

光子晶体微纳传感技术的理论与实验研究进展

王超, 孙富君, 付中原, 周健, 丁兆祥, 田慧平

北京邮电大学信息与通信工程学院信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 光子晶体(PC)微纳传感器具有体积小、易集成、响应时间快、控光能力强、可实现无标签检测以及设计灵活等优点,在工业生产、海洋探测、生物医疗检测及环境监测等领域展现出巨大的应用前景。针对基于一维纳米束 PC 与二维平板 PC 的微纳光子传感技术,从传感器结构设计和传感性能提升方面,分析了当前国内外 PC 微纳传感的关键理论和实验技术进展,并通过对比分析,探讨了 PC 微纳传感技术在未来应用中所面临的挑战及未来发展的趋势。

关键词 传感器; 光子晶体; 微纳传感; 对比分析

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328003

Research Progresses on Theory and Experiments of Photonic Crystal Micronano Sensing Technology

Wang Chao, Sun Fujun, Fu Zhongyuan, Zhou Jian, Ding Zhaoxiang, Tian Huiping

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract Due to the advantages of compact size, easy integration, fast response time, strong ability for controlling light, detecting without label, and flexibility in design, the photonic crystal (PC) micronano sensors show great application prospects in the fields of industrial production, ocean exploration, biological medicine testing, and environmental detection. As for the one-dimensional nanobeam and two-dimensional slab PC sensing technologies, the key theories and experimental technique progresses of PC micronano sensing at home and abroad are analyzed from the aspects of structural design and sensing performance improvement of sensors. Furthermore, with comparative analysis, the challenges and future development trend of PC micronano sensing technology in further application are discussed.

Key words sensors; photonic crystals; micronano sensing; comparative analysis

OCIS codes 280.4788; 230.5298; 260.1180; 230.0040; 230.3120

1 引 言

随着科学技术的发展,人们对传感器性能的要求越来越高。1978年,普林斯顿大学的 John 等^[1]和 Bell 通信研究室的 Yablonovitch 等^[2]在研究材料中周期性电介质结构对光传播行为的影响时,几乎在同一时间分别提出了光子晶体(PC)的概念,提供了一种全新的控光机制。不同于以往利用全反射方式实现对光子的引导传输,PC 通过周期性排列的电介质形成光子带隙,以实现光子传输的引导和控

制。PC 由于具有体积小、控光能力强、设计灵活等优点,在传感领域引起了广泛关注,尤其在近几年,其研究重点从最初的基本原理和材料开发向芯片化和多功能化等方向逐渐转变。

PC 微纳传感技术作为一种全新的传感器基础技术,与传统的传感技术相比,具有响应时间短、体积小、易集成、抗干扰能力强以及可实现无标签检测等优势。目前,国内外主要的 PC 传感器根据其应用领域可分为温度传感器、生物传感器、湿度传感器、化学传感器、气体传感器和压力传感器等,根据

收稿日期: 2017-10-26; **收到修改稿日期:** 2017-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(61372038,61431003)、水下光网络联合实验室项目

作者简介: 王超(1990—),男,博士研究生,主要从事光子晶体微纳传感方面的研究。E-mail: ofcoswang@163.com

导师简介: 田慧平(1976—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光子晶体微纳传感与光纤通信方面的研究。

E-mail: hptian@bupt.edu.cn(通信联系人)

其结构特性主要可分为一维、二维、三维 PC 传感器等。本文聚焦于近年来研究较多的基于一维纳米束 PC 和二维平板 PC 的微纳传感器,从结构设计与传感性能提升的角度,综述了 PC 微纳传感关键技术的理论和实验研究进展,并探讨了其未来应用发展所面临的挑战。

2 一维纳米束 PC 传感关键技术及性能

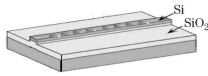





一维纳米束 PC 是介电常数只在一个方向上呈周期性变化的 PC,基于其所设计的光学微腔具有品质因子(Q)高、模式体积(V)低、结构简单、尺寸小等优点,常被用于传感器的设计。PC 微腔结构的光学特性可以通过 Q 与 V 的比值(又称为珀塞尔因子)来衡量,珀塞尔因子越高,光物反应越强烈,从而可使光学传感器获得更高的分辨率和灵敏度。因此,设计高品质因子和低模式体积的光学微腔对实现高性能的 PC 微纳传感器非常重要。

高性能一维纳米束 PC 微腔的设计理念经历了一个逐渐发展的研究过程,提高纳米束腔 Q 值的典型研究见表 1。1997 年,美国的 Foresi 等^[3]利用 PC 的光子带隙特性,通过在亚微米尺寸的硅波导上引入一排周期排列的孔,并调整中心孔的间距,形成了 Q 值为 256、模式体积为 $0.055 \mu\text{m}^3$ 的一维 PC 纳米束腔结构。之后,为了提高 Q 值,大量不同类型的优化结构相继被提出。其中,2004 年,法国的 Lalanne 等^[4]提出了两种可以提高 PC 纳米腔珀塞尔因子的方法,第一种方法是通过调节腔的长度来增强腔内反射,第二种方法是通过引入逐渐变化的镜像来减小辐射损耗。这两种方法的提出对后续高性能微腔的设计具有重要借鉴意义。如 2008 年,日本电报电话公司(NTT)的 Notomi 等^[5]提出了一种堆栈尺寸渐变的一维阶梯 PC 结构,其 Q 值高达 1×10^8 。2009 年,哈佛大学的 Deotrae 等^[7]提出了一种通过腔的长度、孔晶格常数和半径渐变的结构来提高 Q 值的方法。2011 年,哈佛大学的 Quan 等^[8]提出了一种高 Q 纳米束腔的确定性设计方法。此后,得益于有效的设计方法及其高品质因子、低模式体积等优点,高性能一维纳米束 PC 微腔的设计难度大大降低,因此其在 PC 传感领域受到广泛关注。

一维纳米束腔按光的局域位置,一般可分为介质模腔、空气模腔和槽腔,如图 1 所示。因光的局域位置不同,其与物质相互作用的强度也不同,灵敏度也不同。

表 1 提高纳米束腔 Q 值的实验研究

Table 1 Studies for improving Q factor value of nanobeam cavity

Reference	Structure	Q	Research type
[3]		256	Experiment
[4]		10^5	Experiment
[5]		6.3×10^7	Experiment
[6]		1.49×10^5	Experiment
[7]		7.5×10^5	Experiment
[8]		10^9	Experiment

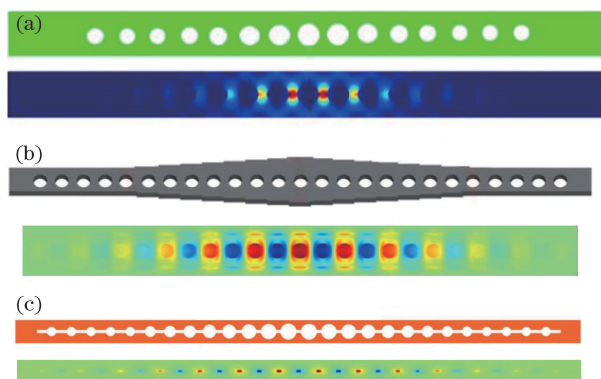


图 1 典型一维 PC 纳米束腔的结构及场图。

(a)介质模腔^[8]; (b)空气模腔^[9]; (c)槽结构腔^[10]

Fig. 1 Schematics and electric field distributions of several typical 1D PC nanobeam cavities. (a) Dielectric-mode cavity^[8]; (b) air-mode cavity^[9]; (c) slot-based cavity^[10]

2.1 基于介质模腔的一维纳米束 PC 传感技术

一维纳米束 PC 的介质模腔可将其光学模式主要局域在高折射率区域,易于获得高 Q 值和低模式体积,因此其是研究较多的一种微腔类型。介质模纳米束腔通过操纵能带的介质模能带边缘,将微腔中心结构的介质带隙边缘局域到波导两侧孔的光子带隙中,可使谐振模的光场主要局域在高折射率区域,能带如图 2 所示,其中 k 为波矢大小相对于 π/a 的归一化常量, a 为晶格常数。具体的设计可从中心到两侧逐渐减小孔的尺寸、增大晶格常数等,本质上是从中心到两侧逐渐增大每个晶胞的有效折射率,使光子带隙逐渐向低能级移动,从而使目标的谐振模位于光子带隙的边缘内侧。

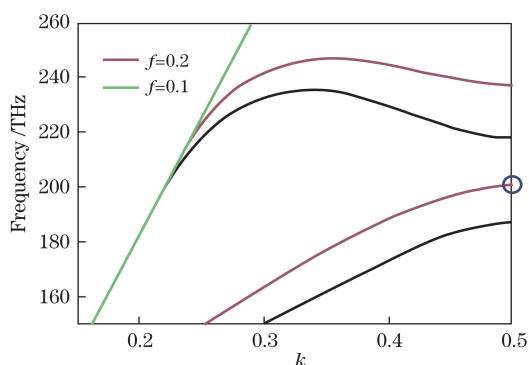


图 2 介质模纳米束腔的能带示意图^[8]

Fig. 2 Energy band diagram of dielectric-mode nanobeam cavity^[8]

一维纳米束 PC 介质模腔不仅控光能力强,在实际应用中设计也非常灵活,近几年一维纳米束 PC 介质模腔用于传感领域的典型结构及其传感特性见表 2。2011 年,哈佛大学的 Quan 等^[11]设计了一种聚合物 PC 纳米束腔传感器,其品质因子为 3.6×10^4 ,灵敏度为 386 nm/RIU(RIU 为单位折射率)。2012 年,浙江大学的 Yao 等^[12]提出了一种一维堆栈型的 PC 微腔传感器,其 Q 值为 2.7×10^4 ,灵敏度为 269 nm/RIU。四川大学的 Feng 等^[13]设计了一种孔半径和晶格常数同步逐渐增大的介质模纳米束

腔,Q 值高达 1×10^6 ,灵敏度为 190 nm/RIU。2014 年,麻省理工学院的 Clevenston 等^[14]设计了一种基于柔性聚合材料的 PC 纳米束腔气体传感器,其原理为柔性聚合材料与气体接触后会发生膨胀,从而引起谐振波长的偏移,实验验证其 Q 值超过 1×10^4 ,灵敏度为 10^{-5} 。2015 年,加州理工学院的 Fegadolli 等^[15]将硅基 PC 纳米束波导耦合腔用于传感,通过结合一个加热器,可同步控制温度和折射率,灵敏度为 98 nm/RIU。浙江大学的 Zhang 等^[16]设计了一种基于绝缘衬底的硅材料(SOI)堆栈结构的纳米束腔,并用于 NaCl 溶液的浓度检测,Q 值为 1.3×10^4 ,灵敏度为 428 nm/RIU。2016 年,新加坡的 Zhang 等^[17]提出了一种基于硅 PC 纳米束腔的复折射率传感模型,其检测原理为:通过谐振波长的偏移检测折射率的实部变化,通过吸收引起的谐振波半峰带宽的变化检测折射率的虚部变化。该传感器可实现对三元混合物的检测,实验中实部和虚部的灵敏度分别为 58 nm/RIU 和 139 nm/RIU。这意味着基于一维纳米束 PC 介质模腔的传感器在多功能传感方面迈出了重要一步,对未来多参量传感等多功能传感器的研究具有启发和借鉴意义。

表 2 应用于传感领域的一维 PC 介质模纳米束腔

Table 2 1D PC dielectric-mode nanobeam cavity applied in sensing field

Reference	Structure	Q	Sensitivity	Analyte	Research type
[11]		3.6×10^4	386 nm·RIU ⁻¹	Glucose solution	Experiment
[12]		2.7×10^4	269 nm·RIU ⁻¹	Liquid	Experiment
[13]		10^6	190 nm·RIU ⁻¹	Gas	Simulation
[14]		10^4	10^{-5}	Gas	Experiment
[15]		10^6	98 nm·RIU ⁻¹	Liquid	Experiment
[16]		1.3×10^4	428 nm·RIU ⁻¹	NaCl solution	Experiment
[17]		3.5×10^4	58 nm·RIU ⁻¹	Ternary liquid mixture	Experiment

2.2 基于空气模腔的一维纳米束 PC 传感技术

基于介质模的一维 PC 纳米束腔具有较强的光子局域能力,但其光场模式主要局域在高折射率的介质中,不利于光和低折射率区域中物质的反应,因此在一定程度上制约了灵敏度的提高。因此,为了进一步提高灵敏度,增强光与低折射率区域物质的反应,研究人员提出了一种基于空气模的一维纳米束 PC 微腔结构。空气模纳米束腔通过操纵能带的空气模带隙边缘,将中心腔孔的空气带隙边缘局域到波导两侧孔的 PC 带隙中,可使光场主要局域在低折射率区域,能带如图 3 所示。设计本质是从中心到两侧逐渐减小每个晶胞的有效折射率,使光子带隙逐渐向高能级移动,从而使目标谐振模位于光子带隙的边缘内侧。

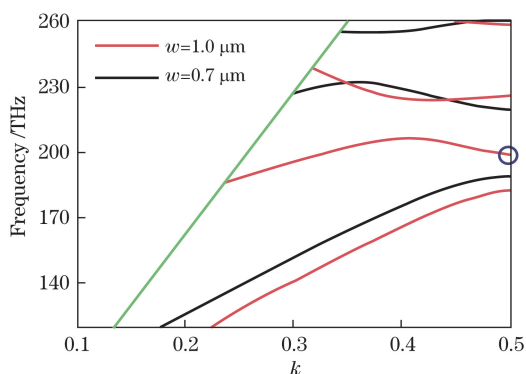


图 3 空气模纳米束腔的能带示意图^[8]

Fig. 3 Energy band diagram of air-mode nanobeam cavity^[8]

近几年一维纳米束 PC 空气模腔用于传感领域的结构及其传感特性见表 3。2015 年,哈佛大学的 Liang 等^[18]通过调节矩形孔的长度,设计了一种空气模纳米束腔,其 Q 值高达 2.5×10^6 ,模式体积低至 $0.01\lambda^3$ (λ 为波长),其谐振模光场主要局域在低折射率的介质区域,因此可以显著提高探测纳米粒子的灵敏度,可探测到直径小至 1.8 nm 的单个金纳米粒子。同年,韩国的 Kim 等^[19]利用 PC 纳米束腔的二阶空气能带模式进行传感,在水环境中,其所设计的传感器的理论 Q 值为 23300,理论灵敏度达 631 nm/RIU,实验灵敏度为 461 nm/RIU。相比于大多数基于低能级空气模的传感器,该传感器所利用的高能级空气模可更有效地将光场模式局域在低折射率区域,从而进一步增强了光物反应,获得了更高的灵敏度。此外,2015 年,北京邮电大学的 Yang 等^[9]设计了一种波导宽度渐变的空气模纳米束腔传感器,理论灵敏度可达 537.8 nm/RIU。2016 年,北京邮电大学的 Huang 等^[20]提出了一种基于椭圆孔的空气模纳米束腔结构,其灵敏度为 389 nm/RIU。2017 年,北京邮电大学的 Sun 等^[21]提出了一种矩形孔晶格常数渐变的超小体积的空气模纳米束腔传感器,灵敏度为 252 nm/RIU。这些研究极大丰富了基于空气模的纳米束腔传感器的研究,对后续基于空气模提高传感器灵敏度的研究具有重要借鉴意义。

表 3 应用于传感领域的一维 PC 空气模纳米束腔

Table 3 1D PC air-mode nanobeam cavity applied in sensing field

Referece	Structure	Q	Sensitivity / (nm·RIU ⁻¹)	Analyte	Research type
[18]		2.5×10^5	-	Nano-particle	Experiment
[19]		770	461	Liquid	Experiment
[9]		10^4	537.8	Liquid	Simulation
[20]		10^4	389	Liquid	Simulation
[21]		10^5	252	Gas	Simulation

2.3 基于槽结构腔的一维纳米束 PC 传感技术

通过前文分析可知,通过增强光在低折射率介质中的能量分布以增强光物之间相互作用是提高传

感器检测灵敏度的一种有效方法。相较于介质模腔和空气模腔,槽结构腔的谐振光场主要局域在槽波导中,光物的接触面积更大,光物反应更加充分,因

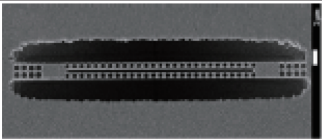

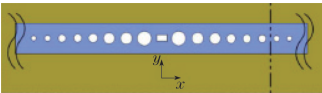
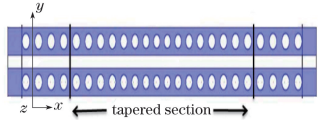
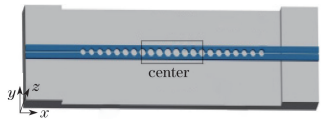
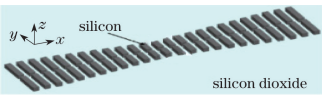
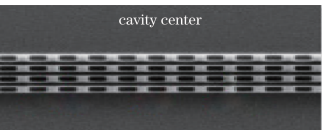


此可进一步提高传感器的灵敏度。

近几年,一维纳米束 PC 槽结构腔在传感领域的应用及其结构和传感特性见表 4。2010 年,荷兰的 Wang 等^[22]提出了一种基于 InGaAsP 的 PC 双纳米束槽腔,水环境下其品质因子为 3×10^3 ,灵敏度达 700 nm/RIU。2013 年,浙江大学的 Xu 等^[23]设计了一种堆栈宽度渐变的槽纳米束腔,进一步提高了品质因子,使其达到了 10^4 ,在 NaCl 溶夜的检测中,灵敏度为 410 nm/RIU。2015 年,新加坡的 Lin 等^[24]通过在腔的中心区域加入短槽,在不牺牲品质因子和灵敏度的情况下,将模式体积减小了 1/10,其用于单纳米粒子检测时,可检测到最小半径为 1 nm 的纳米粒子,灵敏度为 460 nm/RIU。台湾的 Chang 等^[25]提出了一种双纳米束的并列耦合式槽

腔结构,实验获得其折射率灵敏度为 234 nm/RIU。2016 年,华中科技大学的 Li 等^[26]设计了一种孔半径渐变的槽纳米束腔,品质因子达 10^5 ,灵敏度高达 851 nm/RIU。浙江大学的 Zhang 等^[27]设计的槽纳米束腔的品质因子高达 4.5×10^7 ,利用光力的作用可捕获半径为 2 nm 的聚苯乙烯粒子。此外,北京邮电大学的 Yang 等^[10,28-29]设计了一系列的槽纳米束腔,其中,他们在 2014 年与哈佛大学合作设计了一种平行四方晶格的槽式纳米束腔^[28],水环境下其灵敏度为 451 nm/RIU,实验结果显示,该传感器能够在磷酸缓冲溶液里探测到密度为 10 ag/mL 的链霉亲和素;2015 年,他们设计了高灵敏度、高品质因数和低模式体积的单纳米束纳米槽 PC 微腔^[10],灵敏度高达 749 nm/RIU;2017 年,他们设计

表 4 应用于传感领域的一维 PC 槽结构纳米束腔

Table 4 1D PC slot-based nanobeam cavity applied in sensing field

Reference	Structure	Q	Sensitivity / (nm·RIU ⁻¹)	Analyte	Research type
[22]		3×10^3	700	Sucrose solution	Experiment
[23]		10^4	410	NaCl solution	Experiment
[24]		6.08×10^6	460	Liquid	Simulation
[25]		10^3	234	Gas	Experiment
[26]		10^5	851	Gas	Simulation
[27]		4.5×10^7	-	Polystyrene particles	Simulation
[28]		7×10^3	451	Ethanol solution	Experiment
[10]		10^7	900	Gas	Simulation
[29]		1.14×10^7	451	Liquid	Simulation

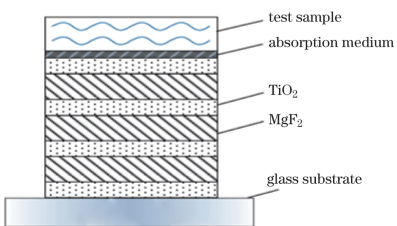
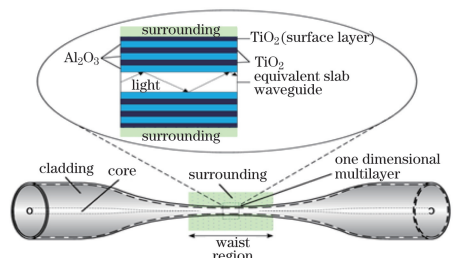
了双纳米梁的槽 PC 结构^[29],在水环境下,其灵敏度达 400 nm/RIU。总之,基于槽结构的纳米束微腔传感器不仅实现了高灵敏度,还实现了高品质因子等特性,这促进了槽结构腔在高灵敏度、低探测极限传感中的应用,对粒子探测、气体检测及生物医疗检测等具有重要意义。

基于上述分析可知,将光场局域到低折射率区域中,可有效提高传感器的灵敏度。对大部分传感器而言,灵敏度越高越好,如何在此基础上进一步提高传感器的灵敏度,研究人员仍然在探索。对于基于 PC 结构的传感器,当前还没有非常有效的方法,根据目前为数不多的研究可知,PC 表面模可能是一个重要方向,一维 PC 表面模缺陷腔在传感中的

典型应用见表 5。2017 年,燕山大学的陈颖等^[30]结合 PC 的缺陷模式和表面模式特性,提出了一种含吸收介质的 PC 法布里-珀罗异质结构,该结构将待测样本直接作为表面缺陷腔,在折射率检测中实现了 1017.98 nm/RIU 的灵敏度。上海大学的 Tu 等^[31]通过激发锥形化光纤的一维 PC 包层的布洛赫表面模,实现了最高为 2184 nm/RIU 的折射率灵敏度,这远高于前述传感器的灵敏度。然而,表 5 中两种传感器在取得高灵敏度的同时,其对应的表面谐振模式的 Q 值分别只有 2097 和 32 左右,这将会影响其传感精度和实际应用价值。因此,实现各方面性能皆优的传感器,仍然需要更多的研究。

表 5 应用于传感领域的一维 PC 表面模缺陷腔

Table 5 1D PC surface-mode cavity applied in sensing field

Reference	Structure	Q	Sensitivity / (nm·RIU ⁻¹)	Research type
[30]		2097	1017.98	Simulation
[31]		<50	2184	Experiment

3 二维平板 PC 传感关键技术及性能

二维 PC 是介电常数在二维空间呈周期性排列的结构,相对于一维 PC,二维 PC 的结构设计更加灵活多样,能够依据需求而构造各种不同的高性能传感器,如折射率传感器、生化传感器、压力传感器等。典型的二维 PC 结构是由一些圆的或方的介质柱在空气背景中排列成六方晶系(三角晶格),或由空气孔在介质背景中规则排列而成的。在理论、实验研究及实际应用中,二维 PC 微腔传感器多以三角晶格空气孔型平板作为基础平台,相较于介质柱型的二维 PC,其在横电(TE)模式下具有较大的光子带隙,并且对光子具有很强的局域效应,因此通过破坏二维 PC 的完美结构从而形成的各种缺陷

微腔可用于高品质因子、高灵敏度及低探测极限的传感器检测。

近年研究较多的二维平板 PC 传感器按其结构设计的不同可分为点缺陷腔传感器、异质结构腔传感器、慢光波导传感器以及导模谐振传感器等。不同结构的传感器性能也有所不同。

3.1 基于点缺陷腔的二维平板 PC 传感技术

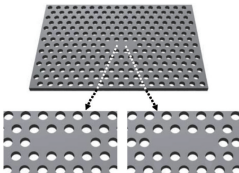
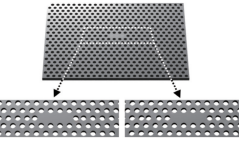
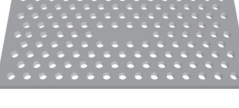
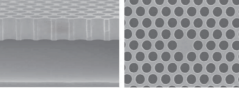
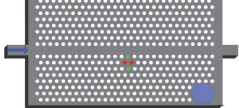
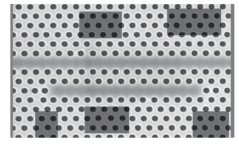
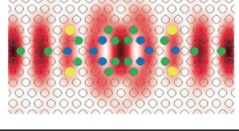
通过去除、增加或移动等方式改变二维 PC 结构中的完美周期性结构,可以构成点缺陷腔。点缺陷腔由于具有结构简单、体积小、易集成以及光场局域性能良好等优点,是二维平板 PC 微腔的一类重要结构,在 PC 传感器中的应用也较多。

设计高性能的二维平板 PC 点缺陷腔对其后续应用非常重要,类似于一维纳米束 PC 微腔,其

设计理念和性能也分别经历了一个逐渐发展和不断优化的过程,典型的基于二维平板 PC 点缺陷腔的设计及其关键性能见表 6。2003 年,日本京都大学的 Akahane 等^[32]首次提出了在完美的二维 PC 结构中去除 3 个空气孔的 L3 微腔的设计理念,并实验验证了其 Q 值达 4.5×10^4 ,模式体积为 $7.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^3$ 。此后,日本京都大学的 Akahane 等^[33]、美国罗切斯特大学的 Lai 等^[34]分别对 L3 微腔进行了优化,极大提高了 L3 微腔的光场局域性能,将 Q 值分别提升到了 10^5 和 10^6 量级。2008 年,日本高等科学技术研究中心的 Tandraechanurat 等^[35]提出了一种在完美的二维 PC 结构中去除一个空气孔的 H1 微腔结构,通过优化平板的厚度,得到最高的仿真 Q 值为 16200,最高的实验 Q 值为 3000。

表 6 高品质因子的二维平板 PC 点缺陷腔


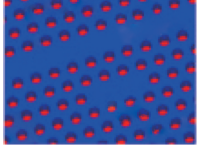
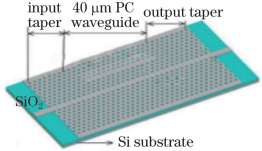
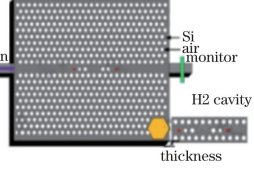
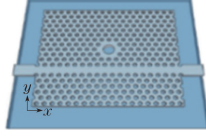
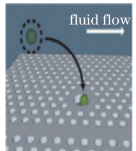
Table 6 2D slab PC point-defect cavity with high quality factor

Reference	Structure	Q	Research type
[32]		4.5×10^4	Experiment
[33]		10^5	Simulation
[34]		10^6	Experiment
[35]		3×10^3	Experiment
[36]		10^3	Simulation
[37]		9.3×10^3	Experiment
[38]		10^6	Simulation

与其他结构不同的是,该设计中 PC 平板平面内光场的强局域能力并非是由 PC 的禁带效应造成的,而是 PC 平板谐振腔模式与二阶导模之间弱耦合的结果。2011 年,北京邮电大学的 Yang 等^[36]仅仅通过移动空气孔的位置,首次提出并形成了 H0 微腔(即无需去除 PC 平板中空气孔,仅通过调整相邻空气孔的相对位置而形成的缺陷腔)模型,该模型的结构简单,对 PC 微腔的单片集成具有重要意义。2012 年,美国的 Chakravarty 等^[37]以 L3 腔为基础,通过去除 PC 平板同一方向上的 n 个空气孔,构建了一系列 L_n 型 PC 微腔模型,这极大丰富了点缺陷腔的设计理念,对后续 L_n 型点缺陷腔的设计具有重要借鉴意义。此外,值得提出的是,2016 年,日本京都大学的 Nakamura 等^[38]通过观察微腔光场在傅里叶空间泄露模中的分布,以一种非常直观的方法对 Q 值进行了优化,这对高品质因子 PC 微腔及基于此类微腔的高性能传感器的设计具有重要指导意义。

二维平板 PC 点缺陷腔具有简单的结构和良好的控光性能,在传感领域得到了学者们的广泛关注,近几年其在生化传感中的典型应用见表 7。2010 年,新加坡的 Hsiao 等^[39]设计了一种二维平板 PC 环形腔生物分子传感器,理论仿真结果表明,该结构对生物分子的传感极限达 0.2 fg。2012 年,美国的 Lai 等^[40]设计了 L3、L7 和 L13 微腔与 W1 波导(去除完美 PC 平板中的一排空气孔所形成的波导)边腔耦合的传感结构,在生化传感中最高灵敏度达到 15 ng/mL。2014 年,美国的 Zou 等^[41]进一步设计了 L13、L21 和 L55 微腔,并对其在生化传感中的性能进行了研究,其中 L55 微腔在实验中对磷酸盐缓冲液中生物素浓度的检测灵敏度为 3.35 pg/mL。同年,北京邮电大学的 Zhou 等^[42]设计了一种基于 H2 微腔(去除 PC 平板中的两个相邻空气孔形成的缺陷腔)的 PC 传感器,并应用于糖水溶液浓度的检测,折射率灵敏度为 $(131.70 \pm 16.82) \text{ nm/RIU}$,探测极限达 $3.797 \times 10^{-6} \text{ RIU}$ 。2015 年,美国罗切斯特大学的 Baker 等^[43]设计了一种大型缺陷腔,并用于检测人体血清中的大分子病毒。基于相似结构,2017 年, Baker 等^[44]又提出了一种新型的基于二维平板 PC 波导耦合的微流控粒子识别检测器,该检测器集成了 PC 病毒探测器,通过对抗体和病毒的实验检测,进一步验证了其对于病毒尺寸的粒子的检测能力。

表 7 应用于生化传感领域的二维 PC 点缺陷腔
Table 7 2D PC point-defect cavity applied in biochemical sensing field

Reference	Structure	Q	Sensitivity	Analyte	Research type
[39]		about 3×10^3	-	Bio-molecule	Simulation
[40]		2.676×10^4	15 ng/mL	Biomacro-molecule	Experiment
[41]		1.4×10^4	3.35 pg/mL	Antibiotic proteins combined with biotin	Experiment
[42]		2.966×10^3	131.70 nm/RIU	Liquid	Simulation
[43]		-	-	Biomacro-molecule	Simulation
[44]		-	-	Biomacro-molecule	Experiment

3.2 基于异质结构微腔的二维平板 PC 传感技术

异质结构是指整体或局部结构渐变的 PC 微腔结构。异质结构微腔可通过调节其结构参数,使谐振模电场分量的强度在空间上随距离的变化更加平缓,从而减小谐振模在漏模部分的光场分量,有效增强微腔对光场的局域能力^[45]。2005 年,日本京都大学的 Song 等^[45]首次提出了一种晶格异构的 PC 微腔,通过优化其 Q 值理论上可以大于 2×10^7 。PC 异质结构微腔因其超高品质因子的优势在传感领域吸引了学者的关注,典型研究见表 8。2008 年,德国乌尔兹堡大学的 Kwon 等^[46]分别设计了一种基于小孔和槽结构的异质结构微腔,其中前者的 Q 值为 3.82×10^6 ,折射率灵敏度为 171 nm/RIU;后者的 Q 值为 1.01×10^6 ,折射率灵敏度为 360 nm/RIU。2009 年,英国圣安德鲁斯大学的 Falco 等^[47]提出了一种用于化学传感的 PC 槽异构微腔,其 Q 值达到

5×10^4 ,灵敏度超过 1500 nm/RIU。2010 年,瑞士洛桑联邦理工学院的 Jágerská 等^[48]提出了一种应用于折射率传感器的空气槽 PC 异质结构,其 Q 值达到 2.6×10^4 ,灵敏度为 510 nm/RIU,检测极限小于 1×10^{-5} RIU。2014 年,法国巴黎-萨克雷大学的 Caër 等^[49]提出了一种基于异质结构微腔的液体传感器,其 Q 值为 2.5×10^4 ,灵敏度为 235 nm/RIU。然而,与点缺陷的 PC 腔相比,基于异质结构的 PC 微腔传感器的结构较大,设计较复杂,制作难度也更大,其实用性是一大问题。

3.3 基于慢光波导的二维平板 PC 传感技术

利用 PC 的慢光效应可以减小光在波导中传播的群速度,增大光场的能量密度,从而增大光与周围物质的相互作用强度,因此常被用于高灵敏度传感器的设计中。近几年,PC 慢光波导在传感领域的典型应用见表 9。2010 年,西班牙瓦伦西亚理工大学

表 8 应用于传感领域的二维 PC 异质结构微腔

Table 8 2D PC heterostructure cavity applied in sensing field

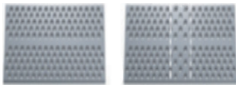
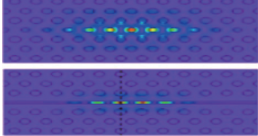
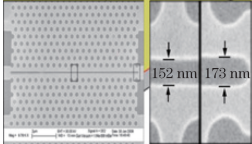
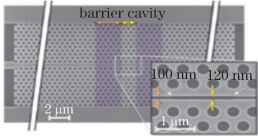
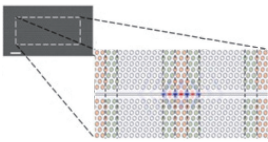
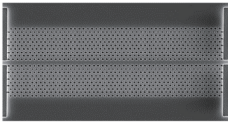
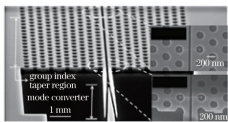
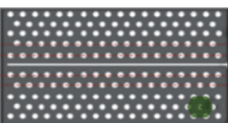
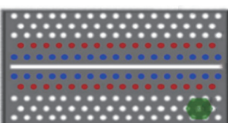
Reference	Structure	Q	Sensitivity / (nm•RIU ⁻¹)	Analyte	Research type
[45]		6×10^5	-	-	Experiment
[46]		3.82×10^6 - 1.01×10^6	171,360	Gas	Simulation
[47]		5×10^4	150	Liquid	Experiment
[48]		2.6×10^4	510	Gas	Experiment
[49]		2.5×10^4	235	Liquid	Experiment

表 9 应用于传感领域的二维 PC 慢光波导

Table 9 2D PC slow-light waveguide applied in sensing field

Reference	Structure	Detection limit	Analyte	Research type
[50]		0.2 fg	Bovine serum albumin	Experiment
[51]		10^{-4}	Methane	Experiment
[52]		10^{-6}	Acetylene	Simulation
[53]		1.56×10^{-6}	Gas	Simulation

的 García-Rupérez 等^[50]提出了一种利用 PC 波导边带慢光效应的无标签抗体传感器,仿真得到的折射率灵敏度达到 174.8 nm/RIU,在对牛血清蛋白的实验检测中,其质量探测极限低于 0.2 fg。将二维 PC 慢光波导与槽波导结合,可以进一步增强光物相互作用,从而提高传感器的灵敏度。2011 年,美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Lai 等^[51]提出了一种

基于二维 PC 慢光槽波导的片上甲烷传感器或甲烷传感芯片,在氮气环境中对甲烷浓度的检测极限达 1×10^{-4} 。2012 年,东北大学的 Zhang 等^[52]提出了一种基于二维 PC 慢光槽波导的高灵敏度气体传感器,其对乙炔气体的理论检测极限为 10^{-6} 。2015 年, Zhang 等^[53]进一步提出了一种液体填充工作频率可调的基于二维 PC 槽波导的多成分气体检测传感器,检测极限达到 1.56×10^{-6} 。此外,还有一些针对 PC 慢光波导中光与粒子的相互作用的研究。2015 年,英国约克大学的 Dholakia 等^[54]利用慢光引导 PC 波导上的一系列亚微米介质粒子,通过仿真和实验验证了粒子速度与 PC 波导中慢光群速度的相关性。2016 年,法国的 Zang 等^[55]利用 PC 慢光波导,研究了原子与光子之间的强相互作用。虽然上述研究不针对具体的传感应用,但其对 PC 传感领域的研究具有重要借鉴意义。总之,PC 慢光波导由于其特殊的控光特性,在生化传感、粒子操控及光器件、光信息处理等领域都具有很大的应用潜力。

3.4 基于导模谐振的二维平板 PC 传感技术

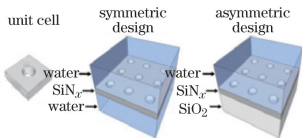
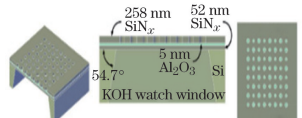
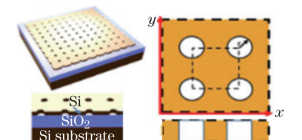
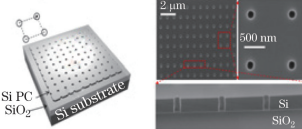
利用导模谐振设计微腔实现传感是二维平板 PC 的另一种应用。与 PC 平面内的谐振模式相比,导模谐振不仅可以将光从平板 PC 的平面内引导到周围环境中,从而增强光物之间的相互作用,而且易于激发出高的 Q 值,因而可用于高灵敏度低探

测极限传感器的设计中^[56]。导模谐振二维平板 PC 在传感中的典型应用见表 10。2010 年,加拿大多伦多大学的 Beheiry 等^[57]研究了对称结构与非对称结构,以及 TE 模与横磁(TM)模对导模谐振 PC 平板折射率传感性能的影响,仿真获得了最高 902 nm/RIU 的灵敏度,以及约 10^{-6} RIU 的探测极限。2013 年,Nicolaou 等^[58]通过调整部分孔的大小使耦合光轻微扰动暗模,极大降低了纳米制作的精确度要求,实验获得了超过 800 nm/RIU 的灵敏度以及最低 1.6×10^{-7} 的探测极限。2017 年,美国奥斯汀大学惠灵顿分校的 Wang 等^[59]利用法诺谐振

垂直入射的方法,实现了检测极限达 1.3×10^{-6} RIU 的光流体折射率传感器。美国德克萨斯大学阿灵顿分校的 Liu 等^[60]发现,通过调整自由空间入射光源与二维 PC 平板法线方向的夹角,可以激发出高 Q 因子单简并模式,并在实验中获得了 3×10^{-5} RIU 的超低探测极限。由上述分析可见,由于具有有效的光物反应和高聚光性能,基于导模谐振结构的二维平板 PC 传感器在实现高灵敏度和低探测极限传感方面具有优势。此外,其还具有设计简单、容易实现的特点,因此在传感领域具有良好的应用前景。

表 10 应用于传感领域的导模谐振二维平板 PC 结构

Table 10 2D slab PC structure with guided-mode resonance applied in sensing field

Reference	Structure	Q	Sensitivity / (nm·RIU ⁻¹)	Detection limit / RIU	Analyte	Research type
[57]		7.1761×10^4	902	10^{-6}	Liquid	Simulation
[58]		1.06×10^4	>800	1.6×10^{-7}	Liquid	Experiment
[59]		5.5×10^3	298	1.3×10^{-6}	Liquid	Experiment
[60]		1.8×10^4	94.5	3×10^{-6}	Liquid	Experiment

4 集成结构 PC 传感关键技术及性能

除了基于单一传感单元的一维纳米束 PC 传感器和二维平板 PC 传感器,基于多个传感单元集成结构的 PC 传感技术近年来也得到了快速发展。相较于单传感单元的传感器,多传感单元的传感器可实现更复杂的功能,如通过额外设置对比腔或通道以消除温度等环境噪声的干扰等;还可提高集成度,如可将多个传感单元与单个或多个硅波导或二维 PC 的 W1 波导进行耦合以复用等。复用的传感器在设计时需要考虑彼此间的相互影响,通常的处理方法主要有两种:一种是在空间上使不同的传感单元或区域的间隔足够大,如通过多路并联等;另一种是在频域上使各传感单元微腔的谐振波长在频谱上的间隔足够大,如通过滤波器滤除谐振腔中与传感

无关的光波模式,或通过优化增大谐振模式的自由频谱范围(FSR)等。正是由于集成结构 PC 传感器设计的灵活性、应用的广泛性和可实现功能的多样性等优点,其在高集成、芯片式及多功能传感等领域展现出巨大的应用前景。

4.1 基于一维纳米束 PC 集成结构的微纳传感技术

4.1.1 基于边腔耦合式集成结构的一维纳米束 PC 传感技术

对一维纳米束 PC 而言,边腔耦合式的集成结构主要是多个纳米束腔通过边腔耦合的方式与主硅波导进行耦合。在传感中,光源从波导的一端入射,传播的过程中不同频段的光逐一耦合到纳米束微腔中,最终在波导末端的透射谱中,通过观测各个下坠峰在待测参量变化下的偏移从而实现传感。2008 年,美国康奈尔大学 Mandal 等^[61]提出并

通过实验验证了一种基于一维纳米束 PC 微腔的传感器阵列模型,如图 4(a)所示。该模型中多个一维纳米束腔逐一耦合到总线波导,每个谐振腔具有不同的谐振波长,且每个谐振腔的谐振波长在传感中的偏移相互独立。之后,Mandal 等^[62-63]又分别于 2009 年和 2010 年提出了一种基于类似结构的在不同应用场景下的生物传感平台。2016 年,浙江大学的 Shi 等^[64]提出并实验制作了一种基于双一维纳米束腔级联的双参量传感器,如图 4(b)所示。该传感器由与主硅波导边腔耦合的两个高品质因子的一维 PC 纳米束腔级联组成,在对 NaCl 溶液浓度和温度的实验测量中,传感器的两个传感单元的折射率灵敏度分别为 255 nm/RIU 和 87.1 nm/RIU,温度灵敏度分别为 24.5 pm/°C 和 51.8 pm/°C,可实现对两个参量的同时测量。

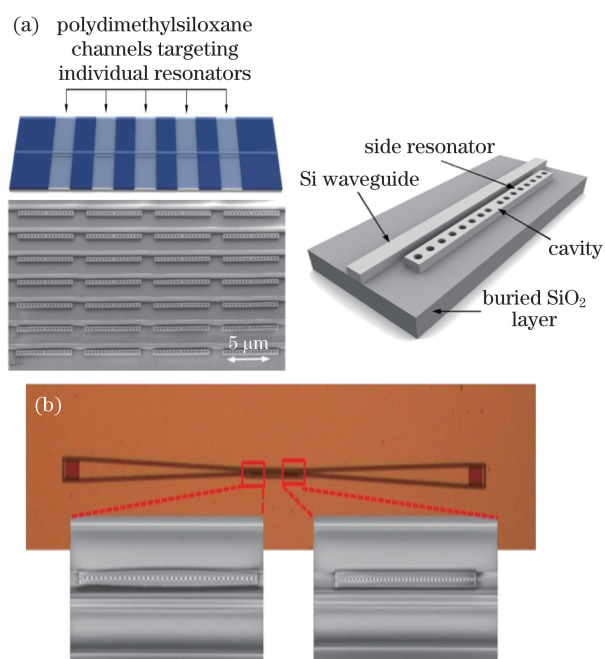


图 4 基于边腔耦合的一维纳米束腔微纳 PC 传感器。

(a) 多纳米束传感器复用阵列^[61-63];

(b) 双纳米束腔级联的双参传感器^[64]

Fig. 4 1D nanobeam cavity PC sensors based on side-cavity-coupling. (a) Multiplexing sensor array with multiple nanobeams^[61-63]; (b) dual-parameter sensor based on double nanobeam cavity cascading^[64]

这种耦合方式直接简单,适用于高集成度传感器芯片的制作,但是各耦合腔的性能不仅与其本身结构有关,还对腔与波导之间的耦合距离比较敏感,因此在设计和制作的过程中都需要对其进行精确控制。另外,在光学检测方案中,还要考虑到传感信号的强度随光程长度的增大而减弱,对于基于一维纳

米束 PC 的集成结构,当微腔数量较少时,边腔耦合式级联的效果较好,集成度与传感性能可达到很好的平衡。但当单路集成的边腔的数量增多时,传感信号的光程也成倍增加,其强度将会不断减弱,且传感器整体结构的稳定性也会减弱。

4.1.2 基于多路并联集成结构的一维纳米束 PC 传感技术

为了实现更高集成度、更简易的 PC 传感器复用技术,克服上述基于边腔耦合式的集成复用技术的缺点,基于一维纳米束 PC 微腔的多腔多路复用技术近年来被提出。2011 年,美国佐治亚理工学院的 Adibi 等^[65]提出了一种基于 32 路一维纳米束 PC 的并联集成结构,如图 5(a)所示。相较于多腔单路复用,多腔多路复用在设计上更为灵活,不仅可以多个单腔直接并联复用,也可以将多个多腔单路结构作为支路再次进行并联复用,因此可有效提高 PC 传感器的集成度和复用度。但是,要在不牺牲各支路的可传感频谱范围的前提下实现大规模集成和复用,一个必要条件是用于复用的各支路微腔要有足够大的 FSR。然而,直接调整各谐振腔的 FSR 的难度较大,而通过给每个谐振腔添加额外的滤波器以滤除谐振腔中非目标谐振模式,从而间接增大 FSR 较为简单。如图 5(b)所示。2016 年,北京邮电大学的 Yang 等^[66]提出了一种基于一维纳米束 PC 滤波器和一维纳米束 PC 微腔的超小体积集成传感器阵列。这种方法在一定程度上解决了 FSR 对可集成微腔数量的限制以及各谐振腔在传感中由于频谱重叠而可能发生的串扰问题。然而,添加滤波器的方案也有其局限性:首先,在实际应用中,滤波器本身的性能不完美,可能会使其在实现滤波功能的同时给系统引入新的干扰;其次,滤波器会带来一定程度的光吸收和损耗,因此也会对传输信号的强度造成一定程度的影响;另外,额外的滤波器也加大了设计的难度和结构的复杂度。因此,为简化设计、提升性能,研究者们致力于优化 PC 微腔目标谐振峰自身的 FSR 性能。2017 年,Yang 等^[67]又提出了一种基于宽 FSR 一维纳米束的超小体积高密度集成传感器阵列,如图 5(c)所示。

4.2 基于二维平板 PC 集成结构的微纳传感技术

4.2.1 基于多腔单路集成结构的二维平板 PC 传感技术

2011 年,美国罗切斯特大学的 Pal 等^[68]设计了一种基于二维平板 PC 的三腔级联的传感器阵列,如图 6(a)所示,实验分析显示,该传感器对不同折

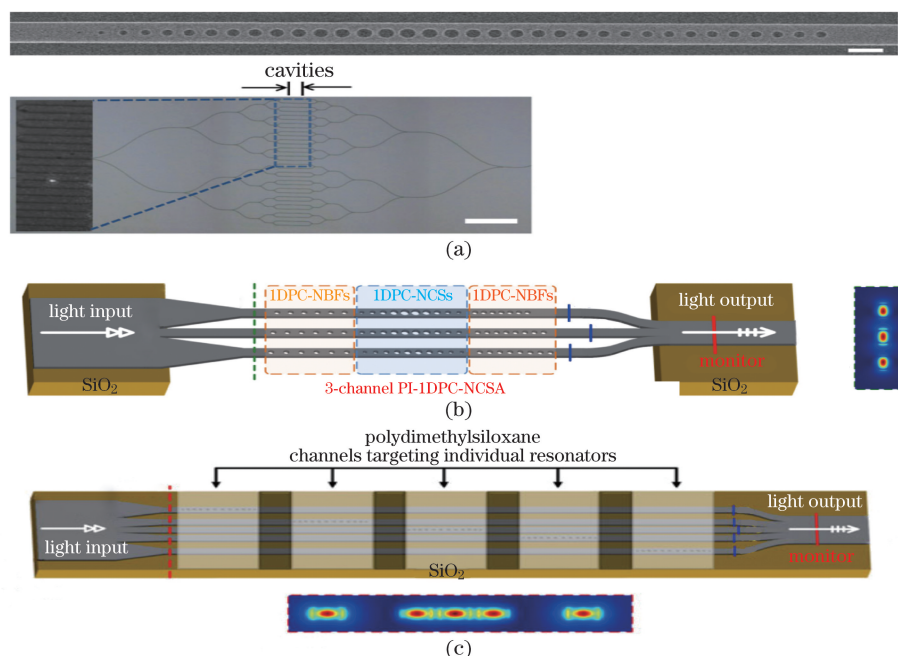


图 5 基于多腔多路的一维纳米束 PC 传感器阵列的设计。(a) 32 路并联集成传感器阵列^[65]；
 (b) 各支路级联额外滤波器^[66]；(c) 直接优化各支路微腔自身的 FSR 性能^[67]
 Fig. 5 Design of 1D nanobeam cavity PC sensor array based on multi-cavity and multi-channel.
 (a) 32-channel parallel integrated sensor array^[65]；(b) branch-cascaded additional filters^[66]；
 (c) own FSR performance of each branch after direct optimization^[67]

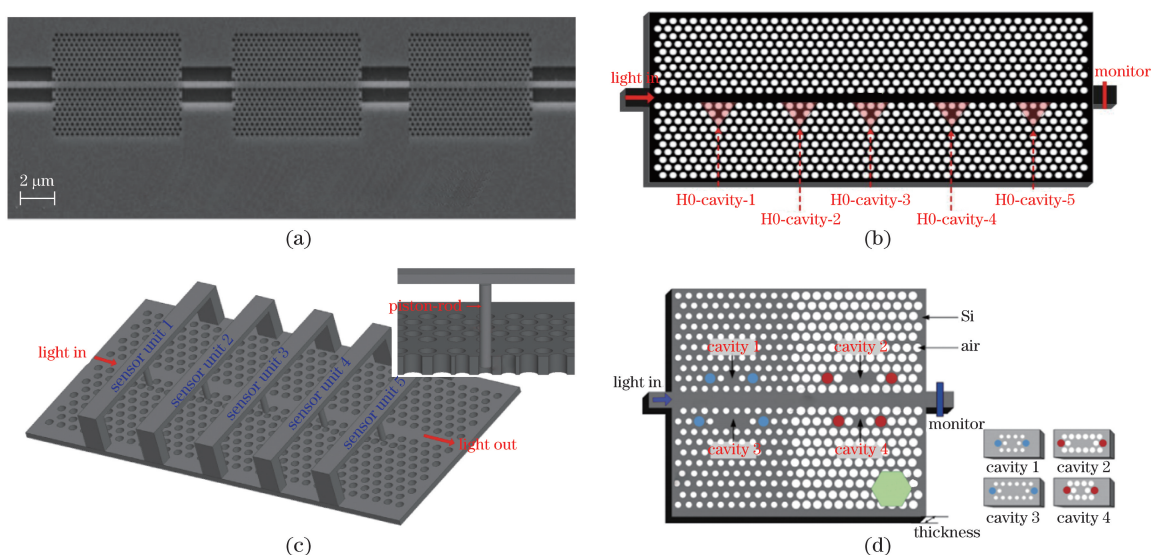


图 6 基于多腔单路的二维平板 PC 传感器阵列的设计。(a) 串联式集成的传感器阵列^[68-69]；
 (b)~(d) 边腔耦合式集成的传感阵列^[70-71]
 Fig. 6 Designs of 2D PC sensor array based on multi-cavity and single-channel. (a) Series integrated sensor array^[68-69]；
 (b)-(d) side-cavity-coupled integrated sensor array^[70-71]

射率的液体具有 64.5 nm/RIU 的折射率灵敏度, 对人体免疫球蛋白 G(IgG) 分子的检测限低达 1.5 fg, 灵敏度为 $(2.3 \pm 0.24) \times 10^5$ nm/(mol·L⁻¹)。这种基于多腔直接级联的复用方式, 使传感器的集成度和复用度得到了有效提高, 但缺点是体积也成倍增

大。随后, 基于单片二维 PC 平板的多腔单路集成复用方案被陆续提出, 传感器的集成度和复用度得到了更有效的提高。2011 年, 北京邮电大学的 Yang 等^[69] 提出了一种基于单片二维平板 PC 的多腔单路传感器阵列模型, 如图 6(b) 所示, 该模型由六个谐

振波长互异的 H0 腔与一个二维 PC-W1 波导通过边腔耦合的方式集合而成。在仿真分析中,该传感器单腔对折射率的灵敏度为 115.60 nm/RIU,探测极限为 8.65×10^{-5} ,且通过优化功能孔的数量,可以将灵敏度从 84.39 nm/RIU 调整到 161.25 nm/RIU。在此基础上,2013 年,北京邮电大学的 Yang 等^[70]设计了一种新型的基于二维平板 PC 的纳米级无扭力压力传感器阵列,如图 6(c)所示,该传感器阵列由二维平板 PC-W1 波导和与之进行边腔耦合的一系列相互独立的活塞型微腔组成。仿真分析中,该传感器的单个传感单元的压力灵敏度可达 0.50 nm/nN。之后,2014 年,北京邮电大学的 Liu 等^[71]提出了一种基于二维 PC 晶格异构的四腔复用传感器阵列,如图 6(d)所示,其中两个 L3 腔和两个 H1 腔分别集成在晶格异构的二维平板 PC-W1 波导的两侧,与微腔只在 W1 波导单侧的集成方式相比,其集成度得到进一步提高。

上述方案均有效提高了传感器阵列的集成度和复用度。但是,集成度和复用度越高,各相邻传感单元的谐振腔之间的 FSR 越窄,这意味着各传感单元可用于传感的频谱范围越有限。当单个传感单元的谐振波长偏移范围超出其 FSR 时,相邻的传感单元就有可能相互作用而发生串扰,这将使得传感信号难以识别。

4.2.2 基于多腔多路集成结构的二维平板 PC 传感技术

为有效提高二维平板 PC 传感器的集成度和复用度,另一种方案是采用多通道分别检测的方法,即多腔多路方案。2003 年,美国密歇根大学的 Topol'ančik 等^[72]提出了多通道 PC 流体传感器的概念,如图 7(a)所示。该传感器阵列主要由两个独立的二维平板 PC 微腔构成的两个分支组成,通过将两个分支并联,成功实现了双通道传感的目的。2011 年,新加坡的 Li 等^[73]提出了一种“双微环”结构的 PC 压力传感模型,如图 7(b)所示。该模型通过并联集成两个独立的传感单元,可以同时实现对两个力的独立传感。随后,如图 7(c)~(e)所示,北京邮电大学的 Yang 等^[74-76]先后于 2014 年和 2016 年提出了基于二维平板 PC 微腔的 2×3 双路多腔高集成度传感阵列、 1×3 低串扰的环形槽传感阵列以及 1×4 单片 PC 的多腔多路集成传感阵列。2017 年,美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Yan 等^[77]提出并通过实验验证了基于四路二维平板 PC 微腔并联复用的 1×4 生物传感器阵列等,如图 7(f)所示。

在实际应用中,当集成的传感单元或谐振腔的数量较少时,上述方案可有效提高 PC 传感器的集成度和复用度。然而,类似于一维纳米束 PC 传感器

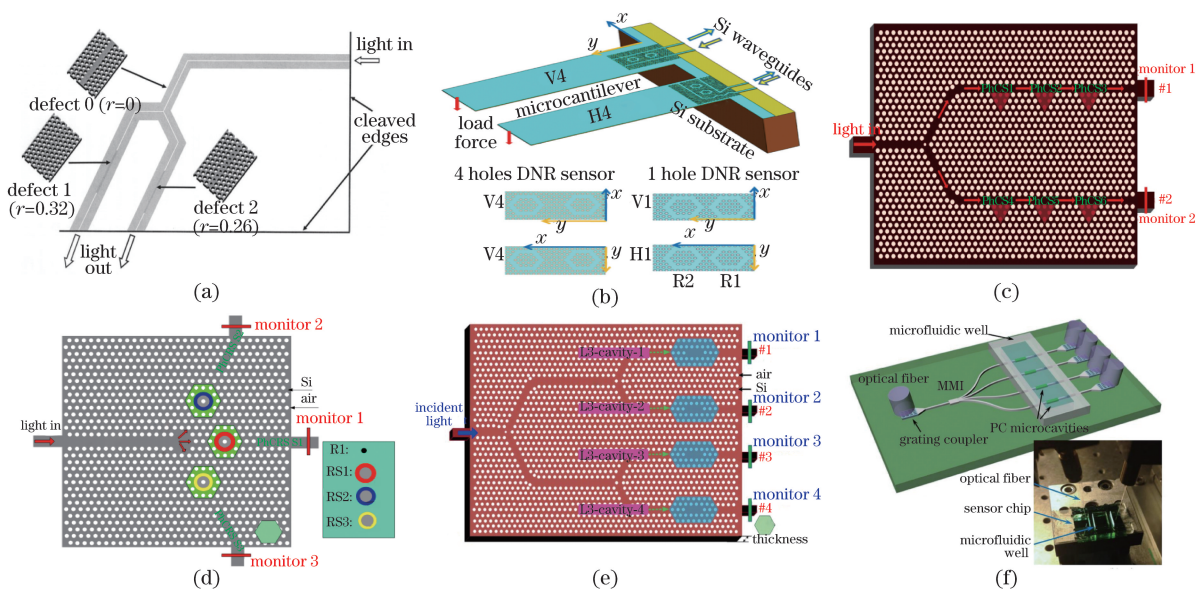


图 7 基于多腔多路集成结构的二维平板 PC 传感器阵列的设计。(a)~(c)双通道传感器阵列^[73-74];
(d)三通道传感器阵列^[75];(e)~(f)四通道传感器阵列^[76-77]

Fig. 7 Designs of 2D slab PC sensor array based on multi-cavity and multi-channel.

(a)-(c) Dua-channel sensor arrays^[73-74]; (d) three-channel sensor arrays^[75];

(e)-(f) four-channel sensor arrays^[76-77]

的集成复用,当集成度进一步提高时,受各传感单元谐振腔 FSR 的限制,串扰问题依然存在。2015 年,德克萨斯大学奥斯汀分校的 Yan 等^[78]提出了一种基于二维平板 PC 微腔与滤波器级联的高集成度多路并联的复用传感器阵列,如图 8(a)所示。2016 年,北京邮电大学的 Zhou 等^[79]提出的一种类似的由二维平板 PC 滤波器与微腔级联的 1×3 高灵敏度集成度的多路复用传感器阵列,如图 8(b)所示。上述方案通过为每个传感单元添加额外滤波器的方法,在一定范围内滤除了谐振腔中与目标谐振模式无关的光波模式,从而间接增大了各传感单元的 FSR,这在一定程度上解决了单个传感单元谐振腔的 FSR 对可集成复用的传感单元数量的限制问题。然而,这种方案也有其不足之处,与基于滤波器方案的一维纳米束集成结构类似,首先,额外的滤波器意味着额外的复杂度和更大的体积;其次,额外的滤波器也意味着滤波器本身性能的不完美也可能带来新的负面影响,如滤波器的边缘模式干扰,以及对所传输信号的散射和吸收等。

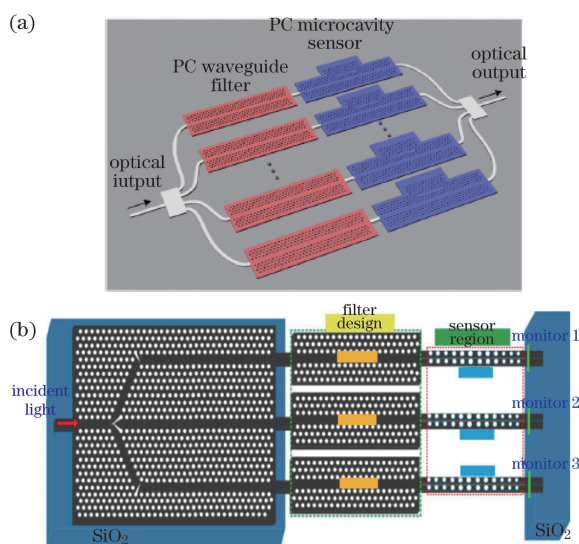


图 8 基于 PC 微腔与滤波器级联的传感器阵列的设计。

(a)文献[78];(b)文献[79]

Fig. 8 Design of sensor arrays based on PC cavity and filter cascading. (a) From reference [78];

(b) from reference [79]

4.2.3 基于芯片化阵列式集成结构的二维平板 PC 传感技术

对 PC 微腔进行串并联集成是目前提高传感器阵列集成度、复用度以及实现多功能检测的一种有效方式,在此基础上,更高集成度的、芯片化、多功能的传感器阵列被陆续提出。2014 年,美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Zou 等^[80]通过实验验证了一种

有效、稳定的 PC 微腔串并联集成方案,该方案通过功率分光器产生高密度的硅纳米光子微阵列,可实现 64 路二维平板 PC 微腔的同时传感,如图 9(a)所示。2017 年,美国马里兰大学的 Chen 等^[81]提出了一种基于平面 PC 阵列的新型片上多功能传感平台,如图 9(b)所示。该平台通过在平面基板上大量刻蚀低维(一维和二维)PC 结构来构成平面 PC 传感阵列,且阵列中各个谐振结构的基模和高阶谐振模对不同类型的外部刺激表现出独特的反应。利用各谐振腔的协同效应,可同时测量多个参数。Chen 等^[81]在利用这种多功能感测平台同时检测压力和温度时,获得各传感单元压力的灵敏度分别为 18, -54, -53, -98, -81 pm/MPa,温度的灵敏度分别为 -48, -46, -44, -39, -17 pm/°C。以上类型的设计不仅对实现高密度集成的传感器芯片很重要,也对紧凑型分插滤波器的设计提供了参考,可广泛应用于光学通信芯片等领域。

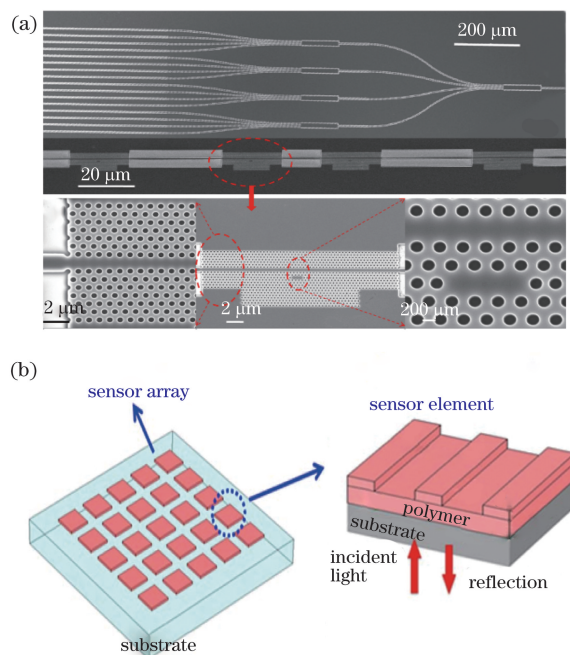


图 9 (a) 64 腔集成传感阵列^[80]; (b) 片上多功能传感平台^[81]

Fig. 9 (a) 64-cavity integrated sensor array^[80]; (b) on-chip multi-functional sensor platform^[81]

5 结束语

PC 结构的超小体积使基于 PC 的传感器的尺寸大幅度减小。同时,PC 极强的控光能力可以提升传感器的传感性能,如灵敏度和探测极限等。总之,PC 独特光子局域特性从根本上克服了微小尺寸下控制光子的困难,使传感器的超小型化成为可能。此外,通过多腔联用等集成结构,PC 又为传感器的

多功能化及高密度集成复用提供了新的方向和可能。随着近三十年的不断发展,目前 PC 传感器的研究已经由前期对结构的探索与设计,向着高集成、芯片化、多功能化等方向逐渐转变,这种转变契合了当前各领域对传感的大量、多样化需求。然而,有效克服超高集成度带来的串扰问题,突破目前 PC 传感器所面临的性能优化瓶颈,发掘新的传感机制以适应实际的复杂应用场景,以及解决目前微纳 PC 器件制作困难、成本高的问题,都是当前研究人员所面临的挑战及未来努力的方向。

参 考 文 献

- [1] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486.
- [2] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059.
- [3] Foresi J S, Villeneuve P R, Ferrera J, *et al.* Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides[J]. Nature, 1997, 390(6656): 143-145.
- [4] Lalanne P, Mias S, Hugonin J P. Two physical mechanisms for boosting the quality factor to cavity volume ratio of photonic crystal microcavities[J]. Optics Express, 2004, 12(3): 458-467.
- [5] Notomi M, Kuramochi E, Taniyama H. Ultrahigh-Q nanocavity with 1D photonic gap[J]. Optics Express, 2008, 16(15): 11095-11102.
- [6] Zain A R, Johnson N P, Sorel M, *et al.* Ultra high quality factor one dimensional photonic crystal/photonic wire micro-cavities in silicon-on-insulator (SOI)[J]. Optics Express, 2008, 16(16): 12084-12089.
- [7] Deotare P B, Mccutcheon M W, Frank I W, *et al.* High quality factor photonic crystal nanobeam cavities[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(12): 121106.
- [8] Quan Q, Loncar M. Deterministic design of wavelength scale, ultra-high Q photonic crystal nanobeam cavities[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18529-18542.
- [9] Yang D, Tian H, Ji Y. High-Q and high-sensitivity width-modulated photonic crystal single nanobeam air-mode cavity for refractive index sensing[J]. Applied Optics, 2015, 54(1): 1-5.
- [10] Yang D, Zhang P, Tian H, *et al.* Ultrahigh-Q and low-mode-volume parabolic radius-modulated single photonic crystal slot nanobeam cavity for high-sensitivity refractive index sensing[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1-8.
- [11] Quan Q, Burgess I B, Tang S K Y, *et al.* High-Q, low index-contrast polymeric photonic crystal nanobeam cavities[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 22191-22197.
- [12] Yao K, Shi Y. High-Q width modulated photonic crystal stack mode-gap cavity and its application to refractive index sensing[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27039-27044.
- [13] Feng C, Feng G Y, Zhou G R, *et al.* Design of an ultracompact optical gas sensor based on a photonic crystal nanobeam cavity[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(12): 875.
- [14] Clevenston H, Desjardins P, Gan X, *et al.* High sensitivity gas sensor based on high-Q suspended polymer photonic crystal nanocavity[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(24): 241108.
- [15] Fegadolli W S, Pavarelli N, O'Brien P, *et al.* Thermally controllable silicon photonic crystal nanobeam cavity without surface cladding for sensing applications[J]. ACS Photonics, 2015, 2(4): 470-474.
- [16] Zhang Y, Han S, Zhang S, *et al.* High-Q and high-sensitivity photonic crystal cavity sensor[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1-6.
- [17] Zhang X, Zhou G, Shi P, *et al.* On-chip integrated optofluidic complex refractive index sensing using silicon photonic crystal nanobeam cavities[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1197-1200.
- [18] Liang F, Quan Q. Detecting single gold nanoparticles (1.8 nm) with ultrahigh-Q air-mode photonic crystal nanobeam cavities[J]. ACS Photonics, 2015, 2(12): 1692-1697.
- [19] Kim S, Kim H M, Lee Y H. Single nanobeam optical sensor with a high Q-factor and high sensitivity[J]. Optics letters, 2015, 40(22): 5351-5354.
- [20] Huang L, Zhou J, Sun F, *et al.* Optimization of one dimensional photonic crystal elliptical-hole low-index mode nanobeam cavities for on-chip sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(15): 3496-3502.
- [21] Sun F, Fu Z, Wang C, *et al.* Ultra-compact air-mode photonic crystal nanobeam cavity integrated with bandstop filter for refractive index sensing[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4363-4368.
- [22] Wang B, Dündar M A, Nötzel R, *et al.* Photonic crystal slot nanobeam slow light waveguides for refractive index sensing[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(15): 151105.
- [23] Xu P, Yao K, Zheng J, *et al.* Slotted photonic

- crystal nanobeam cavity with parabolic modulated width stack for refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26908-26913.
- [24] Lin T, Zhang X, Zhou G, *et al.* Design of an ultra-compact slotted photonic crystal nanobeam cavity for biosensing[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(9): 1788-1791.
- [25] Yaseen M T, Yang Y C, Shih M H, *et al.* Optimization of high-Q coupled nanobeam cavity for label-free sensing[J]. *Sensors*, 2015, 15(10): 25868-25881.
- [26] Li T, Gao D, Zhang D, *et al.* High-Q and high-sensitivity one-dimensional photonic crystal slot nanobeam cavity sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(6): 689-692.
- [27] Zhang S, Yong Z, Shi Y, *et al.* Numerical analysis of an optical nanoscale particles trapping device based on a slotted nanobeam cavity[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35977.
- [28] Yang D, Kita S, Liang F, *et al.* High sensitivity and high Q-factor nanoslotted parallel quadrabeam photonic crystal cavity for real-time and label-free sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(6): 063118.
- [29] Zhou J, Tian H, Huang L, *et al.* Parabolic tapered coupled two photonic crystal nanobeam slot cavities for high-FOM biosensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(16): 1281-1284.
- [30] Chen Y, Cao H Y, Han S T, *et al.* Sensing property of photonic crystal Fabry-Pérot heterogeneous structure with absorption medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0223003.
陈颖, 曹会莹, 韩帅涛, 等. 含吸收介质的光子晶体法布里-珀罗异质结构的传感特性研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0223003.
- [31] Tu T, Pang F, Zhu S, *et al.* Excitation of Bloch surface wave on tapered fiber coated with one-dimensional photonic crystal for refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9019-9027.
- [32] Akahane Y, Asano T, Song B S, *et al.* High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal[J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 944-947.
- [33] Akahane Y, Asano T, Song B S, *et al.* Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity[J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1202-1214.
- [34] Lai Y, Pirotta S, Urbinati G, *et al.* Genetically designed L3 photonic crystal nanocavities with measured quality factor exceeding one million[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(24): 096501.
- [35] Tandaechanurat A, Iwamoto S, Nomura M, *et al.* Increase of Q-factor in photonic crystal H1-defect nanocavities after closing of photonic bandgap with optimal slab thickness[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 448-455.
- [36] Yang D, Tian H, Ji Y. Nanoscale photonic crystal sensor arrays on monolithic substrates using side-coupled resonant cavity arrays[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20023-20034.
- [37] Chakravarty S, Zou Y, Lai W C, *et al.* Slow light engineering for high Q high sensitivity photonic crystal microcavity biosensors in silicon[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2012, 38(1): 170-176.
- [38] Nakamura T, Takahashi Y, Tanaka Y, *et al.* Improvement in the quality factors for photonic crystal nanocavities via visualization of the leaky components[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9541-9549.
- [39] Hsiao F L, Lee C. Computational study of photonic crystals nano-ring resonator for biochemical sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(7): 1185-1191.
- [40] Lai W C, Chakravarty S, Zou Y, *et al.* Silicon nanomembrane based photonic crystal microcavities for high sensitivity bio-sensing[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(7): 1208-1210.
- [41] Zou Y, Chakravarty S, Kwong D N, *et al.* Cavity-waveguide coupling engineered high sensitivity silicon photonic crystal microcavity biosensors with high yield[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4): 1-10.
- [42] Zhou J, Tian H, Yang D, *et al.* Integration of high transmittance photonic crystal H2 nanocavity and broadband W1 waveguide for biosensing applications based on silicon-on-insulator substrate[J]. *Optics Communications*, 2014, 330(1): 175-183.
- [43] Baker J E, Miller B L. Discrimination of “specific” and “nonspecific” binding in two-dimensional photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7101-7110.
- [44] Baker J E, Sriram R, Miller B L. Recognition-mediated particle detection under microfluidic flow with waveguide-coupled 2D photonic crystals: towards integrated photonic virus detectors[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(9): 1570-1577.
- [45] Song B S, Noda S, Asano T, *et al.* Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity[J]. *Nature materials*, 2005, 4(3): 207-210.
- [46] Kwon S H, Süner T, Kamp M, *et al.* Optimization of photonic crystal cavity for chemical sensing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 11709-11717.
- [47] Falco A D, O’faolain L, Krauss T F. Chemical sensing in slotted photonic crystal heterostructure cavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(6): 063503.

- [48] Jágerská J, Zhang H, Diao Z, *et al.* Refractive index sensing with an air-slot photonic crystal nanocavity[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2523-2525.
- [49] Caër C, Serna-Otálvaro S F, Zhang W, *et al.* Liquid sensor based on high-Q slot photonic crystal cavity in silicon-on-insulator configuration[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5792-5794.
- [50] García-Rupérez J, Toccafondo V, Bañuls M J, *et al.* Label-free antibody detection using band edge fringes in SOI planar photonic crystal waveguides in the slow-light regime[J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 24276-24286.
- [51] Lai W C, Chakravarty S, Wang X, *et al.* On-chip methane sensing by near-IR absorption signatures in a photonic crystal slot waveguide[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 984-986.
- [52] Zhang Y N, Zhao Y, Wu D, *et al.* Theoretical research on high sensitivity gas sensor due to slow light in slotted photonic crystal waveguide[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 173(12): 505-509.
- [53] Zhang Y, Zhao Y, Wang Q. Multi-component gas sensing based on slotted photonic crystal waveguide with liquid infiltration[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 184(8): 179-188.
- [54] Dholakia K, Scullion M G, Krauss T F, *et al.* Enhancement of optical forces using slow light in a photonic crystal waveguide[J]. *Optica*, 2015, 2(9): 816-821.
- [55] Zhang X, Yang J, Faggiani R, *et al.* Interaction between atoms and slow light: a waveguide-design study[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5(2): 024003.
- [56] Fan S H, Joannopoulos J D. Analysis of guided resonances in photonic crystal slabs[J]. *Physical Review B*, 2002, 65(23): 235112.
- [57] Beheiry M E, Liu V, Fan S, *et al.* Sensitivity enhancement in photonic crystal slab biosensors[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 22702-22714.
- [58] Nicolaou C, Lau W T, Gad R, *et al.* Enhanced detection limit by dark mode perturbation in 2D photonic crystal slab refractive index sensors[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31698-31712.
- [59] Wang S, Liu Y, Zhao D, *et al.* Optofluidic Fano resonance photonic crystal refractometric sensors[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(9): 091105.
- [60] Liu Y, Wang S, Zhao D, *et al.* High quality factor photonic crystal filter at $k \approx 0$ and its application for refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10536-10545.
- [61] Mandal S, Erickson D. Nanoscale optofluidic sensor arrays[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 1623-1631.
- [62] Mandal S, Goddard J M, Erickson D. A multiplexed optofluidic biomolecular sensor for low mass detection[J]. *Lab on a Chip*, 2009, 9(20): 2924-2932.
- [63] Goddard J M, Mandal S, Nugen S R, *et al.* Biopatterning for label-free detection[J]. *Colloids & Surfaces B Biointerfaces*, 2010, 76(1): 375-380.
- [64] Shi Y. Ultracompact high-sensitivity biochemical sensor built with photonic crystal nanobeam cavity[C]. *IEEE Nanoelectronics Conference*, 2016: 16394112.
- [65] Adibi A, Eftekhari A A, Momeni B, *et al.* High resolution on-chip spectroscopy based on miniaturized microdonut resonators[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12356-12364.
- [66] Yang D, Wang C, Ji Y. Silicon on-chip 1D photonic crystal nanobeam bandstop filters for the parallel multiplexing of ultra-compact integrated sensor array[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16267-16279.
- [67] Yang D, Wang B, Chen X, *et al.* Ultra-compact on-chip multiplexed sensor array based on dense integration of flexible 1D photonic crystal nanobeam cavity with large free spectral range and high Q-factor[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1-9.
- [68] Pal S, Guillermain E, Sriram R, *et al.* Silicon photonic crystal nanocavity-coupled waveguides for error-corrected optical biosensing[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2011, 26(10): 4024-4031.
- [69] Yang D, Tian H, Ji Y. Nanoscale photonic crystal sensor arrays on monolithic substrates using side-coupled resonant cavity arrays[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20023-20034.
- [70] Yang D, Tian H, Wu N, *et al.* Nanoscale torsion-free photonic crystal pressure sensor with ultra-high sensitivity based on side-coupled piston-type microcavity[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013, 199(17): 30-36.
- [71] Liu Q, Tian H, Yang D, *et al.* Nanoscale radius-graded photonic crystal sensor arrays using interlaced and symmetrical resonant cavities for biosensing[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2014, 216(3): 223-230.
- [72] Topol'ančik J, Bhattacharya P, Sabarinathan J, *et al.* Fluid detection with photonic crystal-based multichannel waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(8): 1143-1145.
- [73] Li B. Configuration analysis of sensing element for photonic crystal based NEMS cantilever using dual nano-ring resonator[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2011, 169(2): 352-361.
- [74] Yang D, Tian H, Ji Y. Nanoscale low crosstalk photonic crystal integrated sensor array[J]. *IEEE*

- Photonics Journal, 2014, 6(1): 1-7.
- [75] Huang L, Tian H, Zhou J, *et al.* Design low crosstalk ring-slot array structure for label-free multiplexed sensing[J]. Sensors, 2014, 14(9): 15658.
- [76] Zhou J, Huang L, Fu Z, *et al.* Higher Q factor and higher extinction ratio with lower detection limit photonic crystal-parallel-integrated sensor array for on-chip optical multiplexing sensing[J]. Applied Optics, 2016, 55(35): 10078-10083.
- [77] Yan H, Yang C J, Tang N, *et al.* Specific detection of antibiotics by silicon on-chip photonic crystal biosensor arrays[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 7(18): 5915-5919.
- [78] Yan H, Zou Y, Chakravarty S, *et al.* Silicon on-chip bandpass filters for the multiplexing of high sensitivity photonic crystal microcavity biosensors[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(12): 229-234.
- [79] Zhou J, Huang L, Fu Z, *et al.* Multiplexed simultaneous high sensitivity sensors with high-order mode based on the integration of photonic crystal 1×3 beam splitter and three different single-slot PCNCs[J]. Sensors, 2016, 16(7): 1050.
- [80] Zou Y, Chakravarty S, Zhu L, *et al.* The role of group index engineering in series-connected photonic crystal microcavities for high density sensor microarrays[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(14): 141103.
- [81] Chen Y, Liu H, Zhang Z, *et al.* Planar photonic crystal based multifunctional sensors[J]. Applied Optics, 2017, 56(6): 1775-1780.