

# 光子晶体光纤传感器研究进展

马 健, 余海湖, 熊家国\*, 郑 羽

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

**摘要** 光子晶体光纤(PCF)具有许多不同于普通光纤的特性,将 PCF 应用于传感领域是近年来的研究热点。介绍了 PCF 的基本结构、导光原理及制备方法,概述了干涉型、吸收型、荧光型、表面等离子体共振型、拉曼散射型及光栅型 PCF 传感器的原理及国内外研究进展,分析了其应用领域和优缺点,展望了 PCF 传感器的发展趋势。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 干涉仪; 荧光; 表面等离子体共振; 拉曼散射

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.070006

## Research Progress of Photonic Crystal Fiber Sensors

Ma Jian, Yu Haihu, Xiong Jiaguo, Zheng Yu

*National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology,  
Wuhan, Hubei 430070, China*

**Abstract** Photonic crystal fiber (PCF) has many characteristics which are different from those of traditional optical fiber, and the application of PCF in sensing field becomes a hot research topic in recent years. The basic structure, guiding principle and preparation method of PCF are introduced. The principle and research progress at home and abroad of interference, absorption, fluorescence, surface plasmon resonance, Raman scattering and grating PCF sensors are summarized. The application fields, advantages and disadvantages of PCF are analyzed. The development trend of PCF sensors is prospected.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; interferometer; fluorescence; surface plasmon resonance; Raman scattering

**OCIS codes** 060.2370; 060.5295; 040.1880

## 1 引 言

随着信息化时代的到来,物联网这一概念越来越频繁地被人们提及。作为物联网的关键组成部分,传感器的重要性日益凸显。作为传感器的一个分支,光纤传感器发展至今已有 30 多年,并以优异的性能占据重要地位,如航天、军事等领域对光纤陀螺仪、光纤电流传感器、光纤水听器等产品有大量需求。

光子晶体光纤(PCF)是一类在包层区域具有二维周期性折射率变化的特殊光纤,可通过引入空气孔结构或多组分材料进行制备<sup>[1-2]</sup>,这种包层微结构使得 PCF 成为独特的光波导以及具有色散可调制、传输可控等特性<sup>[1-3]</sup>,并且这些特性与光纤结构密切相关,即通过改变结构参数可改变 PCF 的特性<sup>[3]</sup>,故自其诞生以来一直受到人们的广泛关注。PCF 不仅在脉冲压缩、高次谐波、超连续谱、色散调控、粒子传输等方面<sup>[4-9]</sup>具有很大的应用价值,也为光纤传感器的设计提供了新的选择。近年来,基于 PCF 的传感技术引起诸多研究者的兴趣,各种具有优异性能的新型传感结构不断被提出,因此 PCF 传感器具有广泛的发展前景。

**收稿日期:** 2016-12-01; **收到修改稿日期:** 2017-02-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(61290311)、湖北省自然科学基金(2015AAA001)

**作者简介:** 马 健(1993—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感及特种光纤方面的研究。E-mail: jeromema@foxmail.com

**导师简介:** 余海湖(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事特种光纤及传感器方面的研究。

E-mail: hhyu@whut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: xjg@whut.edu.cn

本文分别介绍了几种 PCF 传感器的原理及国内外研究进展,对其各自应用领域和优缺点进行了分析,并对 PCF 传感器的未来发展趋势进行了展望。

## 2 PCF 原理及制备方法

1991 年, Russell 等<sup>[10]</sup> 提出在二维光子晶体中引入线形缺陷。光子带隙的作用使得某些频率的光局限于线型缺陷中,从而可达到传导光的目的。1996 年 PCF 拉制成功,但其纤芯为实芯结构,包层空气孔的引入使纤芯折射率高于包层整体折射率,PCF 与普通光纤一样按照全内反射原理导光,称为折射率引导型 PCF<sup>[11]</sup>。1998 年,基于光子带隙原理的 PCF 被提出<sup>[12]</sup>。光子带隙型 PCF 的纤芯具有较大的空气孔,当光在纤芯中以某个角度入射至包层微结构时,包层的周期性结构使光产生多重散射,多重散射引起的干涉减弱将导致光无法通过包层微结构而返回纤芯,即在某一特定传播常数  $\beta$  下,如果光的频率落入包层微结构的光子带隙之中,光就会受到包层的排斥而被限制在纤芯中<sup>[13]</sup>。

PCF 的制备方法有堆拉法、挤压法、化学腐蚀法和机械钻孔法等。堆拉法是目前采用较多的方法,利用该方法制作的 2 种不同类型的 PCF 的扫描电子显微镜(SEM)图片如图 1 所示,主要步骤为:1) 将空芯/实芯石英棒拉制成所需尺寸的毛细管/细棒,堆栈成所需要的形状并紧密套入尺寸较大的空芯石英棒中[图 2(a)];2) 将堆栈后的结构拉制成中间体预制棒[图 2(b)];3) 将中间体预制棒再次紧密套入一定尺寸的空芯石英棒中,形成光纤预制棒,再拉制光纤预制棒以得到 PCF[图 2(c)]。需要注意的是,在中间体预制棒及光纤成品的拉制过程中,压力控制决定气孔的形状及大小。堆拉法的优点是无需引入其他特殊设备,普通光纤拉丝塔即可满足生产条件,且所制备预制棒成品的轴向均匀度好,缺点是堆积时易引入灰尘、水分等杂质,从而降低光纤性能。

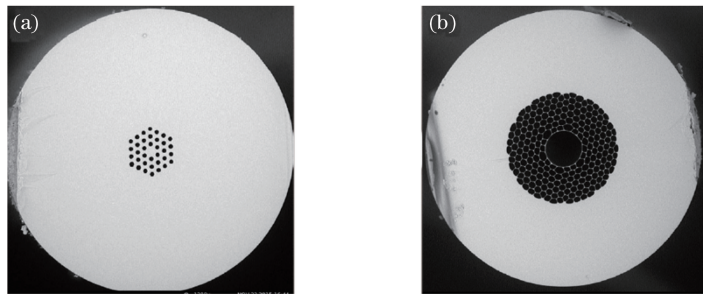


图 1 PCF 的 SEM 图像(黑色区域为空气孔)。(a)折射率引导型 PCF;(b)光子带隙型 PCF

Fig. 1 SEM images of PCF (black areas are air holes). (a) Index-guiding type PCF; (b) photonic bandgap type PCF

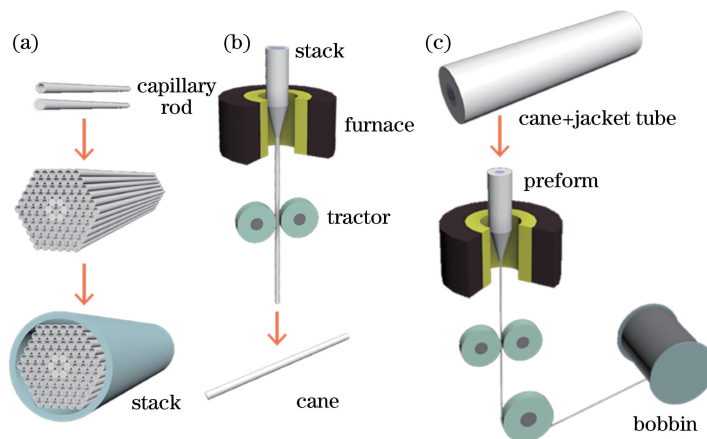


图 2 采用堆拉法制备 PCF 的示意图。(a)细管堆栈;(b)中间体预制棒的拉制;(c) PCF 的最终拉制

Fig. 2 Schematic of PCF fabrication with stack-and-draw method. (a) Stacking of tubules; (b) drawing of intermediate preform; (c) final drawing of PCF

### 3 PCF 传感器

PCF 自诞生以来一直受到人们的广泛关注,在脉冲压缩、高次谐波、超连续谱、色散调控、粒子传输等方面已有大量研究。不同于普通光纤,PCF 易于通过灵活的结构设计获得一些新的性质,如多孔结构、无截止单模、色散调制、非线性可控和高双折射效应等,有望拓展光纤传感器的应用范围。近年来国内外许多课题组开展了有关 PCF 传感技术的研究,并取得了一些进展。

#### 3.1 干涉型 PCF 传感器

干涉型光纤传感器主要基于波动光学中光的干涉原理,已经发展出法布里-珀罗(F-P)、马赫-曾德尔(M-Z)、萨奈克等多种类型,可广泛应用于温湿度、应变、曲率、折射率测量等诸多领域。为了获得良好的干涉效应,干涉型传感器通常要求光传输模式及偏振态一致,因此需使用具有高双折射的单模光纤。通过结构设计可使 PCF 获得无截止单模及高双折射特性,因此 PCF 适用于干涉型传感。有些干涉型传感器要求光纤本身能够传输或激发 2 个或 2 个以上模式以产生模间干涉,也可通过结构设计使 PCF 获得少模、多模特性或者激发出包层模式,从而增加传感器结构设计的灵活性。

2013 年,Rota-Rodrigo 等<sup>[14]</sup>制作了一种基于高双折射 PCF 的内反射干涉仪,入射光在端面被反射后,背向传输通过线偏振片时能够引起信号分量之间的干涉,在 3200 mε 应变下灵敏度可达 7.96 dB/mε。同年,Qureshi 等<sup>[15]</sup>报道了一种采用双芯 PCF 的 M-Z 干涉仪,双芯模式产生模间干涉,在 0~4000 με 应变范围内的灵敏度为 -0.31 pm/mε。Ji 等<sup>[16]</sup>设计了一种拉锥型 PCF M-Z 干涉传感器,其折射率灵敏度为 210.075 nm/RIU。对实芯光子晶体光纤(SCPCF)进行熔融拉锥后,干涉臂长度得到增加,从而增大了传感区域与外界环境的耦合程度,提高了灵敏度。2014 年,Noor 等<sup>[17]</sup>将实芯 PCF 一端熔接单模光纤,另一端空气孔熔塌成弧形以制成一种湿度传感器。入射光到达弧形熔塌端面可激发出包层模式,随后与纤芯模式产生模间干涉,相对湿度范围为 60%~80%、80%~95% 时每 1% 湿度变化对应的波长漂移分别为 20.3 pm 和 61.6 pm。同年,Peng 等<sup>[18]</sup>将单模光纤与一小段双芯 PCF 熔接,双芯前后端面之间形成 F-P 干涉腔,范围得到温度范围为 40~480 °C 时灵敏度为 0.013 nm/°C。Gong 等<sup>[19]</sup>将长度为 36 cm 的空芯光子晶体光纤(HCPCF)两端熔接同一个耦合器同侧的两个输出臂,以形成萨奈克干涉环,得到 0~9.9 m<sup>-1</sup> 曲率范围内的曲率灵敏度为 0.232 nm·m,且温度响应低。Yang 等<sup>[20]</sup>在保偏 PCF 包层表面利用磁控溅射技术沉积钯/银(Pd/Ag)氢敏膜,当氢气浓度不同时氢敏膜膨胀程度不同,利用萨奈克干涉原理实现 0~4% 浓度范围的氢气检测。2015 年,Liu 等<sup>[21]</sup>采用双空气孔保偏 PCF 制备了基于模间干涉原理的弯曲传感器,该传感器可检测出 10~30 mm 范围内的弯曲半径。同年,Dash 等<sup>[22]</sup>设计了一种 F-P 干涉仪(图 3),可实现温度及折射率的测量,该设计的独特之处在于将实芯、空芯 PCF 熔接,利用电弧放电效应使熔接处的空芯 PCF 包层空气孔坍塌而形成封闭 F-P 微腔。该传感器的温度灵敏度为 0.012 nm/°C,折射率灵敏度为 30 nm/RIU,分辨率为 3×10<sup>-4</sup> RIU<sup>-1</sup>;该课题组还提出了一种大模场实芯 PCF 微弯后包层线偏振(LP<sub>11</sub>)模式与纤芯基模发生模间干涉的折射率传感器,灵敏度为 258 nm/RIU<sup>[23]</sup>。

如图 4 所示,将 Kagome 型空芯 PCF 两端熔接单模光纤,熔接时入射侧纤芯略微错开,从而可激发包层模式,利用纤芯模式和包层模式之间的干涉实现 M-Z 干涉。M-Z 干涉仪在 20~60 °C 范围内具有高达

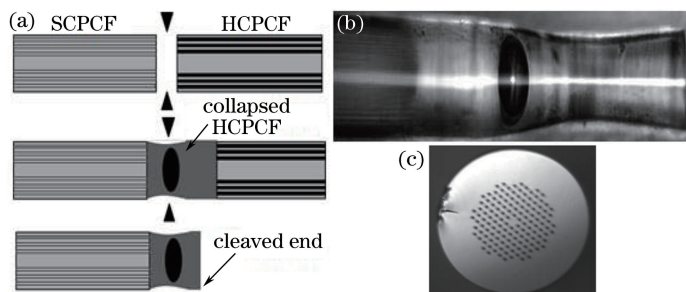


图 3 封闭型 F-P 微腔探头。(a)制作过程示意图;(b)实物图;(c) PCF 截面图

Fig. 3 Sealed F-P micro cavity probe. (a) Schematic of producing process; (b) picture of real product;

(c) cross section image of PCF

0.03 nm/°C 的温度灵敏度,与现有光纤干涉传感器相比,灵敏度明显得到提升,且线性度和重复性好,测量精度可达 0.1 °C。将 Kagome 型光纤一端熔接单模光纤、另一端熔接高反射面以制成一种 F-P 干涉仪,两个熔接端面之间形成反射腔,入射光在反射腔内往返干涉,最后从入射端输出。Kagome 型光纤在温度、振动测量等方面具有潜在应用。

干涉型传感器可针对基于几乎所有新颖结构的 PCF 进行设计,是目前研究最广的 PCF 传感器类型。干涉型 PCF 传感器的优点在于传感器的结构及制备方法相对简单、稳定性好且可用于多种环境物理量的测量,缺点是测量时存在多参量交叉敏感问题且测量灵敏度较低。

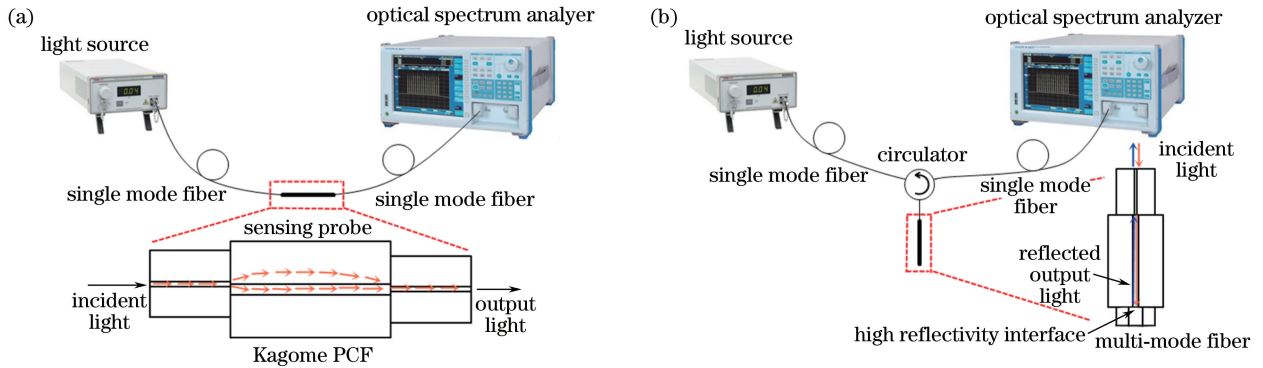


图 4 Kagome 型 PCF 的干涉型传感器示意图。(a) M-Z 干涉仪;(b) F-P 干涉仪

Fig. 4 Schematic of interferometric sensors based on Kagome PCF. (a) M-Z interferometer; (b) F-P interferometer

### 3.2 吸收型 PCF 传感器

吸收型传感器的工作机理主要基于 Beer-Lambert 定律,即

$$A = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = kcd, \quad (1)$$

式中  $A$  为吸光度,  $d$  为光程,  $k$  为吸收系数,  $c$  为样品浓度,  $I_0$  为输入光强,  $I$  为输出光强。当传感器及待测样品一定时,光程及光吸收系数就已经确定,通过测量输入光强和输出光强可以计算出吸光度,进而建立样品浓度与吸光度之间的关系。在具有多孔结构的 PCF 内部直接通入气体或液体,使其与气孔表面的倏逝波相互作用。该过程无需像普通光纤一样对包层进行腐蚀或拉锥,在简化操作的同时保证了传感结构的强度,具有显著优势。

在气体传感方面,2014 年, Yu 等<sup>[24]</sup>将长度为 72.5 cm、光纤直径为 18  $\mu\text{m}$  的空芯 PCF 与单模光纤通过光纤连接器进行空间耦合,乙炔气体分子在耦合间隙处扩散进入 PCF 内部,如图 5 所示。当乙炔气体浓度不同时,1531.58 nm 乙炔特征吸收峰处的透射强度的变化不同,成功实现了乙炔气体浓度检测,响应时间约为 200 s。2015 年, Kassani 等<sup>[25]</sup>研制了一种乙炔气体传感器,传感探头结构为多模光纤-C 型光纤-空芯 PCF-C 型光纤-多模光纤的一体化结构, C 型光纤的长度为 50  $\mu\text{m}$ , 气体从 C 型光纤槽口处进入传感通道内部,如图 6 所示。各部分之间的熔接使得传感探头结构稳定、抗振动等外界干扰能力强。该传感器在 4.84% 的乙炔浓度下的响应时间约为 8.7 min, 0.53% 低浓度下的响应时间约为 16.4 min, 且重复性和稳定性良好。2016 年, Feng 等<sup>[26]</sup>设计了一种石英增强光声光谱检测系统,采用长度为 5 m、内部充满氮气的空芯 PCF 作为参考气室,两端用单模光纤熔接密封,成功实现了痕量氨气检测,研究表明通过控制空芯光纤的长度可以获得强度合适、干涉噪声低的参考透射谱。在液体生化传感方面,2010 年, Malinin 等<sup>[27]</sup>在空芯 PCF 内部填充含有不同浓度的霍乱肠毒素(cholero-genum)溶液,依据不同浓度溶液的吸光度不同的原理,在 0~2.5 g/L 范围内实现了蛋白浓度检测。2016 年, Rabah 等<sup>[28]</sup>利用三孔悬芯 PCF 实现了单克隆(mAb)抗体溶液的无标记检测,将不同浓度的单克隆(mAb)抗体溶液填充至悬芯光纤内部,检测极限达到 0.37 mol/L,响应时间小于 25 s。吸收型传感器的机理明确、应用范围较广,缺点在于对待测物质的纯度要求高,特别是在低浓度范围内检测时不能含有较多杂质。目前,气体吸收型传感器的效果和可操作性优于液体吸收型,已初步得到工程应用,如何进一步缩短响应时间、降低检测极限是吸收型传感器需要继续提升的方向,而研发新式结构

的 PCF 作为传感探头是可能的提升途径。

此外,若在 PCF 的气孔中填充液体或液晶等物质,这些物质比石英玻璃对温度、压力、磁场等外界条件变化更为敏感,与孔内表面倏逝波相互作用后,透射光能够对外界参量的变化产生响应。Yu 等<sup>[29]</sup>提出了一种乙醇填充的 PCF 温度传感器,在毛细管力和大气压力的共同作用下,乙醇被吸入 PCF 的空气孔中。乙醇的吸光度及折射率会随温度变化发生改变,输出光与表面倏逝波作用后,功率随之发生改变。当使用的 PCF 长度为 10 cm 时,该传感器的温度灵敏度为 0.315 dB/°C。2011 年,Thakur 等<sup>[30]</sup>在保偏 PCF 中填充铁基磁流体,磁流体的光学性质随磁场强度变化而变化,透射光谱中峰位产生漂移,当四氧化三铁的浓度为 0.6 g/L 时磁场灵敏度为 0.242  $\mu\text{m}/\text{T}$ 。2012 年,Zu 等<sup>[31]</sup>在光子带隙型 PCF 中填充了铁基甲苯磁流体,磁场灵敏度达到 124.14 nm/(A·m<sup>-1</sup>),分辨率为 0.51 A·m<sup>-1</sup>。2016 年,Peng 等<sup>[32]</sup>将有机液体填充的 PCF 与单模光纤光栅进行小于 1 dB 的低损耗熔接,在 0~150 °C 范围内实现了温度测量,灵敏度明显高于仅使用传统单模光栅的情形。Yu 等<sup>[33]</sup>在 Kagome 型 PCF 内部填充温敏液体异丙醇,填充液体后 Kagome 光纤带隙结构发生改变,1600 nm 处出现损耗峰,且损耗峰随温度变化发生显著漂移,在 20~50 °C 范围内理论温度灵敏度可达到 4.09 nm/°C。

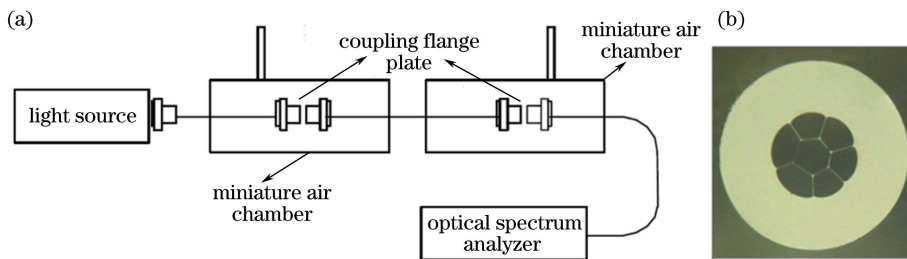


图 5 空间耦合型 PCF 乙炔气体传感器。(a) 实验装置示意图;(b) PCF 截面图

Fig. 5 Spatial-coupling type PCF acetylene gas sensor. (a) Experimental setup diagram; (b) cross section image of PCF

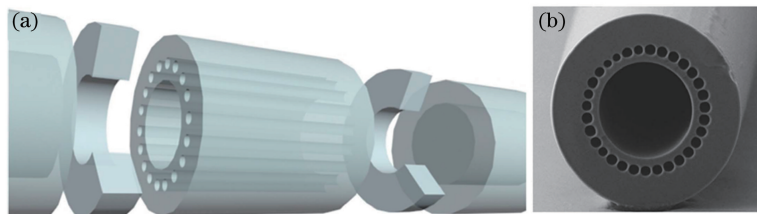


图 6 C 型光纤连接型 PCF 乙炔气体传感器。(a) 传感探头结构;(b) PCF 截面图

Fig. 6 C-shape fiber connected type PCF acetylene gas sensor. (a) Structure of sensing probe; (b) cross section image of PCF

### 3.3 荧光型 PCF 传感器

光纤荧光型传感器能够利用某种特定波长的入射光激发相应物质,以产生较长波长的荧光。激发出的荧光信号由传感探头进行收集,当荧光信号传输至检测系统时,对其进行分析处理。荧光强度及寿命等特性会随着被测物质浓度及环境介质的变化而变化,通过检测荧光强度或荧光寿命等特性可实现物质浓度或环境物理量的传感。普通光纤由于受到纤芯尺寸和接收角的限制,荧光收集率较低,而 PCF 可通过灵活的结构设计获得较大的吸收面积及接收角,且待测物质有时可以直接进入内部空气孔,在很大程度上提高了荧光收集效率。

2011 年,Fujii 等<sup>[34]</sup>将一段 PCF 与 10 mm 单模光纤熔接,并用化学方法将单模光纤纤芯腐蚀成锥形,同时沉积金(Au)膜并将其作为传感探头。将该传感探头靠近镉/硒(Cd/Se)荧光量子点沉积膜,可以对产生的荧光进行高精度荧光寿命检测。温度不同时自发荧光寿命不同,从而可实现温度传感。PCF 具有独特的导光原理,其纤芯为纯二氧化硅而未掺杂其他元素,使其检测到的荧光信号的信噪比更高,检测效果优于仅使用单模光纤作为传感探头的检测结果。2012 年,Xiao 等<sup>[35]</sup>设计了一种后向荧光检测系统,如图 7 所示。二极管激光器发出的光源通过连接器与空芯 PCF 探头耦合,照射到 Cy3 染料分子上并激发出荧光,荧光型 PCF 收集荧光,并将其后向传导至锁相放大系统。Cy3 染料分子在负压作用下进入 PCF 探头内部,提高了

荧光收集效率,在 2~3 min 内可检测出 2  $\mu\text{L}$  荧光样品。2012 年, Ghenuche 等<sup>[36]</sup> 提出一种采用 Kagome 型空芯 PCF 的荧光分子探测系统,在 PCF 的前端固定直径为 20  $\mu\text{m}$  的聚苯乙烯微球,能够更好地实现入射光的聚焦及荧光的收集。该传感器在溶液中对荧光分子的探测极限可达到 nmol 量级,信噪比相比于使用普通光纤时提高了 200 倍,检出极限降低了 1000 倍。2015 年, Yin 等<sup>[37]</sup> 制作了一种基于荧光硒化镉/硫化锌 (CdSe/ZnS) 量子点水溶液的温度传感器,将量子点水溶液填充至一段空芯 PCF 的气孔中,两端用多模光纤熔接密封,量子发光特性随温度变化,通过比较不同温度下透射光谱中量子点荧光波长的漂移,得到灵敏度为 0.1309 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。本课题组尝试在 Kagome 型 PCF 及三孔悬芯 PCF 的内表面镀包埋荧光素膜,之后两端熔接多模光纤并密封,当温度发生变化时荧光素发光性质随之发生改变,同样可以实现荧光温度传感。收集荧光信号的方式有两种,透射光谱和反射光谱均包含荧光信号,其原理如图 8 所示。所用 PCF 的直径仅为数百微米,该传感器在高精度温度传感领域具有很大的发展潜力。

荧光型传感器既可以检测特定物质的浓度,也可以对影响物质荧光特性的外界参量(如温度)进行传感,其优点在于特异性好。由于不同物质的荧光波长不同,且允许一定量的杂质存在,故检测极限低,在微浓度甚至痕量物质检测方面具有良好的应用价值。

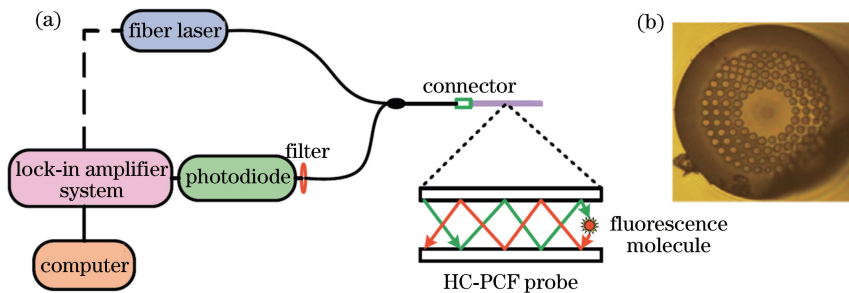


图 7 基于 PCF 的荧光传感器。(a) 实验装置示意图; (b) PCF 截面图

Fig. 7 Fluorescence sensor based on PCF. (a) Schematic of experimental setup; (b) cross section image of PCF

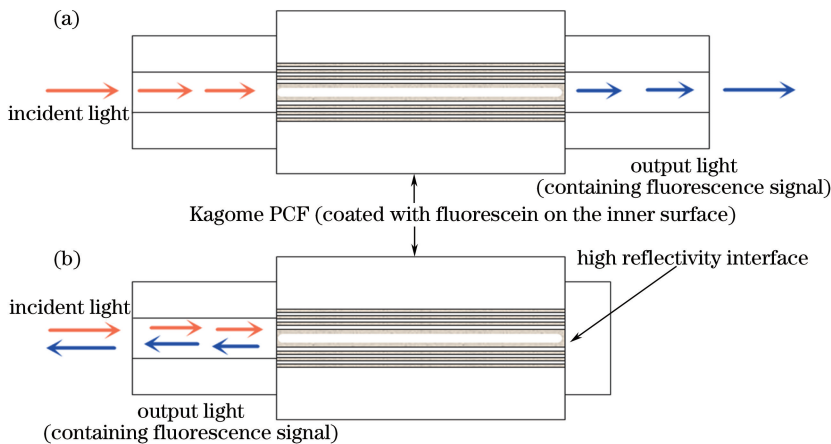


图 8 两种 PCF 荧光温度传感探头。(a) 正向透射型; (b) 背向反射型

Fig. 8 Two kinds of PCF fluorescence temperature sensing probes. (a) Forward transmission type; (b) back reflection type

### 3.4 表面等离子体共振 (SPR) 型 PCF 传感器

光纤 SPR 传感以光纤为传导介质,在光纤传感器探头上激发 SPR,再利用检测设备对 SPR 信号进行分析。传统的光纤 SPR 传感器采用将普通光纤剥去包层后镀上金属(通常为金或银)膜的方式制成传感探头,利用纤芯表面倏逝波与金属膜的相互作用来产生 SPR 信号。若采用 PCF 制作传感探头,传输模式的有效折射率和待测物质折射率易于通过结构设计达到一致,从而实现模式耦合和共振。对于多孔结构,可直接在其空气孔内表面镀金属膜,避免剥去包层的纤芯表面粗糙带来的散射损耗,该结构具有作用距离长、共振强度高优点。

近年来,基于复杂截面结构 PCF 的 SPR 传感器不断被报道,已成为 PCF 传感领域的一大热点<sup>[38-41]</sup>,其

中大多数仍为理论模型计算阶段,研究结果表明基于 PCF 的 SPR 传感器的灵敏度远高于传统的干涉型与光栅型传感器。如图 9 所示,Yu 等<sup>[41]</sup>在 Kagome 型 PCF 芯孔内表面沉积金纳米粒子,之后在纤芯孔内填充不同折射率液体,仿真计算表明 1.30~1.38 折射率范围内的灵敏度可达到 1495 nm/RIU。当温度发生变化时,由于液体的折射率在一定范围内随温度呈线性变化,共振条件发生改变。传感器也可同时应用于温度测量,以乙醇作为温敏液体填充纤芯孔时,0~40 °C 温度范围内灵敏度为 0.7317 nm/°C,共振峰漂移显著且线性度高达 99.97%。实际研制方面,2013 年,Wong 等<sup>[42]</sup>报道了一种用于检测免疫球蛋白 G(IgG)的 SPR 生物传感器,如图 10 所示。将 PCF 两端空气孔熔塌并熔接至多模光纤,在 PCF 表面镀上金膜,并在金膜表面镀一层 G 蛋白及硫醇混合膜以固定 IgG。该传感器仅需 0.267 mg/L 的 IgG 抗体标记即可实现 IgG 检测。2014 年,Lu 等<sup>[43]</sup>通过在 LMA-8 型 PCF 中填充质量比为 1:4 的银纳米线及乙醇混合溶液来激发 SPR,以实现温度传感;研究发现 10~40 °C 温度范围内的共振峰发生明显蓝移,灵敏度高达 2.7 nm/°C。2015 年,Lu 等<sup>[44]</sup>又提出了一种在 PCF 内部填充银纳米线的 SPR 折射率传感器,灵敏度达到  $1.424 \times 10^4$  nm/RIU。直接填充银纳米线相比内表面镀银膜操作更简便,在一定范围内银纳米线浓度对共振峰强度的影响极小、允许误差大,显著提高了可操作性。

SPR 型传感器具有相当高的灵敏度,检测极限低且应用范围广,不仅可以实现温度、折射率的测量,在生化传感方面也具有潜在应用。某些生化物质可与 PCF 表面或内壁固定的底物特异性结合,使得其共振条件发生变化,从而实现其浓度的特异性检测。若要进一步提升 PCF-SPR 传感器的性能并使其得到实际应用,如何高效地在 PCF 气孔表面镀上均匀、稳定及重复性好的金属膜是要重点克服的技术难题。

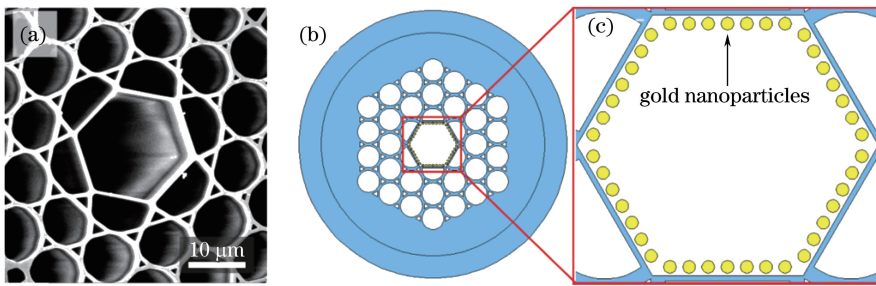


图 9 Kagome 型 PCF 的 SPR 传感器理论模型。(a) Kagome 光纤 SEM 图;(b) Kagome 光纤仿真模型;(c)纤芯孔放大图

Fig. 9 Theoretical model of SPR sensor based on Kagome PCF. (a) SEM image of Kagome fiber; (b) simulation model of Kagome fiber; (c) enlarged image of fiber core hole

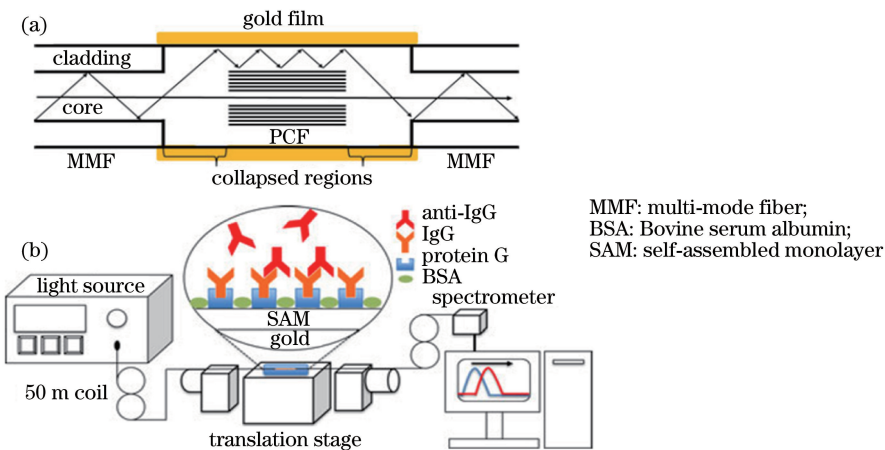


图 10 PCF-SPR 传感器。(a)传感探头结构;(b) IgG 固定机理

Fig. 10 PCF-SPR sensor. (a) Sensing probe structure; (b) fixation mechanism of IgG

### 3.5 拉曼散射型 PCF 传感器

在光纤信号分析中,拉曼散射的强度通常十分微弱,难以检测。在去除包层的纤芯表面镀金、银等金属膜时,拉曼谱线强度会得到极大地增强,即产生表面增强拉曼散射(SERS)现象。若使用 PCF 替代普通光

纤,可通过在气孔内表面沉积金属纳米颗粒或镀金属膜的途径激发 SERS,PCF 传感器具有传感探头强度高、散射损耗低、作用距离长等优点,在生物化学检测方面有潜在应用价值。

2014 年,Dinish 等<sup>[45]</sup>利用化学方法将癌蛋白固定于 PCF 的气孔内表面,通过金纳米粒子与拉曼活性分子生物偶联激发 SERS 信号,于 10 nL 样品中成功检测出  $1 \times 10^{-10}$  g 癌蛋白。2015 年,Wang 等<sup>[46]</sup>在空芯光纤的内壁沉积银膜,将食用油注入空芯光纤中检测透射拉曼光谱,实现了食用油不饱和度的检测和食用油煎炸程度的判定。采用镀银空芯光纤可以有效增强及收集拉曼散射光,从而提高灵敏度。同年,Khetani 等<sup>[47]</sup>在空芯 PCF 中沉积银纳米颗粒,实现 300 细胞  $\text{mL}^{-1}$ 量级的白血病细胞的检测,有望替代传统的抗体+流体细胞仪的检测方法。Pinkhasova 等<sup>[48]</sup>在 PCF 内表面镀上一层纳米标记物,该标记物由 Ag 核-硫氰酸分子-Au 壳层的结构组成,直径约为  $45 \mu\text{m}$ ;实验证明随填充至 PCF 内部 R6G 溶液浓度的变化,标记物激发的 SERS 信号强度发生显著改变,从而可实现浓度检测。2016 年,Gong 等<sup>[49]</sup>提出了一个基于侧通道光子晶体光纤(SC-PCF)的 SERS 生物检测平台,该研究将金纳米粒子和亚油酰胺炔烃(LAA)标记后的细胞混合负载于侧通道表面以激发 SERS,通过测量炔烃的拉曼特征峰可准确监测细胞中脂质过氧化导致的蛋白质改性。

PCF 不仅能将光紧密束缚在其中传播,光与扩散在其中的反应待测物还能发生强烈的相互作用,研究发现在某些情况下 PCF 探针可以自发地增强拉曼散射信号而不必借助于 SERS 现象,这也为 PCF 拉曼散射传感器的研究提供了一个新的思路。2011 年,Yang 等<sup>[50]</sup>提出了一种检测葡萄糖浓度的非表面增强型 PCF 拉曼散射传感器,该研究直接在空芯 PCF 气孔中填充液体,葡萄糖分子扩散进入液体中并激发拉曼散射,拉曼谱线强度随葡萄糖分子浓度的变化而变化;该传感器检测体积为 50 nL 的样品响应时间约为 30 s,在葡萄糖-果糖混合溶液中的传感准确性不受影响。2016 年,Zhang 等<sup>[51]</sup>设计了一种使用 SC-PCF 的拉曼散射传感器(图 11),侧通道内的倏逝波能量可以通过改变包层气孔间距及气孔直径来调节。将 R6G 与金纳米粒子(AuNPs)的混合溶液通过注射器注入侧通道内激发拉曼散射,该传感器对于 R6G 的检测非常灵敏,检测极限低至  $5 \times 10^{-5}$  nmol/L。

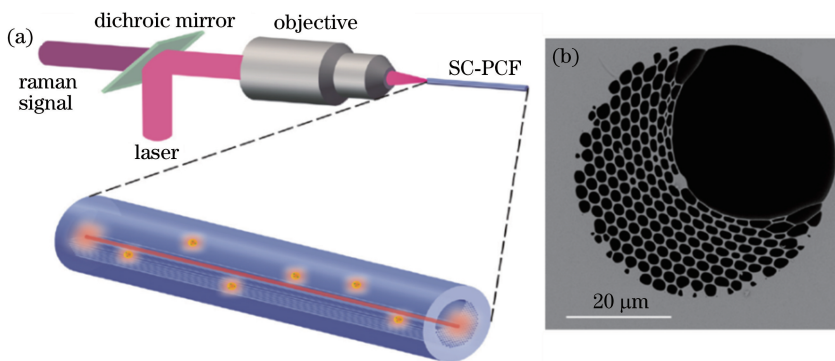


图 11 基于 SC-PCF 的拉曼散射传感器。(a)传感探头原理图;(b)PCF 截面图

Fig. 11 A Raman scattering sensor based on SC-PCF. (a) Schematic of sensing probe; (b) cross section image of PCF

### 3.6 PCF 光栅型传感器

光纤光栅传感器属于波长调制型光纤传感器,根据布拉格光栅公式  $\lambda = 2n_{\text{co}}\Lambda$  或长周期光栅公式  $\lambda = (n_{\text{co}} - n_{\text{cl}})\Lambda$ (其中  $\lambda$  为光栅中心波长,  $n_{\text{co}}$  为纤芯折射率,  $n_{\text{cl}}$  为包层折射率,  $\Lambda$  为光栅间距),光纤光栅型传感器利用环境物理量变化直接引起光栅间距的变化,间接引起反射峰位漂移的原理进行传感。传统的光纤光栅传感器已成功应用于桥梁、建筑、道路等领域的监测,但因存在对温度、应力等外界参量交叉敏感以及高温不稳定问题,在某些领域的应用受到一定限制。PCF 高温稳定性较普通光纤好,且可以通过改变结构参数、气孔镀膜或者填充其他物质等方法降低多参量交叉敏感的影响。随着光纤光栅刻写工艺的成熟,关于光纤光栅型 PCF 传感器的研究有望取得更大进展。

2012 年,Zheng 等<sup>[52]</sup>利用二氧化碳激光器于 PCF 内部刻写长周期光栅,并通过静电自组装沉积技术在光纤气孔内表面镀聚烯丙基胺盐酸盐( $\text{PAH}^+$ )/聚丙烯酸( $\text{PAA}^-$ )双层纳米膜,当环境湿度由 22% 提高至 29% 时,该传感器具有  $0.07 \text{ nm}^{-1}$  的共振波长漂移。2014 年,Naem 等<sup>[53]</sup>在两段相同长度的纤芯掺锗实芯



PCF 上利用相位掩模技术刻写光栅,刻写完毕后在其中一段 PCF 气孔中填充乙醇并将两段光纤进行熔接,制成了一种可同时测量张力及温度的 PCF 光栅型传感器,张力、温度分辨率分别为  $95.26 \mu\epsilon$  和  $4.37 \text{ }^\circ\text{C}$ 。填充乙醇后两段 PCF 的温度灵敏度不同,而张力灵敏度相近,利用传输矩阵法对数据进行处理,得到单传感参量,从而克服交叉敏感问题。同年,Liu 等<sup>[54]</sup>在 LMA-10 PCF 上刻写长周期光栅,如图 12 所示,其原理是利用飞秒激光将半边空气孔选择性熔塌以形成非对称结构,该过程使得光周期性地泄漏到包层再耦合到纤芯中。该 PCF 光栅的温度灵敏度为  $0.0105 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,折射率灵敏度为  $725 \text{ nm}/\text{RIU}$ ,应变灵敏度为  $1.86 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon$ ,并且包层非对称结构的存在使得曲率灵敏度高达  $1.12 \text{ nm}\cdot\text{m}$ 。2015 年,Iadicco 等<sup>[55]</sup>采用电弧放电法制备了一种长周期 PCF 光栅,并通过测量共振波长漂移及衰减带深度变化来研究其在不同的应力、温度、曲率和折射率等参量下的传感特性;研究发现 PCF 光栅温度灵敏度显著低于普通单模光纤长周期光纤光栅的温度灵敏度,且应力灵敏度更高,对于曲率、折射率的变化则几乎没有响应。

由于制备光纤的材料(如熔融石英等)的线膨胀系数或弹性模量在一定范围内近似为定值,光栅间距随温度或应力等物理量近似呈线性变化,所以 PCF 光栅型传感器的优势在于线性度非常好,可用于多种环境物理量的测量,并且借助解调技术可以实现分布式传感,但同样也存在测量灵敏度相对较低的问题,且目前无法解决多参量交叉影响的问题。

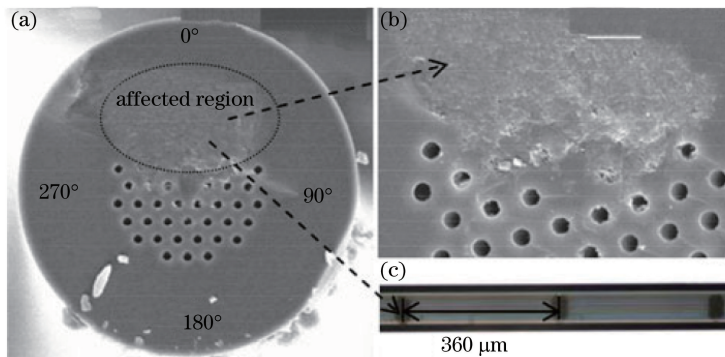


图 12 飞秒激光刻写的长周期 PCF 光栅。(a) SEM 照片;(b)选择性熔塌区域细节图;(c)侧向光栅周期图

Fig. 12 Long-period PCF grating written by femtosecond laser. (a) SEM image; (b) detailed image of selective melting region; (c) lateral image of grating period

## 4 结束语

近年来随着 PCF 制作工艺的不断成熟,其在传感领域也受到越来越多的关注。PCF 具有一些不同于普通光纤的新特性,其沿长度方向分布的多孔结构允许气体、液体流入,在生物化学传感方面具有独特优势,光纤内表面镀膜激发表面等离子体共振或表面增强拉曼散射现象也是一大研究热点。PCF 传感器诞生至今时间还不太长,技术仍不够成熟,需要着重解决的问题及发展的方向主要有:

1) 简化气体、液体或纳米材料填充于 PCF 内部的复杂度。PCF 的独特优势在于多孔结构允许物质进入内部,以实现与待测物质充分作用或光纤性能的改进。目前在实验室阶段已能实现材料或待测物填充,但步骤繁琐且效率不高,并且较难对某些孔进行选择性的填充,因此必须找到快速且高效的填充方法。

2) 发展在 PCF 内部或表面涂覆均匀、稳定且重复性好的镀膜技术。目前的镀膜技术重复性差,不能保证每次镀膜的长度、厚度及均匀性完全相同,降低了传感器的性能和重复性,限制了 PCF-SPR、PCF-SERS 等传感器的商业化应用。

3) 充分发挥 PCF 的优异特性,探索新型传感机理以扩大应用范围、提升传感性能。PCF 的许多特性尚未能很好地与传感结合,可在双折射、色散调控、粒子传输等方面进行更多探索。同时各种传感机理之间可以相互补充,在同一传感器上结合多种传感类型,如干涉-光栅型、干涉-吸收型、光栅-荧光型等,能够实现多参量同时检测并提升传感性能。

4) 提高现有 PCF 传感器的灵敏度、快速响应性、抗干扰性及可重复性等能力。目前大多数 PCF 传感器

仍处于实验室阶段,且其性能与稳定性仍需进一步提高,除了对传感器参数进行优化外,还可通过预制棒材料掺杂、新型 PCF 结构设计等途径从源头进行性能改进。

5) 进行分布式传感研究。目前 PCF 传感多局限在局部小范围内,若能像目前已有的光纤光栅或光纤布里渊传感器一样实现长距离分布式传感,将可显著提升 PCF 传感器的应用价值。有望率先实现分布式传感的 PCF 传感器有光栅型和倏逝波气体吸收型等。

6) 进行网络化传感研究。目前 PCF 传感器多用于独立或少量参量的测量,未来可将多种传感器连成网络,利用复用技术将各个传感器得到的数据通过光纤网络会聚到检测系统,在实现多参量传感的同时简化系统、降低成本。

7) 进行智能化传感研究。物联网技术是中国战略性新兴产业的重要组成部分,而传感器是影响物联网发展的 4 个最主要技术之一。基于计算机智能技术实现多参量、多测点、长距离、自动化传感,将 PCF 传感技术充分融入物联网是很有前途的发展方向。

### 参 考 文 献

- [1] Knight J. Photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 847-851.
- [2] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [3] Russell P. Photonic-crystal fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 5729-2749.
- [4] Wang Y M, Zhao Y H, Nelson J S, *et al.* Ultrahigh-resolution optical coherence tomography by broadband continuum generation from a photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(3): 182-184.
- [5] Humbert G, Wadsworth W J, Leon-Sava S G, *et al.* Supercontinuum generation system for optical coherence tomography based on tapered photonic crystal fibre[J]. *Optics Express*, 2006, 14(4): 1596-1603.
- [6] Saitoh K, Koshiba M. Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window[J]. *Optics Express*, 2004, 12(10): 2027-2032.
- [7] Ni Y, Zhang L, An L, *et al.* Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(6): 1516-1518.
- [8] Gérome F, Auguste J L, Blondy J M. Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2725-2727.
- [9] Schmidt O A, Garbos M K, Euser T G, *et al.* Reconfigurable optothermal microparticle trap in air-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(2): 024502.
- [10] Russell P, Culverhouse D, Farahi F. Theory of forward stimulated Brillouin scattering in dual-mode single-core fibers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(3): 836-842.
- [11] Knight J C, Birks T A, Russell P, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [12] Knight J C, Broeng J, Birks T A, *et al.* Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. *Science*, 1998, 282(5393): 1476-1478.
- [13] Liu Deming, Sun Junqiang, Lu Ping, *et al.* Fiber optics[M]. Beijing: Science Press, 2008: 213-216.  
刘德明, 孙军强, 鲁平, 等. 光纤光学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 213-216.
- [14] Rota-Rodrigo S, Ana M R P, Bravo M, *et al.* An in-reflection strain sensing head based on a Hi-Bi photonic crystal fiber[J]. *Sensors*, 2013, 13(7): 8095-8102.
- [15] Qureshi K K, Liu Z Y, Tamb H Y, *et al.* A strain sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in twin-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Communications*, 2013, 309(22): 68-70.
- [16] Ji Yushen, Fu Guangwei, Fu Xinghu, *et al.* Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1006005.  
纪玉申, 付广伟, 付兴虎, 等. 熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1006005.
- [17] Noor M, Rajan G, Peng G D. Microstructured fiber sealed-void interferometric humidity sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(4): 1154-1159.
- [18] Peng W, Zhang X P, Liu Y, *et al.* Temperature characteristics of a core-mode interferometer based on a dual-core

- photonic crystal fiber[J]. Applied Physics B, 2014, 116(1): 21-26.
- [19] Gong H P, Song H F, Zhang S L, *et al.* Curvature sensor based on hollow-core photonic crystal fiber Sagnac interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 777-780.
- [20] Yang Yuanhong, Wang Huan, Yang Fuling, *et al.* Polarization-maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0806004.  
杨远洪, 王欢, 杨福铃, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0806004.
- [21] Liu Feng, Feng Xiaolong, Guo Xuan, *et al.* Research on the bending sensing characteristics of PM-PCF based on intermodal interference[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0905005.  
刘丰, 冯晓龙, 郭璇, 等. 基于模间干涉的保偏光子晶体光纤弯曲传感特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0905005.
- [22] Dash J N, Jha R. Inline microcavity-based PCF interferometer for refractive index and temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1325-1328.
- [23] Dash J N, Jha R. PCF modal interferometer based on macrobending for refractive index sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 5291-5295.
- [24] Yu H H, Zheng Y, Guo H Y, *et al.* Spectral absorption gas sensor based on anti-resonant reflecting optical waveguide[J]. Photonic Sensors, 2014, 4(2): 128-131.
- [25] Kassani S H, Khazaeinezhad R, Jung Y M, *et al.* Suspended ring-core photonic crystal fiber gas sensor with high sensitivity and fast response[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 14927918.
- [26] Feng Qiaoling, Jiang Meng, Wang Xuefeng, *et al.* High sensitivity ammonia gas detection with hollow-core photonic bandgap fibers reference gas cavity[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0305001.  
冯巧玲, 姜萌, 王学锋, 等. 基于空芯光子晶体光纤气体参考腔的高灵敏度氨气检测[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305001.
- [27] Malinin A V, Skibina Y S, Mikhailova N A, *et al.* Biological sensor based on a hollow-core photonic crystal fiber[J]. Technical Physics Letters, 2010, 36(4): 362-364.
- [28] Rabah J, Mansaray A, Wynne R, *et al.* Human immunoglobulin class G (IgG) antibody detection with photonic crystal fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1398-1404.
- [29] Yu Y Q, Li X J, Hong X M, *et al.* Some features of the photonic crystal fiber temperature sensor with liquid ethanol filling[J]. Optics Express, 2010, 18(15): 15383-15388.
- [30] Thakur H V, Nalawade S M, Gupta S, *et al.* Photonic crystal fiber injected with  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid for magnetic field detection[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(16): 161101.
- [31] Zu P, Chan C C, Gong T X, *et al.* Magneto-optical fiber sensor based on bandgap effect of photonic crystal fiber infiltrated with magnetic fluid[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(24): 241118.
- [32] Peng Zhaozhuang, Wang Li, Huo Mingchao, *et al.* Research of photonic crystal fiber temperature sensor with liquid filling[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 040605.  
彭兆状, 王丽, 霍明超, 等. 液体填充的光子晶体光纤的温度传感特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 040605.
- [33] Yu H H, Cheng X, Ma J, *et al.* Fabrication of Kagomé hollow-core photonic crystal fiber for temperature sensing[C]. Asia-Pacific Optical Sensors Conference, 2016: Th4A.60.
- [34] Fujii T, Taguchi Y, Saiki T, *et al.* A fusion-spliced near-field optical fiber probe using photonic crystal fiber for nanoscale thermometry based on fluorescence-lifetime measurement of quantum dots[J]. Sensors, 2011, 11(9): 8358-8369.
- [35] Xiao R, Rong Z, Pang Y F, *et al.* Effects of structure parameters on the sensor performance of photonic crystal fiber[J]. Optics Communications, 2015, 336: 116-119.
- [36] Ghenuche P, Rigneault H, Wenger J. Hollow-core photonic crystal fiber probe for remote fluorescence sensing with single molecule sensitivity[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28379-28387.
- [37] Yin X J, Wang W Y, Yu Y Q, *et al.* Temperature sensor based on quantum dots solution encapsulated in photonic crystal fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(5): 2810-2813.

- [38] Dash J N, Jha R. Graphene-based birefringent photonic crystal fiber sensor using surface plasmon resonance[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1092-1095.
- [39] Otupiri R, Akowuah E K, Haxha S, *et al.* A novel birefringent photonic crystal fiber surface plasmon resonance biosensor[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 14445688.
- [40] Al Mamun A, Islam A, Alam M S. A square lattice photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor with high sensitivity[C]. International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology (ICEEICT), 2014: 14663313.
- [41] Yu H H, Ma J, Li X F, *et al.* Numerical analysis of a novel refractive index and temperature sensor based on a Kagomé hollow-core photonic crystal fiber[C]. IEEE Sensors Conference, 2016: 16597299.
- [42] Wong W C, Chan C C, Boo J L, *et al.* Photonic crystal fiber surface plasmon resonance biosensor based on protein G immobilization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(3): 4602107.
- [43] Lu Y, Wang M T, Hao C J, *et al.* Temperature sensing using photonic crystal fiber filled with silver nanowires and liquid[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 6801307.
- [44] Lu Y, Yang X C, Wang M T, *et al.* Surface plasmon resonance sensor based on hollow-core PCFs filled with silver nanowires[J]. Electronics Letters, 2015, 51(21): 1675-1677.
- [45] Dinish U S, Fu C Y, Soh K S, *et al.* Highly sensitive SERS detection of cancer proteins in low sample volume using hollow core photonic crystal fiber[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2012, 33(1): 293-298.
- [46] Wang Wei, Chen Pan, Liu Binghong, *et al.* Research on hollow fiber raman detection system for edible and fried oils [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906003.  
王 为, 陈 盼, 刘炳红, 等. 食用油和煎炸油空芯光纤拉曼检测系统研究[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906003.
- [47] Khetani A, Momenpour A, Alarcon E I, *et al.* Hollow core photonic crystal fiber for monitoring leukemia cells using surface enhanced Raman scattering (SERS)[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(11): 4599-4609.
- [48] Pinkhasova P, Chen P H, Kanka J, *et al.* Nanotag-enabled photonic crystal fiber as quantitative surface-enhanced Raman scattering optofluidic platform[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(7): 71106.
- [49] Gong T X, Zhang N, Kong K V, *et al.* Rapid SERS monitoring of lipid-peroxidation-derived protein modifications in cells using photonic crystal fiber sensor[J]. Journal of Biophotonics, 2016, 9(1/2): 32-37.
- [50] Yang X, Zhang A Y, Wheeler D A, *et al.* Direct molecule-specific glucose detection by raman spectroscopy based on photonic crystal fiber[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2012, 402(2): 687-691.
- [51] Zhang N, Humbert G, Gong T X, *et al.* Side-channel photonic crystal fiber for surface enhanced Raman scattering sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 223: 195-201.
- [52] Zheng S J, Zhu Y N, Krishnaswamy S. Fiber humidity sensors with high sensitivity and selectivity based on interior nanofilm-coated photonic crystal fiber long-period gratings[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 176(1): 264-274.
- [53] Naeem K, Chung Y. Strain and temperature discrimination using PCF bragg-gratings filled with different liquids[C]. Opto-Electronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology, 2014: 14579703.
- [54] Liu S J, Luo M Y, Ji Q. Sensing characteristics of femtosecond laser-induced long period gratings by filling cladding holes in photonic crystal fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(12): 2287-2292.
- [55] Iadicco A, Campopiano S. Sensing features of long period gratings in hollow core fibers[J]. Sensors, 2015, 15(4): 8009-8019.