱线^[33]; (b)硅基粗波分复用解复用器及传输谱线^[34]; (c)抗反射光栅辅助反向耦合滤波器及传输谱线^[35]

Fig. 3 Schematic diagrams of Bragg grating filter structures and transmission spectra. (a) Strip waveguide Bragg grating filter structure and transmission spectra^[33]; (b) silicon-based coarse wavelength division multiplexer/demultiplexer and transmission spectra^[34]; (c) anti-reflection grating-assisted reverse coupling filter and transmission spectra^[35]

周期结构构成布拉格光栅,通过交错两种占空比的波导形成周期性折射率调制,以满足波长选择性滤波需求。基于该结构制备的布拉格光栅在1574~1626 nm波段内实现了窄带滤波,最小带宽可达0.37 nm。

2022年,重庆邮电大学廖莎莎团队^[37]针对光栅辅助总线波导滤波中“超宽带与可调谐难以兼顾、大带宽器件尺寸冗余”的问题,提出了级联啁啾亚波长光栅辅助反向耦合器设计(图4(b)),为总线波导滤波提供了超宽带、低损耗、紧凑集成且无中断传输的解决方案。该设计通过交叉波导级联两个不同周期的啁啾光栅,并结合热调谐实现了44.30~48.92 nm的可调带宽;同时,不满足相位匹配条件的信号可路由至直通端,从而实现“无中断传输”,适配光网络动态频谱分配的需求。

2024年,河北大学苏勇霞团队^[38]提出了基于复合槽波导布拉格光栅的总线波导滤波方案(图4(c)),针对传统光栅滤波器件偏振控制困难及光场耦合弱的难题,利用槽波导的光场局域增强特性与布拉格光栅的波长选择性,实现了滤波、偏振控制与传感的多功能集成,为光栅辅助总线波导滤波提供了新的结构范式。2025年,东南大学研究团队^[39]针对传统粗波分复用器难以实现箱式响应且尺寸偏大的问题,提出了光栅辅助反向耦合器级联

架构(图4(d)),实现了兼具低损耗、小尺寸与典型箱式响应的三通道总线波导滤波。

光栅滤波结构仅具备独立波长选择功能,未与微环谐振腔形成耦合,因此无法产生微环光谱线型调控效应。从物理机制来看,此类光栅仅对波导内传输光进行滤波或反射,属于外部被动调制,不参与微环本征模式的构建。在光谱效应方面,光栅主要实现宽带反射、多通道滤波及平顶滤波等常规功能,难以产生类EIT、Fano共振或模式分裂等相干耦合效应。在传感性能方面,该类结构仅能优化滤波平坦度、偏振相关性及插入损耗,无法直接提升灵敏度、降低检测限或扩展FSR。尽管光栅能提升系统稳定性与抗干扰能力,但对微弱折射率信号检测无增益;若要实现高灵敏度与宽动态范围的同步提升,需将光栅与微环耦合。在制备与性能方面,光栅采用直波导结构,具有工艺简单、损耗可控、容差大及可调谐性强等特点,适合CMOS兼容批量制备,为后续光栅与微环耦合系统奠定了可靠的工艺基础。

3 光栅辅助微环谱线调控的研究进展

3.1 光栅引入微环总线波导

将布拉格光栅引入微环总线波导,其本质是构

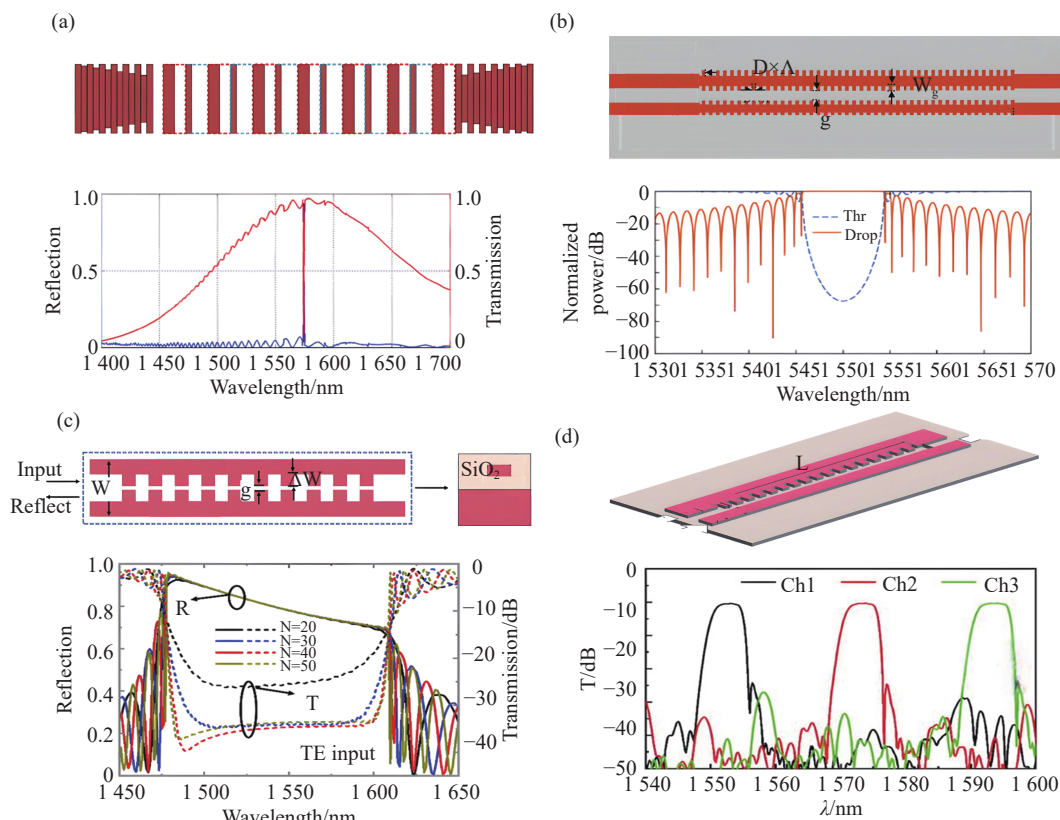


图4 布拉格光栅滤波器结构及传输谱线示意图。(a)交替亚波长光栅型布拉格光栅耦合滤波器及传输谱线^[36]；(b)级联啁啾亚波长光栅辅助反向耦合滤波器及传输谱线^[37]；(c)复合槽波导布拉格光栅滤波器及传输谱线^[38]；(d)光栅辅助反向耦合滤波器及传输谱线^[39]

Fig. 4 Schematic diagrams of Bragg grating filter structures and their transmission spectra. (a) Alternating subwavelength grating-type Bragg grating coupled filter and transmission spectra^[36]; (b) cascaded chirped subwavelength grating-assisted reverse coupling filter and transmission spectra^[37]; (c) composite slot waveguide Bragg grating filter and transmission spectra^[38]; (d) grating-assisted reverse coupling filter and transmission spectra^[39]

建离散态-连续态耦合的经典光学谐振系统,从而在硅基芯片上模拟量子干涉效应。该设计的核心在于利用布拉格光栅的反射特性形成法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 谐振腔,并与微环的离散共振态耦合。当两种模式的谐振波长匹配且存在空间耦合时,将发生模式间的相干干涉。通过调控耦合强度、相位差和损耗比,即可实现对微环原有洛伦兹线型传输光谱的灵活重构,进而产生类电磁诱导透明效应 (electromagnetically induced transparency, EIT)、Fano 共振等特殊光谱效应。

国外在该领域的研究起步较早。2016年,新加坡南洋理工大学研究团队^[40]实验证实,基于全通微环-布拉格光栅的耦合谐振系统可产生类 EIT 传输,器件结构如图 5(a)所示。利用弱对比度布拉格光栅作为反射镜构成 FP 腔,使总线波导与微环光路耦合,从而输出类 EIT 谱线。核心创新在于构

建双路径干涉模型:当两条光路的光程差满足相消干涉条件时,微环谐振波长处的深吸收谷中会出现尖锐透射峰(即类 EIT 谱线),其品质因子显著高于单一微环谐振峰。实验测得 EIT 光谱的消光比为 12 dB,带宽为 0.077 nm,品质因子高达 20200。随后,该团队发现调节器件耦合间隙可控制谐振峰线型,在临界点触发 π 相移,实现类 EIT 线型与 Fano 线型的动态转换^[41]。当耦合强度达到临界值时,系统发生 π 相位突变,导致干涉相消与相长反转,从而实现类 EIT 对称透射峰与 Fano 非对称谐振峰之间的动态切换。同年,加拿大渥太华大学微波光子研究实验室^[42]提出并制备了一种基于硅芯片的光栅型 FP 腔耦合微环谐振器,其结构如图 5(b)所示。该器件同样利用弱对比度布拉格光栅形成 FP 腔,研究了微环谐振器与 FP 腔耦合对 Fano 线型共振的影响,并利用双光子吸收诱导的非线性热

光效应实现 Fano 共振的光调谐。当 1550 nm 波段泵浦光入射时, 硅波导中的双光子吸收产生自由载流子并释放热量, 导致波导有效折射率变化, 进而使 Fano 共振波长连续漂移。实验测得调谐范围达 12 nm, 响应时间为微秒量级。国内相关研究随后展开。2023 年, 兰州交通大学刘春娟等^[43]提出一种基于槽型相移布拉格光栅的微环谐振器结构, 如

图 5(c) 所示。相移布拉格光栅在其布拉格反射带中心引入极窄缺陷态透射峰, 当该缺陷态波长与微环谐振波长精确匹配时, 二者发生强干涉, 将微环原本平缓的洛伦兹线型转化为具有极高斜率的 Fano 线型^[43]。该结构品质因数达 2.6×10^4 , 消光比为 18.65 dB, 在气体折射率传感中获得 122 nm/RIU 的高灵敏度。

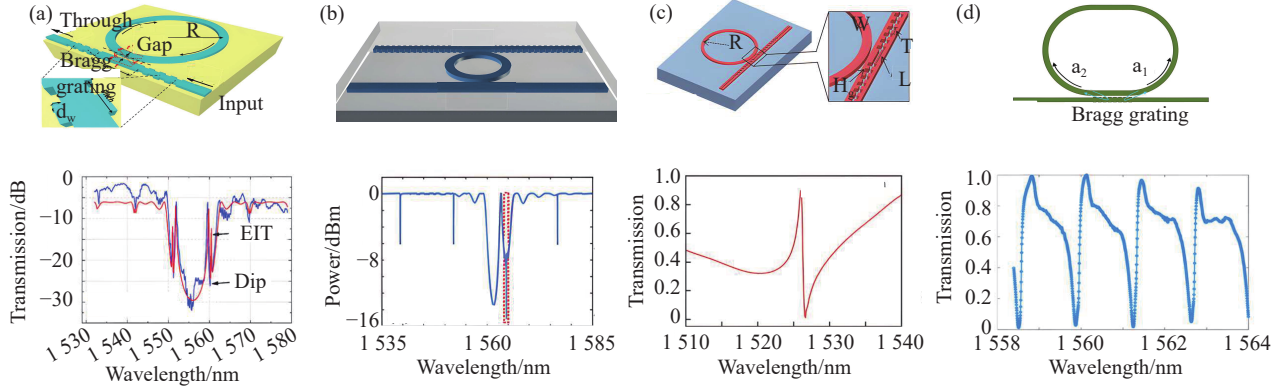


图 5 布拉格光栅引入总线波导的微环谐振器结构及传输谱线示意图。(a)总线波导引入弱对比度布拉格光栅的微环谐振器及传输谱线^[40]; (b)总线波导引入弱对比度布拉格光栅的微环谐振器及传输谱线^[42]; (c)总线波导引入槽型相移布拉格光栅的微环谐振器及传输谱线^[43]; (d)引入布拉格光栅的微环谐振器及传输谱线^[44]

Fig. 5 Schematic diagrams of microring resonators with Bragg gratings integrated into the bus waveguides, along with their corresponding transmission spectra. (a) Microring resonator with a weak-contrast Bragg grating in the bus waveguide and its transmission spectrum^[40]; (b) microring resonator with a weak-contrast Bragg grating in the bus waveguide and its transmission spectrum^[42]; (c) microring resonator with a slotted phase-shift Bragg grating in the bus waveguide and its transmission spectrum^[43]; (d) microring resonator with an integrated Bragg grating and its transmission spectrum^[44]

2024 年, 意大利巴里理工大学^[44]提出一种带布拉格光栅的耗散耦合微环谐振器, 如图 5(d)所示。通过在微环谐振器输入总线中嵌入布拉格光栅, 实现单谐振器内顺时针与逆时针模式间的耗散耦合, 获得理论超高灵敏度并呈现非对称 Fano 共振。

总体而言, 位于总线波导中的光栅-微环耦合结构, 是将布拉格光栅作为反射镜在总线波导上形成 FP 腔。其中, FP 腔谐振模式作为准连续态, 微环谐振模式作为离散态, 两种模式相互耦合产生类 EIT 和 Fano 线型。这些线型通过大幅提高光谱斜率降低检测限, 但检测范围仍受限。该结构具有光谱调控灵活、器件结构简单、良率高及适合大规模量产等优势, 可通过调节光栅周期、耦合间隙及器件温度等参数实现光谱精细调谐。然而, 该结构也存在局限性: 布拉格光栅占用总线波导空间, 限制了器件集成密度; 光栅与波导间的模式失配引入插入损耗; 且光谱调控范围受限于布拉格光栅反射带宽, 通常仅为几纳米至十几纳米。

3.2 光栅引入微环环形波导

除将布拉格光栅引入微环总线波导外, 许多研究者将布拉格光栅直接引入微环环形波导。其本质是通过光栅的周期性折射率调制直接作用于微环回音壁模式, 从根本上改变谐振腔模式结构与传输特性。这种设计增强了光场与光栅的相互作用, 光谱调控效果更为显著, 可实现多种光谱效应。

2011 年, 美国伊利诺伊大学研究团队^[45]提出在硅基微环环形波导上半周集成布拉格光栅, 其结构如图 6(a)所示。由于上半周布拉格光栅仅对特定传播方向和模式阶数的光产生强反射, 从而选择性抑制所有高阶杂模, 仅保留基模谐振输出, 实现了无需缩小器件半径的单波长工作。测得单反射峰半高全宽为 0.4 nm, 峰值反射率达 92.3%。2015 年, 纽约大学研究者^[46]提出集成布拉格光栅的微环, 其结构如图 6(b)所示。当光栅布拉格反射波长与微环谐振波长精确匹配时, 光栅诱导微环中原本简并的顺时针与逆时针回音壁模式发生强耦合,

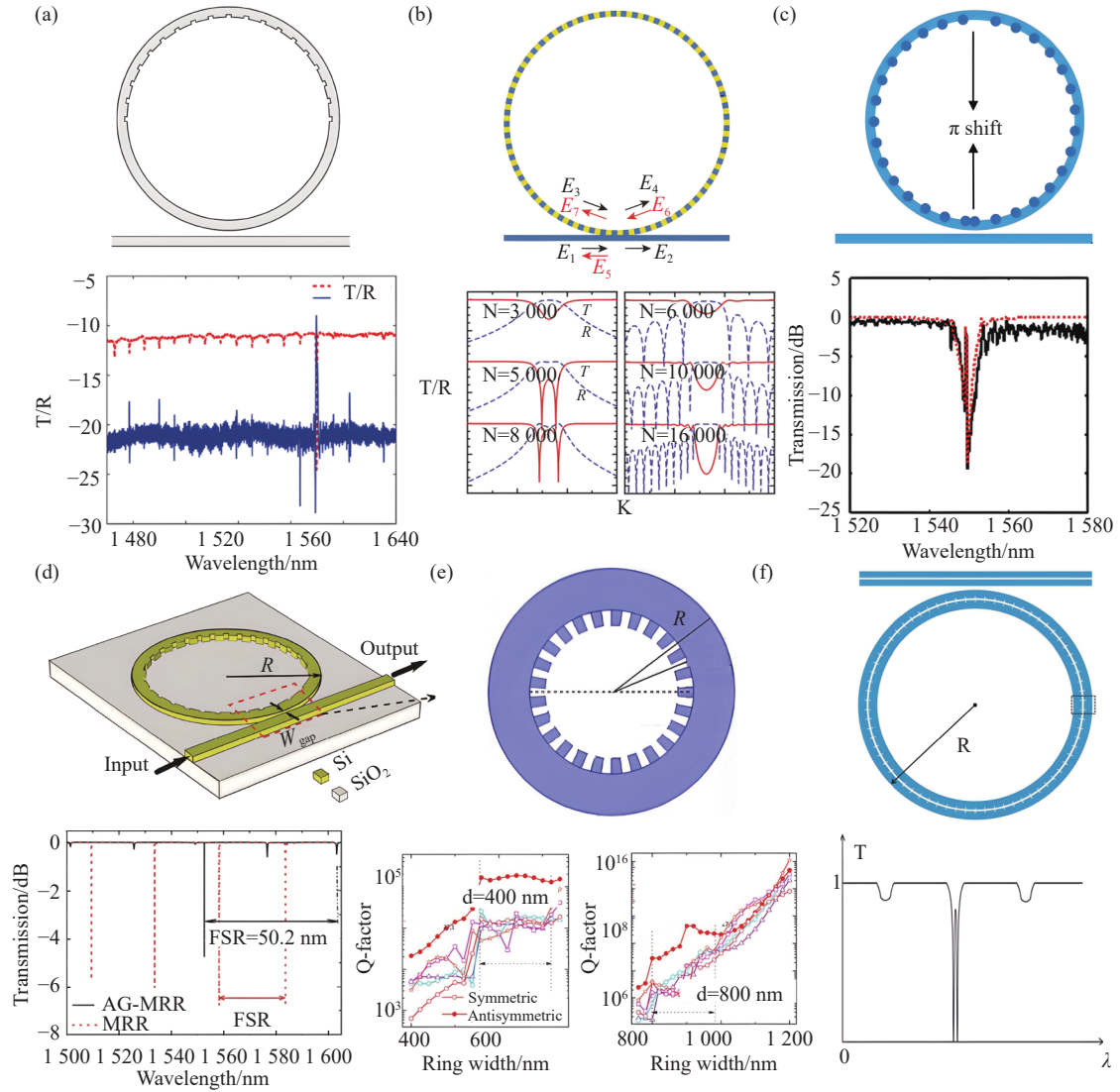


图6 布拉格光栅引入环形波导的微环谐振器结构及传输谱线示意图。(a)环形波导上半周引入布拉格光栅的微环谐振器及传输谱线^[45]；(b)环形波导引入布拉格光栅的微环谐振器及传输谱线^[46]；(c)环形波导引入相移布拉格光栅的微环谐振器及传输谱线^[47]；(d)环形波导引入角光栅的微环谐振器及传输谱线^[48]；(e)环形波导引入内壁角光栅的微环谐振器及光栅参数对品质因子影响的示意图^[49]；(f)环形波导引入槽型布拉格光栅的微环谐振器及传输谱线^[50]

Fig. 6 Schematic diagrams of the microring resonators with the Bragg gratings introduced into the ring waveguide and transmission spectra. (a) Microring resonator with the Bragg grating introduced in the upper half of the ring waveguide and transmission spectra^[45]; (b) microring resonator with Bragg grating introduced into the ring waveguide and transmission spectra^[46]; (c) microring resonator with phase-shift Bragg grating introduced into the ring waveguide and transmission spectra^[47]; (d) microring resonator with angular grating introduced into the ring waveguide and transmission spectra^[48]; (e) microring resonator with inner-wall grating introduced into the ring waveguide and schematic diagram of the effect of grating parameters on the quality factor^[49]; (f) microring resonator with slotted Bragg grating introduced into the ring waveguide and transmission spectra^[50]

导致单一共振模式分裂为两个能量不同的简并模式，在传输光谱上表现为两个间距很近的分裂峰。同年，浙江大学黄强胜等^[47]首先将布拉格光栅引入微环形成布拉格光栅微环谐振器，并在此基础上加入 π 相移，其结构如图6(c)所示。 π 相移在布拉格光栅反射带中引入缺陷态，当缺陷态波长与微环

谐振波长匹配时产生窄带透射峰；若相移偏离 π ，耦合失配则导致非对称 Fano 线型谐振峰。该 π 相移光栅微环获得 0.1 nm 超窄线宽。2016 年，北京邮电大学袁金辉等^[48]提出一种基于绝缘体上硅平台的角光栅-微环谐振器，其结构如图6(d)所示。其利用角光栅波长选择性，仅对特定角向模数光产

生布拉格反射,像“模式滤波器”一样过滤掉微环中所有非目标级次边模谐振峰,仅输出单个主模谐振峰,从而将器件准FSR扩大至传统微环的2倍。其品质因子达 1.03×10^5 ,浓度灵敏度高达107.64 pm/%,检测限低至0.2911%。同年,中国科学院半导体研究所黄永箴团队^[49]提出一种基于内壁角光栅的微环谐振腔,其结构如图6(e)所示,实现了对回音壁模式的选择性调控。通过优化光栅参数,实现了单一高品质因子的稳定激射,解决了传统微环激光器的多模与双稳态问题。2020年,杭州电子科技大学^[50]提出槽型布拉格光栅微环,其结构如图6(f)所示。该结构结合槽型波导光场增强效应与布拉格光栅模式调控效应,槽型波导将70%以上光场限制在低折射率空气槽区域,极大增强光与光栅相互作用。光栅诱导的两个耦合模式间发生相消干涉,从而产生线宽极窄的类EIT效应传输谱线。

总体而言,环形波导光栅结构的核心优势在于高集成度、强光场与光栅相互作用以及显著的光谱调控效果,能够实现总线波导光栅难以达成的模式分裂和单模激射等效应。其主要局限性在于制备工艺难度较大,需在弯曲的环形波导上刻蚀高精度周期性光栅结构,对光刻和刻蚀精度要求极高,工艺容差较小。光栅引入总线波导与环形波导的核心区别在于调控层级:前者属于外部干涉调控,后者属于内部模式本征调制。总线波导光栅以类EIT和Fano共振为主,旨在提升传感灵敏度并降低检测限;环形波导光栅则以模式分裂、边模抑制及FSR扩展为主,旨在扩大检测范围。若优先追求灵敏度与可调谐性,宜选择总线引入光栅的微环结构;若优先追求大检测范围与高集成度,则宜选择环内引入光栅的微环结构。在工艺方面,总线引入光栅的微环结构易于制备、容差高且易于调谐,而环内引入光栅的微环结构制备困难、容差低且调谐难度大。二者分别对应“高灵敏微弱传感”与“宽范围无模糊传感”两大技术路线。表1对比了光栅不同引入方式的核心特性。

4 光栅辅助微环传感应用的研究进展

4.1 调控谐振峰线型用于传感的相关工作

将布拉格光栅引入微环谐振器中,可改变其谐

表1 总线波导光栅微环与环形波导光栅微环的核心特性
Table 1 Characteristics of microring resonators with bus waveguide grating and ring waveguide grating

对比项	总线波导光栅微环	环形波导光栅微环
物理机制	光栅形成FP腔作为准连续态,与微环离散态相干涉 ^[40]	光栅直接调制回音壁模式,周期性折射率改变微环本征模式 ^[45]
光谱效应	类EIT透射峰, Fano非对称共振, 光谱线型动态转换 ^[40-41]	模式分裂, 缺陷态窄带透射, 边模抑制, 单模激射, FSR拓展 ^[45-50]
技术优势	制备工艺简单, 光谱调控方式灵活, 器件良率高, 耦合参数易调节 ^[41]	光场与光栅相互作用更强, 调控效果显著, 可实现单模输出, 突破FSR限制 ^[48]
局限性	光栅占用总线波导空间, 限制集成度, 光栅与波导模式失配引入插入损耗, 光谱调控范围受光栅反射带宽限制 ^[42-44]	需在弯曲波导上刻蚀高精度光栅, 工艺难度大, 对光刻和刻蚀精度要求高, 工艺容差小, 调谐难度较大, 动态可调谐器件较少 ^[50]

振峰线型,如导致原有洛伦兹线型分裂,或产生类EIT线型、Fano线型等。相较于传统洛伦兹线型,这些特殊线型具有更尖锐的光谱特征和更高的斜率,能够显著提升传感器对微弱折射率变化的检测能力,从而优化微环谐振器的传感性能。

国外在该领域的研究起步较早。2014年,意大利巴里理工大学的研究者^[51]提出了一种结合布拉格光栅的微环传感器,其结构如图7(a)所示。该结构利用光栅诱导微环中原本简并的顺时针与逆时针传播模式发生耦合,使单一谐振峰分裂为两个间距固定的分裂峰。由于这两个分裂峰源自同一微环的同一阶本征模式,它们对温度、应力、振动等共模干扰具有完全相同的响应特性,而对待测折射率、生物分子浓度等目标参量则因光场分布差异表现出不同的响应程度。通过追踪两个分裂峰的波长差而非单个峰的绝对波长进行测量,可完全消除共模干扰的影响。实验证明,该方法可将温度漂移和工艺波动带来的测量误差降低80%以上。2018年,杭州电子科技大学的研究者^[52]提出了一种引入槽型相移布拉格光栅的槽波导微环传感器件,其结构如图7(b)所示。槽型波导将70%以上

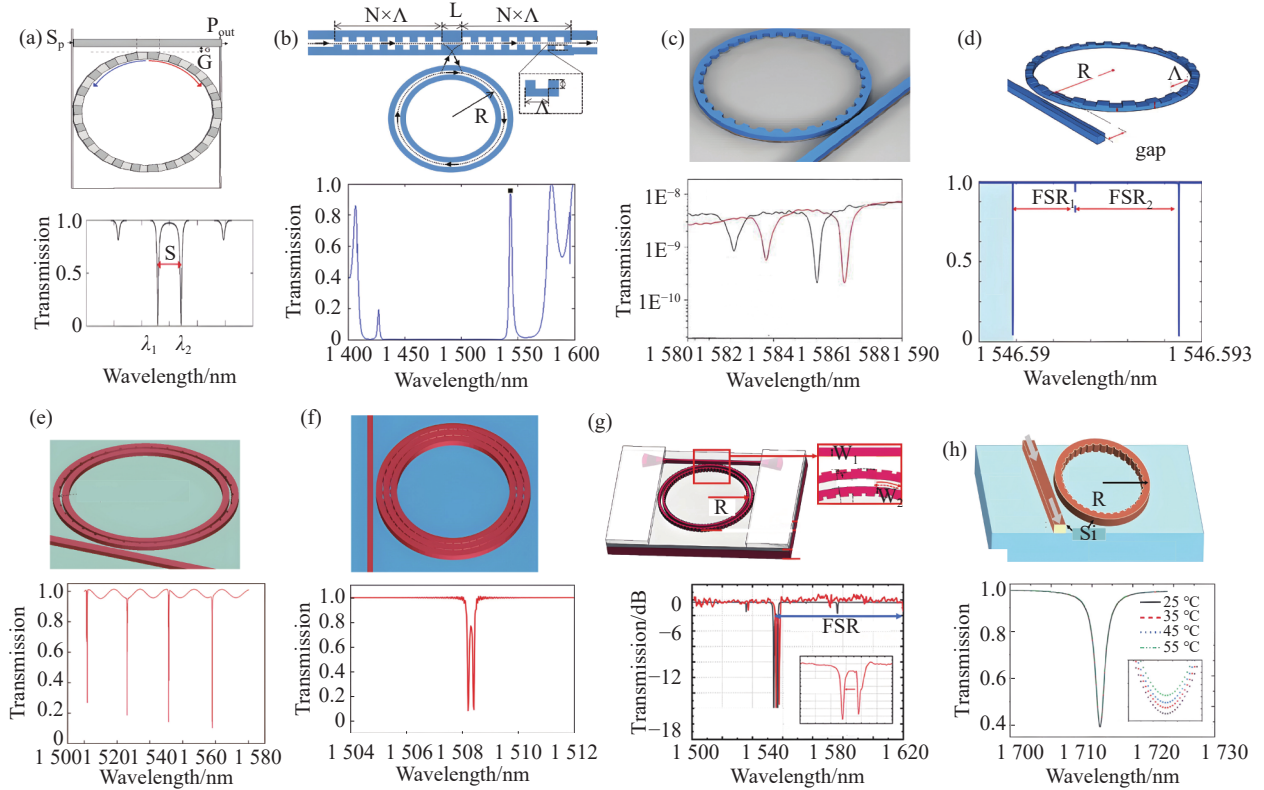


图7 用于传感的布拉格光栅微环谐振器结构及传输谱线示意图。(a)布拉格光栅微环传感器及传输谱线^[51]；(b)槽型相移布拉格光栅微环传感器及传输谱线^[52]；(c)内壁空气孔光栅微环传感器及传输谱线^[53]；(d)一维光子晶体光栅微环传感器及传输谱线^[54]；(e)空气孔光栅槽型微环传感器及传输谱线^[55]；(f)空气孔光栅双槽型微环传感器及传输谱线^[56]；(g)侧壁光栅槽波导微环传感器及传输谱线^[57]；(h)内壁空气孔光栅微环传感器及传输谱线^[19]

Fig. 7 Schematic diagrams of Bragg grating microring resonators for sensing, featuring controlled resonance lineshapes and transmission spectra. (a) Bragg grating microring resonator sensor and transmission spectra^[51]; (b) slotted phase-shift Bragg grating microring resonator sensor and transmission spectra^[52]; (c) inner-wall air-hole Bragg grating microring resonator sensor and transmission spectra^[53]; (d) one-dimensional photonic crystal Bragg grating microring resonator sensor and transmission spectra^[54]; (e) air-hole Bragg grating slotted microring resonator sensor and transmission spectra^[55]; (f) air-hole Bragg grating double-slotted microring resonator sensor and transmission spectra^[56]; (g) side-wall Bragg grating slotted microring resonator sensor and transmission spectra^[57]; (h) inner-wall air-hole Bragg grating microring resonator sensor and transmission spectra^[19]

的光场限制在低折射率槽区,显著提升了传感灵敏度;总线波导中加入的相移光栅使得传输谱线出现尖锐的窄带缺陷态谐振峰。当该缺陷态与微环谐振峰发生干涉时,会产生具有极高斜率的Fano线型谐振峰,其光谱斜率较传统洛伦兹线型提升了一个数量级以上。2020年,日本横滨国立大学的研究团队^[53]也将布拉格光栅引入微环中,其结构如图7(c)所示,通过内壁光栅诱导双模分裂。由于内壁光栅与微环回音壁模式的光场重叠度更高,模式耦合效率提升且诱导产生的模式分裂更明显,实现了兼具高传感灵敏度与自参考能力的微环传感器。同年,意大利巴里理工大学的研究团队^[54]提出了一种基于一维光子晶体光栅的微环谐振器,如图7

(d)所示。该团队深入揭示了光子晶体光栅带边共振与微环谐振耦合产生Fano线型的物理机制,通过优化光子晶体光栅的周期和占空比,实现了对Fano共振不对称因子的精准调控。其品质因子 Q 大于 10^9 ,较无光栅微环腔提升了三个数量级。国内相关研究工作也在不断赶超。2022年,兰州交通大学刘春娟团队^[55]提出了一种光栅辅助槽型微环谐振器,其结构如图7(e)所示。通过在槽型微环内壁引入周期性空气孔阵列形成布拉格光栅,利用微环与光栅的耦合效应产生类EIT效应。类EIT效应由两个耦合模式之间的相消干涉产生,其高斜率特性突破了传统微环洛伦兹线型的限制。2023年,该团队又提出了一种双槽型光栅微环谐振

器^[56],如图7(f)所示。该结构进一步优化了波导设计,采用双槽型波导增强光场局域化效应,利用半圆柱硅光栅的反射与微环谐振路径干涉产生类 EIT 效应,在紧凑尺寸下实现了超高品质因子与传感灵敏度。同年,英国格拉斯哥大学的研究团队^[57]提出并实验验证了侧壁光栅槽波导微环谐振器生化传感器,如图7(g)所示。该结构将布拉格光栅集成于槽波导侧壁,进一步增大了光场与待测生物分子的相互作用面积;通过侧壁光栅与槽波导微环的协同设计,产生了类 EIT 效应。该传感器实现了 620 nm/RIU 的折射率灵敏度和 1120 pm/% 的浓度灵敏度,检测极限达 1.4×10^{-4} RIU,检测范围扩至 84.5 nm 且无 FSR 限制。2023 年,印度理工学院的研究小组^[19]提出了光栅辅助温度不敏感微环传感器,如图7(h)所示。该设计利用水的负热光系数与硅波导的正热光效应相互抵消,并通过环形光栅阵列优化光场局域化,实现了零温度漂移工艺容差及超高传感灵敏度。

4.2 拓宽 FSR 用于传感的相关工作

将布拉格光栅引入微环谐振器,可通过滤除特定谐振峰实现侧模抑制的单模输出,从而扩大 FSR,有利于拓宽传感谐振器的可探测范围。传统微环谐振器的 FSR 与器件半径严格成反比,为获得较大 FSR 需减小半径,但这会导致弯曲损耗急剧增加及品质因子显著下降。光栅辅助的边模抑制技术无需缩小器件半径,即可大幅拓展有效工作波长范围,为高精度、大范围光学传感提供了高效解决方案。

2019 年,吉林大学研究团队^[58]提出了内壁光栅型槽波导微环谐振器,其结构如图8(a)所示,其双重滤波机制实现了侧模抑制的主模输出。第一重滤波源于微环谐振器的本征模式选择特性,仅满足谐振条件的波长能在环内形成稳定谐振;第二重滤波源于微环内壁的角光栅,仅同时满足光栅布拉格反射条件的基模回音壁模式能稳定传播,而不匹配的角向高阶边模则被光栅反射并通过辐射损耗耗散,从而实现了有效工作范围的拓展。随后,杭州电子科技大学赵彩云团队^[59]提出了一种结合槽型微环与布拉格光栅的传感器,其结构如图8(b)所示,利用槽波导的光场增强效应提升传感灵敏度,

并借助光栅的旁模抑制能力拓展有效工作范围。仿真表明,该器件的准 FSR 拓展至传统微环的 2.2 倍,兼具高灵敏度与宽检测范围,特别适用于溶液浓度检测等大动态范围应用场景。2021 年,兰州交通大学研究团队^[60]提出了一种基于双槽型光栅微环谐振器的折射率传感器,其结构如图8(c)所示。该结构采用双槽型波导进一步增强光场局域化效应,使光场与待测物质的相互作用面积提升 30% 以上;同时,内壁布拉格光栅与微环耦合产生了线宽极窄的类 EIT 透射峰。由于光栅布拉格反射带宽覆盖多个微环 FSR,整个反射带宽内仅存在一个类 EIT 透射峰,实现了准无 FSR 限制的检测效果,显著拓宽了可探测范围。2023 年,英国格拉斯哥大学研究团队^[61]实验验证了基于双槽型内壁光栅微环谐振器的超灵敏生化传感器,其结构如图8(d)所示。通过结合双槽波导的光场局域增强效应与内壁角光栅的侧模抑制能力,该器件实现了超高灵敏度与超大检测范围的协同突破。实验结果表明,其对牛血清白蛋白的检测限达 0.1 ng/mL,可探测浓度范围覆盖 5 个数量级,展示了在高灵敏度、大动态范围生化传感领域的巨大应用潜力。同年,中科院研究团队^[62]提出了一种基于布拉格光栅辅助的槽型亚波长光栅微环谐振器,其结构如图8(e)所示,利用槽型亚波长光栅波导增强传感灵敏度,并借助布拉格光栅的侧模抑制拓展有效工作范围,实现了兼具高灵敏度和宽可探测范围的传感性能。

光栅辅助微环传感主要包含两条互补的技术路线,其核心技术对比如表2所示。线型调控路线旨在提升灵敏度并降低检测限,依赖类 EIT、Fano 共振及模式分裂等效应,适用于微弱信号检测;FSR 拓宽路线旨在扩大检测范围,依赖边模抑制与单模输出,适用于大动态范围测量。传感灵敏度与检测极限之间存在典型的权衡关系。从工艺与性能角度分析,线型调控结构工艺难度适中且可调谐性良好,而 FSR 拓宽结构工艺难度较高但稳定性更强。这两类路线共同构成了光栅辅助微环高性能传感的完整技术体系。两种技术路线代表性器件的关键性能定量对比如表3所示。

5 总结与展望

布拉格光栅与微环谐振器的深度融合,为硅基

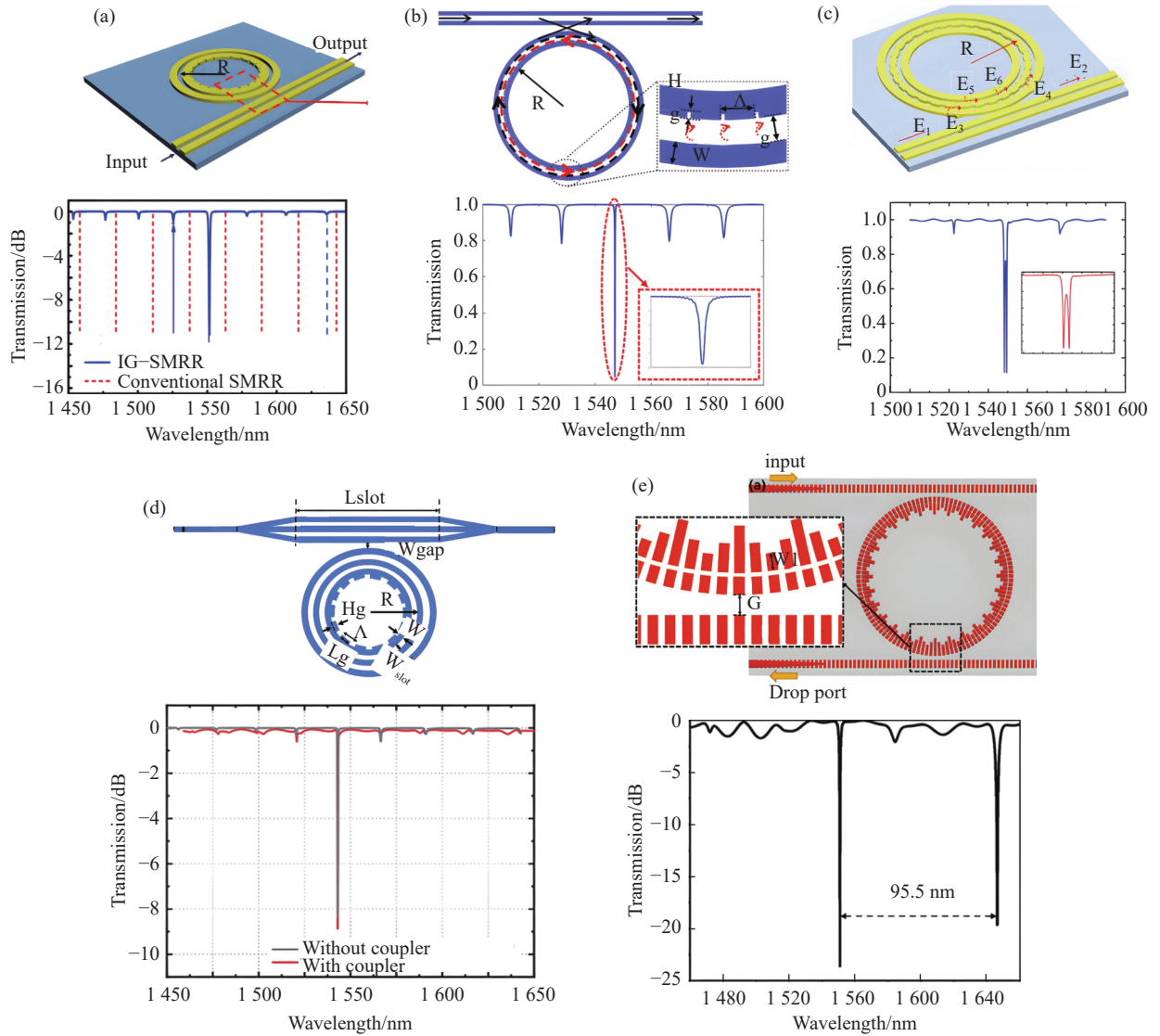


图 8 拓宽 FSR 用于传感的布拉格光栅微环谐振器结构及传输谱线示意图。(a)内侧空气孔光栅槽型微环传感器及传输谱线^[58]；(b)内壁布拉格光栅槽型微环传感器及传输谱线^[59]；(c)双槽型内壁光栅微环传感器及传输谱线^[60]；(d)内侧光栅双槽型微环传感器及传输谱线^[61]；(e)布拉格光栅结合槽型微环传感器及传输谱线^[62]

Fig. 8 Schematic diagrams of Bragg grating microring resonators for sensing, featuring broadened free spectral range (FSR) and transmission spectra. (a) Inner-wall air-hole Bragg grating slotted microring resonator sensor and transmission spectra^[58]; (b) inner Bragg grating slotted microring resonator sensor and transmission spectra^[59]; (c) inner Bragg grating double-slotted microring resonator sensor and transmission spectra^[60]; (d) inner-wall Bragg grating double-slotted microring resonator sensor and transmission spectra^[61]; (e) Bragg grating combined with slotted microring resonator sensor and transmission spectra^[62]

集成光学器件的光谱调控与传感应用开辟了新的技术路径。在总线波导中引入布拉格光栅,可构建 FP 腔并与微环形成耦合谐振系统,通过干涉效应产生类 EIT 或 Fano 线型谱线;在微环环形波导中引入布拉格光栅,则可通过模式分裂或选择性滤波机制重构光谱响应,例如全周光栅诱导反向传播模式耦合产生对称/反对称分裂峰, π 相移光栅引入缺陷态窄带透射峰,以及内壁光栅抑制边模以扩

展 FSR 等。得益于上述灵活的光谱调控能力,布拉格光栅辅助的微环谐振器在传感领域展现出显著优势。通过追踪不同线型谐振峰的特征变化,可构建具备自参考能力的微环传感器,有效抑制温度漂移与工艺波动带来的测量误差;利用边模抑制后的单模输出光谱,可大幅拓宽传感器的无模糊探测范围,从而突破传统微环传感器因 FSR 有限而导致的测量模糊问题。尽管布拉格光栅辅助微环谐

表 2 光栅辅助微环两种核心传感技术路线对比

Table 2 Comparison of two core sensing technical routes for grating-assisted microring resonators

对比项	调控谐振峰线型用于传感	拓宽微环的FSR用于传感
物理机制	光栅诱导微环模式间相干干涉, 重构谐振峰线型特征, 提升光谱斜率 ^[51]	光栅作为模式选择性滤波器, 抑制高阶边模, 实现单一主模输出 ^[58]
光谱效应	模式分裂, 类EIT对称透射峰, Fano非对称共振 ^[52-53]	边模抑制, 单一主模输出, 准FSR大幅拓展 ^[59]
解决的核心瓶颈	传统洛伦兹线型斜率低, 检测灵敏度不足 ^[54-56]	传统微环检测范围与检测精度不可兼得的固有矛盾, 大波长范围内的测量模糊性问题 ^[60-61]
核心优势	灵敏度高, 抗干扰能力强, 检测限低, 适合微弱信号检测 ^[19, 57]	检测范围大, 无测量模糊, 可同时保持高 Q 值 ^[62]

表 3 代表性光栅辅助微环器件关键性能定量对比

Table 3 Quantitative comparison of key performance metrics for representative grating-assisted microring devices

文献	年份	结构类型	光栅位置	光谱效应	实验/仿真	Q	S	δ_c/RIU	$\Delta\lambda_{\text{FSR}}/\text{nm}$
[40]	2016	微环FP腔耦合	总线	类EIT	实验	2×10^4	—	—	—
[41]	2017	微环FP腔耦合		EIT与Fano	实验	2.1×10^4	—	—	—
[42]	2016	光栅FP腔-微环		Fano共振	实验	1.8×10^4	—	—	11.3
[43]	2023	槽相移光栅-微环		Fano共振	仿真	2.6×10^4	122 nm/RIU	—	—
[44]	2024	鱼骨布拉格光栅		Fano共振	实验	—	—	—	—
[52]	2018	槽相移光栅-微环		窄带谐振峰	仿真	2×10^3	297.13 nm/RIU	1.1×10^{-4}	—
[45]	2011	半周光栅微环	环内	边模抑制	实验	1.56×10^5	—	—	—
[48]	2016	角光栅微环		边模抑制	仿真	1.03×10^5	107.64 pm/%	0.3290%	50.2
[55]	2022	光栅辅助狭缝		类EIT	仿真	3.5×10^4	360 nm/RIU	2.3×10^{-4}	—
[57]	2023	侧壁光栅狭缝		类EIT	实验	3.1×10^3	620 nm/RIU	1.4×10^{-4}	84.5
[19]	2023	内壁光栅		洛伦兹	仿真	—	525 nm/RIU	2×10^{-6}	5
[60]	2021	双槽微环		类EIT	仿真	4.3×10^3	433.33 nm/RIU	8.26×10^{-4}	Free
[61]	2023	内壁角光栅双槽		边模抑制	实验	1.6×10^4	563 nm/RIU	3.7×10^{-6}	72.62
[62]	2023	亚波长光栅狭缝		边模抑制	仿真	5.8×10^3	743 nm/RIU	3.60×10^{-4}	95.5

振传感在提升灵敏度与调控谱线方面优势显著, 但该类结构在实用化过程中仍面临若干挑战。光栅的引入增加了器件加工难度, 侧壁光栅的刻蚀误差会直接影响反射率与谐振波长, 进而降低器件性能的一致性与成品率。现有方案多基于单微环与光栅的耦合, 结构自由度有限, 在同时实现超高灵敏度、低检测限和宽动态范围方面仍存在性能瓶颈; 且大部分研究尚处于仿真或实验室验证阶段, 距离片上集成、多通道并行检测等实际应用场景仍有

差距。

随着硅基集成光子学向更高集成度、多功能化和智能化方向发展, 布拉格光栅与微环谐振器这种多效应协同结构将成为主流。通过将槽波导^[63-64]、亚波长光栅^[65-66]、光子晶体^[67]等新型波导结构与布拉格光栅微环深度融合, 可同时实现超高灵敏度、超高品质因子及宽 FSR 的性能突破。随着智能传感与自适应调控技术的发展, 结合相变材料、二维材料或热光、电光调谐手段, 有望进一步实现可重

构、可编程的光谱响应,满足动态环境下的多参量并行传感需求,拓宽硅基集成传感器的应用场景和适用范围。未来的研究可围绕3个方向展开:一是优化光栅-微环耦合结构,通过相移、亚波长设计降低加工误差影响,提升器件一致性;二是发展多参数同步传感与解耦技术,减少温度、应力等环境因素的交叉干扰;三是推动与光源、探测器的单片集成,构建小型化片上传感系统。在应用场景上,这类器件可在生物分子无标记检测、环境痕量污染物监测、食品安全快速筛查等领域发挥作用,也有望在工业过程监测、气体传感等场景中实现实用化,展现出良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Steglich P, Rabus D G, Sada C, et al. Silicon photonic micro-ring resonators for chemical and biological sensing: a tutorial[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(11): 10089-10105.
- [2] Stojanović V, Ram R J, Popović M, et al. Monolithic silicon-photonics platforms in state-of-the-art CMOS SOI processes[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13106-13121.
- [3] Luchansky M S, Bailey R C. High- Q optical sensors for chemical and biological analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(2): 793-821.
- [4] Margalit N, Xiang Chao, Bowers S M, et al. Perspective on the future of silicon photonics and electronics[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(22): 220501.
- [5] Dhote C, Singh A, Kumar S. Silicon photonics sensors for biophotonic applications: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(19): 18228-18239.
- [6] Zinoviev K, Carrascosa L G, Sánchez del Río J, et al. Silicon photonic biosensors for lab-on-a-chip applications[J]. *Advances in Optical Technologies*, 2008, 2008: 383927.
- [7] Luan Enxiao, Shoman H, Ratner D M, et al. Silicon photonic biosensors using label-free detection[J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3519.
- [8] Wan Yating, He W, Jaussi J, et al. Integrating silicon photonics with complementary metal-oxide-semiconductor technologies[J]. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2026, 3(1): 15-31.
- [9] Porzi C, Reza M, Sorel M, et al. Recent progresses in silicon waveguide Bragg grating filters[C]//2024 24th International Conference on Transparent Optical Networks. Bari: IEEE, 2024: 1-4.
- [10] Oser D, Pérez-Galacho D, Le Roux X, et al. Silicon subwavelength modal Bragg grating filters with narrow bandwidth and high optical rejection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5784-5787.
- [11] Chae C J, Choi D Y, Skafidas E, et al. Compact waveguide resonator filter for wavelength-selective reflection and rejection in silicon waveguides[C]//2015 Opto-Electronics and Communications Conference. Shanghai: IEEE, 2015: 1-3.
- [12] Wang Xu, Shi Wei, Yun Han, et al. Narrow-band waveguide Bragg gratings on SOI wafers with CMOS-compatible fabrication process[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15547-15558.
- [13] Wang Junjia, Glesk I, Chen L R. Subwavelength grating devices in silicon photonics[J]. *Science Bulletin*, 2016, 61(11): 879-888.
- [14] Puckett M W, Vallini F, Grieco A, et al. Multichannel Bragg gratings in silicon waveguides with asymmetric sidewall modulation[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 379-382.
- [15] Wang Jiaqi, Zhang Hui, Chen Si, et al. A silicon microring resonator for refractive index carbon dioxide gas sensing[J]. *ACS Sensors*, 2025, 10(7): 4938-4944.
- [16] Guo Rongxiang, He Qi, Zhang Zunyue, et al. High- Q silicon microring resonator with ultrathin sub-wavelength thicknesses for sensitive gas sensing[J]. *Applied Physics Reviews*, 2024, 11(2): 021417.
- [17] Mi Guangcan, Horvath C, Van V. Silicon photonic dual-gas sensor for H_2 and CO_2 detection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16250-16259.
- [18] Tan Ying, Dai Daoxin. Silicon microring resonators[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(5): 054004.
- [19] Verma Y K, Kumari S, Tripathi S M. Grating assisted temperature insensitive micro-ring resonator biosensor[J]. *Journal of Optics*, 2023, 25(12): 125801.
- [20] Zou Jun, Le Zichun, He Jianjun. Temperature self-compensated optical waveguide biosensor based on cascade of ring resonator and arrayed waveguide grating spectrometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(21): 4856-4863.
- [21] Cheng Weiqing, Ye Shengwei, Sun Xiao, et al. Double slot micro ring resonators with inner wall angular gratings as ultra highly sensitive biochemical sensors[C]//2022 IEEE Photonics Conference. Vancouver: IEEE, 2022: 1-2.
- [22] Rea I, Iodice M, Coppola G, et al. A porous silicon-based Bragg grating waveguide sensor for chemical monitoring[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, 139(1): 39-43.

- [23] Sahu S, Ali J, Yupapin P P, et al. Porous silicon based Bragg-grating resonator for refractive index biosensor[J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(3): 248-254.
- [24] Cheng Rui, Chrostowski L. Spectral design of silicon integrated Bragg gratings: a tutorial[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(3): 712-729.
- [25] Kaushal S, Cheng Rui, Ma Minglei, et al. Optical signal processing based on silicon photonics waveguide Bragg gratings: review[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2018, 11(2): 163-188.
- [26] Zhang Weifeng, Ehteshami N, Liu Weilin, et al. Silicon-based on-chip electrically tunable sidewall Bragg grating Fabry-Perot filter[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3153-3156.
- [27] Niehusmann J, Vörckel A, Bolivar P H, et al. Ultrahigh-quality-factor silicon-on-insulator microring resonator[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(24): 2861-2863.
- [28] Nawrocka M S, Liu Tao, Wang Xuan, et al. Tunable silicon microring resonator with wide free spectral range[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(7): 071110.
- [29] Biberman A, Shaw M J, Timurdogan E, et al. Ultralow-loss silicon ring resonators[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4236-4238.
- [30] Guha B, Kyotoku B B C, Lipson M. CMOS-compatible athermal silicon microring resonators[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3487-3493.
- [31] 付晨阳. 基于亚波长光栅结构微环谐振器的折射率传感研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
Fu Chenyang. Research on refractive index sensing based on subwavelength grating microring resonator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.
- [32] 孙士博. 基于亚波长结构微环谐振器的传感特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
Sun Shibo. Research on sensing characteristics based on subwavelength structure microring resonator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023.
- [33] Wang Xu, Shi Wei, Vafaei R, et al. Uniform and sampled Bragg gratings in SOI strip waveguides with sidewall corrugations[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(5): 290-292.
- [34] Shi Wei, Yun Han, Lin C, et al. Silicon CWDM demultiplexers using contra-directional couplers[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington: Optical Society of America, 2013: 1-2.
- [35] Shi Wei, Yun Han, Lin C, et al. Ultra-compact, flat-top demultiplexer using anti-reflection contra-directional couplers for CWDM networks on silicon[J]. *Optics Express*, 2013, 21(6): 6733-6738.
- [36] Wang Junjia, Glesk I, Chen L R. Subwavelength grating filtering devices[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15335-15345.
- [37] 廖莎莎, 包航, 冯玉婷, 等. 基于级联啁啾亚波长光栅辅助反向耦合器的超宽带可调滤波器[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1405003.
Liao Shasha, Bao Hang, Feng Yuting, et al. Ultra-broadband tunable filter based on cascaded chirped subwavelength grating assisted contra-directional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1405003.
- [38] 苏勇霞. 基于复合槽波导 Bragg 光栅的硅基片上偏振控制滤波器件[D]. 保定: 河北大学, 2024.
Su Yongxia. Polarization control filters on silicon substrate based on composite slot waveguide Bragg gratings[D]. Baoding: Hebei University, 2024.
- [39] 钟国舜, 李虹宇, 胡国华, 等. 基于光栅辅助反向耦合器的箱式响应粗波分复用器[J]. *半导体光电*, 2025, 46(2): 269-274.
Zhong Guoshun, Li Hongyu, Hu Guohua, et al. Grating-assisted contra-directional coupler-based coarse-wavelength-division multiplexer with box-like spectral responsivity[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2025, 46(2): 269-274.
- [40] Zhang Zecen, Ng G I, Hu Ting, et al. Electromagnetically induced transparency-like effect in microring-Bragg gratings based coupling resonant system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25665-25675.
- [41] Zhang Zecen, Ng G I, Hu Ting, et al. Conversion between EIT and Fano spectra in a microring-Bragg grating coupled-resonator system[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(8): 081105.
- [42] Zhang Weifeng, Li Wangzhe, Yao Jianping. Optically tunable Fano resonance in a grating-based Fabry-Perot cavity-coupled microring resonator on a silicon chip[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2474-2477.
- [43] 刘春娟, 孙晓丽, 吴小所, 等. 槽型相移布拉格光栅微环谐振器及其传感特性[J]. *光子学报*, 2023, 52(6): 0623003.
Liu Chunjuan, Sun Xiaoli, Wu Xiaosuo, et al. Slot phase-shifting Bragg grating microring resonator and its sensing characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(6): 0623003.
- [44] De Carlo M, De Leonardis F, Dell'Olio F, et al. Bragg-

- grating-coupled Fano resonator with dissipative coupling for anti-PT-symmetric gyroscopes[C]//2024 24th International Conference on Transparent Optical Networks. Bari: IEEE, 2024: 1-4.
- [45] Arbabi A, Kang Y M, Lu C Y, et al. Realization of a narrowband single wavelength microring mirror[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(9): 091105.
- [46] Teraoka I. A hybrid filter of Bragg grating and ring resonator[J]. *Optics Communications*, 2015, 339: 108-114.
- [47] Huang Qiangsheng, Ma Keqi, He Sailing. Experimental demonstration of single mode-splitting in microring with Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(13): 1402-1405.
- [48] Ma Tao, Sun Lei, Yuan Jinhui, et al. Integrated label-free optical biochemical sensor with a large measurement range based on an angular grating-microring resonator[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(18): 4784-4790.
- [49] Jin Xin, Yang Yuede, Xiao Jinlong, et al. Mode control for microring resonators with inner-wall gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(9): 1906-1912.
- [50] 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.
- [51] De Leonardis F, Campanella C E, Troia B, et al. Performance of SOI Bragg grating ring resonator for nonlinear sensing applications[J]. *Sensors*, 2014, 14(9): 16017-16034.
- [52] Zhao Chaoying, Zhang Lei, Zhang Chengmei. Compact SOI optimized slot microring coupled phase-shifted Bragg grating resonator for sensing[J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 212-216.
- [53] Petruškevičius R, Balčytis A, Urbonas D, et al. Microring resonators with circular element inner-wall gratings for enhanced sensing[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, 59: S00D02.
- [54] Brunetti G, Dell'Olio F, Contedua D, et al. Comprehensive mathematical modelling of ultra-high Q grating-assisted ring resonators[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(3): 035802.
- [55] 刘春娟, 王嘉伟, 吴小所, 等. 一种光栅辅助狭缝微环谐振器的传感特性[J]. *光学学报*, 2022, 42(16): 1613001.
- Liu Chunjuan, Wang Jiawei, Wu Xiaosuo, et al. Sensing characteristics of grating-assisted slot microring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 1613001.
- [56] Zhu Yanjie, Liang Longxue. Sensing characteristics of a three-ring grating slit micro ring resonator[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2597(1): 012006.
- [57] Cheng Weiqing, Sun Xiao, Ye Shengwei, et al. Sidewall grating slot waveguide microring resonator biochemical sensor[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(19): 5113-5116.
- [58] Gu Hongjun, Gong He, Wang Chunxue, et al. Compact inner-wall grating slot microring resonator for label-free sensing[J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 5038.
- [59] Zhao C Y, Chen P Y, Zhang L. Numerical analysis of effective refractive index sensor based on slot micro-ring and Bragg grating[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2019, 33(25): 1950292.
- [60] Liu Chunjuan, Sang Changlin, Wu Xiaosuo, et al. Grating double-slot micro-ring resonator for sensing[J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127280.
- [61] Cheng Weiqing, Sun Xiao, Ye Shengwei, et al. Double slot micro ring resonators with inner wall angular gratings as ultra-sensitive biochemical sensors[J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 20034.
- [62] Li Hanyue, Wang Ruxue, Wu Aimin. Ultra-large FSR filter based on Bragg grating-subwavelength grating slot microring resonator[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Laser, Optics and Optoelectronic Technology (LOPET 2023). 2023: 127572H.
- [63] Awasthi K, Malviya N, Kumar A. Subwavelength grating slot waveguide based refractometric chemical sensor with improved sensitivity[C]//VLSI, Microwave and Wireless Technologies. Singapore: Springer, 2026: 107-114.
- [64] Barrios C A, Gylfason K B, Sánchez B, et al. Slot-waveguide biochemical sensor[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(21): 3080-3082.
- [65] Luque-González J M, Sánchez-Postigo A, Hadij-ElHouati A, et al. A review of silicon subwavelength gratings: building break-through devices with anisotropic metamaterials[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(11): 2765-2797.
- [66] Zhang Bihao, Deng Kaihao, Chu Wei, et al. Ultra-low-loss Si_3N_4 grating coupler featuring gradient subwavelength grating, interlayer coupling and Bragg reflection[J]. *Optics Communications*, 2026, 615: 133266.
- [67] Chakravarty S, Chen Xiangning, Tang Naimei, et al. Review of design principles of 2D photonic crystal microcavity biosensors in silicon and their applications[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016, 9(2): 206-224.