

文章编号: 1002-1582(2025)04-0439-10

布里渊动态光栅研究现状与发展趋势

陈飞飞¹, 赵丽娟², 陈思慧^{1*}, 肖宁¹

(1. 南宁理工学院 信息工程学院, 广西 桂林 541006)

(2. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘 要: 相比传统光纤传感技术布里渊动态光栅 (BDG) 具有多参量同时传感、测量精度高等优势。目前对 BDG 各项指标研究主要基于产生的不同类型 BDG 和在不同光纤介质中产生 BDG。基于不同类型产生的不同 BDG 有啁啾、相移、随机和混沌四种, 且混沌 BDG 实现高精度、高空间分辨率测量的同时, 可以实现单个、稳定维持的动态光栅克服了多光栅的影响与其在分布式光纤传感中的限制。BDG 产生介质有单模光纤、少模光纤、保偏光纤和光子晶体光纤。相比其他光纤, 光子晶体光纤具有高双折射系数及能提高传感距离等特性。首先介绍了 BDG 的原理, 并详细综述了混沌 BDG 和光子晶体光纤的应用与研究进展, 同时介绍了 BDG 在分布式光纤传感中的多参量同时传感、高精度测量和高空间分辨的应用。最后, 对该领域存在的一些问题进行了探讨。

关 键 词: 单个稳定维持动态光栅; 布里渊动态光栅; 混沌布里渊动态光栅; 光子晶体光纤; 高双折射系数

中图分类号: TP247; TN929.11

文献标识码: A

Research status and development trends of Brillouin dynamic grating

CHEN Feifei¹, ZHAO Lijuan², CHEN Sihui^{1*}, XIAO Ning¹

(1. School of Information Engineering, Nanning College of Technology, Guilin Guangxi 541006, China)

(2. School of Electrical and Electronic Engin., North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: Compared with the traditional optical fiber sensing technology, Brillouin dynamic grating (BDG) has the advantages of multi-parameter simultaneous sensing and high measurement accuracy. At present, the research on BDG indicators is mainly based on the different types of BDG and BDG generated in different optical fiber media. There are four types of BDGs based on different types: chirp, phase shift, random and chaos. While chaotic BDG achieves high-precision and high-spatial resolution measurement, it can achieve a single, stable dynamic grating to overcome the influence of multiple gratings and its limitations in distributed optical fiber sensing. BDG generation media include single-mode fiber, few-mode fiber, polarization-maintaining fiber and photonic crystal fiber. Compared with other optical fibers, photonic crystal fiber has high birefringence coefficient and can improve the sensing distance. Firstly, the principle of BDG is introduced, and the application and research progress of chaotic BDG and photonic crystal fiber are reviewed in detail. At the same time, the application of BDG in multi-parameter simultaneous sensing, high-precision measurement and high spatial resolution in distributed optical fiber sensing is introduced. Finally, some problems in this field are discussed.

Keywords: a single stable dynamic grating; Brillouin dynamic grating; chaotic Brillouin dynamic grating; photonic crystal fiber; high birefringence coefficient

收稿日期: 2024-11-28; 收到修改稿日期: 2025-04-14

基金项目: 广西中青年能力提升项目 (2024KY1758, 2024KY1762)

作者简介: 陈飞飞 (1990—), 男, 助教, 硕士, 从事光纤传感技术、图像识别等方面的研究。313575109@qq.com

陈思慧 (1995—), 女, 助教, 硕士, 从事光纤传感、无线电等方面的研究。

* 通讯作者: 13623271437@163.com

0 引 言

由于存在声子寿命限制以及温度和应变的交叉敏感,传统分布式光纤传感技术在多参量同时传感、测量精度、空间分辨率等方面受到限制。近年来,一种新型布里渊动态光栅(Brillouin Dynamic Grating,BDG)传感技术,引起了国内外专家、学者的广泛关注。2008年,Song等首次在30m长的熊猫型保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber,PMF)中通过受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering,SBS)产生了BDG。通过将探测光与泵浦光在偏振方向上进行分离,解决了空间分辨率和测量精度之间的矛盾,同时也实现了温度与应变的同时传感^[1-3]。

近年来,国内外对BDG在测量精度、空间分辨率、多参量同时传感等方面的研究主要基于不同类型的BDG和不同介质中的BDG。对不同类型BDG可以通过调制泵浦光或利用不同类型的激光作为泵浦光来实现^[4],主要产生类型有啁啾BDG^[5,6]、相移BDG^[7,8]、随机BDG^[9]和混沌BDG^[10]。由表1不同类型BDG对比可知混沌BDG更适合分布式光纤传感的应用。其原因是,啁啾和相移BDG反射谱宽较小,给测量带来了限制;在产生随机BDG时会有多个旁瓣BDG产生,影响了测量精度且多光栅的激发会产生测量误差进而导致空间分辨率下降;而采用低相干光源的混沌BDG可以产生单个BDG且不需要搭建复杂结构就可以实现信号的调制,有效避免了上述问题的出现^[11]。

表1 不同类型BDG对比

BDG类型	特性	应用
啁啾BDG	反射谱宽度小于100MHz	用于窄带宽滤波器、光子滤波器和全光信号处理等
相移BDG	反射谱宽度大于100MHz	
随机BDG	反射谱宽度可以达到GHz级别,但会同时产生多个BDG	用于随机光纤激光器
混沌BDG	反射谱宽度比随机BDG要大	用于分布式光纤传感

关于BDG产生介质主要有单模光纤(Single-Mode Optical Fibers, SMF)^[12]、少模光纤^[13,14]、PMF^[15-17]和光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)^[18]。如表2是不同光纤介质对比。由表2可知单模光纤不易产生BDG;少模光纤在实现BDG时系统较复杂;在传感距离增加时PMF对泵浦光功率要求很高,且PMF成本高,导致搭建系统成本也较高。虽然PCF成本也高,但是它具有很好的非线性,当传感距离增加时可以降低对泵浦光

功率要求。除此之外,PCF还具有限制性损耗和高双折射等特性。通过结构设计可以提高PCF中两偏振轴的不对称性,有效提高双折射系数,减少传输过程中两偏振轴之间的模式耦合,从而在提高传输距离情况下也可以提高测量精度。同时较低的限制性损耗也有助于提高传输距离。这些指标对于提高BDG的多参量同时传感和提高空间分辨率情况下进一步提高传感距离具有重要意义和研究价值。

表2 不同光纤介质对比

光纤类型	特性
单模光纤	线偏振光状态不易保持,不易激发SBS
少模光纤	利用其模态更好地实现泵浦光、探测光和反射光的分离,但系统复杂。
保偏光纤	可以很好地保持偏振光,当传感距离增加时对泵浦光功率要求较高。并且搭建成本高。
光子晶体光纤	具有很好的非线性,当传感距离增加时可以降低对泵浦光功率要求,但成本也高。

本文首先对BDG理论进行了介绍,并对近几年在基于不同类型BDG中能够产生单个稳定维持光栅的混沌BDG和基于改变光纤内部结构来提高传感系数以此达到更高精度测量的PCF进行了详细综述。并对其在分布式光纤传感中的多参量同时传感、高精度测量和高空间分辨率传感进行了介绍。最后对BDG的发展中存在的一些问题进行了探讨,并提出了未来的发展趋势。

1 BDG理论分析

BDG通常产生于PMF中,如图1所示是BDG理论模型。从光纤两端的慢轴(x 轴)入射两束泵浦光(Pump1和Pump2),其中Pump1脉冲光功率大于Pump2脉冲光功率,这样有利于将Pump1写入到光栅上。当满足相位匹配条件时,即Pump1和Pump2的频率差为布里渊频移,表示为^[19]

$$v_B = v_1 - v_2 = \frac{2nV_a}{\lambda_p} \quad (1)$$

式中, v_B 为布里渊频移; v_1 和 v_2 分别为Pump1和Pump2的频率; n 、 V_a 、 λ_p 分别为光纤有效折射、光纤中声速和入射光在真空中的波长。在相遇位置处产生的受激布里渊散射作用最强,导致高频率的光向低频率的光进行能量传递,在电致伸缩效应下将产生强声波场,这个声波场会对光纤折射率进行周期性调制,并形成以声速 V_a 运动的折射率光栅,即动态光栅。当从Pump1一侧以快轴(y 轴)方向注入Probe到光纤中时,由于声波模式在高双折射

光纤的两偏振方向上差别较小,对于探测光而言相当于一个运动的反射光栅,且反射信号具有一个多普勒频移,上频移量等于光纤中布里渊频移,即满足相位匹配条件时反射光功率最大,通过对反射光谱进行测量即可得到BDG相关特性。由于PMF中两偏振轴上的折射率存在偏差,会导致产生不同的布里渊频移,考虑到产生的声波是一个不受横向极化的纵向声波,在忽略声波色散情况下,光纤的 x 、 y 轴具有相同的布里渊频移,即^[20]

$$\frac{2n_x V_a}{\lambda_x} = \frac{2n_y V_a}{\lambda_y} \quad (2)$$

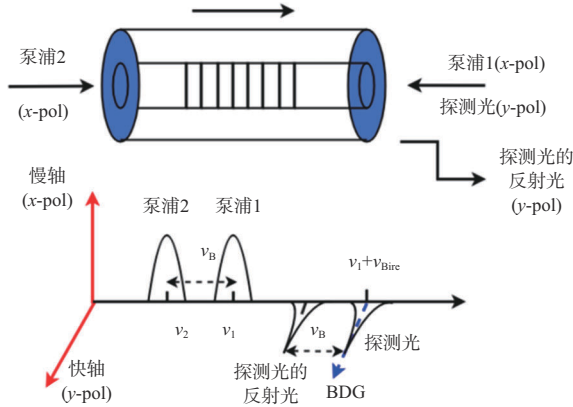


图1 BDG产生与探测原理图

式中, n_x 、 n_y 分别是 x 、 y 轴方向上的折射率; λ_x 、 λ_y 分别为光纤 x 、 y 轴上的中心波长。且高双折射PMF中 x 、 y 轴方向的折射率差远小于1,当Pump1、Pump2、Probe和反射光四束光的频率近似相等时,可得双折射频移公式如下^[21,22]

$$v_{Bire} = \frac{\Delta n}{n} v_1 \quad (3)$$

式中, v_1 是Pump1的频率, Δn 是光纤折射率差; n 为 x 、 y 轴平均折射率。

在慢变振幅条件下,可通过五波耦合方程对BDG进行描述,即由Pump1、Pump2、Probe、反射光和声波场,关系式如下^[23]

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n_x}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) A_1 = ig_0 \rho A_2 - \frac{\alpha}{2} A_1 \\ \left(-\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n_x}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) A_2 = ig_0 \rho^* A_1 - \frac{\alpha}{2} A_2 \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n_y}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) A_3 = ig_0 \rho A_4 e^{-i\Delta k z} - \frac{\alpha}{2} A_3 \\ \left(-\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n_y}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) A_4 = ig_0 \rho^* A_3 e^{-i\Delta k z} - \frac{\alpha}{2} A_4 \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{\Gamma_B}{2} \right) \rho = ig_a (A_1 A_2^* + A_3 A_4^* e^{i\Delta k z}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 g_0 、 g_a 分别是光波长耦合系数和声波场耦合系数; Δk 是相位失谐量; A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 分别是Pump1、Pump2、Probe、反射光的振幅; Γ_B 是布里渊增益线宽; ρ 是声波振幅; α 是光纤衰减系数。在 $\Delta k \neq 0$ 情况下,可以得到BDG反射率公式为^[24]

$$R = \frac{\sinh^2(gL)}{\cosh^2(gL) - (\Delta k^2/4K_1K_2)} \quad (5)$$

式中, L 为光栅长度; $K_1 = -1/2g_B A_1 A_2^*$ 、 $K_2 = -1/2g_B A_1^* A_2$ 。

2 混沌布里渊动态光栅

为了探究能产生稳定维持的BDG,减少多波形给测量带来的影响。2011年, M Santagiustina等^[25,26]提出了一种基于混沌激光在PMF中实现BDG定位和稳定产生的方法。结合理论进行了数值模拟,结果得到只有一个混沌波形的同时也可以将空间分辨率提高到1cm,并且反射率会随着输入功率的乘积而增加,当Pump1和Pump2功率每增加一次反射率就增加6dB。

2017年, Zhang团队用SBS五波耦合方程在PMF中建立了混沌BDG产生与读取理论模型来探索混沌BDG相关特性。五波耦合方程式如下^[27]

$$\begin{cases} \partial_z A_{p1} + \beta_{1s} \partial_t A_{p1} = -\eta g_B Q A_{p2} \\ -\partial_z A_{p2} + \beta_{1s} \partial_t A_{p2} = -\eta g_B Q^* A_{p1} \\ -\partial_z A_p + \beta_{1f} \partial_t A_p = \eta g_B Q^* A_r e^{i\Delta k z} \\ \partial_z A_r + \beta_{1f} \partial_t A_r = \eta g_B Q A_p e^{-i\Delta k z} \\ \partial_z Q + (1/2\tau_B - i\Delta\omega) Q = (A_{p1} A_{p2}^* + A_r A_p^* e^{i\Delta k z}) / 2\tau_B \end{cases} \quad (6)$$

式中 A_{p1} 、 A_{p2} 、 A_p 、 A_r 分别是Pump1、Pump2、Probe和Reflection的慢变振幅; Q 是Pump1和Pump2在PMF中发生SBS,电致伸缩效应产生的声波场振幅; β_{1s} 和 β_{2s} 分别是PMF慢轴和快轴单位长度的群延时; Δk 为Pump2和Probe频差 $\Delta\nu$ 直接相关的相位失谐量。

通过数值模拟得到了如图2所示PMF中混沌激光产生的声波场 $Q(z, t)$ 的时空分布、图3所示的不同有效长度下混沌BDG的反射谱和图4不同有效光栅长度下混沌BDG增益谱及增益谱随泵浦光变化曲线图^[27]。图2表明在1m长的PMF中可以得到约0.2cm长稳定维持的混沌BDG;由图3可知混沌BDG反射谱宽度与光栅有效长度成反比,且不受泵浦光功率影响;由图4可知增益谱宽度受光栅有效长度影响,但不受泵浦光功率影响。

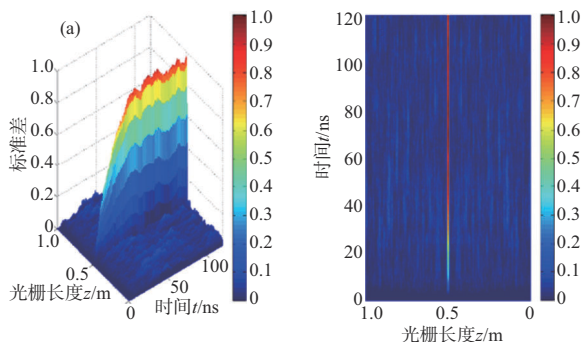


图2 PMF中混沌激光产生的声波场 $Q(z, t)$ 的时空分布^[18]

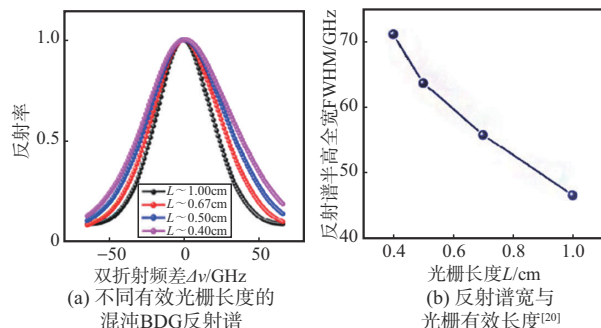


图3 混沌BDG反射谱宽与光栅有效长度关系^[20]

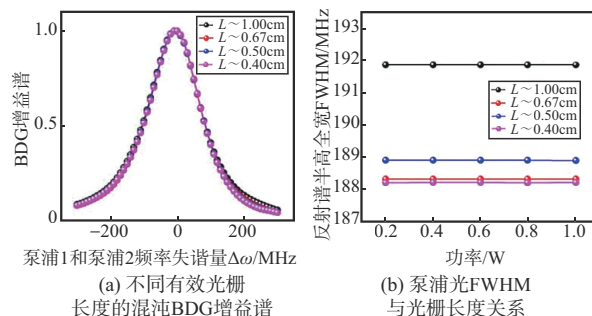


图4 混沌泵浦光功率与光栅长度之间的关系

虽然使用混沌BDG可以抑制波动旁瓣的产生，但总体来说还存在受声子寿命限制和无法长时间稳定维持的问题。因此，Zhu采用低相干特性的混沌激光来激发混沌BDG，并最终实现温度与应变无交叉敏感的分布式传感测量^[28]。实验通过同时调节衰减器和偏振控制器来实现对反馈光的强度调制，进而实现对混沌BDG的控制。在100m长的熊猫型PMF中分别产生了2.07cm、1.66cm、1.39cm、1.24cm长的BDG，并在2.07cm的BDG下获得了2.7cm的空间分辨率。如图5所示是混沌BDG与光栅长度关系曲线图，从图中可以看出BDG反射谱宽与光栅长度呈反比关系。

实验进一步在100m长PMF中的20m处设置了2.5cm的温度调节区域，得到了如图6所示的布里渊频移和双折射频移随温度变化的关系曲线图。图6中展示了通过布里渊频移和双折射频移测得的

温度加热区域分别为2.7cm和2.8cm，两数值基本相同。证明了混沌BDG可以有效解决温度和应变交叉敏感问题。

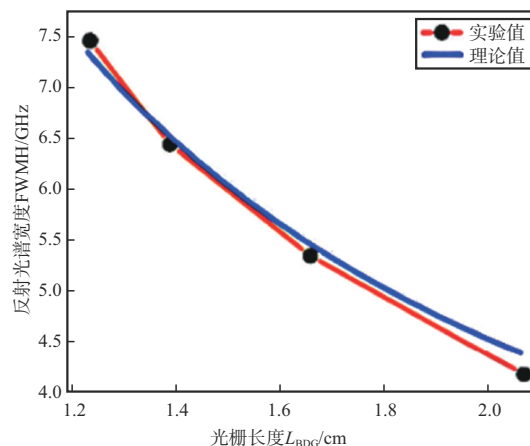
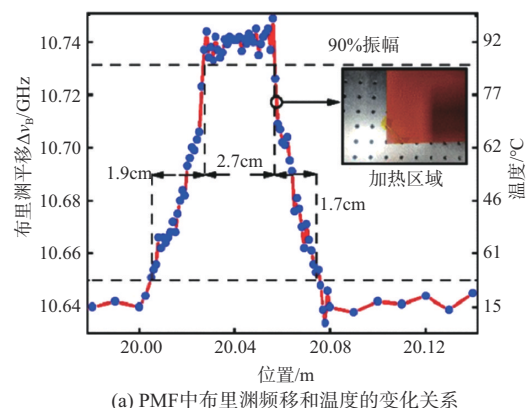
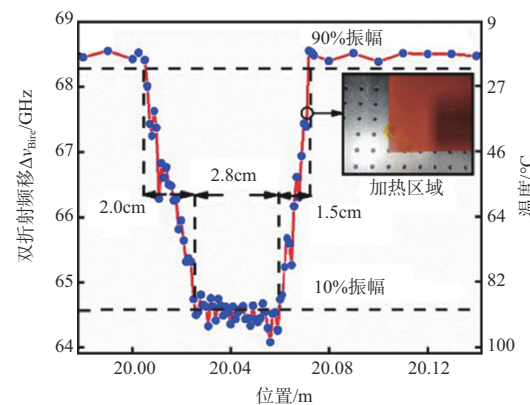


图5 混沌BDG反射光谱宽度与光栅长度关系^[28]



(a) PMF中布里渊频移和温度的变化关系



(b) 双折射频移和温度的变化关系

图6 温度与布里渊频移和双折射频移关系

现阶段基于混沌激光产生的混沌BDG已能够产生稳定维持的动态光栅，并可以实现温度和应变的同时测量以及高空间分辨率的测量。但就现有文献来看，其传感距离还远未达到长距离传输，其实际应用将会受到限制。随着各项解调技术和方法的不断涌现，相信未来混沌BDG在传感距离上会得到进一步提升。

3 光子晶体光纤

由于传统PMF的双折射系数较低,且微弱外界干扰都会导致光纤两偏振方向发生耦合,影响了它在BDG光纤传感系统的应用。而光子晶体光纤可以通过改变光纤内部结构的非对称性来提高双折射系数,进而提高测量精度。

2009年,Dong等提出了一种瞬态布里渊光栅双折射效应的时域分布式光纤温度传感技术^[29]。在3m长的保偏PCF中注入脉冲宽度为2ns的Pump1和Pump2,频率差固定为11.131GHz,使用6ns探测光在15℃、35℃、55℃和75℃下测得了瞬态布里渊光栅增益谱,得到温度分辨率为0.07℃,温度与中心频移系数为-23.5MHz/℃,温度与中心频移之间的关系曲线如图7所示。实验中将0.9~2.4m光纤置于加热区域内实现了20cm的空间分辨率测量,结果如图8所示。同时也提出了通过提高测试光纤中峰值功率或使用具有更小纤芯面积的保偏PCF以及更短泵浦脉冲,可进一步提高空间分辨率和温度测量范围,以及利用Pump1脉冲序列同时进行多位置测量,来减少测量时间开销。

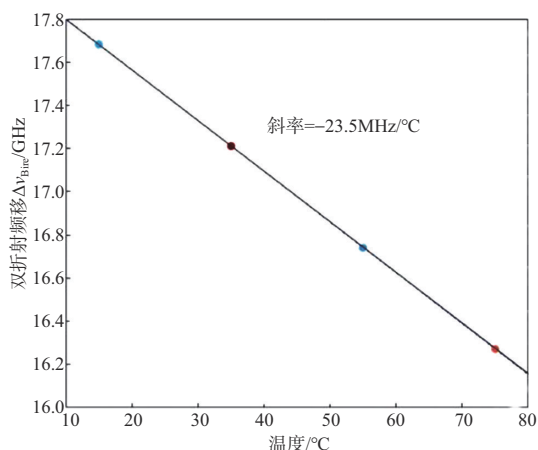


图7 中心频移与温度关系

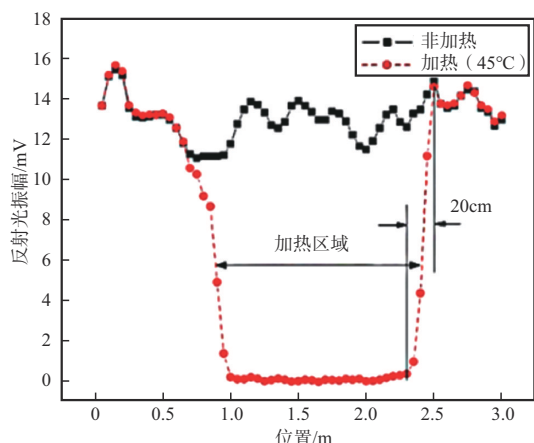


图8 加热和不加热情况下PM-PCF不同位置处反射信息

2013年,R Pant等^[30]在6.5cm长的As₂S₃材质的PCF中使用单通道谐振腔几何结构实现了BDG,并测得BDG的反射率、开关比和3dB带宽分别为0.4%、28dB和6GHz。在使用相等Pump1功率时,其反射率与20m和30m长的SMF和PMF中的几乎相等,且3dB带宽也相比高出3个数量级。这一发现对基于PCF的BDG在可调延时和开关比方面具有重大意义。

2015年,Kim等在-30~150℃温度范围内,对保偏PCF中的BDG双折射频移和折射率对温度依赖特性进行了研究^[31]。如图9所示是涂覆和未涂覆丙烯酸情况下双折射频移和折射率与温度的变化曲线图。通过对图9分析发现PCF的温度依赖特性在涂覆丙烯酸的部分在温度为20℃以上时几乎保持恒定,即不受温度影响;在20℃以下时,裸露部分的双折射频移则发生突变,产生这一现象的原因可能是由于丙烯酸涂层在低温情况下收缩引起的径向压力导致的。之后,他们又设计了一种保偏PCF中BDG的高灵敏度静水压力传感器^[32],并实验测得其压力灵敏度为1.69MHz/psi,是SMF中BFS的169倍,并且该光纤对温度依赖特性可忽略不计。

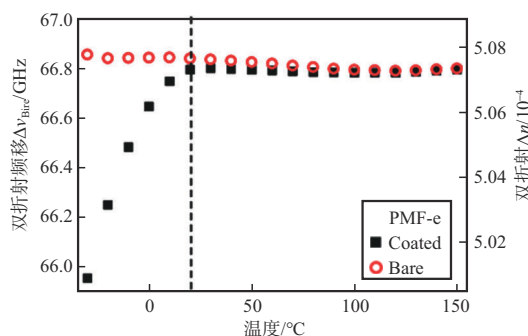


图9 双折射频移和折射率与温度变化关系

2016年,张绍鹏对BDG的双折射频移及其温度和应变系数进行了研究^[33]。搭建了BDG传感实验装置,对双折射频移及其温度和应变系数进行了测量。实验发现当Probe脉冲宽度较窄时能够实现更高分辨率的测量。如图10和图11分别是双折射频移在不同应变、不同温度下的变化。图10中当施加应变时,测得的双折射频移应变系数为-0.15MHz/με。图11是在1m长保偏PCF进行温度和应变的处理。当温度控制在-40~10℃时,双折射频移系数随温度呈不均匀增加,在10~80℃内时,双折射频移系数变化较小可忽略,并用Sagance实验装置对这一现象进行了验证,这一结果与文献^[31]基本一致,证明了在高温区域双折射频

移具有温度不敏感特性。因此，可以在高温下实现对温度不敏感的应变传感。

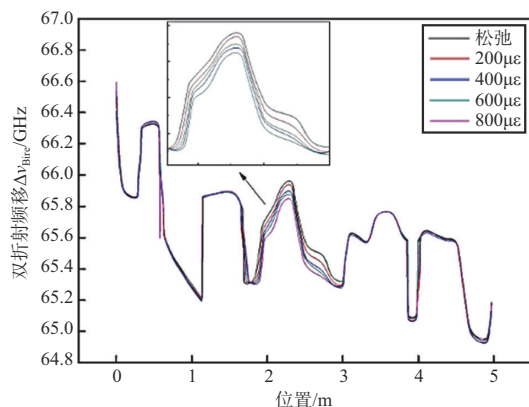


图 10 不同应变下双折射频移变化

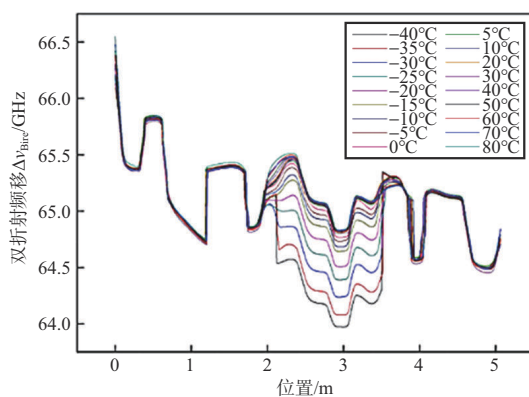


图 11 不同温度下双折射频移变化

2023 年，赵丽娟团队设计了一种纤芯区域由大、小两种沿 y 轴堆叠排布且关于 x 轴对称的椭圆空气孔包围而成的新型多层次结构 PCF。如图 12 所示是光子晶体光纤横截面示意图^[34]。在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 下模拟了沿 x 、 y 轴施加压力时，双折射系数随压力变化情况。如图 13 所示是在温度为 20°C 下施加压力两轴双折射频移的变化情况。

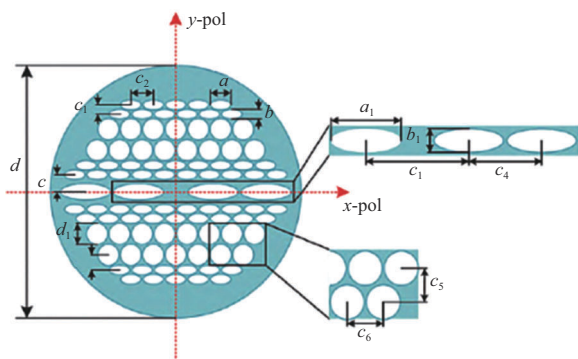
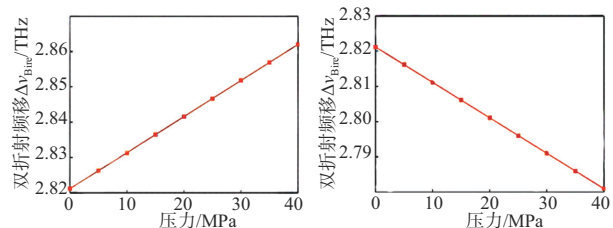


图 12 光子晶体光纤横截面示意图

由图 13 可知当温度不变时，双折射频移沿 x 轴随施加压力增加而线性减小，而沿 y 轴则随施加压力增加而线性增加。 x 轴和 y 轴的灵敏度分别为 -1.004GHz/MPa 和 1.021GHz/MPa ，当施加压力

每增加 10MPa 时，两轴双折射频移分别减小 10.04GHz 和增加 10.21GHz 。相比文献[35]中设计的“三明治”结构光子晶体光纤灵敏度提高了 328MHz/MPa 。此外，还从 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内对温度特性进行了分析，结果表明随着温度升高，光纤的温度双折射系数也在增大，但其变化量很小，即证明了双折射系数对温度不敏感，这与文献[27]和文献[29]几乎相同，从而避免了温度补偿，且可以实现温度和压力的双参量传感。



(a) 沿 y 轴施加压力双折射频移变化 (b) 沿 x 轴施加压力双折射频移变化

图 13 不同方向上压力对双折射频移影响

综上所述，采用 PCF 可以有效避免多参量同时测量时的温度补偿，这对 PCF 在 DOFS 中的应用具有重要意义。同时，通过设计 PCF 结构来增大相关测量系数或灵敏度可以有效提高测量精度，对于未来的发展可能是进一步提高 PCF 温度和应变系数以此来提高测量精度和进一步将这种新型的光纤结构实用化。

4 BDG 传感技术应用

4.1 多参量同时传感

当待测光纤所处环境温度和应变发生变化时会对光纤双折射产生影响，结合布里渊频移对温度和应变的测量，可以解调出温度和应变变化值，从而实现多参量的同时传感，具体公式如下^[36]

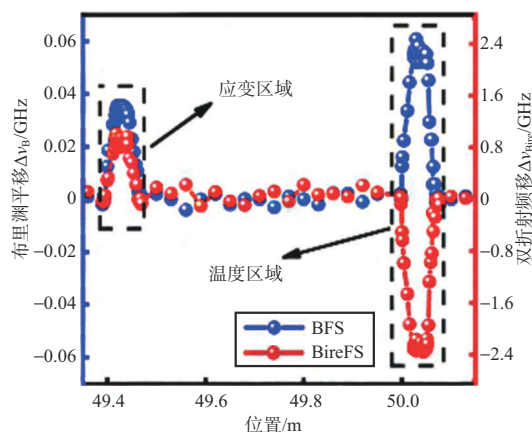
$$\begin{cases} \Delta\epsilon = \frac{C_v^T \Delta\nu_{\text{Bire}} - C_{\text{Bire}}^T \Delta\nu_B}{C_{\text{Bire}}^\epsilon C_v^T - C_{\text{Bire}}^T C_v^\epsilon} \\ \Delta T = \frac{C_v^\epsilon \Delta\nu_{\text{Bire}} - C_{\text{Bire}}^\epsilon \Delta\nu_B}{C_{\text{Bire}}^T C_v^\epsilon - C_{\text{Bire}}^\epsilon C_v^T} \end{cases} \quad (7)$$

式中， $\Delta\nu_B$ 是布里渊频移变化量； C_v^ϵ 和 C_v^T 分别是布里渊频移的应变系数和温度系数； $\Delta\epsilon$ 和 ΔT 是施加的应变与温度改变量； C_{Bire}^ϵ 和 C_{Bire}^T 分别是双折射频移的应变系数和温度系数。由于 C_{Bire}^T 是一个负值， C_v^ϵ 、 C_v^T 和 C_{Bire}^ϵ 都是正值， $|C_{\text{Bire}}^\epsilon C_v^T - C_{\text{Bire}}^T C_v^\epsilon|$ 较大，会保证温度和应变的测量精度。

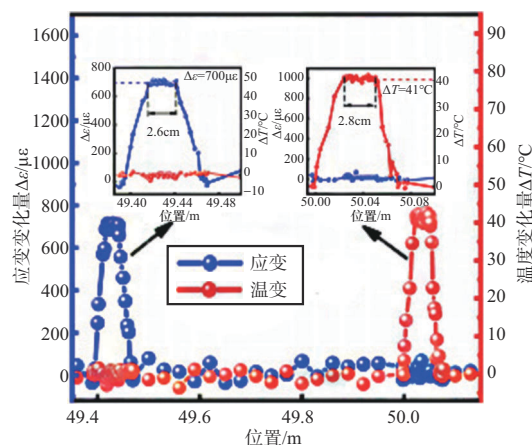
2010 年，Zou 等在 8m 长 PMF 中采用相关域分析技术，通过正弦频率调制两个 1550nm 的泵浦光，在 PMF 中任意位置产生了受激布里渊散射和动态光栅，通过测量动态光栅反射谱和布里渊增

益谱,实现了温度和应变的分布式测量。测得温度和应变的精度分别为 0.3°C 和 $12\mu\epsilon$ ^[37]。

2023年, Wang等^[38]提出了一种基于混沌BDG的无交叉敏感温度和应变高空间分辨率分布式传感技术。采用具有受控短相干长度的混沌激光器作为光源,通过布里渊频移和双折射频移实现温度和应变的非交叉灵敏度测量。通过拟合得到了布里渊频移和双折射频移的温度系数和应变系数分别为 $1.3\text{MHz}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.0495\text{MHz}/\mu\epsilon$, $-55.78\text{MHz}/^{\circ}\text{C}$ 和 $+1.24\text{MHz}/\mu\epsilon$ 。通过实验测得温度和应变得耦合结果如图14所示。对图14分析可知布里渊频移和双折射频移在应变区域有大约 35MHz 和 910MHz 的频移,在温度区域有 53MHz 和 2.28MHz 的频移。最终在 100m 长PMF中实现了 2.3cm 高空间分辨率的测量,以及温度和应变的测量精度分别为 0.3°C 和 $11\mu\epsilon$ 。



(a) 布里渊频移和双折射频移测量结果



(b) 温度和应变得耦合结果

图14 温度和应变得耦合测量结果

4.2 高精度传感

2013年, Hotate等^[39]采用同步检测方法,通过拟合后得到的双折射频移的温度系数和应变系数分别为 $-54.8\text{MHz}/^{\circ}\text{C}$ 和 $+1.069\text{MHz}/\mu\epsilon$,布里渊频移的温度系数和应变系数分别为 $-55.8134\text{MHz}/^{\circ}\text{C}$ 和 $+0.8995\text{MHz}/\mu\epsilon$ 。将各系数带入式(7)中,在

31m 长的PMF中使用BDG实现了温度和应变的完全分离测量,得到系统对温度和应变的标准误差分别为 0.0078°C 和 $\pm 3.1\mu\epsilon$ 。温度和应变的高精度测量范围分别为 $0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 和 $5\sim 12\mu\epsilon$ 。

2020年, 胡雪蒙^[40]通过探测单点式不同加压形式下在PMF中设计了基于BDG的横向压力测量实验。通过旋转PMF,改变光纤受力方向,如图15(a)和(b)所示分别是横向压力作用于快轴和慢轴时双折射变化情况。由图15(a)可知当横向压力作用于快轴时,双折射频移呈增加趋势,且拟合斜率为 $5.18\text{GHz}/\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$;由图15(b)可知当横向压力作用于慢轴时,双折射频移呈减小趋势,且拟合斜率为 $-6.14\text{GHz}/\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。即横向压力作用于快慢轴的灵敏度分别为 $5.18\text{GHz}/\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $-6.14\text{GHz}/\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

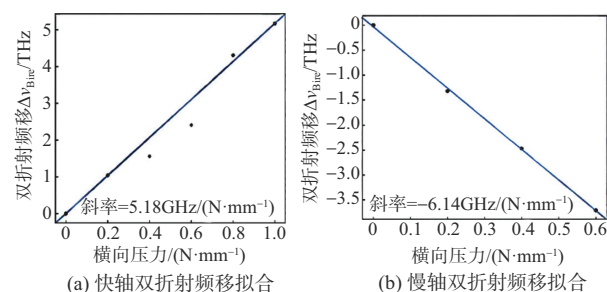


图15 快轴和慢轴双折射与横向压力关系

同年, Zhang等设计了一种基于BDG的聚酰亚胺(PI)涂层保偏PCF分布式盐度传感器^[41],进一步研究了温度依赖特性。实验中制作了 $5\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 四种不同涂层厚度的PI涂层传感器。当盐度变化时引起的膨胀和收缩会被转移到保偏PCF上进行双折射的调制,通过BDG的双折射曲线图可以测量与位置相关的盐度变化情况。测的 $5\mu\text{m}$ 厚度PI的盐度灵敏度为 $30.1\text{MHz}/(\text{mol}/\text{L})$, $8\mu\text{m}$ 的灵敏度为 $75.4\text{MHz}/(\text{mol}/\text{L})$ 。所提出的传感器对盐度变化显示出线性和可重复的响应,其测量不确定度小于 10MHz ,盐度精度为 $0.072\text{mol}/\text{L}$,空间分辨率为 15cm 。通过使用布里渊光时域分析测量温度引起的布里渊频移变化,可以对温度进行补偿。

4.3 高空间分辨率测量

BDG产生与探测是两个独立进行的过程,可以有效解决声子寿命限制问题。所以在进行空间分辨率测量时,传统方式单纯降低脉冲光宽度来提高空间分辨率时,会出现降低系统信噪比和展宽布里渊增益谱等问题,但采用BDG方式,可以有效提供空间分辨率,并保证较窄的布里渊增

益谱。

2014 年, Bergman 提出并演示了一种利用 PMF 中 BDG 的斜率进行快速分布式光时域传感的新技术^[42]。发现与产生 BDG 的泵浦光正交偏振的脉冲探针的反射率应变灵敏度依赖于泵浦和探针的失谐。然后找到一个最佳失谐点, 以此提供了最大应变灵敏度。在 16kHz 的采样率下, 在 5m 长 PMF 中实现了 4.2cm 空间分辨率的测量。2016 年, 他们又在 BDG 中采用数字脉冲压缩技术对提高光时域反射计的性能进行了探究^[43]。由于 BDG 应用中的编码一般需要对反射进行相干处理, 所以给直接检测的使用创造了条件。利用任意波形发生器产生了持续时间为 200ps、码元长度为 256 位 Probe, 并将 Probe 馈入高消光比的 MZM3 中, 由于每个序列都进行零填充, 会使任意时刻光纤内部只有一条序列。通过采用 256 位 Golay 互补单极性探测码将布里渊增益谱的测量中的信噪比提升了 8 倍, 得到 2cm 的空间分辨率。

2020 年 Jiang 等提出了基于增强型 BDG 的 PMF 的分布式双折射测量, 将测量范围扩展到了 3030m, 实现了 40cm 空间分辨率的测量^[44]。实验中使用波长分辨率为 0.1pm 的可调谐激光器读取由两个泵浦波产生的 BDG。由 AWG 通道 2 的输出驱动 EOM2 用于产生 4ns 的读取脉冲, 其上升沿/下降沿为 0.5ns, 对应于 40cm 的空间分辨率。读取脉冲的峰值功率被 EDFA2 放大到 0.3W。读取脉冲沿着慢轴通过 PBS 发射, 以读取 BDG。BDG 的反射波由 PD 检测, 在此之前, 使用反射率为 97% 的光纤布拉格光栅 (FBG2) 滤除泵浦 2 从快轴到慢轴的串扰。在实验中, 如图 16 (a) 所示, 在 FUT 的起点设置泵 1 脉冲和读取脉冲之间有 12.5ns 的时间延迟。泵浦 1 的时间轨迹和 FUT 结束时的读取脉冲如图 16 (b) 所示, 它们的时间延迟增加到 18.5ns, 变化幅度为 6ns, 这是由 x 、 y 轴之间的群折射率差引起的。此外, Pump1 脉冲的下降沿与探测脉冲的上升沿相遇, 确保在 FUT 端点处有最大 BDG 反射信号。

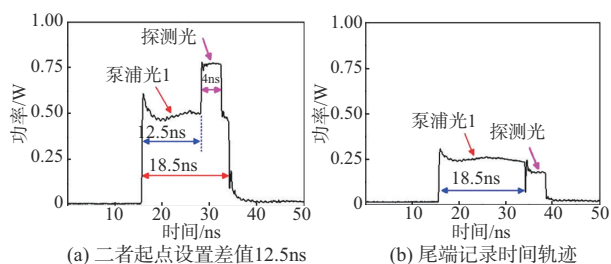


图 16 Pump1 和 Probe 在 FUT 关系

同年, Okawa 提出了一种基于强度调制相关域技术的布里渊动态光栅谱的分布式测量, 通过自由空间中可变延迟将测试光纤入口处的泵浦光和探测光之间的光程差调至几乎为零。实现了 BDG 反射谱来测量更高空间分辨率, 并成功在 100m 长熊猫型 PMF 中实现了 8cm 的空间分辨率测量^[45]。

5 结束语

本文对 BDG 的产生与探测原理进行了介绍, 并分析了 BDG 现阶段在混沌 BDG 和 PCF 中的研究。基于混沌的 BDG 可以实现动态光栅的单个、稳定维持, 克服了 BDG 受声子寿命限制和无法长时间稳定维持的问题, 同时也可以有效解决温度和应变交叉敏感问题时, 提高测量精度。对于混沌 BDG 存在一个关键问题就是扫描相关峰时时间开销大, 这会导致混沌 BDG 系统性能下降, 为此需要探索新的技术来加以解决。同时, 在实现高测量精度下如何将传感距离进一步提高也是当下面临的一个问题, 对这个问题可在现有基础上提高测试光纤的有效长度来检测测量精度和空间分辨率等指标。采用 PCF 作为测试光纤的 BDG 可实现多参量同时传感。同时, 通过设计不同 PCF 结构来提高温度、应变等测量系数可以有效提高测量精度。但改变后的 PCF 内部结构较为复杂, 对制作工艺也提出了更高要求。以及近些年来采用 PCF 对 BDG 进行研究还相对较少。未来的研究方向可以结合混沌 BDG 和 PCF 的各项特性进行组合设计, 在满足高精度测量、高空间分辨率的同时, 提高测试光纤长度。此外, BDG 在测量精度、多参量同时传感以及高空间分辨率等方面也有很大发展空间。

参考文献:

- [1] Song K Y. Distributed fiber sensors based on Brillouin dynamic gratings[C]//Sensors. Valencia, Spain:IEEE, 2014:154—157.
- [2] Song K Y, Zou W, He Z, et al. All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization maintaining fiber[J]. Optics Letters, 2008, 33(19):926—928.
- [3] Song K Y, Chin S, Primerov N, et al. Time-domain distributed sensor with 1 cm spatial resolution based on Brillouin dynamic gratings[C]//20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Edinburgh, United Kingdom:IEEE, 2009, 7503: 1133—1136.
- [4] Wang K, Ma Z, Zhang J, et al. High spatial resolution sensing of temperature and strain without cross sensitivity based on chaotic brillouin dynamic grating[J]. IEEE Sensor Journal, 2023, 23(9):9317—9322.

- [5] Winful H G. Chirped Brillouin dynamic gratings for storing and compressing light[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8):10039—10047.
- [6] Dong M, Winful H G. Area dependence of chirped-pulse stimulated Brillouin scattering: implications for stored light and dynamic gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(12):2514—2519.
- [7] Antman Y, Primerov N, Sancho J, et al. Localized and stationary dynamic gratings via stimulated Brillouin scattering with phase modulated pumps[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7):7807—7821.
- [8] Zhou D, Dong Y, Xu P, et al. Characterization of phase-shifted Brillouin dynamic gratings in a polarization maintaining fiber[C]//*Real-time Photonic Measurements, Data Management, and Processing II*. Beijing, China: IEEE, 2016:115—121.
- [9] Song Y, Li S, Zhang J, et al. The modeling of random Brillouin dynamic grating[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53:102034.
- [10] Zhang J Z, Li Z P, Wu Y, et al. Optimized chaotic Brillouin dynamic grating with filtered optical feedback[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):1—9.
- [11] 吴星亮. 混沌布里渊动态光栅的实验产生及特性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2021:11—14.
Wu Xingliang. Experimental generation and characteristic analysis of chaotic Brillouin dynamic grating[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021:11—14.
- [12] Song K Y. Operation of Brillouin dynamic grating in single-mode optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23):4686—4688.
- [13] Li S, Li M J, Vodhanel R S. All-optical Brillouin dynamic grating generation in few-mode optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22):4660—4662.
- [14] Kim Y H, Song K Y. Distributed analysis on the spatial mode structure in a PANDA-type few-mode Fiber by Brillouin Dynamic gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 29(2):612—619.
- [15] Hotate K, Zou W, Yamashita R K, et al. Distributed discrimination of strain and temperature based on Brillouin dynamic grating in an optical fiber[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3:332—344.
- [16] Zou W, He Z, Hotate K. Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature using a polarization-maintaining optical fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(8):526—528.
- [17] Dong Y, Liang C, Bao X. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using Brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(18):1364—1366.
- [18] Dong Y, Teng L, Tong P, et al. High-sensitivity distributed transverse load sensor with an elliptical-core fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21):5003—5006.
- [19] Dong Y. High-performance distributed Brillouin optical fiber sensing[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11:69—90.
- [20] 张智娟, 陈飞飞, 徐志钏, 等. 分布式光纤传感中布里渊动态光栅研究现状与发展趋势[J]. *半导体光电*, 2018, 39(04):455—461.
- [21] 朱婧, 涂晓波, 姚琼, 等. 布里渊动态光纤光栅及其在分布式传感中的应用[J]. *激光与光电子进展*, 2012, (49):100007:1—7.
- [22] Zhu Jing, Tu Xiaobo, Yao Qiong, et al. Brillouin dynamic grating and its applications in distributed sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, (49):100007:1—7.
- [23] Kim Y H, Song K Y. Optical time-domain reflectometry based on a Brillouin dynamic grating in an elliptical-core two-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15):3036—3039.
- [24] 董永康, 周登望, 滕雷, 等. 布里渊动态光栅原理及其在光纤传感中的应用[J]. *物理学报*, 2017, 66(07):237—249.
- [25] Dong Yongkang, Zhou Dengwang, Teng Lei, et al. Principle of Brillouin dynamic grating and its applications in optical fiber sensing[J]. *Special Topic*, 2017, 66(07):237—249.
- [26] 陈飞飞. 基于光纤布里渊动态光栅的温度测量方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2019:28—31.
- [27] Chen feifei. Research on temperature measurement method based on fiber brillouin dynamic grating[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019:28—31.
- [28] M Santagiustina, L Ursini. Dynamic Brillouin gratings permanently sustained by chaotic lasers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5):893—895.
- [29] M Santagiustina, L Ursini. Localized dynamic brillouin gratings permanently induced by chaotic signals[C]// *Signal Processing in Photonic Communications*, OSA Technical Digest (CD). Toronto, Canada: IEEE, 2011:12—15.
- [30] Zhang J, Li Z, Zhang M, et al. Characterization of Brillouin dynamic grating based on chaotic laser[J]. *Optics Communications*, 2017, 396:210—215.
- [31] Zhu Y, Wu X, Wang K, et al. Experimental observation of chaotic Brillouin dynamic grating[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(23):5814—5817.
- [32] Dong Y, Bao X, Chen L. Distributed temperature sensing based on birefringence effect on transient Brillouin grating in a polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(17):2590—2592.
- [33] R Pant, E Li, C G Poulton, et al. Observation of Brillouin dynamic grating in a photonic chip[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3):305—307.
- [34] Kim Y H, Song K Y. Characterization of nonlinear temperature dependence of Brillouin dynamic grating spectra in polarization-maintaining fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23):4922—4927.
- [35] Kim Y H, Hong Kwon, Jeongjun Kim, et al. Distributed measurement of hydrostatic pressure based on Brillouin dynamic grating in polarization maintaining fibers[J]. *Opt. Express*, 2016, 24:21399—21406.
- [36] 张绍鹏. 基于保偏光子晶体光纤中布里渊动态光栅的传感研

- 究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016:38—43.
- Zhang shaopeng. Brillouin dynamic grating in a polarization maintaining photonic crystal fiber[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology,2016:38—43.
- [34] 赵丽娟, 尹丽星, 徐志钮. 基于布里渊动态光栅的横向压力传感器设计[J]. 红外与激光工程,2023,52(11):256—264.
- Zhao lijuan, Yin xingli, Xu zhiniu. Design of transverse pressure sensor based on Brillouin dynamic grating[J]. Infrared and Laser Engineering,2023,52(11):256—264.
- [35] 赵丽娟, 梁若愚, 徐志钮. 一种新型光子晶体光纤的布里渊动态光栅传感[J]. 光学学报,2021,41(07):9—17.
- Zhao Lijuan, Liang Ruoyu, Xu Zhiniu. Brillouin dynamic grating sensor based on novel photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica,2021,41(07):9—17.
- [36] Song K Y, Yoon H J. Observation of narrowband intrinsic spectra of Brillouin dynamic gratings[J]. Optics Letters,2010,35(17):2958—2960.
- [37] Zou Weiwen, He Zuyuan, Kazuo Hotate. Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature using a polarization-maintaining optical fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2010,22(8):526—528.
- [38] Wang Kangbo, Ma Zhe, Zhang Jianzhong, et al. High spatial resolution sensing of temperature and strain without cross sensitivity based on chaotic brillouin dynamic grating[J]. IEEE Sensors Journal,2023,23(9):9317—9322.
- [39] Hotate K, Zou W, Yamashita R K, et al. Distributed discrimination of strain and temperature based on Brillouin dynamic grating in an optical fiber[J]. Photonic Sensors,2013,3:332—344.
- [40] 胡雪蒙. 分布式光纤压力传感器关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020:49—58.
- Hu Xuemeng. Research on key technologies of distributed optical fiber transverse load sensor[D]. Chengdu: School of Optoelectronic Science and Engineering,2020:49—58.
- [41] Zhang H, Teng L, Dong Y. Distributed salinity sensor with a polyimide-coated photonics crystal fiber based on Brillouin dynamic grating[J]. Journal of Lightwave Technology,2020,99:5219—5224.
- [42] Bergman A, Yaron L, Langer T, et al. Brillouin dynamic grating time-domain slope-assisted fast and distributed strain sensing[C]//23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. Santander, Spain,2014:997—1000.
- [43] Bergman A, Langer T, Tur M. High spatial resolution, low-noise Brillouin dynamic gratings reflectometry based on digital pulse compression[J]. Optics Letters,2016,41(15):3643—3646.
- [44] Jiang T, Zhou D, Ma Z, et al. Distributed birefringence measurement of a polarization-maintaining fiber with an extended range based on an enhanced Brillouin dynamic grating[J]. IEEE Photonics Journal,2020,12(4):1—7.
- [45] Okawa Y, Kendy Yamashita R, Kishi M, et al. Distributed measurement of Brillouin dynamic grating spectrum localized by an intensity-modulated correlation-domain technique[J]. Optics Express,2020,28(14):21310—21317.