光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022033102

基于亚波长光栅结构的折射率传感研究进展

徐亚萌*，付晨阳，孙士博

（长春理工大学 物理学院，长春 130022）

摘　要： 新一代片上传感系统提出了微型化、集成化、低成本等发展需求，硅基集成波导器件适应其发展趋势，其中亚波长光栅结构因独特的模场分布特性在折射率传感领域备受青睐。文章首先对亚波长光栅波导的工作原理进行了介绍，阐述其在折射率传感领域的优势，然后按器件结构分类梳理了亚波长光栅结构折射率传感的最新研究进展，并分析和总结了不同器件结构的优缺点，最后展望了基于亚波长光栅结构的折射率传感未来的发展方向。

关键词： 硅基；亚波长光栅；微腔；微环谐振器；折射率传感

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0254－07

Research Progresses of Refractive Index Sensing Based on Subwavelength Grating Structures

XU Yameng, FU Chenyang, SUN Shibo

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

Abstract: New generation on-chip sensing system puts forward the requirements of miniaturization, integration, low cost, etc. Silicon-based integrated waveguide devices adapt to its development trend, and the sub-wavelength grating structure is favored in the field of refractive index sensing because of its unique mode distribution characteristics. In this paper, first, the operating principles of the sub-wavelength grating waveguide are introduced, focusing on its advantages in the field of refractive index sensing. Then, the latest research progress of refractive index sensing based on subwavelength grating structures are sorted out according to the classification of device structures, and their advantages and disadvantages are analyzed and summarized simultaneously. Finally, the future development of refractive index sensing based on sub-wavelength grating structures is discussed.

Key words: silicon-based; subwavelength grating; micro-cavity; microring resonator; refractive index sensing

0　引言

硅基集成光学器件以硅和硅化合物为基础材料，其硅波导芯层与包层/衬底的折射率对比度高，可在微纳米量级尺寸下实现光的强限制，十分有利于器件小尺寸和高集成度的实现，并且其加工工艺与现有的微电子加工工艺相兼容，已被广泛应用于光通信[1]、微波信号处理[2]、量子信号处理[3]等领域。在传感领域，硅基集成光学器件适应于传感器件的小型化、单片集成、低成本等发展趋势，已经成为新一代片上传感系统中主要传感器件的有力候选。基于硅基集成器件的传感系统应用前景广阔，如医疗诊断[4]、食品安全[5]和环境监测[6]等。

硅基集成波导器件在波导芯外有倏逝场存在，它可与包层的待测分析物相互作用，将待测分析物的折射率变化转换为光信号的变化，通过光信号的监测实现传感功能。传感器的传感性能用传感灵敏度 S 来衡量，它表征光信号随待测分析物折射率变

收稿日期：2022－03－31.

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

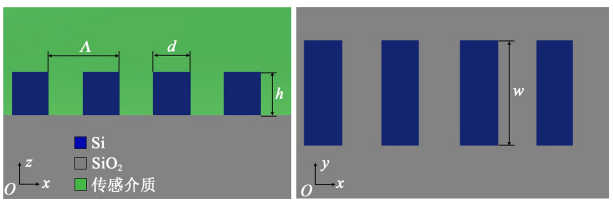
* **通信作者：**徐亚萌　**E-mail:** yamengxu@cust.edu.cn

化的灵敏情况，定义为传感器光信号变化量与待测分析物折射率变化量的比值。对于最常见的条波导来说，大量的光被限制在芯层中传播，倏逝场微弱，使条波导器件与包层待测分析物的相互作用受限，导致条波导器件的传感灵敏度较低。为了提升传感灵敏度，槽波导[7-9]和一维光子晶体波导[10-12]被提出，亚波长光栅波导结构[13-16]也受到越来越多的关注，它不仅利用亚波长尺度的分割使模式离域以增加光与物质的相互作用体积，而且在硅块之间的分析物所在处引入了高场强，可进一步增强光与物质的相互作用，使其在折射率传感领域独具优势。

本文首先从亚波长光栅波导的结构、模场分布、工作原理等方面阐述其在传感领域的优势，并介绍亚波长光栅波导的各种新型演变结构。随后介绍亚波长光栅波导结构器件的折射率传感研究进展，其中重点介绍基于亚波长光栅波导的微腔和微环腔型器件的折射率传感研究进展。最后给出基于亚波长光栅波导结构折射率传感的研究热点和发展趋势。

1　亚波长光栅

亚波长光栅是指光栅周期远小于入射光波长的光栅[17]，图 1 所示为亚波长光栅波导结构，它是一个周期性的分段波导，其周期 Λ 远小于光波波长 λ，占空比为 $D=d/\Lambda$，d 为亚波长光栅中硅块的宽度，w 和 h 分别为亚波长光栅波导的宽度、高度。亚波长光栅波导芯层材料为硅，衬底材料为二氧化硅，包层为待测分析物。



（a）　侧视图　　（b）　俯视图

图 1　亚波长光栅波导

亚波长光栅波导的能带色散曲线如图 2 所示，此时其结构参数为 $\Lambda=300$ nm，$D=0.6$，$w=500$ nm，$h=220$ nm，亚波长光栅波导材料硅的折射率为 3.48，衬底二氧化硅的折射率为 1.444，包层为水，折射率为 1.333。由图 2 可以看出，亚波长光栅波导的工作状态与工作波长息息相关。亚波长光栅波导的工作光波长决定了其三种工作状态[17]，即分别工作在反射区域、衍射区域和亚波长区域。当波长 λ 约等于光栅周期 Λ 时，光在周期波导中被反射，如图 3(a)所示，为反射区域；当波长 λ 小于光栅周期 Λ 时，光从周期波导中辐射出来，损耗极大，如图 3(b)所示，为衍射区域；当波长 λ 远大于光栅周期 Λ 时，其光栅单元间距足以抑制由其周期性引起的衍射效应，此时光在波导中的传播模式为布洛赫模式，光近乎无损耗地传播，此时亚波长光栅波导可近似等效为均匀的介质波导，光在波导中的传输如图 3(c)所示，为亚波长区域。

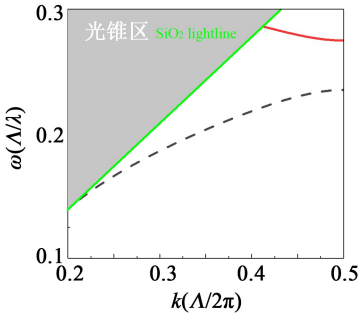
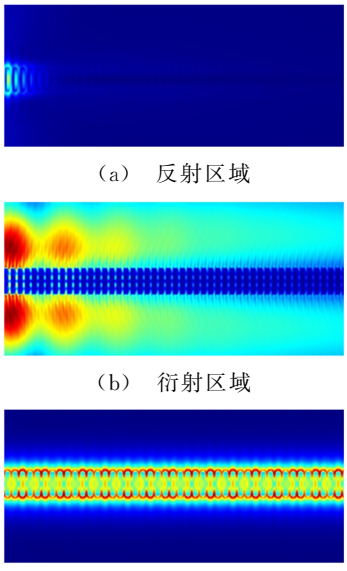


图 2　亚波长光栅波导能带曲线



（a）　反射区域

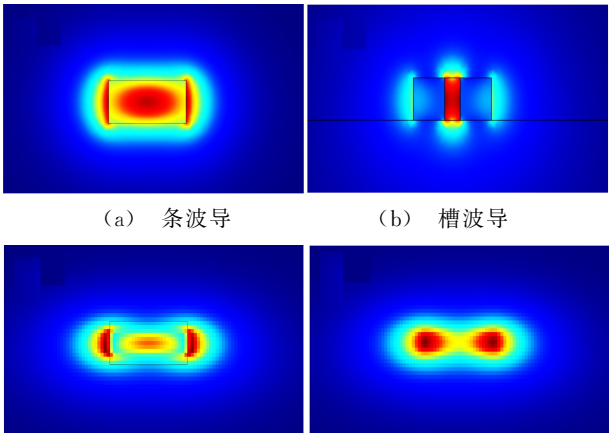
（b）　衍射区域

（c）　亚波长区域

图 3　亚波长光栅在三种工作状态下的光场图

条波导、槽波导和亚波长光栅波导的模场分布如图 4 所示，此时条波导和槽波导的波导宽度和高度均与亚波长光栅波导一致。由图 4(a)可见，条波导中光场被紧紧地束缚在波导芯中，仅有微弱的倏逝场存在于待测分析物中。槽波导将光场限制在槽中，此时光场与待测分析物重叠，可充分接触，光与待测分析物的相互作用被增强，如图 4(b)所示。亚波长光栅波导的模场分布如图 4(c)和(d)所示，在硅块位置和两个硅块的中间区域均有较强的光场，

光场被集中在了折射率较低的待测分析物区。亚波长光栅波导不仅利用亚波长尺度的分割使模式离域以增加光与物质的相互作用体积，而且在硅块之间的分析物所在处引入了高场强，进一步增强光与物质的相互作用，以上模场特性使其在传感领域具有独特的优势。



(a) 条波导 (b) 槽波导

(c) 亚波长光栅波导硅块 (d) 亚波长光栅波导缝隙

图 4 三种波导的模场分布图

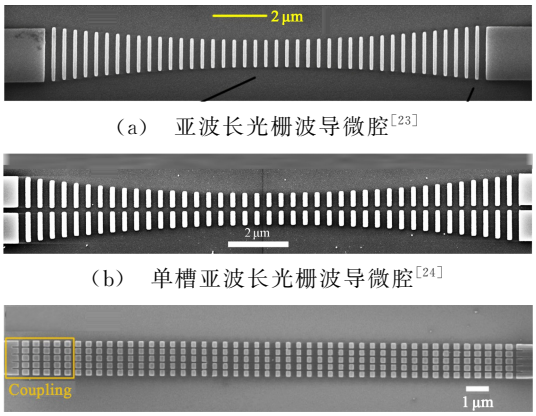
在亚波长光栅波导结构的基础上，为了进一步提高传感性能，各种基于亚波长光栅波导的优化工作和结构演变工作开始大量涌现。亚波长光栅波导的结构参数被优化[18]，包括亚波长光栅波导的波导层厚度、宽度、占空比等，研究发现这些结构参数均会影响亚波长光栅波导的传感灵敏度。另外，单槽和多槽等结构被引入亚波长光栅波导[19-20]，这些结构可进一步释放波导中的光场，提高光与待测物质的相互作用。工艺上，过刻的亚波长光栅波导[21-22]被提出，通过过刻的方式让亚波长光栅波导尽量地暴露在待测分析物中，提高光与物质的相互作用，提高传感灵敏度。

综上所述，亚波长光栅波导结构在折射率传感领域独具优势，下文将详细介绍基于亚波长光栅波导结构的折射率传感研究进展。

2 基于亚波长光栅结构的折射率传感研究进展

2.1 亚波长光栅微腔的折射率传感研究进展

利用亚波长光栅波导结构构成微腔，通过监测其谐振峰的波长位置随外界待测传感物质折射率的变化可实现传感功能。2012 年，浙江大学的研究小组制作了亚波长光栅波导微腔[23]，如图 5(a)所示，其光栅中的硅条宽度由腔内向外逐渐增大构成微腔，此时局限在腔中的光场有很大一部分位于硅条之间的空隙中，可使光场与待测传感物质充分接触，灵敏度达到 269 nm/RIU。随后，该小组在亚波长光栅波导中引入单槽波导[24]，如图 5(b)所示，进一步释放亚波长光栅波导的光场限制，将传感灵敏度提升至 410 nm/RIU。2019 年，宁波大学和华盛顿大学的合作研究小组提出了多槽的亚波长光栅波导微腔结构[25]，如图 5(c)所示，该波导结构在光传播方向上的周期固定，利用该方向上硅块的宽度渐变构成微腔，在垂直光传播的方向上为多槽结构，此方案将传感灵敏度进一步提升至 586 nm/RIU。综上可见，基于亚波长光栅波导的微腔型折射率传感器件的发展趋势与亚波长光栅波导结构的演变相一致，均致力于释放波导中的光场以进一步增强光场与物质的相互作用，进而提高传感灵敏度。



(a) 亚波长光栅波导微腔[23]

(b) 单槽亚波长光栅波导微腔[24]

(c)多槽亚波长光栅波导微腔[25]

图 5 各种亚波长光栅微腔的结构

2.2 亚波长光栅微环的折射率传感研究进展

作为硅基光学器件库的组件之一，微环谐振器因为其优异的谐振性能受到了传感领域的重点关注，其传感原理是包层待测传感物质的变化会引起微环波导的有效折射率发生变化，进而使微环的谐振条件发生变化，通过监测谐振峰的移动可实现传感功能。利用亚波长光栅波导构成圆形微环用于折射率传感的工作是最先出现的。华盛顿大学和英属哥伦比亚大学的合作研究小组于 2014 年提出圆形亚波长光栅波导微环[26]，利用半径 30 μm 的微环达到了 402 nm/RIU 的传感灵敏度。随后，该小组利用半径为 20 μm 的亚波长光栅微环在水中实现了 383 nm/RIU 的传感灵敏度，在空气中实现了 270 nm/RIU 传感灵敏度[27]。另外，该小组利用半

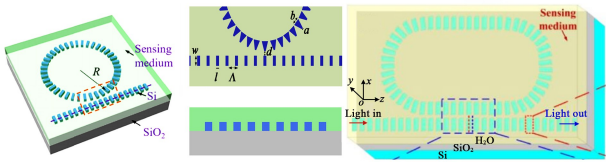
径为 30 μm 的微环还实现了 490 nm/RIU 的折射率传感灵敏度[28]。由以上工作可见，圆形亚波长光栅波导微环的半径需要维持在 20 μm 以上，这是因为当弯曲半径变小时，亚波长光栅波导对光的束缚能力明显变弱，会带来较大的弯曲损耗，影响传感器的工作性能。

针对上述问题，梯形硅块结构的圆形亚波长光栅波导微环被提出。2016 年，北京邮电大学和得克萨斯大学奥斯汀分校的合作研究小组提出梯形硅块结构的亚波长光栅波导微环[29]，如图 6(a)所示，该方案将微环的半径缩小至 10 μm，实现了 440 nm/RIU 的传感灵敏度。2017 年，华中科技大学的研究小组利用梯形硅块的方案将微环的半径缩小至 5.042 μm[30]，利用亚波长光栅总线波导中的耦合器与微环相互作用实现了 Fano 线型，在葡萄糖溶液浓度的检测中达到了 363 nm/RIU 的传感灵敏度。

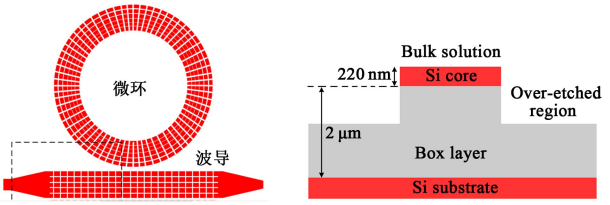
区别于圆形亚波长光栅波导，跑道形微环的总线波导和环状波导的耦合长度增加，在器件设计上更加灵活。2017 年，北京邮电大学和得克萨斯大学奥斯汀分校的合作研究小组提出跑道型亚波长光栅微环[31]，如图 6(b)所示，此工作利用 TM 模式增强光与物质相互作用，使得该器件在水环境中达到了 429.7 nm/RIU 的传感灵敏度。2021 年，该小组证明跑道型亚波长光栅微环[32]可提高微环临界耦合的工艺误差容忍度，在不同浓度的甘油下对器件进行测试，得到了 412 nm/RIU 的传感灵敏度。

为了进一步提高传感灵敏度，基于亚波长光栅演变波导结构的微环型折射率传感工作也开始涌现。在基于单槽亚波长光栅微环[33]和双槽亚波长光栅微环[34]的折射率传感工作基础上，2019 年，华盛顿大学和英属哥伦比亚大学的合作研究小组利用多槽亚波长光栅波导构成了微环结构[35]，如图 6(c)所示，实现了 580 nm/RIU 的传感灵敏度。同年，该小组提出了过刻的亚波长光栅波导微环[36]，如图 6(d)所示，达到了 575 nm/RIU 的传感灵敏度。同年，得克萨斯大学奥斯汀分校的合作研究小组提出了带有基座的亚波长光栅微环[37]，如图 6(e)所示，达到了 545 nm/RIU 的传感灵敏度。

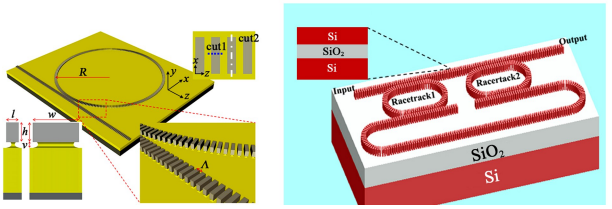
除了单个微环结构，两个及多个微环级联的亚波长光栅微环结构也被提出，并用于折射率传感应用。2019 年，东南大学的研究小组提出双亚波长光栅微环级联结构[38]，如图 6(f)所示，利用实现的 Fano 谱线进行折射率传感，计算得到的传感灵敏度为 500 nm/RIU。次年，该小组又利用 5 个微环级联实现了传感灵敏度为 538 nm/RIU 的折射率传感[39]。



(a) 梯形亚波长光栅微环[29]　(b) 跑道型亚波长光栅微环[31]



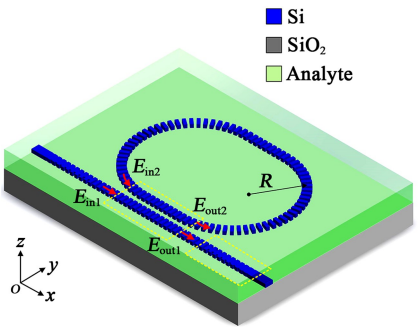
(c) 多槽亚波长光栅微环[35]　(d) 过刻的亚波长光栅微环[36]



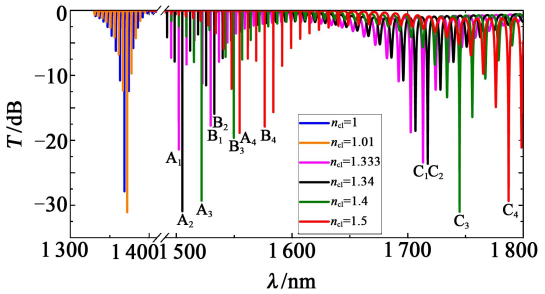
(e) 有基座的亚波长光栅微环[37]　(f) 双亚波长光栅微环级联[38]

图 6　各种亚波长光栅微环结构

然而，以上方案虽然有效提高了传感灵敏度，但是可探测范围受到限制。这是由于微环谐振器实现传感的原理是追踪某一谐振峰随待测物折射率变化的偏移量实现，该方法受到了微环的自由光谱范围(FSR)的限制，即当谐振峰受外界折射率变化的影响而产生偏移时，仅可以判断出一个 FSR 内的偏移量。最近，本研究小组提出了基于亚波长光栅结构微环谐振器的包络谱探测传感方案，如图 7 所示，其利用亚波长光栅波导结构在微环中引入强色散，使器件产生包络型谱线，通过追踪包络谱随外界折射率的变化量实现传感功能。以追踪整个包络谱取代了追踪单个谐振峰，使探测范围不再受限于FSR，提



(a) 跑道型亚波长光栅波导微环结构图



（b） 包络谱随着外界折射率变化的漂移

图 7 基于亚波长光栅微环的包络谱探测传感方案

高了器件的可探测范围。另外，微环中的亚波长光栅结构保证了器件的传感灵敏度，该方案可实现兼具宽可探测范围和高传感灵敏度的集成型折射率传感器。

表 1 不同亚波长光栅微环的折射率传感特性

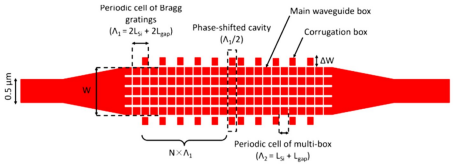
传感原理	结构	S/(nm/RIU)	Δn(RIU)
单峰探测	圆型亚波长光栅微环[26]	402	受限于 FSR
	圆型亚波长光栅微环[27]	383	
	亚波长光栅微环(TE 模式)[28]	490	
	梯形亚波长光栅微环[29]	440	
	梯形亚波长光栅微环(Fano 谱线)[30]	363	
	跑道型亚波长光栅微环(TM 模式)[31]	429.7	
	跑道型亚波长光栅微环[32]	412	
	多槽亚波长光栅微环[35]	580	
	过刻的亚波长光栅微环[36]	575	
	有基座的亚波长光栅微环[37]	545	
	双亚波长光栅微环级联[38]	500 *	
	多亚波长光栅微环级联[39]	538 *	
包络谱探测	跑道型亚波长光栅微环	600 *	0.8 *

“*”表示理论研究。

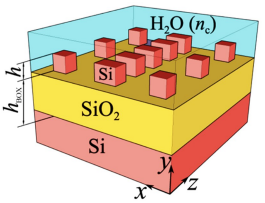
2.3 亚波长光栅其他结构折射率传感的研究进展

除了集成光学波导的最常见器件结构外，亚波长光栅波导与布拉格腔的耦合结构也被提出用于折射率传感。2019 年，华盛顿大学和英属哥伦比亚大学的合作研究小组利用多槽亚波长光栅波导与相移布拉格光栅进行耦合[40]，如图 8(a)所示，以不同浓度的盐水为传感待测物质，实测传感灵敏度为 579.2 nm/RIU。次年，西班牙马拉加大学与捷克和加拿大的合作研究小组也提出了类似方案[41]，如图 8(b)所示，但是他们使用了 1 310 nm 作为工作波长以去除水吸收的影响，实测传感灵敏度达到 507 nm/RIU。

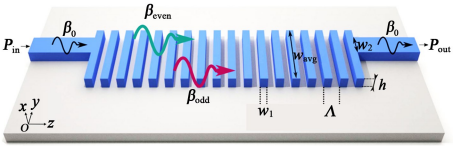
另外，基于亚波长光栅的多模干涉仪被相继提出用于折射率传感。2019 年，西班牙瓦伦西亚理工大学的研究小组利用多模亚波长光栅实现了折射率传感[42-43]，结构如图 8(c)所示，实测传感灵敏度达 2 270 nm/RIU。同年，美国陆军研究所的研究小组提出了基于亚波长光栅波导的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构[44]，如图 8(d)所示，经实验检测的灵敏度达到 300 nm/RIU。2021 年，中国地质大学与武汉光电研究中心和南方科技大学的合作研究小组，提出了利用亚波长光栅波导中两个 TE 模式的色散拐点处用于折射率传感[45]，理论计算的传感灵敏度高达 38 000 nm/RIU。



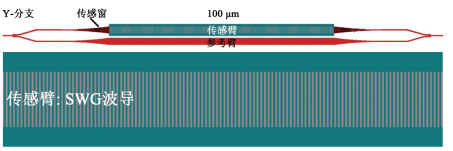
（a） 多槽亚波长光栅波导与布拉格腔的耦合结构[40]



（b） 亚波长光栅波导与布拉格腔的耦合结构[41]



（c） 多模亚波长光栅波导[42-43]



（d） 基于亚波长光栅波导的 MZI[44]

图 8 其他基于亚波长光栅的传感器件结构

3 总结及展望

亚波长光栅波导因其模场、损耗和色散等特性，在折射率传感领域展现了独特的优势。现有亚波长光栅器件的折射率传感工作，包括微腔、微环腔、多模波导和 MZI 等结构，均利用亚波长光栅释放波导对光场的束缚，增强光与物质的相互作用，以提高传感灵敏度。随着光通信等向近红外及中红外波段发展，亚波长光栅器件在近红外及中红外波段传感中也将会有优异的表现。另外，随着氮化硅、薄膜铌酸锂等材料的加工工艺发展，基于不同材料平台的亚波长光栅传感器件也将获得更多关注。

参考文献：

[1] Reed G T, Mashanovich G Z, Gardes F, et al. Silicon optical modulators[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 518-526.

[2] Jiang W, Xu L, Liu Y, et al. Optical all-pass filter in silicon-on-insulator[J]. ACS Photonics, 2020, 7(9): 2539-2546.

[3] Ali W E, Wolfram P, Kartik S, et al. Hybrid integrated quantum photonic circuits[J]. Nature Photonics, 2020, 14: 285-298.

[4] Soler M, Calvo-Lozano O, Estevez M C, et al. Nanophotonic biosensors: driving personalized medicine [J]. Optics and Photonics News, 2020, 31(4): 24-31.

[5] Wang S, Ramachandran A, Ja S J. Integrated microring resonator biosensors for monitoring cell growth and detection of toxic chemicals in water[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2009, 24(10): 3061-3066.

[6] Badri S H. Transmission resonances in silicon subwavelength grating slot waveguide with functional host material for sensing applications[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 136: 106776.

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

[8] Radjenovic B, Radmilovic-Radjenovic M. Excitation of confined modes in silicon slotted waveguides and microring resonators for sensing purposes[J]. IEEE Sensors J., 2014, 14(5): 1412-1417.

[9] Kargar A, Chao C Y. Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring sensors [J]. J. of the Optical Society of America A, 2011, 28(4): 596-603.

[10] 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.

[11] Urbonas D, Balcytis A, Vaskevicius K, et al. Air and dielectric bands photonic crystal microring resonator for refractive index sensing [J]. Opt. Lett., 2016, 41(15): 3655-3658.

[12] Xu Y, Hu S, Kong M. Air-mode photonic crystal micro-ring resonator with enhanced quality factor for refractive index sensing[J]. IEEE Photonics J., 2020, 12(3): 1-11.

[13] Flueckiger J, Schmidt S, Donzella V, et al. Sub-wavelength grating for enhanced ring resonator biosensor [J]. Opt. Express, 2016, 24(14): 15672-15686.

[14] Wang Z, Xu X, Fan D, et al. Geometrical tuning art for entirely subwavelength grating waveguide based integrated photonics circuits[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-7.

[15] Wang Z, Xu X, Fan D, et al. High quality factor subwavelength grating waveguide micro-ring resonator based on trapezoidal silicon pillars[J]. Opt. Lett., 2016, 41(14): 3375-3378.

[16] Yan H, Huang L, Xu X, et al. Breaking the limitation of evanescent wave sensing with subwavelength grating waveguides[C]// CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2017: JTh3M. 3.

[17] Robert H, Przemek J B, Pavel C, et al. Waveguide sub-wavelength structures: A review of principles and applications[J]. Laser & Photonics Rev., 2015, 9(1): 25-49.

[18] Wangüemert-Pérez J G, Hadij-ElHouati A, Sánchez-Postigo A, et al. Subwavelength structures for silicon photonics biosensing[J]. Optics & Laser Technol., 2019, 109: 437-448.

[19] Odeh M, Twayana K, Sloyan K, et al. Mode sensitivity analysis of subwavelength grating slot waveguides[J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(5): 1-10.

[20] Luan E, Yun H, Laplatine L, et al. Enhanced sensitivity of subwavelength multibox waveguide microring resonator label-free biosensors [J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electronics, 2018, 25(3): 1-11.

[21] Chang C W, Xu X, Chakravarty S, et al. Pedestal subwavelength grating metamaterial waveguide ring resonator for ultra-sensitive label-free biosensing [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 141: 111396.

[22] Luan E, Awan K M, Cheung K C, et al. High-performance sub-wavelength grating-based resonator sensors with substrate overetch[J]. Opt. Lett., 2019, 44(24): 5981-5984.

[23] Yao K, Shi Y. 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.

[24] Xu P, Yao K, Zheng J, et al. Slotted photonic crystal nanobeam cavity with parabolic modulated width stack for refractive index sensing[J]. Opt. Express, 2013, 21(22): 26908-26913.

[25] Xu P, Zheng J, Zhou J, et al. Multi-slot photonic crystal cavities for high-sensitivity refractive index sensing[J]. Opt. Express, 2019, 27(3): 3609-3616.

[26] Schmidt S, Flueckiger J, Wu W X, et al. Improving the performance of silicon photonic rings, disks, and Bragg gratings for use in label-free biosensing[C]// Biosensing and Nanomedicine Ⅶ. Inter. Society for Optics and Photonics, 2014, 9166: 91660M.

[27] Donzella V, Sherwali A, Flueckiger J, et al. Design and fabrication of SOI micro-ring resonators based on sub-wavelength grating waveguides[J]. Opt. Express, 2015, 23(4): 4791-4803.

[28] Flueckiger J, Schmidt S, Donzella V, et al. Sub-wavelength grating for enhanced ring resonator biosensor [J]. Opt. Express, 2016, 24(14): 15672-15686.

[29] Yan H, Huang L, Xu X, et al. Unique surface sensing property and enhanced sensitivity in microring resonator biosensors based on subwavelength grating waveguides[J]. Opt. Express, 2016, 24(26): 29724-29733.

[30] Tu Z, Gao D, Zhang M, et al. High-sensitivity complex refractive index sensing based on Fano resonance in the subwavelength grating waveguide micro-ring resonator[J].

Opt. Express, 2017, 25(17): 20911-20922.

[31] Huang L, Yan H, Xu X, et al. Improving the detection limit for on-chip photonic sensors based on subwavelength grating racetrack resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25(9): 10527-10535.

[32] Huang L, Yan H, Xiang L, et al. Subwavelength racetrack resonators with enhanced critically coupled tolerance for on-chip sensing[J]. IEEE Access, 2021, 9: 23424-23431.

[33] Ruan Z, Zhou N, Zheng S, et al. Releasing the light field in subwavelength grating slot microring resonators for athermal and sensing applications[J]. Nanoscale, 2020, 12(29): 15620-15630.

[34] Kazanskiy N L, Khonina S N, Butt M A. Subwavelength grating double slot waveguide racetrack ring resonator for refractive index sensing application[J]. Sensors, 2020, 20(12): 3416.

[35] Luan E, Yun H, Laplatine L, et al. Enhanced sensitivity of subwavelength multibox waveguide microring resonator label-free biosensors[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electronics, 2018, 25(3): 1-11.

[36] Luan E, Awan K M, Cheung K C, et al. High-performance sub-wavelength grating-based resonator sensors with substrate overetch[J]. Opt. Lett., 2019, 44(24): 5981-5984.

[37] Chang C W, Xu X, Chakravarty S, et al. Pedestal subwavelength grating metamaterial waveguide ring resonator for ultra-sensitive label-free biosensing[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 141: 111396.

[38] Wen Y, Sun Y, Deng C, et al. High sensitivity and FOM refractive index sensing based on Fano resonance in all-grating racetrack resonators[J]. Opt. Communications, 2019, 446: 141-146.

[39] Sun Y, Hu G, Cui Y. Subwavelength grating waveguide racetrack-based refractive index sensor with improved figure of merit[J]. Appl. Opt., 2020, 59(33): 10613-10617.

[40] Luan E, Yun H, Ma M, et al. Label-free biosensing with a multi-box sub-wavelength phase-shifted Bragg grating waveguide[J]. Biomedical Opt. Express, 2019, 10(9): 4825-4838.

[41] Pérez-Armenta C, Ortega-Moñux A, Ctyroký J, et al. Narrowband Bragg filters based on subwavelength grating waveguides for silicon photonic sensing[J]. Opt. Express, 2020, 28(25): 37971-37985.

[42] Torrijos-Morán L, Griol A, García-Rupérez J. Experimental study of subwavelength grating bimodal waveguides as ultrasensitive interferometric sensors[J]. Opt. Lett., 2019, 44(19): 4702-4705.

[43] Torrijos-Morán L, García-Rupérez J. Single-channel bimodal interferometric sensor using subwavelength structures[J]. Opt. Express, 2019, 27(6): 8168-8179.

[44] Bickford J R, Cho P S, Farrell M E, et al. The investigation of subwavelength grating waveguides for photonic integrated circuit based sensor applications[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electronics, 2019, 25(3): 1-10.

[45] Huang T, Xu G, Tu X, et al. Design of highly sensitive interferometric sensors based on subwavelength grating waveguides operating at the dispersion turning point[J]. J. of the Optical Society of America B, 2021, 38(9): 2680-2686.

作者简介：

徐亚萌(1987—)，女，吉林省人，2009年本科毕业于华中科技大学，2014年博士毕业于华中科技大学光学工程专业，现为副教授，主要研究方向为硅基微纳光学器件特性及其传感技术。