

级联双光纤光栅的传感技术应用综述

冯森林,刘月明,涂帆

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘要:为了全面了解级联双光纤光栅(CFG)传感器的研究现状,从测量温度、应变和折射率的传感应用出发,详细介绍和对比了级联双光纤布喇格光栅(FBG)、级联双长周期光纤光栅(LPG)以及级联 LPG+FBG 这 3 种 CFG 传感器,总结出了现阶段 CFG 传感器的技术优势和存在的难点,最后对 CFG 传感器的技术发展进行了展望。

关键词:光纤布喇格光栅;长周期光纤光栅;级联双光纤光栅;传感器;温度

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)03-0001-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review on the application of cascaded double fiber grating sensing technology

FENG Senlin, LIU Yueping, TU Fan

(College of Optics and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to fully understand the research status of cascaded double fiber Bragg grating (CFG) sensor, from the measurement of temperature, strain and refractive index sensor application, the cascaded double Fiber Bragg grating (FBG), cascaded double long period fiber grating (LPG) and cascaded LPG+FBG three CFG sensors are introduced and compared in detail. Summarized the technical advantages and difficulties of CFG sensor at the present stage, finally, the development of CFG sensor technology is prospected.

Key words: fiber Bragg grating, long period fiber grating, cascaded double fiber gratings, sensor, temperature

0 引言

光纤光栅是一种通过对光纤折射率进行周期性调制所形成的光纤微结构,也是一种应用广泛的光学元件。光纤光栅按周期大小可以分为短周期光纤光栅和长周期光纤光栅(LPG)^[1],这 2 种光纤光栅已经广泛地应用在航天、医学、海底探测、地质勘测以及电力系统等领域。在光纤传感领域中,刻有光纤光栅结构的传感器虽然具有体积小、耐腐蚀和可以应用于复杂环境等优点,但是在测量多参量时,存在交叉敏感的问题,使得测量结果不太理想,测量参数的灵敏度无法

满足实际需求。随着研究人员对光纤光栅在传感应用的深入研究,2009 年,冯显桂^[2]提出了级联双光纤光栅(CFG)结构的光纤传感器,即在普通单模光纤(SMF)上先后刻写 2 个或多个光纤布喇格光栅(FBG)或者 LPG,形成级联结构。基于 CFG 结构的传感器不仅继承了光纤光栅传感器的优点,降低了测量多参量时交叉敏感的影响,同时提高了传感器的灵敏度和精确度,测量结果较为理想,成为了国内外研究人员的研究热点之一。

本文从测量温度和折射率传感应用出发,介绍 3 种级联结构(级联双 FBG 传感器^[3-20]、级联双 LPG 传感器^[21-33]和级联 LPG+FBG 传感器^[34-59])的光纤传感器。

1 级联双 FBG 传感器

1.1 工作原理

根据 FBG 的模式耦合理论可知,谐振波长的表达式为: $\lambda_B=2n_{\text{eff}}\Lambda$,其中 n_{eff} 为光纤的有效折射率, Λ 为 FBG 的周期。当外界测量参数发生改变时,改变有

收稿日期:2021-09-30。

基金项目:浙江省自然科学基金项目(NO.LY18F050008)资助。

作者简介:冯森林(1996—),男,硕士研究生,河南郑州人,现就读于中国计量大学光学与电子科技学院光学工程专业,主要从事光纤传感方面的研究工作。目前正在参与磁流体 LPFG-FBG 温度磁场传感器的课题研究。



效折射率和 FBG 周期,从而引起谐振波长的变化,即根据谐振波长的变化来反映外界参数的变化情况。波长变化公式为: $\Delta\lambda_B=2n_{eff}\Delta\Lambda+2\Delta n_{eff}\Lambda$,其中 $\Delta\lambda_B$ 为 FBG 的谐振波长漂移量, Δn_{eff} 和 $\Delta\Lambda$ 分别为因外界测量参数发生变化导致的有效折射率和 FBG 周期的变化量。

级联双 FBG 传感器的工作原理如下:当 2 个 FBG 具有相同的中心波长时会出现多光束干涉现象,反射谱的变化情况与 2 个 FBG 之间的间隔大小有关^[12],且由于 FBG 独特的反射特性,所以只能在 FBG 反射带宽内产生谐振;当 2 个 FBG 具有不同的中心波长时,中心波长和 2 个光栅之间距离无关,但反射光的时延会受到影响并与级联的光纤光栅个数有关^[13]。级联双 FBG 传感器的传光示意图如图 1 所示。

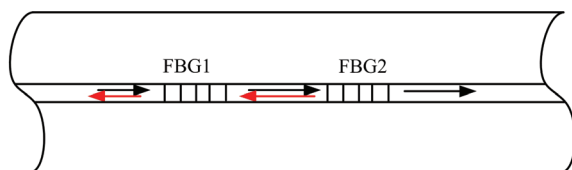


图 1 级联双 FBG 传感器的传光示意图

1.2 级联双 FBG 传感器的国内外研究进展

2004 年,PERIRA D A 等人^[14]提出了一种级联双 FBG 传感器,2 个 FBG 的中心波长为 1550 nm 左右,分别用来测量温度和折射率。根据实验得出传感器的温度测量范围在 0~20 ℃时,温度灵敏度为 10.05 pm/℃,折射率灵敏度为 7.3 nm/RIU。虽然这种未经加工处理的普通级联双 FBG 传感器可以同时测量温度和折射率,但其温度或折射率灵敏度的大小有待提高,其温度或折射率可测量的范围有待扩大。

本文主要介绍化学腐蚀法处理级联双 FBG 传感器和级联倾斜 FBG。

1.2.1 化学腐蚀法处理级联双 FBG 传感器

为了提高传感器的测量精确度。2014 年,宁波工程学院的赵红霞等人^[15]设计了一种半腐蚀光纤包层的 FBG 和普通 FBG 相级联的应变-温度光纤传感器。这 2 个 FBG 的中心波长是一致的,使用 HF 酸腐蚀其中 1 个 FBG 光纤包层区,腐蚀接近至光纤纤芯,通过仿真优化和实验实现了对应变和温度的同时测量。其中,温度精确度为 1.1 ℃,温度测量范围为 20.5~80 ℃;应变精确度为 7.2 $\mu\epsilon$,应变测量范围为 0~800 $\mu\epsilon$ 。虽然这种结构设计的传感器的参数测量范围有所提高,但也存在严重的交叉敏感问题,影响了测量的精确度。2019 年,GU H 等人^[5]设计了一种级联双 FBG 染料浓度传感器,结构图如图 2 所示,该传感器由 2 个谐

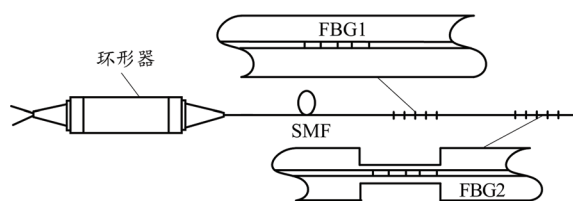


图 2 级联双 FBG 染料浓度传感器结构图

振波长一样的 FBG 和 1 个环形器组成,其中一个 FBG 经过 HF 酸腐蚀,另一个 FBG 不做处理。该传感器的溶液浓度的变化与谐振波长的变化具有良好的线性关系,且这种结构设计的传感器有效提高了参数测量精确度,但被腐蚀的 FBG 光纤易断裂,且加工难度较高。为了提高测量参数的范围,2021 年,KUMAR J 等人^[16]设计了一种在普通 SMF 中制作级联去包层与未去包层 FBG 结构的传感器。首先,使用 HF 酸腐蚀 1 个 FBG 的光纤包层,使得包层直径腐蚀到 25 μm ;然后,与未腐蚀的 FBG 级联,实验测得温度灵敏度为 11.80 pm/℃,温度测量范围为 30~150 ℃,应变灵敏度为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$,应变测量范围为 952.38~5476.19 $\mu\epsilon$;最后,根据腐蚀包层 FBG 和未腐蚀包层 FBG 的温度应变灵敏度的不同,采用转换矩阵实现同时测量的目的。这种设计结构的传感器有效地提高了温度和应变的测量范围。

1.2.2 级联倾斜 FBG 传感器

倾斜 FBG 是特殊光纤光栅的一种^[17],其光纤光栅与光纤轴向方向存在的一定的角度。这种结构使倾斜 FBG 可以把一部分前向传输光耦合进光纤包层并变成向后传输的光,丰富了光纤光栅的光谱特性,使谱型更加丰富,在传感应用中具备了更多的优势。

2008 年,CAUCHETEUR C 等人^[18]设计了一种级联倾斜 FBG 来实现折射率的测量,沿着一根普通光纤在不同位置上刻写相同的倾斜 FBG,倾斜角度为 4°。实验结果表明:该传感器实现了环境折射率在 1.39~1.43 范围的测量,折射率灵敏度为 65 dB/RIU,温度在 20~80 ℃范围,引起的最大损耗为 0.02 dB,可以忽略不计。为了更好地研究级联倾斜 FBG 的传感特性,2019 年,王金豆等人^[19]仿真级联倾斜 FBG,并从倾斜角度、周期和级联的相对位置角度分析传感特性。仿真结果表明:倾斜角度、周期和级联的相对位置都会对谐振波长造成影响,因此可以通过不同参量的相互补偿作用来设计传感器,如当特定角度难以实现时,可以改变光栅的长度达到相同的效果。级联倾斜 FBG 的结构参量存在互补性,可以使得传感器的设计更加灵活。

为了扩大测量范围和实现同时测量双参量的目的,2021年,YITAO F等人^[20]设计了一种FBG级联倾斜FBG的温度折射率传感器,在25~300℃范围内,FBG的温度灵敏度为11.60 pm/℃,倾斜FBG的温度灵敏度为11.25 pm/℃;FBG折射率灵敏度忽略不计,倾斜FBG折射率灵敏度为0.833 nm/RIU。该传感器通过灵敏度转换矩阵,实现了温度和折射率同时测量目的,并降低交叉敏感的影响。

综上所述,与单FBG结构的传感器相比,级联双FBG可以有效地降低交叉敏感的影响,并在工作性能上、测量参数的精确度和测量范围方面都有所提高。但是,其难点在于元件结构较长且容易损坏,工艺复杂,难以实际应用。

2 级联双LPG传感器

2.1 工作原理

与FBG不同,LPG是一种透射型的光纤光栅^[24],其工作原理如下:将光纤纤芯中满足特定条件的光耦合到光纤包层中传输,然后再耦合回光纤纤芯与同向传输的纤芯的光互相耦合,最后在透射谱中形成一定带宽的损耗峰。在符合相位匹配条件时,损耗峰公式为 $\lambda_p = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Lambda$,其中 λ_p 是损耗峰的波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 是光纤纤芯基模有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 是光纤包层的一阶 m 次模有效折射率, Λ 是LPG的周期。当外界测量参数发生改变时,会改变 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 和 Λ 的大小,从而改变损耗峰波长大小,即谐振波长发生偏移。

级联双LPG不仅具有单LPG的特性和透射谱的干涉峰振幅大外,还具有谱型多样、条纹充足和较窄的干涉峰等优点。级联双LPG的传光示意图如图3所示。当输入光经过LPG1时,光纤纤芯基模的一部分光耦合到包层中并向前传输,而剩下的光继续在光纤纤芯中向前传输;当经过LPG2时,光纤包层中的光重新耦合回光纤纤芯中。这是因为光纤包层和光纤纤芯的有效折射率不同,2束光形成光程差,相遇时发生干涉。但是,2个LPG之间的间隔距离需要合理设置,在光纤包层中传输的光才不至于被完全损耗掉。2012年,

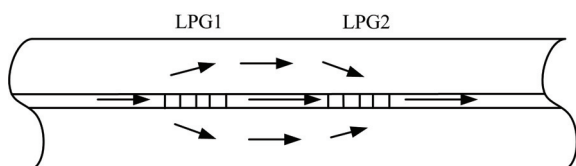


图3 级联双LPG传光示意图

胡兴柳等人^[25]设计了一种级联LPG的温度传感器,详细讨论了该传感器的温度灵敏度与包层模的阶次和光纤光栅周期的关系,并通过了实验验证。实验结果表明:在温度为20~80℃范围内,该传感器的温度灵敏度为0.2501 nm/℃,与温度灵敏度为0.131 nm/℃,其它参数相同的单LPG相比,该级联LPG的温度传感器温度灵敏度有所提高。

2.2 级联双LPG传感器的国内外研究进展

2.2.1 在特种光纤上刻写级联双LPG传感器

2019年,WU W等人^[26]设计了一种基于少模级联LPG的窄带折射率传感器,周期为208 μm,光栅长度为12 mm,级联总长度为400个周期。根据LPG损耗峰带宽较窄的特点,采用级联结构进一步降低每个LPG的损耗峰带宽。实验结果表明:该传感器损耗峰的带宽为1 nm,折射率灵敏度为2410 nm/RIU,折射率测量范围为1.4445~1.4475。这种结构的优点在于减小了损耗峰的带宽,且更易于应用在光纤传感领域。2020年,KIM D K等人^[27]采用CO₂激光沿着保偏光子晶体光纤的不同位置刻写多个LPG级联制成传感器,该传感器实现了应变和温度双参量的测量。该传感器有2种不同的正交输入偏振态干涉谱,保偏光子晶体光纤的双折射在短波长的温度灵敏度约为11.48 pm/℃,应变灵敏度约为-0.93 pm/με;长波长的温度灵敏度约为15.14 pm/℃,应变灵敏度约为1.41 pm/με,温度测量范围为25~95℃,应变测量范围为0~2244 με;同时,短波长和长波长的最大弯曲所导致的波长漂移分别小于0.06 nm和0.02 nm,有效降低了光纤弯曲和交叉敏感的影响。同年,HAN J等人^[28]在双包层光纤上设计、刻写级联LPG,实现了对弯曲和温度的测量,同时减小了应变对测量结果的影响,其传感器的结构如图4所示。实验测得该传感器的温度灵敏度为74.61 pm/℃,温度测量范围为30~100℃。

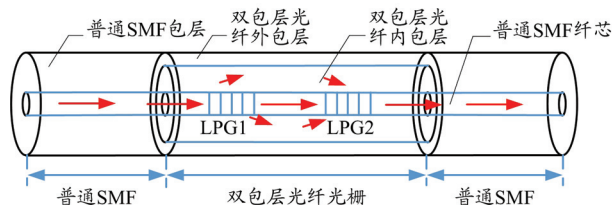


图4 基于双包层级联LPG结构示意图

2.2.2 在普通SMF上刻写级联双LPG传感器

2013年,胡兴柳等人^[29]设计了一种用于测量折射率的级联双LPG温度减敏传感器,同时研制了一种使用负热光系数的聚合物材料的封装结构进行封装,降

低了传感器温度灵敏度和交叉敏感的影响。实验结果表明:未减敏的传感器的温度灵敏度为 120 pm/℃,而减敏封装后的温度灵敏度仅为 10 pm/℃,降低了 12 倍,有效避免了温度对液体折射率测量的影响。为了实现增敏的目的,2015 年,陈美娟等人^[30]设计了级联双 LPG 的温度应变传感器,分别在 2 段不同包层参数的 SMF 上刻制周期不同的 LPG 并级联,实验结果表明:通过改变包层的参数可以使得级联双 LPG 的谐振波长漂移变化更明显,既获得了更高的温度应变灵敏度,又降低了交叉敏感的影响。

2020 年,FUKUSHIMA K 等人^[31]设计了一种级联啁啾 LPG 温度传感器,采用 2 个啁啾型 LPG 级联形成传感元件进行温度特性实验,实验结果得出温度测量范围为 30~130 ℃,温度灵敏度为 -200 pm/℃,温度的测量范围和灵敏度都有所提高。同年,SONG H 等人^[32]设计了一种新型尾环级联 LPG 传感器,结构如图 5 所示,LPG1 和 LPG2 具有相同的结构参数。实验结果表明:该传感器可以提高折射率的灵敏度,折射率灵敏度为 -61.99 nm/RIU。为了实现更多参量的测量,2021 年,付兴虎等人^[33]设计了一种基于粗锥结构级联 LPG 双包层多参量测量的传感器,结构图如图 6 所示,该结构比较复杂,LPG1 和 LPG2 的周期不同,在光谱图中形成了 3 个谐振峰。实验结果表明:传感器的测量温度在 25~75 ℃时,3 个谐振峰的温度灵敏度分别为 60.07 pm/℃、6.47 pm/℃和 103.83 pm/℃;折射率范围在 1.3355~1.3595 内,灵敏度分别为 -56.64 nm/RIU、34.02 nm/RIU 和 -214.84 nm/RIU;应变精确度在 200~1400 με 内,灵敏度分别为 -2.14 pm/με、-3.61 pm/με和 -2.59 pm/με。这种传感器可测量的参数众多,且灵

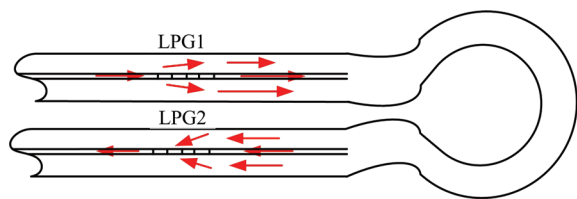


图 5 新型环尾级联 LPG 传感器结构图

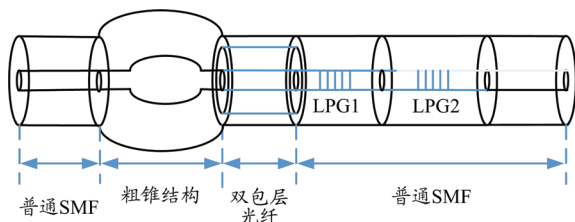


图 6 粗锥级联 LPG 的双包层传感器结构示意图

敏度不错,但测量范围较小、结构复杂、加工工艺难、结构过长且易断裂、不易保存。

综上所述,级联双 LPG 结构的光纤广泛应用在温度和折射率传感应用中,不仅具备 LPG 的各种良好特性,而且便于灵活设计,可采用增敏或减敏结构来满足实际需求。目前,对于级联双 LPG 的应用主要是与不同材质的光纤相结合,比如在双包层光纤中刻制级联 LPG 所得的传感器;或者与其它复杂的光纤结构级联来实现更多参数的测量。但是,其难点在于级联的光纤结构越多,级联长度越长,光纤就越脆弱,更易断裂,且加工工艺难度高,更难以保存。

3 级联 LPG+FBG 传感器

3.1 工作原理

LPG 与 FBG 级联的元件,兼有 LPG 和 FBG 的传光特性^[45],具体传光示意图如图 7 所示。当入射光进入 LPG 时,按照 LPG 的传光特性,此时 LPG 同时具备前向传输的光纤纤芯基模和光纤包层模式。当 2 束光传至 FBG 中时,若 LPG 的谐振波长带宽包含 FBG 的谐振波长的大小^[46-47],且 LPG 未达到满耦合时,则 FBG 同时存在前向传输的光纤纤芯基模和光纤包层模式^[48],表达式为: $\lambda_B^j = [n_{\text{eff}}^{(0)} + n_{\text{eff}}^{(j)}] \Lambda_B$,其中 λ_B^j 是 FBG 谐振波长, $n_{\text{eff}}^{(0)}$ 和 $n_{\text{eff}}^{(j)}$ 分别是光纤纤芯基模和光纤包层一阶 j 次模式的有效折射率, Λ_B 是 FBG 的周期。光纤包层模式的光会被 FBG 耦合并从光纤纤芯反射回 LPG;FBG 反射纤芯基模分为两部分:一部分光沿着光纤纤芯传输回去,另一部分光沿着光纤包层传输回去。最后,这两部分光被 LPG 重新耦合进光纤纤芯^[49-50],满足长周期谐振波长公式 $\lambda_L^j = [n_{\text{eff}}^{(0)} - n_{\text{eff}}^{(j)}] \Lambda_L$,其中 λ_L^j 是 LPG 的谐振波长, Λ_L 是 LPG 的周期。在光谱图中的反射谱会显示 2 种窄带波,谐振波长较短的 λ_B^j 是 FBG 耦合产生的,谐振波长较长的 λ_{LB}^j 是由 FBG 和 LPG 共同作用产生的,两者间的关系为: $\lambda_{LB}^j = \lambda_B^j \left(1 - \frac{\Lambda_B}{\Lambda_L - \Lambda_B} \right)$ 。

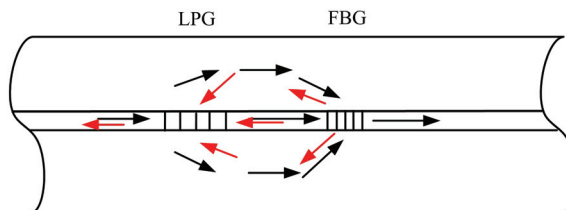


图 7 LPG 与 FBG 级联结构传光示意图

3.2 级联 LPG+FBG 传感器的国内外研究进展

3.2.1 普通级联 LPG+FBG 传感器的研究

2010 年, HAN M 等人^[51]制作了一种具有温度自补偿和折射率测量功能的级联 LPG+FBG 传感器, 其折射率的灵敏度大约为 2.3 nm/RIU。2015 年, 王燕涛等人^[52]利用 FBG、LPG 分别对环境折射率变化不敏感和敏感的特点, 设计了一种具有温度补偿效应的溶液浓度传感器, 实现了折射率和温度双参量测量。实验结果得到 LPG 折射率灵敏度为 -31.250 nm/RIU, 线性度为 0.9852, FBG 反应可以忽略不计; LPG 温度灵敏度为 0.20137 nm/°C, FBG 温度灵敏度为 0.008 nm/°C。

3.2.2 镀膜法增敏级联 LPG+FBG 传感器的研究

2017 年, 张雯等人^[53-55]研究了 2 种级联 LPG+FBG 的传感器, 通过飞秒激光直写刻制 LPG 和 FBG。在 30~50 °C 时, 分别测量了该传感器升温 and 降温过程, 实验结果表明: 在升温时, LPG 的温度灵敏度是 -24.55 pm/°C, FBG 的温度灵敏度是 26.36 pm/°C; 在降温时, LPG 的温度灵敏度是 -21.82 pm/°C, FBG 的温度灵敏度是 25.00 pm/°C。FBG 对液体浓度不敏感, 在液体浓度为 3%~30% 时, LPG 的折射率灵敏度为 196.36 pm/RIU。2019 年, 李盼盼等人^[56]设计了一种级联 LPG+FBG 传感器, 结构如图 8 所示, 去除 FBG 的光纤包层, 并在 FBG 上镀一层 PI 湿敏薄膜。当温度在 30~60 °C 时, 温度灵敏度为 31.7 pm/°C; 湿度为 40%~70% 时, 湿度灵敏度为 13.3 pm/%RH, 实现了温度和湿度的双参量测量。为了避免级联长度过长, 2020 年, BO P 等人^[57]设计了一种 LPG+FBG 叠加的传感器, 并在包层处镀膜, 同时实现测量温度和折射率的目的, 具体结构如图 9 所示。该传感器温度灵敏度为 10 pm/°C, 测量温度范围是

20~100 °C, 折射率敏感度为 2326.7 nm/RIU, 测量折射率的范围是 1.330~1.342 RIU, 优点是结构紧凑, 避免了级联长度过长所带来的影响。

综上所述, 级联 LPG+FBG 的光纤传感器不仅兼具 LPG 和 FBG 的传感特性, 还因此在光纤中包含了多种模式的光, 丰富了反射谱图, 便于应用在传感领域中; 该类型传感器既具有 LPG、FBG 分别对外界折射率变化敏感与不敏感的特性, 降低多参数测量交叉敏感的影响。目前, 级联 LPG+FBG 传感器的增敏设计多为在光纤包层区域的镀膜, 但是镀上的膜层易脱落或者松动, 影响了传感器的测量性能和寿命。

4 3 种级联结构传感器的性能对比

本文主要综述了近几年国内外 CFG 传感技术的情况, 从测量温度和折射率的传感应用出发, 分别对级联双 FBG 传感器、级联双 LPG 传感器和级联 LPG+FBG 传感器的工作原理、传感结构、测量参数和测量特性进行了对比和分析, 具体性能如表 1 和表 2 所示。可以看出, 经过加工处理后的单 FBG 或 LPG 的传感器, 在温度和折射率灵敏度上都不及 CFG 结构的传感器。级联双 FBG 传感器的折射率和温度的灵敏度不及另外 2 种级联结构的传感器; 级联双 LPG 传感器无论是温度测量范围还是温度灵敏度上均优于级联 LPG+FBG 型传感器, 且由于级联 LPG+FBG 传感器在测量折射率的传感应用上, 同时具备了 LPG 和 FBG

表 1 不同光纤光栅级联结构的温度传感器性能对比

结构	结构处理	温度灵敏度 /($\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	测量范围/ $^\circ\text{C}$	参考文献
单 FBG	光纤材料	20	10~70	[58]
单 LPG	—	31.2	24~200	[59]
双 FBG	半腐蚀	8.6	20.5~80	[2]
双 LPG	啁啾	-200	30~130	[32]
LPG+FBG	半腐蚀	64.26	30~80	[35]

表 2 不同光纤光栅级联结构的折射率传感器性能对比

结构	结构处理	折射率灵敏度 /($\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$)	测量范围 /RIU	参考文献
单 FBG	级联 F-P 结构	0.0011	1.333~1.383	[11]
单 LPG	竹节型 LPG	872.44	1.3308~1.3464	[21]
双 FBG	倾斜 FBG	0.833	1.3399~1.3648	[20]
双 LPG	复合结构级联	-214.84	1.335~1.3595	[33]
LPG+FBG	包层镀膜	2326.7	1.330~1.342	[57]

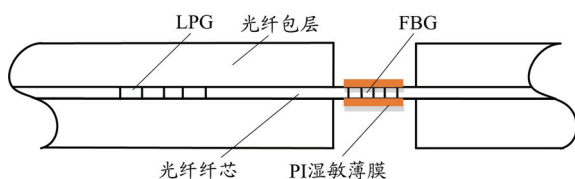


图 8 级联 LPG-FBG 温湿度传感器结构图

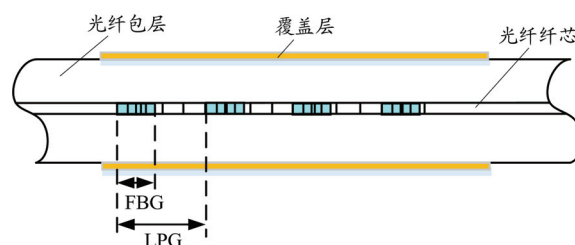


图 9 涂层叠加 LPG-FBG 传感器结构图

的特性,既可测量外界折射率的变化又可通过 FBG 来进行温度补偿,降低了多参数测量时交叉敏感的影响,因此级联 LPG+FBG 传感器在同时测量折射率和温度的传感应用上比较理想。总之,3 种级联结构的光纤光栅传感器各有优缺点:级联双 FBG 传感器的优点是兼具 FBG 的特性,工作机理简单、成本相对较低,缺点是对外界温度和折射率的灵敏度不高,经常被设计用来进行温度补偿;级联双 LPG 传感器的优点是具备了 LPG 温度和折射率敏感的特点,且灵敏度有所提高,缺点是透射波的光谱图中带宽较宽,不利于传感的应用;级联 LPG+FBG 传感器的优点是具备了 LPG 和 FBG 的共同特性,缺点是 LPG 与 FBG 级联后的传感器长度变长、易断裂,传感器光纤光栅的制作工艺较复杂,需要在同一根光纤纤芯中精准刻写 2 种不同的光纤光栅。

5 结束语

本文详细讨论了 CFG 温度和折射率传感器近几年的研究现状,由于 CFG 传感器的应用处于理论分析和实验室实验的研究阶段,还有如下难点需要突破:①在 CFG 结构传感器同时测量双参数的研究中,CFG 结构传感器可以有效地降低交叉敏感的影响,即利用一种被测参量来对另一个被测参量的测量结果进行补偿,比如温度补偿+折射率测量,若测量的参量为 3 个,交叉敏感的现象还是比较严重,有待继续探索;②光纤光栅的腐蚀和镀膜处理技术有待研究,只有这种处理技术更加完善,传感器的性能才会更好,寿命才会更长久;③与制作单一光纤光栅不同,制作一系列光纤光栅的难度和复杂性较高,工艺复杂,且级联的光栅长度较长、易断裂,不易保存;④大多数双光纤光栅传感器的应用条件要求苛刻且成本高,仅停留在实验阶段,难以广泛应用。

未来,研究人员可以探索更适合的腐蚀液来更好地腐蚀包层,也可以研究出更适合的镀膜材料避免膜层脱落或镀膜不均匀的情况。此外,在保证传感性能的同时,可以寻找成本更低的光纤或者设计更加新颖的光纤结构来扩大传感器应用范围。

参考文献:

[1] FANG Y, HE W, ZHANG W, et al. All-fiber temperature and refractive index sensor based on a cascaded tilted Bragg grating and a Bragg grating [J]. Journal of Optical Technology c/c of Opticheskii Zhurnal, 2021, 88(2): 100–105.
[2] 冯显桂. 级联光纤光栅的特性及应用研究[D]. 成都:西南交通大学,

2009.

[3] AHMED F, ASHRAF A, FATHY M, et al. An enhanced WDM optical communication system using a cascaded fiber Bragg grating[J]. Opt. Quant Electron, 2020, 52: 1–21.
[4] XIAOLING T, YOUFU G, XUEJIN L. High-birefringence photonic crystal fiber Michelson interferometer with cascaded fiber Bragg grating for pressure and temperature discrimination [J]. Optical Engineering, 2016, 55(9): 1–3.
[5] GU H, LI X, WANG X. High precision differential measurement of dyeconcentration based on two cascaded FBGs[J]. Applied Optics, 2019, 59(2): 413–417.
[6] JACOBSSON B, TIHONEN M, LAURELL F, et al. Narrow band bulk Bragg grating optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 2005, 30(17): 2281–2283.
[7] 李想. 基于两级联光纤光栅的染料浓度高精度差分测量[D]. 天津:天津工业大学, 2019.
[8] SAYED A F, KHALAF A, ALY M, et al. Spectral width reduction using apodized ca-scaded fiber Bragg grating for post-dispersion compensation in WDM optical network-s [J]. Photonic Network Communications, 2021(6): 1–11.
[9] WU M, CHEN S, YING L, et al. Wavelength switchable graphene Q-switched fiber laser with cascaded fiber Bragg gratings [J]. Optics Communications, 2016(368): 81–85.
[10] BAI X, HU M, GANG T, et al. Simultaneous acoustic and magnetic measurement usi-ng cascaded fibre Bragg grating[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 376–382.
[11] 刘子溪. 基于飞秒激光微孔的光纤光栅折射率及温度传感器件的研究[D]. 广州:暨南大学, 2019.
[12] 宁提纲, 傅永军, 谭中伟, 等. 光纤光栅级联时延特性的研究[J]. 中国激光, 2004(1): 77–80.
[13] SAIMON S M, ABDULLAH A S, AHMAD S, et al. Simultaneous measurement of high refractive index and temperature based on SSRS-FBG [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021(9): 715–718.
[14] PEREIRA D A, FRAZAO O, JOSE L, et al. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature [J]. Optical Engineering, 2004, 43(2): 299–304.
[15] 赵洪霞, 程培红, 鲍吉龙, 等. 一种两段式 FBG 应变和温度同步测量的实现[J]. 光电子·激光, 2014, 25(6): 1071–1074.
[16] KUMAR J, MAHAKUD R, KUMAR S, et al. Analysis and experiment on simultaneo-us measurement of strain and temperature by etched and un-etched FBG pair[J]. Results in Optics, 2021(8): 1–8.
[17] SONG B, JIN C, WANG B, et al. Hydrophobin HGFI assisted immunobiologic sensor based on cascaded tapers integrated ultra-long-period fiber grating[J]. Biomedical Optics Express, 2021, 12(5): 2790–2799.
[18] CAUCHETEUR C, WUILPART M, ALBERT J, et al. Quasi-distributed refractometer using tilted Bragg gratings and time domain reflectometry [J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17882–17890.
[19] 王金豆, 葛海波, 李彩虹, 等. 不同参量的倾斜布喇格光栅级联传输谱特性研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(9): 39–42.
[20] YITAO F, WEI H, WEN Z, et al. All-fiber temperature and refractive index sensor based on a cascaded tilted Bragg grating and a Bragg grating.

- [J]. Opt. Technol, 2021, 88: 100–105.
- [21] 李元鹏. 竹节状长周期光纤光栅的制备与传感特性研究 [D]. 广州:暨南大学, 2020.
- [22] WANG J, XU Q, RUIRONG W. Temperature-compensated single-ended twist sensor based on cascaded fiber grating[J]. Optical Engineering, 2020, 59(9): 1–11.
- [23] 姜凤贤. 级联光纤光栅传感机理与实验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2015.
- [24] GUO J C, XUE Y, CHEN C, et al. Compact long-period fiber gratings based on periodic microchannels [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2): 111–114.
- [25] 胡兴柳, 梁大开, 李丹, 等. 级联长周期光纤光栅的温度特性研究[J]. 光电子激光, 2012(9): 1659–1664.
- [26] WU W, GU Z, LING Q, et al. Design of a narrow-bandwidth refractive index sensor based on a cascaded few-mode long-period fiber grating[J]. Applied Optics, 2019, 58(32): 8726–8732.
- [27] KIM D K, LEE S L, CHOI S, et al. Bend-insensitive simultaneous measurement of strain and temperature based on cascaded long-period fiber gratings inscribed on a polarization maintaining photonic crystal fiber[J]. Journal-Korean Physical Society, 2020, 76(9): 810–818.
- [28] HAN J, KIM J, LEE S L, et al. Strain-insensitive simultaneous measurement of bending and temperature based on cascaded long-period fiber gratings inscribed on double-clad fiber [J]. IEEE Sensors Journal, 2020(99): 1–1.
- [29] 胡兴柳, 梁大开, 王彦, 等. 应用于液体检测的级联长周期光纤光栅的温度减敏封装结构[J]. 光电子·激光, 2013, 24(10): 1895–1899.
- [30] 陈美娟, 李传起, 罗德俊, 等. 高灵敏度级联长周期光纤光栅温度与应变传感的理论研究[J]. 量子电子学报, 2015, 32(2): 228–234.
- [31] FUKUSHIMA K, HUNG B, NAKAYA K, et al. EDF ring laser using cascaded-chirped long period fiber grating for temperature measurement[J]. Optics Express, 2020, 28(9): 13081–13090.
- [32] SONG H, GAO H L, ZHAO X W, et al. Characteristics of novel tail ring-shaped cascaded long period fiber grating sensor-ScienceDirect[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 1–6.
- [33] 付兴虎, 黄书铭, 王宇凡, 等. 基于粗锥结构级联 LPG 的双包层光纤多参量传感器[J]. 光子学报, 2021, 50(1): 83–93.
- [34] 苏怡. 级联长周期光纤光栅设计及气(液)环境监测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [35] 焦冬莉, 郭文静, 薄晓宁, 等. 基于双周期光纤光栅的温度 / 折射率双参量传感器[J]. 光学技术, 2019, 45(4): 458–462.
- [36] 缪松岑. 分布式级联长周期光纤光栅解调复用的系统设计实现[D]. 南京:南京邮电大学, 2020.
- [37] SONG H, GAO H L, ZHAO X W, et al. Characteristics of novel tail ring-shaped cas-caded long period fiber grating sensor-sciencedirect[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 1–6.
- [38] 李彩虹, 葛海波, 侯元萌, 等. 一种级联长周期光纤光栅动态解调光纤布喇格光栅的新方法[J]. 光通信技术, 2019, 43(8): 52–54.
- [39] 高敏, 葛海波, 李盼盼, 等. 不同长周期光栅的级联传输谱特性[J]. 光通信技术, 2018, 42(11): 56–59.
- [40] XIAN L, LI L, WANG D. Torsion and strain simultaneous measurement using a cascaded helical long period grating[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(5): 1307–1311.
- [41] 罗霄. 基于级联长周期光纤光栅的分布式 FBG 解调系统研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2016.
- [42] KAILI R, MINHUI C, JUN D, et al. Ultra-broadband conversion of OAM mode near the dispersion turning point in helical fiber gratings[J]. OSA Continuum 2020(3): 77–87.
- [43] WU W, GU Z, LING Q, et al. Design of a narrow-bandwidth refractive index sensor based on a cascaded few-mode long-period fiber grating[J]. Applied Optics, 2019, 58(32): 8726–8732.
- [44] FUKUSHIMA K, HUNG B, NAKAYA K, et al. EDF ring laser using cascaded-chirped long period fiber grating for temperature measurement[J]. Optics Express, 2020, 28(9): 13081–13090.
- [45] 蒋磊. 基于级联光纤布拉格光栅的盾构机刀头磨损检测研究[D]. 天津:天津大学, 2019.
- [46] 曹莹, 顾铮先. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 97–104.
- [47] WEN Z, HAO J, LOU X, et al. All-fiber dual-parameter sensor based on cascaded long period fiber grating pair fabricated by femtosecond laser and CO₂ laser[J]. Fiber & Integrated Optics, 2018, 37(9): 1–13.
- [48] TIAN J, LIU S, YU W, et al. Microfiber Bragg grating for temperature and strain sensing applications[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(1): 44–47.
- [49] ZHANG A P, TAO X M, BAI O U G, et al. Cladding-mode-assisted recouplings in concatenated long-period and fiber Bragg gratings [J]. Optics Letters, 2002, 27(14): 1214–1216.
- [50] LIU Y, LI Y, FAN Z, et al. Analysis on strain sensing characteristic of long period fibre grating based on deep-grooved process[J]. Optica Acta International Journal of Optics, 2017, 64(7): 672–680.
- [51] MING H, FAWEN G, YONGFENG L. Optical fiber refractometer based on cladding mode Bragg grating[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 399–401.
- [52] 王燕涛, 姜凤贤, 齐跃峰, 等. 基于级联光栅温度补偿的溶液浓度测量研究[J]. 光电工程, 2015, 42(5): 63–67.
- [53] 张雯, 刘小龙, 何巍, 等. 基于双光栅级联结构的温度及浓度传感特性测试[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 225–231.
- [54] 张雯, 刘小龙, 何巍, 等. LPG 和 FBG 级联结构双参数光纤传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 2047–2054.
- [55] WEN Z, LOU X P, DONG M L, et al. Optical fiber sensor by cascading long period fibergrating with FBG for double parameters measurement[J]. Optoelectronics Letters, 2017, 34(1): 140–145.
- [56] 李盼盼, 葛海波, 高敏, 等. 基于 LPG-FBG 级联结构的温湿度传感研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(4): 54–57.
- [57] BO P, ZHENG TIAN G, YUAN Z, et al. Simultaneous measurement of temperature and surrounding refractive index by superimposed coated long period fiber grating and fiber Bragg grating sensor based on mode barrier region[J]. Optik, 2020, 220: 16–24.
- [58] SUO R, LOUSTEAU J, LI H, et al. Fiber Bragg gratings inscribed using 800 nm femtosecond laser and a phase mask in single and multi-core mid-IR glass fibers[J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7540–7548.
- [59] 郑钟铭. 基于飞秒激光直写法制备的长周期光纤光栅的传感特性研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.