动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.001

基于硅基微环谐振器的折射率传感研究综述

徐亚萌，孔　梅*

（长春理工大学 理学院 光电信息科学与技术系，长春 130022）

摘　要： 片上折射率传感在安全检查、环境监测、健康诊断和食品监督等领域有着广阔的应用前景，基于硅基微环谐振器的折射率传感器具有微型化、集成化等优点，已成为当前研究的热点。文章首先对硅基微环谐振器的折射率传感探测原理进行了介绍，然后依据探测原理分类梳理了国内外硅基微环折射率传感的最新研究进展，并分析总结了不同传感探测原理的优缺点，最后讨论了现阶段硅基微环谐振器在折射率传感中存在的问题和未来的发展方向。

关键词： 微环谐振器；波导器件；折射率传感；Fano 谐振；包络谱传感

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0455－09

Research Progresses of Refractive Index Sensing Based on Silicon-on-Insulator Microring Resonators

XU Yameng，KONG Mei

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

Abstract： On-chip refractive index sensing has broad application prospects in the fields of safety inspection，environmental monitoring，health diagnosis，food supervision，etc. Currently，the microring resonator refractive index sensor based on silicon-on-insulator platform has become a research hot spot due to its capacities on miniaturization and integration. In this paper，its principles are introduced firstly，and then，the latest research progresses in and abroad are sorted out according to the principles of detection，and also the advantages and disadvantages are analyzed and summarized simultaneously. Finally，the existing problems and future development trends of refractive index sensing based on silicon-on-insulator microring resonators are discussed.

Key words： microring resonator；waveguide devices；refractive index sensing；Fano resonance；envelope spectrum sensing

0　引言

传感技术作为推动国家乃至世界信息化产业进步的重要标志，在军事反恐[1]、环境监测[2]、医疗保健[3]、食品安全[4-5]等领域有着巨大的应用前景。微型化和集成化的片上传感系统已经成为未来传感技术的发展趋势。硅基器件具有结构紧凑、对通信波段的光透明，且加工工艺与现有微电子工艺相兼容等优势。因此，作为片上传感系统中关键器件的理想候选，硅基传感器件受到了广泛关注。

周围环境物质的折射率是十分关键的传感监测参量，可以直接或间接地反映周围环境物质的性质和状态。折射率传感即利用折射率来监测周围环境物质的变化。传感灵敏度和可探测范围是衡量折射率传感性能的重要指标，直接反映了可被有效探测的物质折射率的变化精度和范围。在提高传感灵敏度和拓宽可探测范围的核心目标指引下，围绕硅基折射率传感开展的研究工作不断涌现。在众多硅基器件中，微环谐振器[6]的结构简单、紧凑，目前硅基

收稿日期：2020－04－24.

基金项目：国家自然科学基金项目(61905022).

* **通信作者：**孔　梅　**E-mail：** kongmei@cust.edu.cn

折射率传感器件的高灵敏度和宽可探测范围均基于硅基微环谐振器实现。

然而，用于折射率传感的微环谐振器也面临高传感灵敏度和宽可探测范围不可兼得的发展瓶颈。例如，已有报道实测微环谐振器传感灵敏度达 10^4 nm/RIU(Refractive Index Unit)量级，但高传感灵敏度只在某一折射率附近出现且可探测范围仅为 10^{-3} RIU 量级[6]。也有研究报道将硅基折射率传感器件的可探测范围拓宽至 1 RIU，但此时传感灵敏度下降为 10^2 nm/RIU 量级[7]。这在实际应用中会带来一些问题。对于溶液和气体等待测物质来说，折射率只与待测物质的浓度或表面密度有关，探测信号不会随待测物质体积的减小而减弱，这使得折射率传感适用于微量物质的探测。当折射率传感应用于微量物质探测时，物质的折射率变化可能非常微小，需要提高器件传感灵敏度以提升其探测物质微量变化的能力。但是，相同物质在不同浓度之间的折射率差也较大，此时需要拓宽可探测范围。以石油为例，其折射率常被用来检验油品质量，但其折射率与产地、加工过程和油品组成等均有关系，如产自羊三木和欢喜岭的石油，经过相同加工过程，折射率差可小至 10^{-4} RIU 量级，而同为大庆产的石油，经过不同的加工过程，折射率差可达 10^{-1} RIU 量级。仅有高灵敏度或仅有宽可探测范围的折射率传感器已经不能满足此类紧系国家重大需求的应用要求。综上所述，硅基微环传感器是最有前景的集成型折射率传感器件之一，研究其传感灵敏度和可探测范围的同时提升具有十分重要的意义。

1 微环谐振器的折射率传感原理

典型的全通型微环谐振器的分析模型如图 1 所示。全通型微环谐振器可看成由一段弯曲波导和一个耦合器组成，耦合器的传输矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{t1} \\ E_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & \kappa \\ -\kappa^* & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中，E_{i1}，E_{i2}，E_{t1} 和 E_{t2} 表示各个位置的光场振幅，t 为振幅自耦合系数，κ 为振幅交叉耦合系数，假设耦合区无损耗，则它们满足以下关系：

$$|t^2|+|\kappa^2|=1 \tag{2}$$

把沿着环波导传输的各种光损耗并入环的衰减因子，则光在微环中传输一周后光场振幅关系为

$$E_{i2}=\alpha e^{j\theta}E_{t2} \tag{3}$$

其中，α 为环程振幅传输因子，$\theta=2\pi n_{\text{eff}}L/\lambda_0$ 为绕环一周的相位改变，n_{eff} 为微环波导的有效折射率，$L=2\pi R$ 为微环周长，R 为微环半径，λ_0 是真空中的光波长。

由式(1)～(3)可得微环的传输函数为

$$T=\left|\frac{E_{t1}}{E_{i1}}\right|^2=\frac{t^2+\alpha^2-2\alpha t\cos\theta}{1+\alpha^2t^2-2\alpha t\cos\theta} \tag{4}$$

根据振幅自耦合系数 t 和环程振幅传输因子 α 的关系，可以将微环的耦合状态分为欠耦合态($t>\alpha$)、临界耦合态($t=\alpha$)和过耦合态($t<\alpha$)。满足临界耦合条件时，谐振峰处的光场透过率为零，微环消光比达到最大。

对于硅基微环谐振器来说，当光在其中传输时，会有倏逝场存在于微环波导芯外，倏逝场能够感应波导外界物质的折射率变化，该变化可被转化为可测量的光学特征参数，即通过监测谐振波长漂移量或特定波长处的强度变化量均可实现传感功能，相应的传感灵敏度表达式分别为

$$S_\lambda=\Delta\lambda/\Delta n \tag{5}$$

$$S_I=\Delta I/\Delta n \tag{6}$$

其中，$\Delta\lambda$ 为波长漂移量，ΔI 为强度变化量，Δn 为待测物质折射率变化量。根据选取的不同监测参量，硅基微环的折射率传感原理主要分为单波长探测、包络谱波长探测、单峰强度探测和包络谱强度探测。

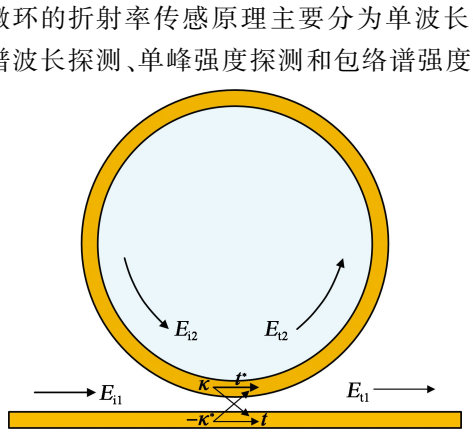


图 1 全通型微环谐振器分析模型

1.1 单波长探测传感原理

对于硅基微环来说，当忽略振幅自耦合系数和环程振幅传输因子的波长相关性时，微环直通端传输谱线为谐振深度相等的均匀梳状谱，如图 2 中实线所示。当微环波导外界待测物质的折射率发生变化时，振幅自耦合系数和环程振幅传输因子的变化非常小，而传输模式的有效折射率发生改变，导致谐振波长发生漂移，即图 2 中谱线从实线漂移至虚线位置，通过监测单个谐振波长的漂移量实现传感功

能。由上述原理可知，基于此单波长探测传感原理的可探测范围受限于微环的自由光谱范围。

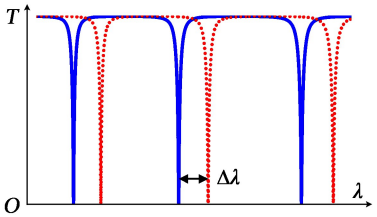


图 2　单波长探测传感原理示意图

1.2　包络谱波长探测传感原理

从包络谱的形成机制来看，包络谱波长探测传感原理可分为游标法和色散法。

(1)游标法。游标法是借助双微环或多微环级联结构，利用参考环和传感环谱线中密集交错谐振峰的游标效应得到包络谱。图 3 为游标法包络谱波长探测传感原理示意图[8]，图 3(a)为参考环的谐振谱线，图 3(b)为传感环的谐振谱线，参考环与传感环的谐振谱线密集交错，使整体结构的谐振谱线为图 3(c)中实线所示包络谱型。当外界待测物质发生变化，参考环的谐振谱线不受影响，传感环的谐振谱线发生漂移，使得图 3(c)中整体结构的包络谱从实线漂移至虚线位置，通过监测包络谱波长漂移量实现传感功能。由上述原理可知，图 3(c)中包络谱的波长漂移量明显大于图 3(b)中所示单个波长的漂移量，同时探测范围不再受限于单个微环的自由光谱范围，而是整体结构的准自由光谱范围，因此，传感灵敏度和可探测范围均有大幅度提升。

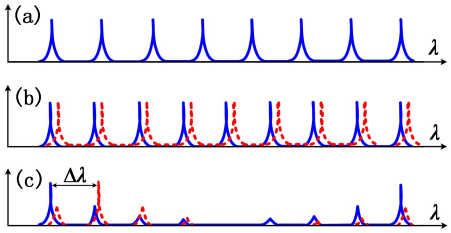
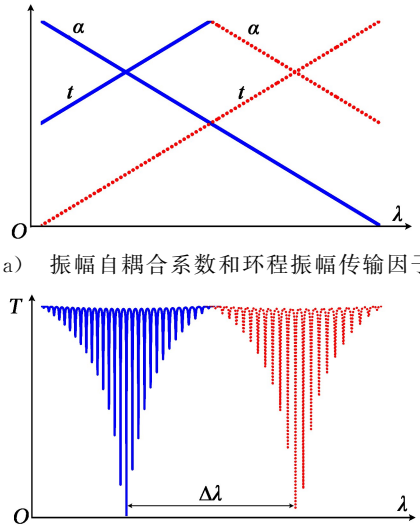


图 3　游标法包络谱波长探测传感原理示意图。(a) 参考环的谐振谱线；(b) 传感环的谐振谱线；(c) 整体结构的谐振谱线。

(2)色散法。色散法是利用微环的损耗特性(环程振幅传输因子 α)和耦合特性(振幅自耦合系数 t)的波长相关性，即微环临界耦合条件的波长相关性形成单个多峰包络谱。当外界折射率变化时，满足临界耦合条件的波长位置亦发生变化，通过监测波长变化量实现传感功能。当振幅自耦合系数 t 和环程振幅传输因子 α 如图 4(a)实线所示(这里 t 和 α 随波长的变化是从数学角度假设的，仅为了更明了地说明结论)，微环传输谱线为图 4(b)中实线所示的多峰值包络谱。当微环波导外界待测物质的折射率发生变化，振幅自耦合系数 t 和环程振幅传输因子 α 的色散特性使微环临界耦合波长发生较大变化。因此，图 4(b)中实线包络谱线将漂移至虚线谱线位置，由此可见包络谱的波长漂移量远大于单峰的波长漂移量，传感灵敏度得以提高，可探测范围也不再受限于微环本身自由光谱范围。



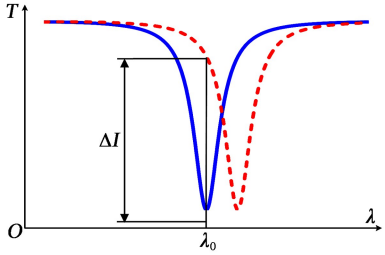
(a)　振幅自耦合系数和环程振幅传输因子

(b)　微环直通端传输谱线

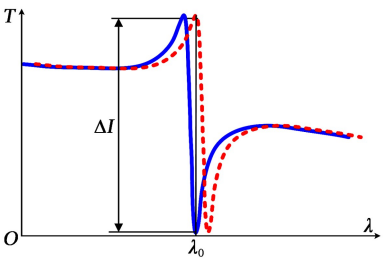
图 4　色散法包络谱波长探测传感原理图

1.3　单峰强度探测传感原理

一般来说，微环谐振器的传输谱线是图 5(a)所示关于谐振波长对称的 Lorentz 型，而引入离散态和连续态的耦合后，可得到如图 5(b)所示的 Fano 线型[9]。相比于 Lorentz 线型，Fano 线型具有明显的不对称特征，透射系数在很小的波长范围内就可以从最大变为最小。固定探测波长为 λ_0，当外界传感物质的折射率发生变化时，谐振峰从图中实线位置漂移至图中虚线位置，则探测波长处的光场强度发生的变化为 ΔI，通过监测该波长处强度变化实现传感功能。由于 Fano 线型比 Lorentz 线型更陡峭，



(a)　Lorentz 线型



(b) Fano 线型

图 5 单峰强度探测传感原理示意图

可探测范围变小,但灵敏度明显更高,一般用于极微小折射率变化的探测。

1.4 包络谱强度探测传感原理

该方案中,包络谱的形成机制与游标法包络谱波长探测传感原理相同,借助于微环级联结构,利用参考环和传感环谱线中密集交错谐振峰的游标效应得到包络谱。包络谱强度探测传感原理如图 6 所示[10],当外界待测物质发生变化时,包络谱线从图中实线位置漂移至虚线位置,则点线所示的光源光谱和传输谱的重叠程度从最大变化到最小,导致输出功率变化,通过监测输出功率变化实现传感功能。

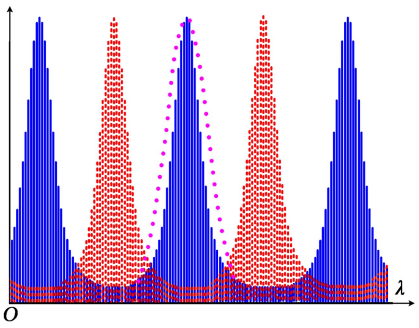


图 6 包络谱强度探测传感原理示意图

2 基于硅基微环谐振器的折射率传感研究进展

2.1 微环单波长探测传感的研究进展

在前期国内外的研究中,基于硅基微环谐振器的折射率传感中的波导结构较单一,如条波导微环谐振器[11-13]、槽波导微环谐振器[14-19]和一维光子晶体微环谐振器[20-25]等。随着研究的深入,研究者们发现单一结构传感器的灵敏度受限,于是研究方向开始向复合结构发展,即将单一结构复合在一起构成传感器,如含槽一维光子晶体微环[26-27]、亚波长光栅微环[28-33]等。

2.1.1 条波导微环

条波导微环谐振器结构简单,是最常见的微环结构之一,由于条波导微环中导模存在倏逝场,可与待测物质相互作用,使其成为天然的传感器件。然而,硅条波导的高模场约束限制了微环谐振器的响应。从硅基微环谐振器的传感机理来看,提高其传感灵敏度的关键在于让光场与待测物质充分接触,增强光与待测物质的相互作用,以提高其对外界折射率变化的敏感度。因此,研究者们提出让微环工作在 TM 模式[11]或将波导层减薄[12],前者在波导与待测物质界面处存在强场;而后者的倏逝场具有较大的穿透深度,借以增强光与待测物质的相互作用,实现了传感灵敏度的小幅度提升。另外,有研究小组提出利用悬浮型条波导微环结构实现折射率传感功能[13],如图 7(a)所示。然而,多种条波导微环方案中的灵敏度并不令人满意,因为它们仍然是基于条形波导的倏逝场和待测物质之间的相互作用。

2.1.2 槽波导微环

槽波导,即为高折射率介质间存在较窄的低折射率介质的波导。由于法向电场分量的不连续性可使电场主要集中于低折射率介质区,如果低折射率介质区填充为待测物质,可有效增强光场与待测物质的相互作用。因此,随着槽波导研究的广泛开展,光场局域在槽区的槽波导微环谐振器[14-17]被提出,如图 7(b)所示。随后更有双槽微环[18](如图 7(c)所示)和多槽微环结构[23]被提出,此时待测物质成为波导芯的一部分,光场与待测物质相互作用明显增强,使得此类微环的折射率传感灵敏度提升至 10^2 nm/RIU 量级。

2.1.3 一维光子晶体微环

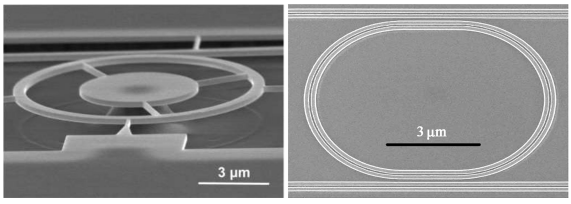
近年来,很多研究小组将一维光子晶体波导引入硅基微环中,形成一维光子晶体微环谐振器(PhC-MRR)[20-25],如图 7(d)所示。在一维光子晶体微环中,被填入光子晶体空气孔中的待测物质成为波导芯的一部分,慢光效应也有利于光与待测物质的相互作用,这使得一维光子晶体微环在传感应用中具有很大的吸引力。一般情况下,基于一维光子晶体微环的传感可被分为基于介质模式的传感[22-24]和基于空气模式的传感[24-25]。介质模式集中在高折射率介质区,不利于场与待测物质的相互作用;而空气模式集中在低折射率区域(待测物质区),有利于场与待测物质之间的相互作用,在传感灵敏度上更具竞争力。

空气模式和待测物质的空间重叠为它们的相互作用提供了强大的空域约束,因此,继续改善一维光

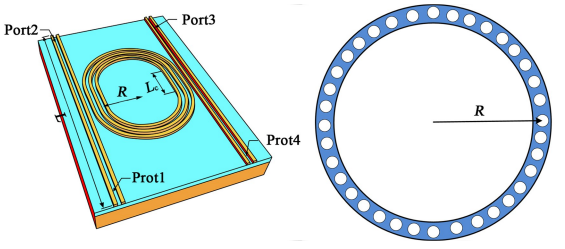
子晶体微环中空气模式的时域约束(即光子腔寿命，以品质因子 Q 衡量)成为另一个研究热点。目前，大部分一维光子晶体微环谐振器[20-25]均基于圆孔，但光在圆孔中不能得到足够的集中，因此品质因子较低。环半径为 16 μm 的一维光子晶体微环中空气模式的品质因数可达 1.46×10^4[25]，但随着微环半径的减小，品质因子将劣化。另有研究小组在微环半径为 4 μm 的一维光子晶体微环中得到了品质因子为 10^4 的空气模式[24]，但是该空气孔半径较小且为浅刻蚀，所以灵敏度仅为 100 nm/RIU[24]。本文提出了蝴蝶结型一维光子晶体微环，如图 7(i)所示，可将光场有效地局域在蝴蝶结孔尖端，实现的空气模式品质因子与上述工作实现的模式品质因子相近，但传感灵敏度提高了一倍。

2.1.4　复合结构微环

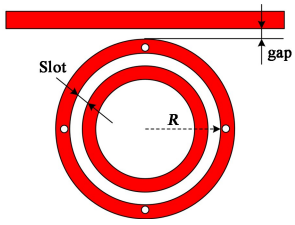
随着集成光学传感器由单一结构向复合结构发展，多种新型的复合结构微环被提出，如含槽一维光子晶体微环[26-27]、亚波长光栅微环[28-33]等。含槽一维光子晶体微环[26-27]可以利用槽波导的场局域效应、光子晶体的慢光效应和微环谐振器的谐振效应等共同增强光与待测物质的相互作用。亚波长光栅微环[28-33]可将光场集中在折射率较低的待测物质区，增强光与待测物质的相互作用，进一步提高传感灵敏度。另外，当亚波长光栅工作波长略大于其布拉格反射波长时，传播模式的群折射率较大，即存在慢光效应，也有利于增强光与待测物质的相互作用，进一步提高传感灵敏度。现有研究工作有基于梯形柱亚波长光栅微环[29]、悬浮亚波长光栅微环[31]和多层亚波长光栅微环[32]等结构的折射率传感，具体结构见图 7(f)～(h)。



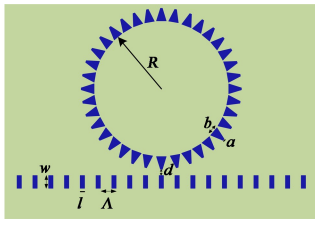
(a)　悬浮条波导微环[17]　(b)　单槽波导微环[19]



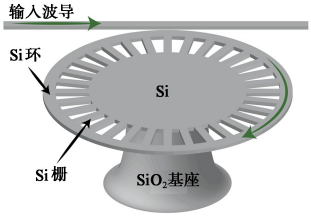
(c)　双槽波导微环[18]　(d)　一维光子晶体微环[20]



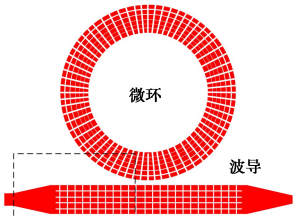
(e)　含槽一维光子晶体微环[27]



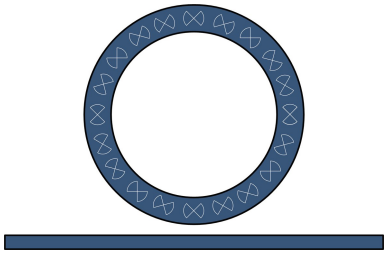
(f)　亚波长光栅微环[29]



(g)　悬浮亚波长光栅微环[31]



(h)　多层亚波长光栅微环[32]



(i)　蝴蝶结型一维光子晶体微环

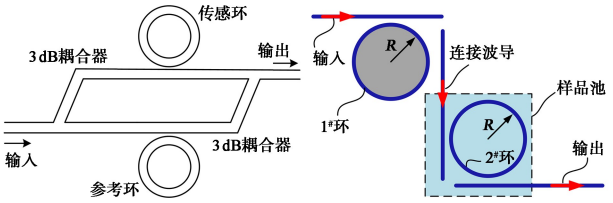
图 7　各类微环折射率传感器的结构示意图

2.2　微环包络谱波长探测传感的研究进展

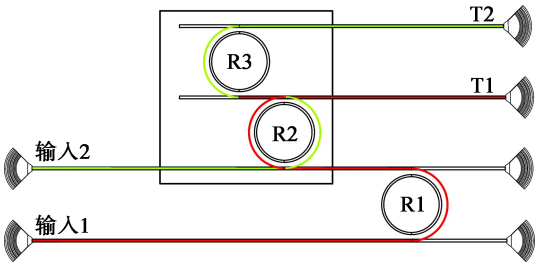
2.2.1　基于游标法的研究进展

针对游标法的理论研究，研究者于 2009 年提出了利用马赫-曾德尔干涉仪双臂耦合微环[34]或双微环级联[8]实现包络谱探测传感，均证明传感灵敏度可达 10^5 nm/RIU 量级。针对游标法的实验研究，从 2010 年至 2019 年，研究人员先后利用双微环级联[35]、双悬浮硅纳米线波导微环级联[36]、双脊形硅波导微环级联[37-38]、三个微环级联[39]、微环级联马赫-曾德尔干涉仪(MZI)[40]等方案实现了包络谱探测传感，如图 8 所示。然而，这些报道的实测传感灵敏度均低于理论预期，这是由于游标法在实际应用中还存在一些发展瓶颈。一方面，在理论上灵敏度受限于级联微环自由光谱范围之差，需要精确控制参考环和传感环的半径之差才能实现理论设计的自由光谱范围之差，以保证传感灵敏度。但是游标法中每个微环的微小工艺误差都会影响级联微环的整体效果，现有工艺难以实现理论设计效果。此外，目前游标法基于双悬浮硅纳米线波导微环级联、双脊形硅波导微环级联、三个微环级联等复杂结构，制备工艺复杂。另一方面，基于游标法传感的可探测范围不再受限于微环的自由光谱范围，而是受限于包

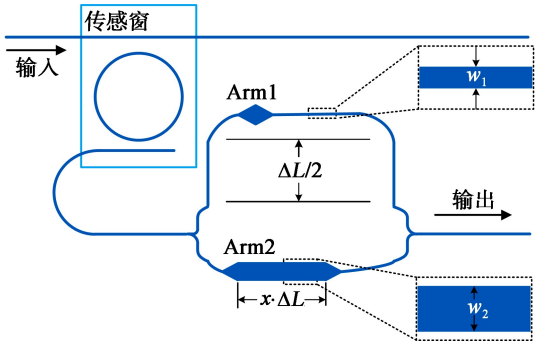
络谱的准自由光谱范围[41]，当待测物质的折射率变化较大时，包络谱的漂移量就会大于其自由光谱范围[42-43]，无法确定实际漂移量，游标法测量将失效，目前游标法探测传感中可探测范围的典型值在 10^{-3}～10^{-2} RIU 量级[37,39,41]。



(a) MZI 臂耦合微环[38] (b) 双环级联[8]



(c) 三环级联[39]

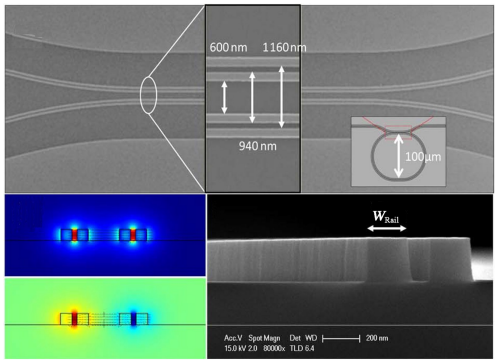


(d) 微环级联 MZI[40]

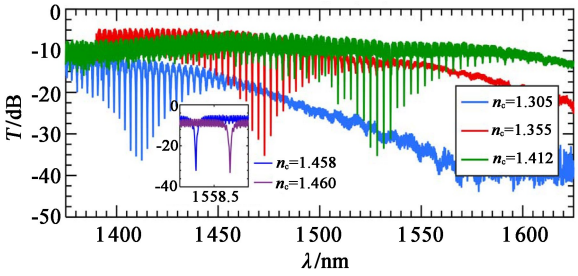
图 8 基于游标法包络谱波长探测原理的结构图

2.2.2 基于色散法的研究进展

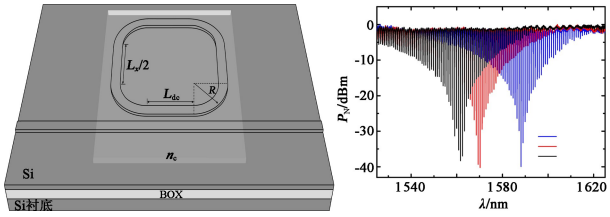
2016 年，法国巴黎第十一大学的研究小组利用单个槽波导微环的包络谱探测传感[44]，如图 9(a)～(b)，实现了 10^3 nm/RIU 量级的灵敏度，但由于槽波导微环损耗随外界折射率变化过快，其可探测范围小于 0.2 RIU。2017 年，印度理工学院马德拉斯分校的研究小组提出的基于单个条波导微环的包络谱探测传感[7]方案将可探测范围提升至 1 RIU，但由于条波导对光的限制作用较强，波导损耗很小且几乎不随外界待测物质的折射率变化，临界耦合条件的波长位置调节仅依靠耦合特性随外界待测物质折射率的变化，因此传感灵敏度仅为 10^2 nm/RIU 量级，且该结构尺寸较大，单个微环面积达 0.38 mm^2，远大于槽波导微环谐振器的面积(0.003 mm^2)，不利于器件的微型化和大规模集成，如图 9(c)所示。



(a) 槽波导微环



(b) 槽波导微环的包络谱传感图[44]



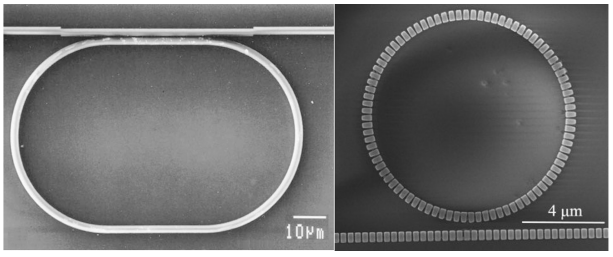
(c) 条波导微环及其包络谱传感图[7]

图 9 基于色散法包络谱探测的两种包络谱传感图

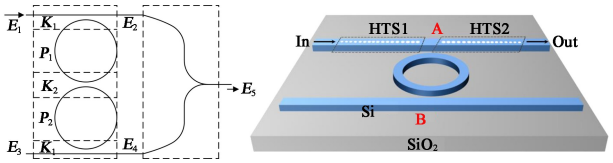
2.3 微环单峰强度探测传感的研究进展

微环谐振器的谐振线型是关于谐振波长对称的 Lorentz 型，可通过提高微环谐振腔的品质因子使谐振谱线更加尖锐，进而提高单峰强度探测的传感灵敏度。相比于 Lorentz 线型，Fano 线型更陡峭，作为单峰强度探测传感器的灵敏度更高。Fano 线型的产生需要离散态与连续态的耦合。一般而言，微环谐振器的谐振谱线为离散态，法布里-珀罗(FP)腔的谐振谱线提供连续态。2003 年，美国密歇根大学的研究小组提出将微环谐振器的总线波导错位刻蚀形成 FP 腔，以产生 Fano 谐振用于传感[45]，如图 10(a)所示。自此之后，基于微环谐振器 Fano 谐振的折射率传感工作受到了明显的关注。2010 年，北京大学的研究小组提出利用微环总线波导的端面构成 FP 腔，利用 Fano 谐振在理论上实现了传感功能[46]。随后，该研究小组又提出利用双环级

联[47]产生 Fano 谐振用于折射率传感。2017 年，华中科技大学和吉林大学的合作研究小组利用梯形亚波长光栅微环和条形亚波长光栅 FP 腔耦合，如图 10(c)所示，实验上实现了基于 Fano 谐振的复折射率传感[48]。2018 年，电子科技大学的研究小组利用微环谐振器和一维光子晶体腔耦合产生 Fano 谐振，如图 10(d)所示，强度检测灵敏度为 1.76×10^4 dB/RIU[49]。



(a)　微环与错位 FP 腔耦合[45]　(c)　亚波长光栅微环和 FP 腔耦合[48]



(b)　双环级联耦合[47]　(d)　微环与光子晶体腔耦合[49]

图 10　基于 Fano 谐振强度探测的四种耦合结构

2.4　微环包络谱强度探测传感的研究进展

随着游标法包络谱波长探测的逐步发展，基于游标法包络谱强度探测的折射率传感方案被报道。该方案主要由浙江大学何建军小组提出并完成。前期工作主要集中于使用双环级联形成包络谱进行强度探测[6,10,41,50]，借鉴条波导微环中的 TM 模式比 TE 模式更易与待测物质相互作用的方案，证明了基于 TM 模式的包络谱强度探测传感的灵敏度明显高于 TE 模式的灵敏度。随后，该研究小组又提出了使用 MZI 级联微环方案实现包络谱强度探测传感[51]，传感灵敏度在 10^3 dB/RIU 量级。

综上所述，基于硅基微环谐振器的折射率传感的研究工作备受关注，为进一步明确目前的研究进展，将本文提及相关工作中的传感灵敏度和可探测范围列于表 1。通过对比可发现，对于波长探测传感而言，包络谱波长探测的传感灵敏度较单波长探测的传感灵敏度提升了 1～2 个数量级。此外，色散法包络谱波长探测传感中，可探测范围也有明显提升。对于强度探测而言，基于 Fano 线型强度探测的传感灵敏度比包络谱强度探测的传感灵敏度高 1 个数量级，但其可探测范围却明显小于后者，故仅适用于微小折射率变化的探测。

表 1　不同传感方案的传感灵敏度和可探测范围

波长探测		结构	S_λ/(nm/RIU)	$\Delta\lambda$/RIU
单波长探测		单环 TM 模式[11]	222	受限于微环 FSR
		单环薄硅层 TE 模式[12]	133	
		悬浮条波导微环[13]	310	
		单槽微环[14]	298	
		单槽微环[15]	490	
		* 双槽微环[18]	708	
		一维光子晶体微环[23]	248	
		一维光子晶体微环[24]	99.7	
		* 含槽一维光子晶体[27]	480.4	
		亚波长光栅微环 TE 模式[28]	490	
		亚波长光栅微环 TM 模式[30]	429.7	
		悬浮亚波长光栅[31]	503	
		多层亚波长光栅微环[32]	579.5	
		* 亚波长光栅微环[33]	627.8	
包络谱波长探测	游标法	* MZI 单臂耦合微环[34]	1.55×10^5	—
		* 双环级联[8]	2.91×10^5	# 0.000 34
		双环级联[6]	24 300	# 0.004
		双环级联[35]	2 169	—
		双悬浮硅纳米线波导微环级联[36]	4.6×10^5	8×10^{-5}
		双脊形硅波导微环级联[37]	1 300	0.011 5
		三环级联[39]	5 866	0.076
		单环与 MZI 级联[40]	3 552	—
		双环级联[41]	3 500	0.003 2
		双环级联[42]	3 000	—
		* 内光栅与槽波导微环[43]	559.5	—
	色散法	槽波导微环[44]	1 300	0.2
		条波导微环[7]	340	1
强度探测		结构	S_I/(dB/RIU)	$\Delta\lambda$/RIU
单峰强度探测		* 微环与光子晶体腔耦合[49]	1.76×10^4	受限于谱宽
包络谱强度探测		双环级联 TE 模式[10]	450	0.002
		双环级联[41]	2 500	0.032
		双环级联 TM 模式[6]	2 430	—
		双环级联[50]	1 579	—
		单环与 MZI 级联[51]	1 892	—

“*”表示理论研究。“#”表示求传感灵敏度所用折射率变化范围，非可探测范围。

3　总结及展望

单波长探测折射率传感灵敏度的提高主要依靠光与待测物质的相互作用增强实现，目前为 10^2 nm/RIU 量级，提高空间有限，可探测范围受限于微环的自由光谱范围；包络谱波长探测传感的灵敏度目前为 10^3 nm/RIU，理论值可达 10^5 nm/RIU 量级，可有效提高传感灵敏度，效果明显优于利用倏逝场增强光与待测物质相互作用的效果，成为大幅提高传感灵敏度的有效手段。在包络谱的探测传感中，游标法在理论上可达到的传感灵敏度较高，但是可探测范围受限且工艺复杂。色散法虽然可有效拓宽可探测范围，但是在现有方案中，受微环波导内在物理机制限制，高传感灵敏度与宽可探测范围不可兼得。

对于强度探测折射率传感来说，基于单峰 Fano

谐振的强度探测传感灵敏度可达 10^4 dB/RIU，且结构简单，但可探测范围较小。而基于包络谱强度探测的传感灵敏度为 10^3 dB/RIU，均基于多环级联结构，结构较复杂，且较高的传感灵敏度要求双环FSR相等，对加工工艺提出了较高要求。

综上所述，高传感灵敏度与宽可探测范围在目前方案中仍然不可兼得，但借鉴本文中综述的方案，可将光子晶体结构或亚波长光栅结构、TM模式工作等引入色散法包络谱波长探测方案中，有望同时实现高灵敏度和宽可探测范围。

参考文献：

[1] Orghici R, Lutzow P, Burgmeier J, et al. A microring resonator sensor for sensitive detection of 1, 3, 5-Trinitrotoluene (TNT)[J]. Sensors, 2010, 10(7): 6788-6795.

[2] Mi G, Horvath C, Van V. Silicon photonic dual-gas sensor for H_2 and CO_2 detection[J]. Opt. Express, 2017, 25(14): 16250-16259.

[3] Shi Sichao, Cheng Qing, Lin Rong, et al. Micro-ring sensor used in the diagnosis of gastric cancer[C]// Proc. SPIE Inter. Conf. on Optoelectronics and Microelectronics Technol. and Application, 2017: 102441K.

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

[5] Feng X, Zhang G, Chin L K, et al. Highly sensitive, label-free detection of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid using an optofluidic chip[J]. ACS Sensors, 2017, 2(7): 955-960.

[6] Jiang Xianxin, Ye Junjun, Zou Jun, et al. Cascaded silicon-on-insulator double-ring sensors operating in high-sensitivity transverse-magnetic mode[J]. Opt. Lett., 2013, 38(8): 1349-1351.

[7] Chandran S, Ramesh K, Das B K. Dispersion enhanced critically coupled ring resonator for wide range refractive index sensing[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2017, 23(2): 424-432.

[8] Dai Daoxin. Highly sensitive digital optical sensor based on cascaded high-Q ring-resonators[J]. Opt. Express, 2009, 17(26): 23817-23822.

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

[10] Jin Lei, Li Mingyu, He Jianjun. Optical waveguide double-ring sensor using intensity interrogation with a low-cost broadband source[J]. Opt. Lett., 2011, 36(7): 1128-1130.

[11] Hoste J W, Werquin S, Claes T, et al. Conformational analysis of proteins with a dual polarization silicon microring [J]. Opt. Express, 2014, 22(3): 2807-2820.

[12] Fard S T, Donzella V, Schmidt S A, et al. Performance of ultra-thin SOI-based resonators for sensing applications[J]. Opt. Express, 2014, 22(12): 14166-14179.

[13] Gaur G, Hu S, Mernaugh R L, et al. Label-free detection of herceptin using suspended silicon microring resonators[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2018, 275: 394-401.

[14] Robinson J T, Chen L, Lipson M. On-chip gas detection in silicon optical microcavities[J]. Opt. Express, 2008, 16: 14296-14301.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Steglich P, Villringer C, Pulwer S, et al. Hybrid-waveguide ring resonator for biochemical sensing[J]. IEEE Sensors J., 2017, 17(15): 4781-4790.

[18] Yuan Guohui, Gao Liang, Chen Yuren, 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.

[19] 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.

[20] Mcgarvey-Lechable K, Bianucci P. Maximizing slow-light enhancement in one-dimensional photonic crystal ring resonators[J]. Opt. Express, 2014, 22(21): 26032-26041.

[21] Mcgarvey-Lechable K, Hamidfar T, Patel D, et al. Slow light in mass-produced, dispersion-engineered photonic crystal ring resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25(4): 3916-3926.

[22] Lo S M, Hu S, Weiss S M, et al. Photonic crystal microring resonator based sensors[C]// Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2014: JTu4A.79.

[23] 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.

[24] 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.

[25] Gao Ge, Zhang Yong, Zhang He, et al. Air-mode photonic crystal ring resonator on silicon-on-insulator[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 19999.

[26] Wang Xueping, Kong Mei, Xu Yameng. Slotted photonic crystal microring resonators[J]. Fiber & Integrated Optics, 2017, 36: 91-100.

[27] Wu Nishan, Xia Li. High-Q and high-sensitivity multi-hole

slot microring resonator and its sensing performance[J]. Physica Scripta, 2019, 94: 115512.

[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 Hai, Huang Lijun, Xu Xiaochuan, et al. Breaking the limitation of evanescent wave sensing with subwavelength grating waveguides[C]// Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2017: JTh3M. 3.

[30] Huang Lijun, Yan Hai, Xu Xiaochuan, 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.

[31] Yousuf S, Shahin M M, Gevorgyan H, et al. Suspended microring resonator sensor using internal sub-wavelength grating[C]// Adv. Photonics, 2015: SeS4C. 4.

[32] Luan E, Yun H, Laplatine L, et al. Enhanced sensitivity of sub-wavelength multi-box waveguide microring resonator label-free biosensor[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electronics, 2018, 25(3): 1-11.

[33] Wu Nishan, Xia Li. Side-mode suppressed filter based on an angular grating-subwavelength grating microring resonator with high flexibility in wavelength design[J]. Appl. Opt., 2019, 58(26): 7174-7180.

[34] Yi H, Citrin D S, Chen Y, et al. Dual-microring-resonator interference sensor[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 95: 191112.

[35] Claes T, Bogaerts W, Bienstman P. Experimental characterization of a silicon photonic biosensor consisting of two cascaded ring resonators based on the Vernier-effect and introduction of a curve fitting method for an improved detection limit[J]. Opt. Express, 2010, 18(22): 22747-22761.

[36] Hu Jing, Dai Daoxin. Cascaded-ring optical sensor with enhanced sensitivity by using suspended Si-nanowires[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2011, 23(13): 842-844.

[37] Jin Lei, Li Mingyu, He Jianjun. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect[J]. Opt. Commun., 2011, 284: 156-159.

[38] Chen Yangqing, Yu Fang, Yang Chang, et al. Label-free biosensing using cascaded double-microring resonators integrated with microfluidic channels[J]. Opt. Commun., 2015, 344: 129-133.

[39] Liu Yong, Li Yang, Li Mingyu, et al. High-sensitivity and wide-range optical sensor based on three cascaded ring resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25(2): 972-978.

[40] Zhang Yang, Zou Jun, Cao Ziwei, et al. Temperature-insensitive waveguide sensor using cascaded ring and Mach-Zehnder interferometer[J]. Opt. Lett., 2019, 44(2): 299-302.

[41] Jin Lei, Li Mingyu, He Jianjun. Analysis of wavelength and intensity interrogation methods in cascaded double-ring sensors[J]. J. of Lightwave Technol., 2012, 30(12): 1994-2002.

[42] Chang Y, Dong B, Ma Y, et al. Vernier effect-based tunable mid-infrared sensor using silicon-on-insulator cascaded rings [J]. Opt. Express, 2020, 28(5): 6251-6260.

[43] Gu Hongjun, Gong He, Wang Chunxue, et al. Compact inner-wall grating slot microring resonator for label-free sensing[J]. Sensors, 2019, 19: 5038.

[44] Zhang W, Serna S, Le R X, et al. Highly sensitive refractive index sensing by fast detuning the critical coupling condition of slot waveguide ring resonators[J]. Opt. Lett., 2016, 41(3): 532-535.

[45] Chao C Y, Guo L J. Biochemical sensors based on polymer microrings with sharp asymmetrical resonance[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83(8): 1527-1529.

[46] Yi H, Citrin D S, Zhou Z. Highly sensitive silicon microring sensor with sharp asymmetrical resonance[J]. Opt. Express, 2010, 18(3): 2967-2972.

[47] Yi H, Citrin D S, Zhou Z. Highly sensitive athermal optical microring sensor based on intensity detection[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2011, 47(3): 354-358.

[48] Tu Zhengrui, Gao Dingshan, Zhang Meiling, 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.

[49] Peng Fangcao, Wang Zhuoran, Yuan Guohui, et al. High sensitivity refractive index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity coupled microring resonator[J]. IEEE Photonics J., 2018, 10(2): 6600808.

[50] Xie Zhenyi, Cao Ziwei, Liu Yong, et al. Highly-sensitive optical biosensor based on equal FSR cascaded microring resonator with intensity interrogation for detection of progesterone molecules[J]. Opt. Express, 2017, 25(26): 33193-33201.

[51] Zhu H, Yue Y, Wang Y, et al. High-sensitivity optical sensors based on cascaded reflective MZIs and microring resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25(23): 28612-28618.

作者简介：

徐亚萌(1987—)，女，吉林人，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，现为讲师，主要研究方向为硅基微纳光学器件特性及其传感技术；

孔　梅(1967—)，女，吉林人，1990 年本科毕业于南开大学，1999 年博士毕业于浙江大学物理电子学专业，现为教授，博士生导师，主要研究方向为导波光学器件及微纳光学器件物理和应用、光学传感技术等。