

布里渊动态光栅原理及其在光纤传感中的应用

董永康 周登望 滕雷 姜桃飞 陈曦

Principle of Brillouin dynamic grating and its applications in optical fiber sensing

Dong Yong-Kang Zhou Deng-Wang Teng Lei Jiang Tao-Fei Chen Xi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 075201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.075201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.075201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于领结型多孔光纤的双芯太赫兹偏振分束器

Dual-core terahertz polarization splitter based on porous fibers with near-tie units

物理学报.2017, 66(2): 024209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024209>

通道调制型偏振成像系统的波段宽度限制判据

Imaging spectral bandwidth criterion equation of channeled modulated polarization imaging system

物理学报.2016, 65(7): 074210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074210>

等离子体密度对激光拉曼放大机理的影响

Plasma density effect on backward Raman laser amplification

物理学报.2015, 64(10): 105201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105201>

一种带葡萄柚空气孔的高双折射  $ZrF_4$ - $BaF_2$ - $LaF_3$ - $AlF_3$ - $NaF$  光子准晶光纤

Highly birefringent  $ZrF_4$ - $BaF_2$ - $LaF_3$ - $AlF_3$ - $NaF$  photonic quasi-crystal fiber with twin grapefruits holes

物理学报.2014, 63(14): 144202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.144202>

一种新型高双折射光子晶体光纤特性研究

Investigation of a new kind of high birefringence photonic crystal fiber

物理学报.2013, 62(8): 084215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084215>

专题: 光纤传感

## 布里渊动态光栅原理及其在光纤传感中的应用\*

董永康<sup>†</sup> 周登望 滕雷 姜桃飞 陈曦

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2016年10月9日收到; 2016年11月29日收到修改稿)

自从2007年布里渊动态光栅被首次提出用于实现光存储以来, 该技术得到了国际上的广泛关注和研究. 布里渊动态光栅本质上是由相干声波场激发的折射率光栅, 一般情况下两束抽运光(频率差等于光纤的布里渊频移)以相同的偏振态从光纤两端注入到光纤中, 通过受激布里渊散射效应激发出相干声波场, 即形成布里渊动态光栅. 光纤布里渊动态光栅因具有全光产生、参数灵活可控的优点, 已被广泛研究应用于光纤传感、光纤特性表征、光存储、全光信号处理、微波光子学和高精度光谱分析等. 本文分析布里渊动态光栅产生和探测原理, 重点探讨在高性能分布式光纤传感上的应用, 这些应用包括高灵敏度温度和应变分布式传感、温度和应变同时解调、分布式横向压力传感、分布式静压力(气压或液压)传感、高空间分辨率分布式传感和高精度光谱分析.

**关键词:** 受激布里渊散射, 布里渊动态光栅, 光纤传感**PACS:** 52.38.Bv, 42.79.Dj, 07.07.Df**DOI:** 10.7498/aps.66.075201

## 1 引言

分布式布里渊光纤传感最早于20世纪80年代末期提出, 这种技术提出的最初目的是发展一种新型的光时域反射计用于测量光纤的损耗<sup>[1]</sup>. 很快人们发现它可以用于传感, 因为布里渊散射对温度和应变都很敏感<sup>[2-4]</sup>. 在传感方案上, 主要包括布里渊光时域分析(Brillouin optical time-domain analysis, BOTDA)和布里渊光时域反射<sup>[5,6]</sup>, 布里渊光相关域分析和布里渊光相关域反射<sup>[7,8]</sup>. 相关域布里渊传感技术的主要优势是具有高达1 mm的空间分辨率, 但是由于是逐点测量导致存在测量时间较长和测量距离较短的问题. 时域布里渊传感技术近年来发展迅速, 尤其是BOTDA技术在空间分辨率、测量距离和测量时间上都有较大的进步, 目前空间分辨率可以达到2 cm<sup>[9]</sup>, 测量距离达到150 km<sup>[10]</sup>, 并且测量时间大为减小, 可以实

现kHz量级的动态测量<sup>[11]</sup>. 这些技术的进步大幅拓展了BOTDA的应用领域, 使其可以应用于石油天然气管道和存储罐的漏油和变形监测, 海底或陆地高压电缆的温度和应变监测, 地质灾害的分布式监测, 桥梁、大坝和隧道等大型建筑物的结构健康监测, 飞行器和航天器的飞行状态监测以及火灾报警等.

但是, 传统的分布式布里渊光纤传感仍然有些局限, 比如测量的物理量仅限于温度和应变, 而且测量的精度限制在1 °C或20  $\mu\epsilon$ . 近年来, 新型的布里渊动态光栅(Brillouin dynamic grating, BDG)技术引起了人们的极大兴趣, 可以实现更高精度和多参量的分布式光纤传感. 2007年, 美国罗切斯特大学Boyd等<sup>[12]</sup>在《Science》上撰文首次提出采用BDG实现光存储, 该方法的思想是把光信号存储到声波中(即布里渊动态光栅), 然后通过读取光脉冲再把声波信号还原成光信号, 从而实现了光信号的存储. 2012年, 瑞士联邦工学院的Thevenaz课

\* 国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2013YQ040815)、国家自然科学基金(批准号: 61575052, 61308004)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2014AA110401)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [aldendong@gmail.com](mailto:aldendong@gmail.com)

题组 [13] 提出了基于BDG的可调谐、可重构的微波光子滤波器, 滤波器的中心频率和带宽均可以通过改变BDG的参数来调谐; 2013年, 该课题组又提出了基于BDG的全光信号处理, 成功地直接在光域上实现了信号的微分、积分和时间反演 [14]. 在分布式光纤传感应用方面, 2009年, 日本东京大学Hotate等 [15,16] 提出基于BDG的分布式温度和应变光纤传感, 该方法通过BDG测量高双折射保偏光纤中的双折射的变化实现温度和应变测量, 而且测量精度比传统的布里渊频移法高一个量级以上; 结合BDG和布里渊频移两种方法可以实现基于保偏光纤的温度和应变双参数同时测量技术 [15,17]. 2013年, 我们提出了基于BDG实现长距离保偏光纤双折射分布式测量方案, 并提出把该方法应用于高精度光纤陀螺环的检测 [18,19]; 2014年, 我们实现了基于BDG的超高分辨光谱分析的概念性验证实验, 实验上获得了0.5 MHz (4 fm) 的光谱分辨率, 可用于高精度光纤传感 [20]; 在2015年和2016年, 我们分别提出了基于BDG的分布式横向压力和分

布式气压传感 [21,22].

本文从理论上探讨布里渊动态光栅产生和探测原理, 并综述近些年该技术在高性能分布式光纤传感方面应用的研究进展.

## 2 理论分析

BDG本质上是由相干声波场激发的折射率光栅, 如图1所示, 一般情况下两束抽运光(抽运光1和抽运光2, 频率差等于布里渊频移)以相同的偏振态( $x$ -pol.)从光纤两端注入到光纤中, 通过受激布里渊散射效应激发出相干声波场, 即形成BDG; 同时, 探测光以正交偏振态( $y$ -pol.)注入到光纤中, 当探测光与抽运光1的频率差(正比于光纤的双折射)满足相位匹配条件时, 就会被BDG反射形成反射光. 图1还给出了四束光波的频率关系, 由于BDG是和高频的抽运光1同方向移动的光栅, 反射光和探测光之间会有一个多普勒频移, 数值上等于布里渊频移.

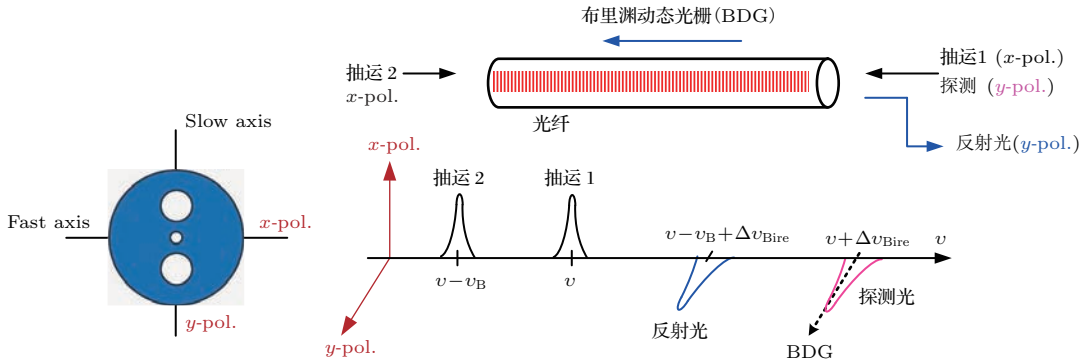


图1 布里渊动态光栅的激发和探测

Fig. 1. The excitation and detection of Brillouin dynamic grating.

考虑到慢包络幅度近似, 我们可以用由四束光波和一个声波场组成的耦合波方程组来描述BDG的激发和探测过程 [23]:

$$\left(-\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n_x}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_1 = ig_0 \rho E_2 - \frac{\alpha}{2} E_1, \quad (1a)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n_x}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_2 = ig_0 \rho^* E_1 - \frac{\alpha}{2} E_2, \quad (1b)$$

$$\left(-\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n_y}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_3 = ig_0 \rho^* E_4 e^{i\Delta k z} - \frac{\alpha}{2} E_3, \quad (1c)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n_y}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_4 = ig_0 \rho E_3 e^{-i\Delta k z} - \frac{\alpha}{2} E_4, \quad (1d)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\Gamma_B}{2}\right) \rho = ig_a \left(E_1 E_2^* + E_3^* E_4 e^{i\Delta k z}\right), \quad (1e)$$

其中,  $E_j (j = 1 : 4)$  是光波的电场强度;  $\rho$  为声波场强度;  $n_x$  和  $n_y$  分别为光纤慢轴和快轴的折射率;  $g_0$  为光波场间的耦合系数;  $g_a$  为声光耦合系数;  $g_B = 4g_0 g_a / \Gamma_B$  光纤的布里渊增益因子;  $\alpha$  为光纤的吸收系数;  $\Delta k$  为四束光波的相位失谐量.

对于由连续抽运光产生的稳态均匀型BDG, 我们可以通过简化模型获得BDG反射光  $E_4$  的解析解. 忽略抽运抽空作用, 抽运光  $E_1$  和  $E_2$  可以认为是常数, 其他光波沿光纤的衰减项和时间的求导

项可以忽略, 则方程组 (1) 可以简化为:

$$\frac{\partial}{\partial z} E_3 = -ig_0 \rho^* E_4 e^{i\Delta k z}, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} E_4 = ig_0 \rho E_3 e^{-i\Delta k z}, \quad (2b)$$

$$\frac{\Gamma_B}{2} \rho = ig_a E_1 E_2^*. \quad (2c)$$

求解方程组 (2) 可得:

$$E_3(z) = E_3(L) \cdot \frac{2g \cosh(gz) - i\Delta k \sinh(gz)}{2g \cosh(gL) - i\Delta k \sinh(gL)} \times e^{-i\Delta k(z-L)/2}, \quad (3a)$$

$$E_4(z) = E_3(L) \cdot \frac{2K_2 \sinh(gz)}{2g \cosh(gL) - i\Delta k \sinh(gL)} \times e^{-i\Delta k(z+L)/2}. \quad (3b)$$

对于稳态 BDG, 它的反射率为

$$R = \frac{|E_4(L)|^2}{|E_3(L)|^2} = \frac{\sinh^2(gL)}{\cosh^2(gL) - \Delta k^2 / (4K_1 K_2)}. \quad (4)$$

首先, 我们对 BDG 反射谱的数值仿真结果和解析解进行对比分析, 采用保偏光纤作为 BDG 产生的介质, 具体仿真参数列于表 1.

表 1 仿真参数  
Table 1 Simulation parameters.

名称	符号	数值
Pump1	$P_1$	0.1 W
Pump2	$P_2$	0.1 W
Pump3	$P_3$	0.01 W
光纤长度	$L$	1.0/0.5 m
布里渊增益谱线宽	$\Gamma_B/2\pi$	30 MHz
布里渊增益系数	$g_B$	$2.5 \times 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{W}^{-1}$
声子寿命	$\tau_p$	5.3 ns
有效模场面积	$A_{\text{eff}}$	$50 \mu\text{m}^2$
慢轴 ( $x$ ) 折射率	$n_x$	1.4686
慢轴 ( $y$ ) 折射率	$n_y$	1.4683

BDG 归一化的反射谱如图 2(a) 所示, 黑色实线和方块点线分别对应长度 0.5 m BDG 反射谱的解析解和数值仿真结果, 蓝色实线和三角点线分别对应长度 1.0 m BDG 反射谱的解析解和数值仿真结果. 可以看出, 解析解和数值仿真结果相符合. BDG 反射谱半高全宽 (full-width at half-maximum, FWHM) 和长度之间的关系如图 2(b)

所示, 由解析方法所得数据 (蓝色方块, 对数坐标) 显示, 随着 BDG 长度从 0.01 m 增加到 1000 m, 其反射谱的线宽会从 10 GHz 量级逐渐减小到亚 MHz 量级.

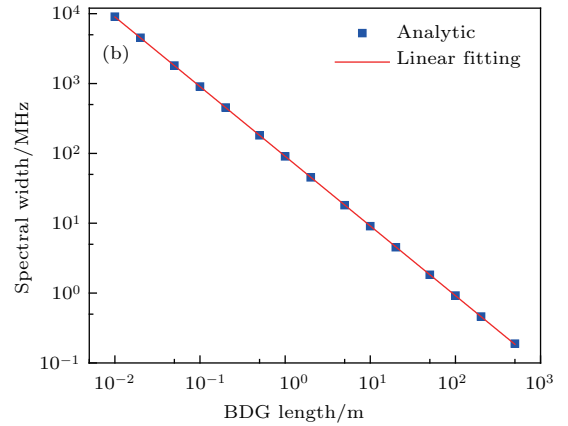
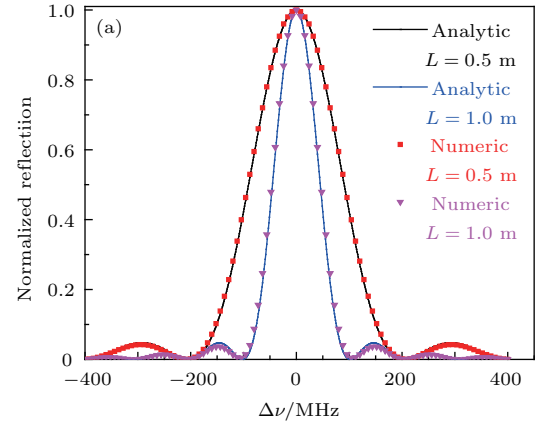


图 2 (a) BDG 的归一化反射谱; (b) 反射谱线宽与长度之间的关系

Fig. 2. (a) The normalized BDG spectra; (b) the spectral width FWHM as a function of length.

### 3 布里渊动态光栅在光纤传感中的应用

#### 3.1 保偏光纤双折射分布式测量

在保偏光纤中, 与纤芯平行的应力棒引起的附加应力使保偏光纤的两个主轴之间产生较大的双折射, 因而避免了在两个主轴中传播的偏振态垂直的两束线偏振光之间的耦合. 在 BDG 的激发和探测过程中, 首先把两束抽运光注入到保偏光纤的一个主轴里通过受激布里渊散射激发出 BDG; 然后, 探测光被注入到另一个主轴里探测该光栅. 其中, 当探测光与光栅的传播方向相同时, 探测光就会在光栅上发生相干斯托克斯散射, 反射光的频率比探测光低一个布里渊频移; 相反, 当探测光与光栅的

传播方向相反, 探测光就会在光栅上发生相干反斯托克斯散射, 反射光的频率比探测光高一个布里渊频移. 相干斯托克斯过程会加强已经产生的光栅, 而相干反斯托克斯过程会消耗已经产生的光栅.

当探测光和抽运光 1(这里假设抽运光 1 与探测光的传播方向一样) 满足相位匹配条件的时候, 探测光就会在光栅上得到最大的反射, 其中相位匹配条件为<sup>[18]</sup>

$$\Delta\nu_{\text{Bire}} = \Delta n\nu/n_g, \quad (5)$$

其中,  $\Delta\nu_{\text{Bire}}$  是双折射频移, 即获得最大反射率时探测光与抽运光 1 之间的频差,  $\Delta n$  是保偏光纤的相双折射,  $n_g$  是光纤的群折射率,  $\nu$  是探测光的频率. (5) 式表明双折射频移和保偏光纤双折射之间存在线性关系, 通过激发和探测 BDG 就可以测量双折射频移, 从而实现保偏光纤双折射的测量. 一般保偏光纤中的双折射频移在 40—90 GHz 之间, 这个值会随着光纤的种类不同而有所变化.

为了避免在激发 BDG 时发生抽运抽空效应, 从而实现长距离光纤的测量, 一般采用如图 3 所示的激发和探测方案<sup>[19]</sup>. 两束抽运光包括脉冲抽运光 1 和连续抽运光 2, 采用脉冲抽运光 1 可以有效减弱抽运抽空效应, 同时为了有效激发 BDG, 脉冲

宽度一般需要大于声子寿命 (~10 ns). 在脉冲抽运光 1 之后, 紧接着注入探测脉冲来读取光栅, 通过扫描探测光的频率就可以获得 BDG 的反射谱和双折射频移, 其中测量空间分辨率由探测光脉冲宽度决定.

图 4 是采用 2 ns 探测脉冲测量的两种典型 BDG 反射谱 (偏置了双折射频移, 即谱的中心位于零频率处), 2 ns 的脉冲对应了 20 cm 的空间分辨率. 图 4 (a) 对应了双折射均匀区域, 也就是说在 20 cm 范围内光纤双折射变化很小, 因此测量的结果与仿真符合得很好; 但是如果 20 cm 范围内双折射有较大的起伏, 就会导致 BDG 反射谱产生非均匀展宽, 典型结果如图 4 (b) 所示.

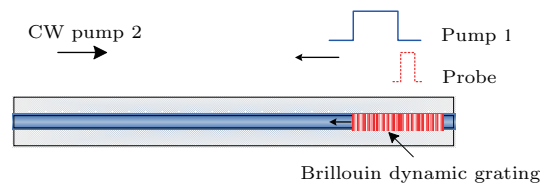


图 3 基于 BDG 的长距离保偏光纤双折射分布式测量方案

Fig. 3. Schematic diagram of excitation and readout of a BDG for distributed measurement of the birefringence of a long-range PMF.

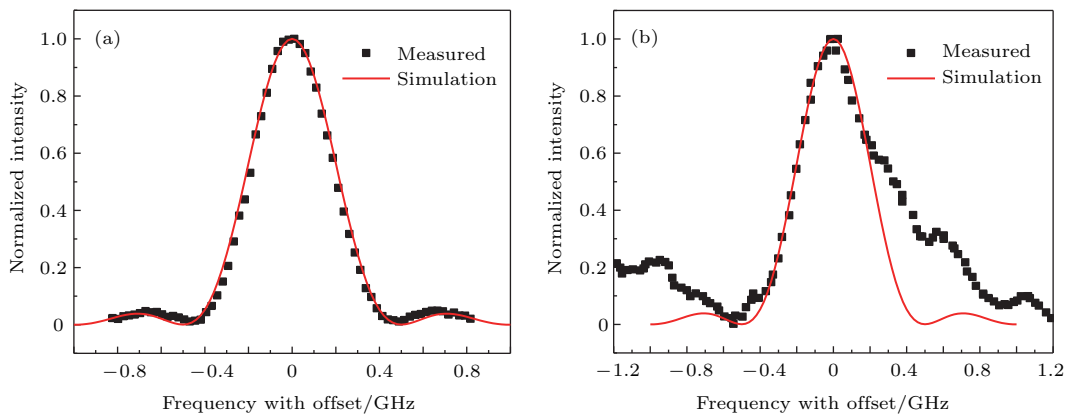


图 4 典型的 BDG 反射谱 (a) 均匀双折射区域; (b) 非均匀双折射区域; 探测光脉冲宽度 2 ns

Fig. 4. Typical measured BDG spectra of (a) a uniform fiber section; (b) a nonuniform fiber section, and simulations (solid curves). The duration of the probe pulse is 2 ns.

图 5 (a) 显示了一段 500 m 保偏光纤双折射分布式测量结果, 该光纤缠绕在直径为 15.6 cm (周长 49 cm) 的卷轴上. 从图中可以看出双折射沿光纤纵向呈现不均匀分布, 变化范围是  $3.6869—3.5772 \times 10^{-4}$ , 起伏达 3%. 这种双折射不均匀分

布有着多种因素, 可能包括光纤预制棒材料的不均匀, 光纤拉制过程不均匀受力, 光纤涂覆层的不均匀, 同时光纤在缠绕时不均匀纵向拉力和横向压力也会导致双折射的起伏, 从图 5 (b) 中可以很清楚地看到对应于卷轴周长 49 cm 的振荡.



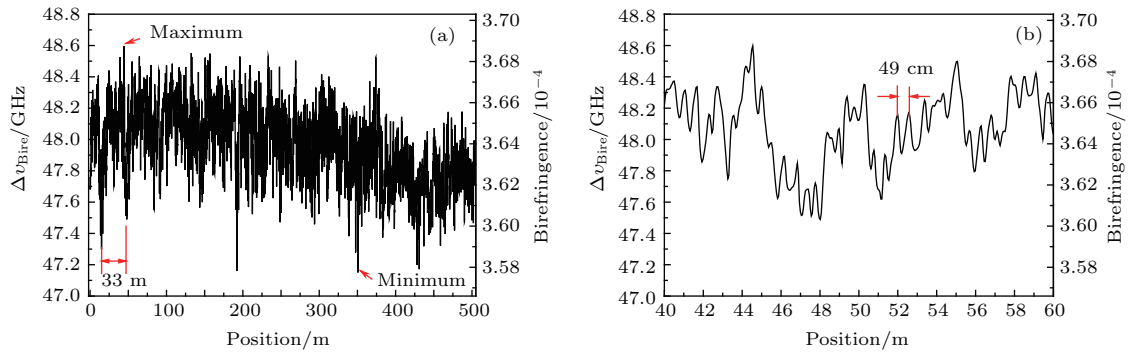


图5 (a) 500 m 保偏光纤双折射分布式测量结果; (b) 40—60 m 段的详细结果  
 Fig. 5. The measured birefringence over (a) the entire 500-m FUT; (b) the segment of 40–60 m.

### 3.2 高灵敏度温度和应变测量

研究表明, 外界的温度变化和对光纤轴向施加的应变都会导致光纤双折射的变化. 通过对保偏光纤中双折射频移的测量可以进行温度和应变的监测.

图6给出了一种熊猫型保偏光纤在不同温

度下BDG反射谱及其双折射频移随温度的变化关系<sup>[17]</sup>. 图6(a)中的BDG反射谱呈高斯型分布, FWHM谱宽约为640 MHz. 图6(b)中的双折射频移与温度的变化关系给出了温度系数为  $C_{\text{Bire}}^T = -54.38 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ . 由于温度的升高会使附加的应力得到释放, 减小了光纤的双折射, 从而得到一个负温度系数.

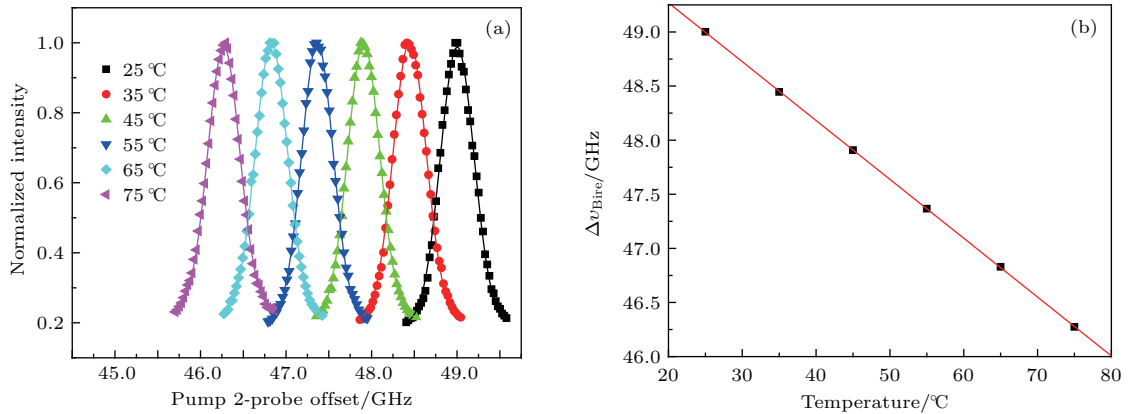


图6 (a) 不同温度下的布里渊光栅反射谱; (b) 双折射频移与温度的变化关系  
 Fig. 6. (a) Measured BDG spectra at different temperatures; (b) the dependence of BireFS on temperature.

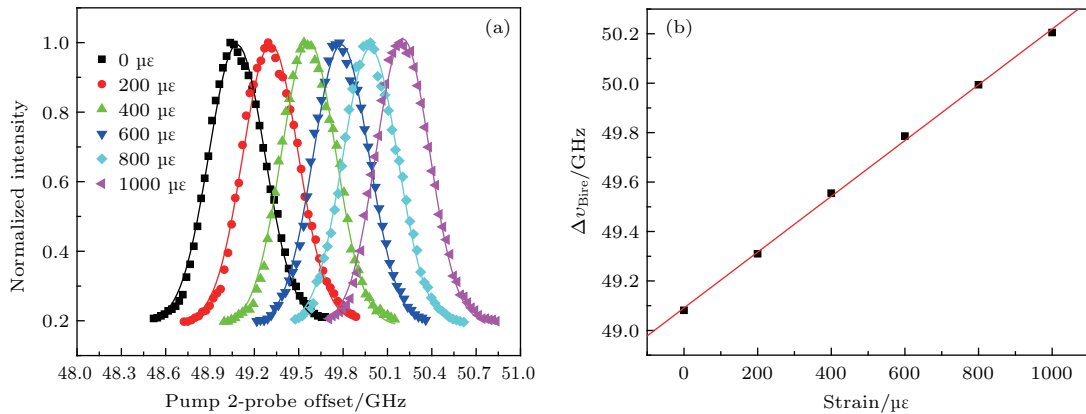


图7 (a) 不同应变下的布里渊光栅反射谱; (b) 双折射频移与应变的变化关系  
 Fig. 7. (a) Measured BDG spectra at different strains; (b) the dependence of BireFS on strain.

图7给出了这种熊猫型保偏光纤在不同应变下BDG反射谱及其双折射频移随应变的变化关系。图7(b)中的双折射频移与应变的变化关系表明双折射频移与应变也有很好的线性关系,其应变系数为  $C_{\text{Bire}}^{\epsilon} = 1.13 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ 。对光纤施加纵向的应力加强了应力棒的附加应力,增加了光纤的双折射,因而得到一个正应变系数。

一般单模光纤中的布里渊频移的温度系数和应变系数分别为  $C_{\text{B}}^T = 1.12 \text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$  和  $C_{\text{B}}^{\epsilon} = 0.0482 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ 。由此我们可以看出保偏光纤中的双折射频移的温度系数和应变系数分别是布里渊频移的50倍和20倍。因此,基于BDG测量双折射频移的温度和应变传感器具有比传统布里渊散射传感器更高的灵敏度。

### 3.3 温度和应变同时解调技术

对于传统的布里渊光纤传感器而言,温度和应变的测量会存在串扰的问题,即温度和应变都会导致布里渊频移的变化,因此无法准确知道待测的温度或应变。一般情况下,需要再引入一个独立的可测量的量进行温度和应变的解调从而实现温度和应变的同时测量。以前文献中曾报道过用布里渊散射功率作为第二个测量的量进行温度和应变的解调,但是测量精度被大幅降低。在这里我们看到,保偏光纤的双折射频移可以作为第二个测量量来实现温度和应变的同时解调。而且,由于双折射频移具有负温度系数,因而可以实现高精度的温度和应变解调<sup>[17]</sup>。

在受外界的温度和应变变化条件下,布里渊频移和双折射频移  $\Delta\nu_{\text{B}}$  和  $\Delta\nu_{\text{Bire}}$  可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta\nu_{\text{B}} &= C_{\text{B}}^{\epsilon}\Delta\epsilon + C_{\text{B}}^T\Delta T, \\ \Delta\nu_{\text{Bire}} &= C_{\text{Bire}}^{\epsilon}\Delta\epsilon + C_{\text{Bire}}^T\Delta T, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $\Delta\epsilon$  和  $\Delta T$  是施加的应变和温度改变量,  $C_{\text{B}}^{\epsilon}$  和  $C_{\text{B}}^T$  分别是布里渊频移的应变系数和温度系数,  $C_{\text{Bire}}^{\epsilon}$  和  $C_{\text{Bire}}^T$  分别是双折射频移的应变系数和温度系数。对方程(6)进行求解可以唯一地得到温度和应变,即

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} &= \frac{1}{C_{\text{B}}^{\epsilon}C_{\text{Bire}}^T - C_{\text{B}}^TC_{\text{Bire}}^{\epsilon}} \begin{bmatrix} C_{\text{Bire}}^T & -C_{\text{B}}^T \\ -C_{\text{Bire}}^{\epsilon} & C_{\text{B}}^{\epsilon} \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} \Delta\nu_{\text{B}} \\ \Delta\nu_{\text{Bire}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $C_{\text{B}}^{\epsilon}$ ,  $C_{\text{B}}^T$  和  $C_{\text{Bire}}^{\epsilon}$  均为正值,而  $C_{\text{Bire}}^T$  为负值,因此  $C_{\text{B}}^{\epsilon}C_{\text{Bire}}^T - C_{\text{B}}^TC_{\text{Bire}}^{\epsilon}$  具有较大的值,从而保证了较高的温度和应变的解调精度。

6 m 熊猫型保偏光纤的布局如图8所示,其中有1 m的应变段、1 m的加热段以及它们中间的在室温及松弛状态下的1 m光纤。应变段中施加的应变为  $670 \mu\epsilon$ , 加热段的温度比室温高  $30^{\circ}\text{C}$ 。

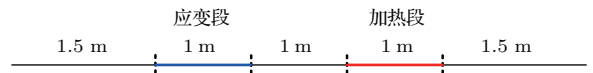


图8 传感光纤布局

Fig. 8. Layout of the 6-m sensing fiber.

实验上测到的布里渊频移和双折射频移如图9(a)所示,我们可以看到基于布里渊频移和双折射频移方法均具有20 cm的空间分辨率。利用所测的布里渊频移,双折射频移以及它们的温度和应变系数,我们可以同时得到光纤上的温度和应变分布,其结果如图9(b)所示。很清楚地可以看出传感光纤上的温度和应变分布被互相解调出来,其中只有在有应变和无应变、加热和室温的交界处存在一些误差,这些误差是由于系统的空间分辨率限制产生的。

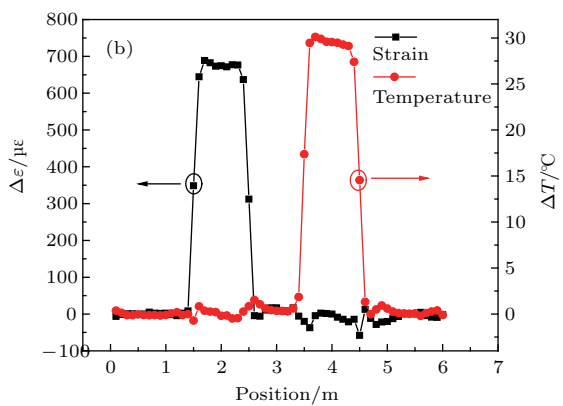
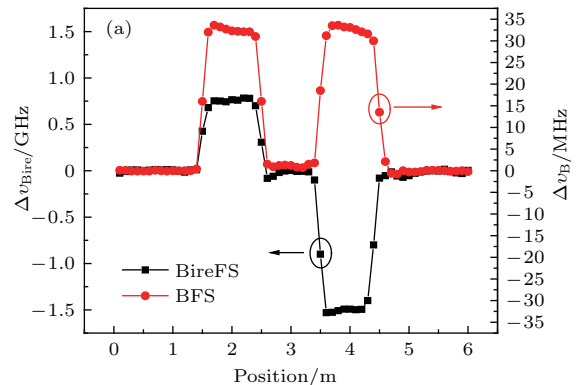


图9 (a) 测量的布里渊频移和双折射频移; (b) 解调后的温度和应变分布

Fig. 9. (a) Measured  $\Delta\nu_{\text{B}}$  and  $\Delta\nu_{\text{Bire}}$ ; (b) calculated temperature and strain.

### 3.4 分布式横向压力传感

土木结构和大型机械在建造和使用过程中难免会受到自重和外部撞击产生的横向压力的作用, 因此, 实际生产中需要一种可靠、高效的横向压力传感器. 传统的光纤横向压力传感器主要是基于光纤光栅 (FBG) 技术和干涉仪技术, 这类横向压力传感器制作简单, 具有很高的灵敏度. 但是现有的光纤横向压力传感器属于点式传感器, 不能进行分布式测量, 不能同时获得测试空间内的全部信息.

当传感光纤受到横向压力作用时, 由于弹光效

应, 光纤的双折射会发生变化. 利用布里渊动态光栅技术测量光纤双折射的变化可以实现对横向压力的测量. 图 10 所示为我们自行设计的横向压力施加平台. 实验光纤包括传感光纤和支撑光纤, 两根光纤平行放置, 其上覆盖一个 20 cm 长的玻璃板, 在玻璃板上放置不同质量的砝码来施加横向压力. 传感光纤和支撑光纤是同一种型号, 砝码放置在两根光纤中间以保证它们均匀受力. 传感光纤的两端固定在可转动的基座上, 通过旋转基座来调整施加的横向压力与光纤主轴之间的相对方向 [21].

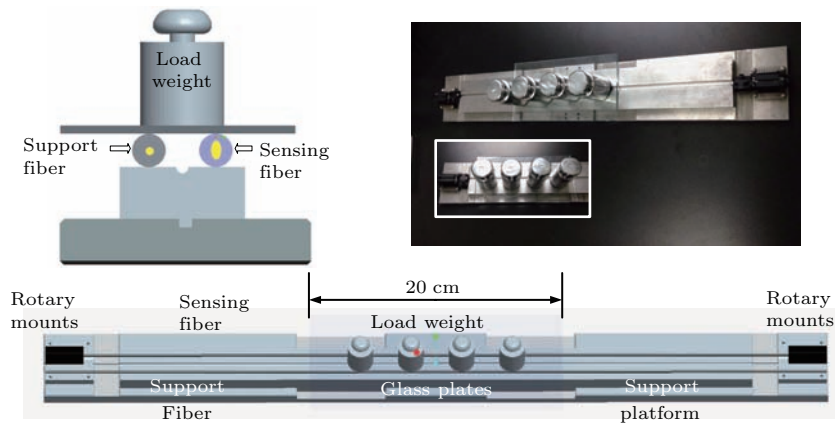


图 10 横向压力施加装置

Fig. 10. Setup with load weight applied.

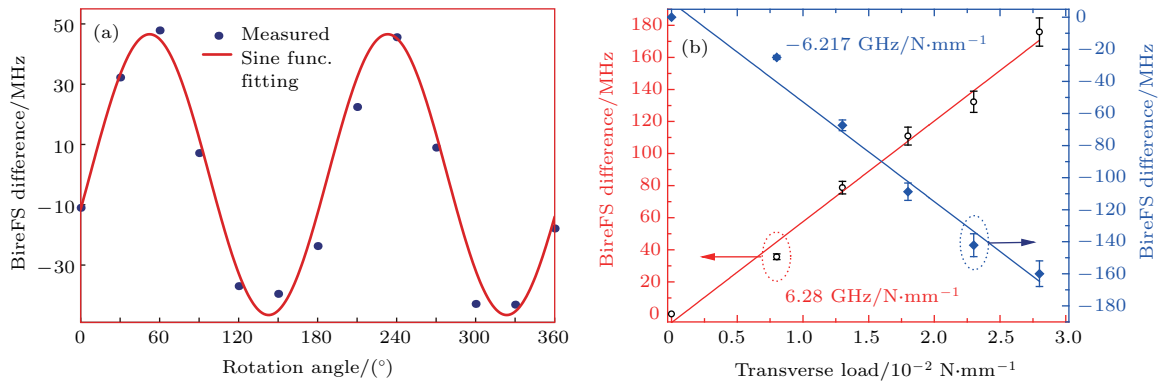


图 11 双折射频移与横向压力的关系 (a) 施加不同压力方向; (b) 施加不同压力值

Fig. 11. Relations between BireFS and transverse load: (a) Various load direction; (b) various load weight.

图 11 为双折射频移变化量与不同横向压力之间的关系. 通过旋转基座可以调整施加的横向压力与光纤主轴之间的相对方向, 测量结果如图 11 (a) 所示, 从图中可以看出双折射频移变化量与压力方向呈正弦变化关系, 当压力方向与光纤慢轴方向一致时 (即图中的  $50^\circ$  或  $230^\circ$ ), 双折射增加量最大; 当压力方向与光纤快轴方向一致时 (即图中的  $140^\circ$

或  $320^\circ$ ), 双折射减小量最大. 图 11 (b) 所示为当压力方向与光纤慢轴 (或快轴) 方向一致时, 双折射频移变化量与不同横向压力值之间的线性关系, 当沿光纤快轴方向时施加横向压力时, 横向压力灵敏度为  $-6.217 \text{ GHz/N}\cdot\text{mm}^{-1}$ , 而沿光纤慢轴方向施加压力是, 灵敏度为  $6.28 \text{ GHz/N}\cdot\text{mm}^{-1}$ . 结合双折射频移最小测量标准差 5 MHz, 可以得到最大测量精



度为  $0.8 \times 10^{-3} \text{ N/mm}$ .

图 12 为横向压力分布测量结果, 其中绿线和红线分别表示施加压力前后的双折射测量结果, 通过对这两个结果做差处理就可以得到由压力引起的双折射变化, 从而解调出的分布式横向压力, 如蓝线所示. 在 1 m 处附近有一段 20 cm 的光纤沿着慢轴方向施加一个压力, 在 3 m 处附近有一段 20 cm 的光纤沿着快轴方向施加一个压力, 两个压力均为  $2.3 \times 10^{-2} \text{ N/mm}$ . 从图中可以清楚地看到施加横向压力的位置、大小和方向.

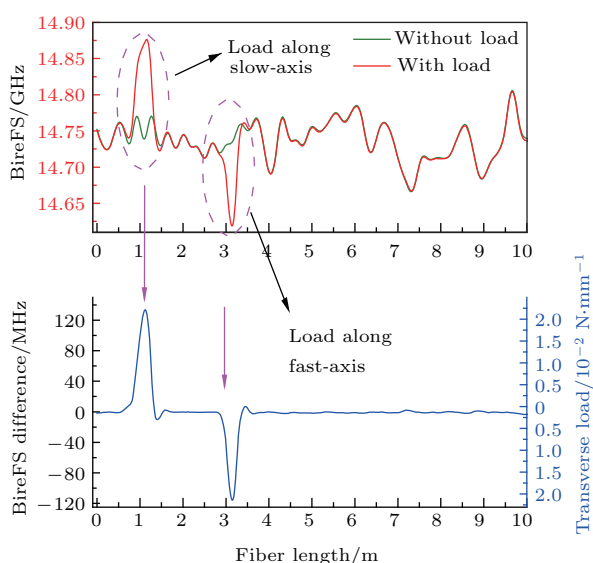


图 12 横向压力分布测量结果, 其中绿线和红线分别表示施加压力前后的双折射测量结果, 蓝线是解调出的分布式压力

Fig. 12. Distributed transverse load measurements, where the green line and red line represent the measured BireFS with and without loads, respectively, and the blue line represents the BireFS difference and transverse load.

### 3.5 分布式静压力传感

目前, 光纤静压力(气压或液压)传感器主要包括基于FBG技术、法布里珀罗腔(FP)技术或光纤干涉仪技术等方案, 但是主要问题是无法实现分布式测量. 分布式气压传感有着非常重要的应用, 尤其是在油井的监测应用, 井下环境比较恶劣, 温度可达几百摄氏度, 压力可达 100 MPa, 克服温度的影响精确测量分布式压力对于提高采油效率有着重要的意义. 对于高双折射的保偏光纤, 在压力的作用下, 光纤双折射会发生改变, 通过BDG技术测量受压区域双折射的变化, 可以进而对气压变化进行探测.

在进行气压传感实验时, 我们采用的测试光纤为如图 13 所示的保偏光子晶体光纤 (polarization-maintaining photonics crystal fiber, PM-PCF) [22]. 这种光纤具有多孔结构, 更容易受到气压影响而产生形变, 从而引起双折射发生较大的改变; 它由纯二氧化硅材料制成, 相比于传统的应力型保偏光纤(比如熊猫型和领结型)具有更低的双折射温度系数. 因此, 采用PM-PCF作为压力传感光纤, 一方面可以获得较高的压力灵敏度, 另一方面可以尽量减小温度对压力测量的影响. 图 13 所示为 4 m PM-PCF 光纤的布局, 其中有两段 20 cm 的加压段、一段 20 cm 的加热段, 其他部分处在室温和松弛状态. 利用图 13 (b) 中所示的高压气池对加压部分光纤施加不同的气压进行气压传感实验, 在加热段改变温度讨论温度对测试的影响.

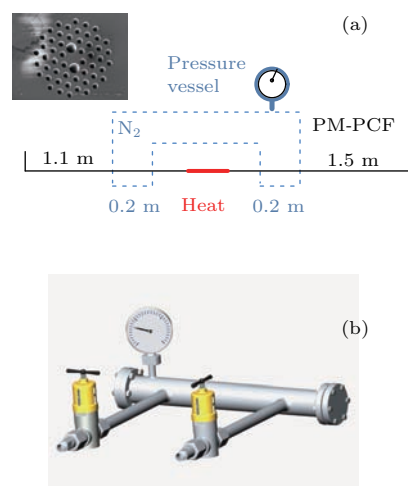


图 13 (a) 气压实验传感光纤布局; (b) 自行设计的高压气池

Fig. 13. (a) the layout of the FUT; (b) the self-designed pressure vessel.

图 14 所示为 PM-PCF 光纤双折射频移与温度的变化关系, 其中温度变化范围是  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ — $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . 从图中可以看出, 在  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  的变温条件下, 双折射频移仅改变  $\sim 180 \text{ MHz}$ , 对比而言, 传统的熊猫型光纤  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度变化就会导致双折射频移改变超过  $200 \text{ MHz}$  [17]. PM-PCF 光纤的双折射对温度不敏感特性可以有效减小在测量过程中温度变化对气压测量带来的误差. 图 15 给出了双折射频移与气压的变化曲线(气压变化范围为  $0$ — $1.1 \text{ MPa}$ ), 结果表明双折射频移与气压有着很好的线性关系, 拟合的线性系数为  $199 \text{ MHz/MPa}$ . 一般通过BDG反射谱测量的双折射频移误差大约为  $5 \text{ MHz}$ , 因此气压的测量精度可达  $0.02 \text{ MPa}$ . 然而, 结合图 14 的

数据可以看出, 尽管PM-PCF 光纤的双折射对温度不敏感, 但是 110 °C 的变温也会导致大约 1 MPa 的测量误差, 因此为了精确测量压力就必须进行温度补偿.

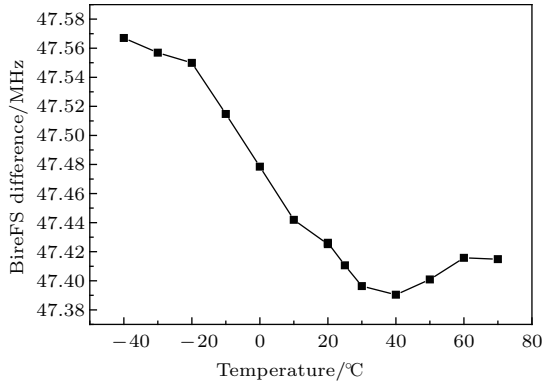


图 14 不同温度下的双折射频移变化曲线

Fig. 14. Measured BireFS variations versus different temperatures.

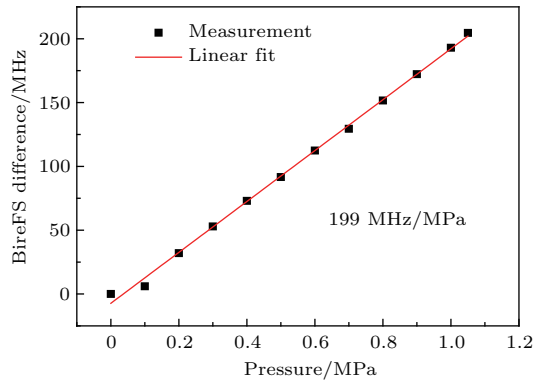


图 15 双折射频移随气压的变化曲线

Fig. 15. BireFS differences versus different hydrostatic pressure.

下式忽略了纵向应变, 仅考虑了温度和气压对布里渊频移和双折射频移的影响:

$$\begin{aligned} \Delta\nu_B &= C_B^T \Delta T + \Delta\nu_B^P, \\ \Delta\nu_{\text{Bire}} &= \Delta\nu_{\text{Bire}}^T + C_{\text{Bire}}^P \Delta P, \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\Delta\nu_B^P$  是气压引起的布里渊频移的改变, 由于布里渊散射对气压不敏感, 该项可以忽略不计, 因此可以通过BOTDA 获得光纤的温度分布, 然后补偿温度引起的双折射频移  $\Delta\nu_{\text{Bire}}^T$ , 就可以准确获得气压分布.

图 16 所示为基于温度补偿的分布式气压传感测量结果. 将两段 20 cm 长的测试光纤放置在气池中, 气压为 1.05 MPa, 温度为 25 °C; 同时将中间 20 cm 光纤放在高低温箱, 温度设定为 -20 °C, 不

施加额外气压. 图 16 (a) 是分布式双折射测量结果, 从中可以清楚看出温度造成的串扰; 图 16 (b) 是分布式布里渊频移测量结果, 表明气压对布里渊频移没有影响, 通过这个结果可以获得分布式温度信息; 通过温度补偿后就可以得到分布式气压信息, 如图 16 (c) 所示.

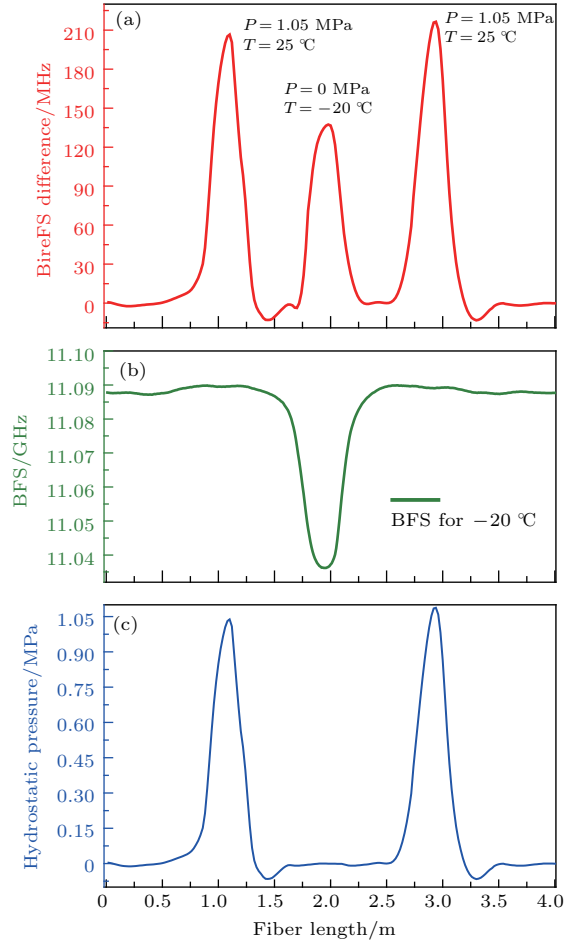


图 16 基于温度补偿的分布式气压传感 (a) 分布式双折射; (b) 分布式布里渊频移 (或温度); (c) 分布式气压

Fig. 16. Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensing: (a) The measured BireFS of the FUT; (b) the measured BFS of the FUT; (c) the measured hydrostatic pressure after compensating the temperature cross-talk.

### 3.6 高空间分辨率分布式传感

对于时域布里渊光纤传感, 空间分辨率是由抽运脉冲宽度决定的, 比如 10 ns 的抽运脉冲对应 1 m 的空间分辨率. 通过简单地减小抽运脉冲宽度来提高空间分辨率将会导致布里渊增益谱展宽和信号幅度下降的问题, 尤其是当抽运脉冲宽度小于声子寿命时 (10 ns), 这个问题变得更加严重. 差分脉冲对技术可以有效提高空间分辨率, 该方法采用

两个脉宽不同的抽运脉冲, 对测量的布里渊信号做差分, 通过减小脉宽差来提高空间分辨率, 然而由于差分过程会导致信噪比劣化, 使该技术目前获得最好的空间分辨率为 2 cm [9].

在传统的时域布里渊光纤传感结构中, 决定空间分辨率的抽运脉冲同时参与激发声波场, 这是限制空间分辨率提高的根本因素. 然而, 由于 BDG 的产生和探测是两个独立的过程, 这就使得可以通过减小探测脉冲宽度来提高空间分辨率, 同时可以保证较窄的布里渊增益谱. 具体方案如图 17 所示, 两束连续抽运光从光纤的两端注入到保偏光纤的  $x$ -plo. 轴里, 当两束光的频率差等于布里渊频移时, 就会在光纤里激发出 BDG, 然后在光纤的  $y$ -plo. 轴里注入一个窄探测脉冲, 调节探测光和抽运光 1 之间的频率差至双折射频移, 就可以在 BDG 上获得一个连续的反射信号, 通过扫描两束连续抽运光的频率差就可以获得光纤的布里渊增益谱, 该方案中空间分辨率是由探测脉冲宽度决定, 同时由于使用连续抽运光布里渊增益谱的宽度可以保持在几十 MHz.

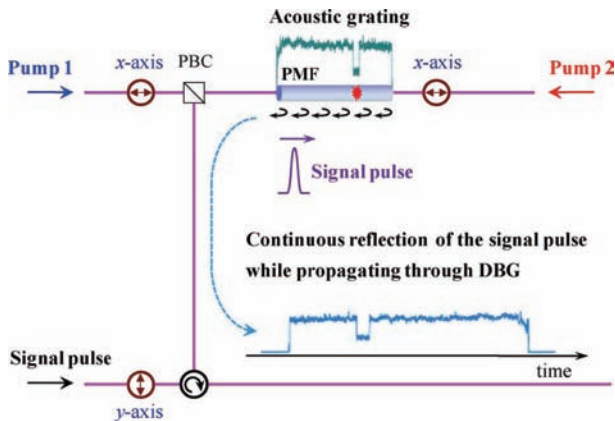


图 17 基于 BDG 的高空间分辨率布里渊传感方案示意图

Fig. 17. Schematic illustration of a high-spatial-resolution distributed Brillouin sensor based on BDG.

在文献 [24] 中, 采用 55 ps 的探测脉冲, 对应于 5.5 mm 的空间分辨率. 图 18 给出了传感光纤布设图和测量结果. 在 2 cm 位置处是光纤熔节点, 由于采用热缩管保护在 22 mm 长光纤区域上产生一个负应变, 同时在 10 cm 处, 有一段 8 mm 长的光纤被加热到比室温高 30 °C 形成一个热点. 测试系统采样率为 40 GSa/s, 对应于 2.5 mm/点, 测量的光纤布里渊频移如图 18 所示. 测量结果清晰地表明该方法可以获得毫米级空间分辨率. 采用一只手的五

指对一段光纤加热, 图 19 显示了 BDG 对探测脉冲的反射信号曲线, 可以看出采用这个技术可以很清晰地看到五指对光纤加热的效果.

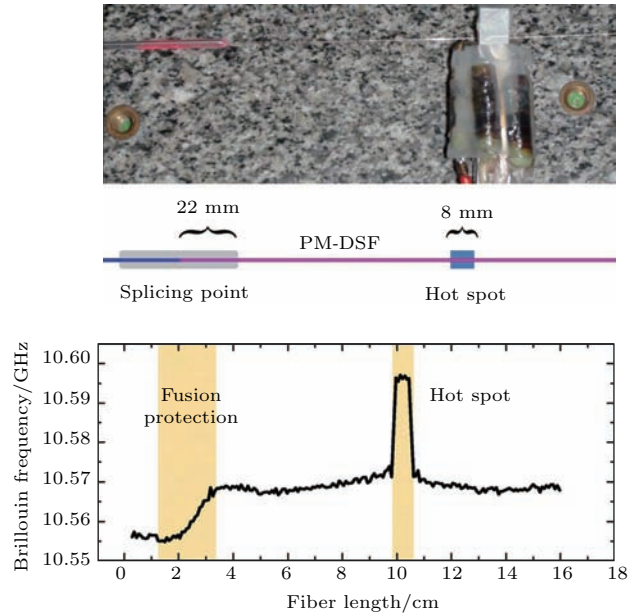


图 18 传感光纤布设和测量结果.

Fig. 18. Layout of the sensing fiber and the measured results.

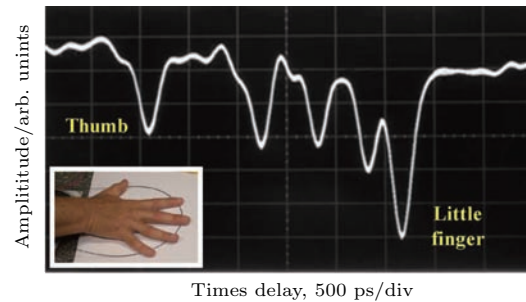


图 19 测量五指加热光纤结果, 图中是 BDG 对探测脉冲的反射时域曲线

Fig. 19. Temporal distribution of the reflected signal of the probe pulse along the sensing fiber when five fingers from one hand are placed on the fiber.

### 3.7 高精度光谱分析

很多高精度光纤传感需要高分辨率光谱仪, 然而, 以体光栅作为分光元件的光谱仪波长分辨率最高仅为几个 pm (1000 MHz), 且其分辨率受光栅刻痕密度及最大光束孔径限制无法进一步提高. 与体光栅光谱仪相比, 扫描法布里-珀罗干涉仪虽能提供较高分辨率, 但其自由光谱范围有限. 基于相干检测原理的光谱分析仪可以提供高达 5 MHz (40 fm) 的波长分辨率的光谱测量, 然而很难实现宽波段更高分辨率的光谱测量.

我们提出一种基于BDG的超高精度光谱分析技术. 之前的研究工作已经证实, 由于折射率的改变量比较小, 光纤中BDG特性与弱光栅条件下的布拉格光纤光栅相符合, 即BDG反射谱的FWHM谱宽与光栅长度成反比, 表达式如下<sup>[20]</sup>:

$$\Delta_{\text{BDG}} = 0.443c/nL, \quad (9)$$

其中  $c$  为真空中光束传播速度;  $n$  为光纤群折射率;  $L$  为光栅长度.

因此, 通过激发一个较长的BDG, 就可以获得超窄带光学滤波器, 滤波器的反射中心波长可以通过调整抽运光波长来改变, 从而实现光谱分析功能. 由于保偏光纤的双折射存在较大的起伏, 造成BDG反射谱的非均匀展宽, 很难获得较窄的反射带宽, 因此我们采用双折射较小的单模光纤来激发BDG. 实验上测得不同长度的BDG反射谱宽如图20所示, 其中蓝线为弱光纤布拉格光栅的理论曲线. 在光纤长度较短(50和100 m)时, BDG反射谱宽与理论值符合较好, 而在光纤较长(200, 400和600 m)时, 测得BDG反射谱宽都偏离理论值, 且随光纤长度增加偏离程度加剧, 这个偏离是由于

单模光纤存在微小的双折射使BDG反射谱出现不同程度的展宽所致. 可以预测, 如果能制造出双折射更小的单模光纤, 就可以获得更窄的反射谱. 其中, 最小谱宽发生在400 m, 对应的谱宽为0.5 MHz (4 fm).

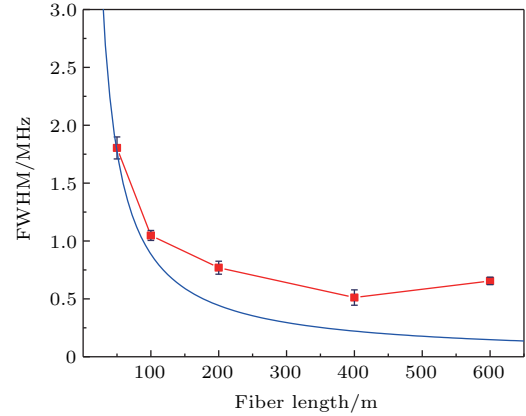


图20 布里渊动态光栅反射谱的谱宽(FWHM)随光栅长度的变化关系, 其中蓝色曲线是弱布拉格光栅的理论曲线

Fig. 20. Red dots show the measured FWHM bandwidth of BDG versus to the fiber length; blue curve shows the theoretical curve of a uniform weak fiber Bragg grating.

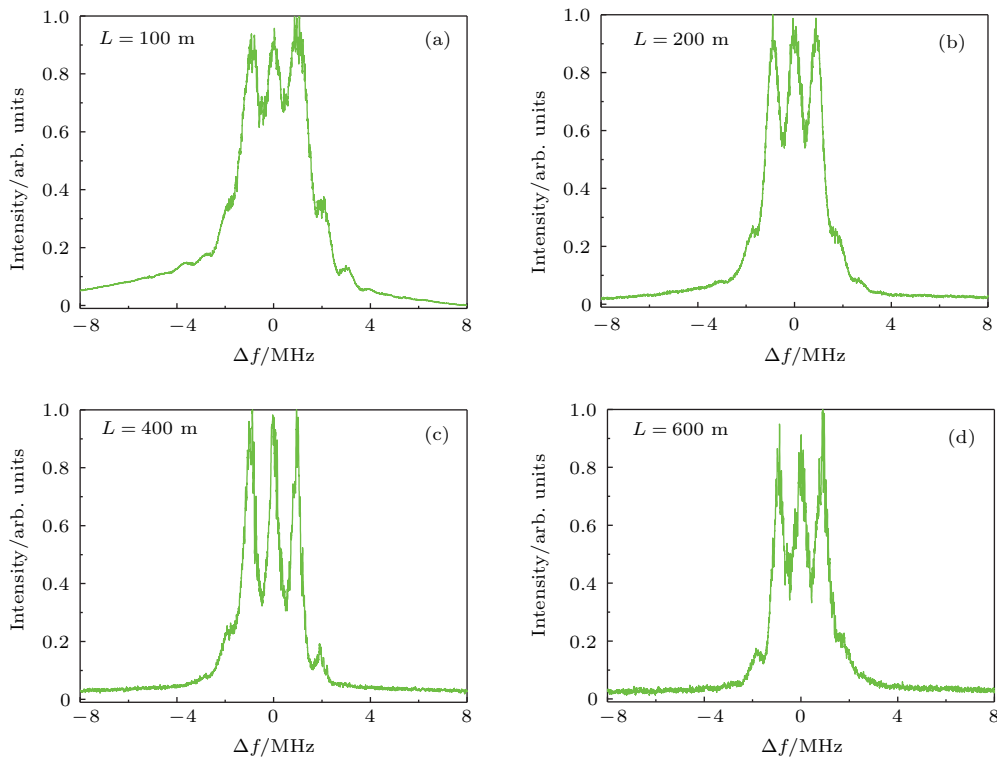


图21 利用不同长度BDG测得频率间隔为1 MHz的三峰光谱 (a) 100 m; (b) 200 m; (c) 400 m; (d) 600 m  
Fig. 21. Measured spectra with SMF segments of (a) 100 m, (b) 200 m, (c) 400 m, (d) 600 m. The frequency interval of the multiplex spectrum is 1 MHz.



为了验证该光谱分析系统具有0.5 MHz (4 fm) 的光谱分析精度, 我们通过相位调制产生三峰光谱. 将微波信号加载到相位调制器上对入射光进行调制, 只要适当控制微波信号功率就可使相位调制器的输出包含多个边带光谱. 本实验中采用三等幅线光谱, 既包括载波和两个一阶边带, 谱线的间隔为1 MHz. 使用不同长度BDG (100, 200, 400和600 m) 扫描测量的光谱如图21所示, 可以看出四种光栅长度下三个峰都可以清晰地分辨, 其中 $L = 400$  m的情况下三个峰分开得最清晰.

## 4 结论和展望

由于传感原理的限制, 传统分布式布里渊光纤传感在有些性能上很难有进一步提升, 比如测量的精度限制在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $20\text{ }\mu\text{e}$ , 测量的物理量仅限于温度和应变, 而且空间分辨率很难进一步提高. 基于布里渊动态光栅的新型分布式光纤传感在测量原理和方案上有创新性突破, 可以实现更高性能的分布式光纤传感. 由于保偏光纤的双折射对温度和应变更敏感, 因此温度和应变传感的测量精度可以提高一个量级以上; 测量的物理参数还可以拓展到横向压力、静压力(气压或液压)等其他物理或化学参数; 利用布里渊动态光栅的激发和探测分离的特点, 可以实现毫米级空间分辨率分布式时域传感. 基于布里渊动态光栅的新型多参量分布式光纤传感可以作为一种新的手段对高精度光纤陀螺环进行检测, 由于保偏光纤双折射对温度、纵向拉力、横向压力都敏感, 因此可以全面反映多种环境参数对光纤环的影响. 此外, 布里渊动态光栅在多参量光纤传感、全光信号处理、光通信和微波光子学等方面仍然有很大的发展潜力.

作者感谢加拿大渥太华大学鲍晓毅教授和陈亮教授的讨论, 作者的博士生姜桃飞、周登望和滕雷在实验上做了很多出色的工作.

## 参考文献

- [1] Horiguchi T, Tateda M 1989 *Opt. Lett.* **14** 408
- [2] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M 1989 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **1** 107
- [3] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M 1990 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2** 718
- [4] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M 1990 *Appl. Opt.* **29** 2219
- [5] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, Kurashima T 1993 *Opt. Lett.* **18** 185
- [6] Bao X Y, Webb D J, Jackson D A 1993 *Opt. Lett.* **18** 552
- [7] Mizuno Y, Zou W, He Z, Hotate K 2008 *Opt. Express* **16** 12148
- [8] Hotate K, Hasegawa T 2000 *IEICE Trans. Electron.* **E83-c** 405
- [9] Dong Y K, Zhang H Y, Chen L, Bao X Y 2012 *Appl. Opt.* **51** 1229
- [10] Dong Y K, Chen L, Bao X Y 2012 *J. Lightw. Technol.* **30** 1161
- [11] Ba D X, Wang B Z, Zhou D W, Yin M J, Dong Y K, Li H, Lu Z W, Fan Z G 2016 *Opt. Express* **24** 9781
- [12] Zhu Z, Gauthier D J, Boyd R W 2007 *Science* **318** 1748
- [13] Sancho J, Primerov N, Chin S, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 6157
- [14] Santagiustina M, Chin S, Primerov N, Ursini L, Thévenaz L 2013 *Sci. Rep.* **3** 1594
- [15] Zou W, He Z, Hotate K 2009 *Opt. Express* **17** 1248
- [16] Zou W, He Z, Hotate K 2011 *Opt. Express* **19** 2363
- [17] Dong Y K, Chen L, Bao X Y 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 1364
- [18] Dong Y K, Chen L, Bao X Y 2010 *Opt. Lett.* **35** 193
- [19] Dong Y K, Zhang H Y, Lu Z W, Chen L, Bao X Y 2013 *J. Lightw. Technol.* **31** 2681
- [20] Dong Y K, Jiang T F, Teng L, Zhang H Y, Chen L, Bao X Y, Lu Z W 2014 *Opt. Lett.* **39** 2967
- [21] Dong Y K, Teng L, Tong P L, Jiang T F, Zhang H Y, Zhu T, Chen L, Bao X Y, Lu Z W 2015 *Opt. Lett.* **40** 5003
- [22] Teng L, Zhang H Y, Dong Y K, Zhou D W, Jiang T F, Gao W, Lu Z W, Chen L, Bao X Y 2016 *Opt. Lett.* **41** 4413
- [23] Dong Y K, Zhang H Y, Zhou D P, Bao X Y, Chen L 2012 *Fiber Optic Sensors (Ottawa: Intech Publisher)* pp115–136
- [24] Chin S, Primerov N, Thévenaz L 2012 *IEEE Sens. J.* **12** 189



# Principle of Brillouin dynamic grating and its applications in optical fiber sensing\*

Dong Yong-Kang<sup>†</sup> Zhou Deng-Wang Teng Lei Jiang Tao-Fei Chen Xi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

( Received 9 October 2016; revised manuscript received 29 November 2016 )

## Abstract

Brillouin dynamic grating (BDG) has been widely studied since it was proposed for the first time to achieve optical storage in 2007. In general, when two beams of pump light (their frequency difference equal to Brillouin frequency shift of the optical fiber) with the same polarization state are injected into the fiber, the coherent acoustic wave can be excited by the stimulated Brillouin scattering effect, forming a BDG. The BDG in an optical fiber has been widely used in optical fiber sensing, characterization of optical fibers, optical storage, all-optical signal processing, microwave photonics and high-precision spectral analysis due to the advantages of all-optical generation and flexible parameter control. In this paper, we analyze the principle of BDG generation and detection, and its applications in optical fiber sensing. The simultaneous measuring of strain and temperature is achieved within a spatial resolution of 20 cm through measuring Brillouin frequency shift and birefringence-induced frequency shift in a polarization-maintaining fiber. A high-sensitivity distributed transverse load sensor based on BDG with a measurement accuracy as high as  $0.8 \times 10^{-3}$  N/mm is proposed and demonstrated, whose principle is to measure the transverse-load-induced birefringence change through exciting and probing a BDG in an elliptical-core polarization maintaining fiber. On the basis of the above research, a distributed measurement of hydrostatic pressure is demonstrated by using a 4-m photonics crystal fiber with a measurement error less than 0.03 MPa at a 20-cm spatial resolution, while the temperature cross-talk to the hydrostatic pressure sensing can be compensated for through measuring the temperature-induced Brillouin frequency shift changes by using Brillouin optical time-domain analysis. A system based on BDG in polarization maintaining fibers is reported to achieve a spatial resolution below one centimeter, while preserving the full accuracy on the determination of temperature and strain through measuring Brillouin frequency shift. Taking advantage of creating a long BDG in an optical fiber, an ultra-narrow bandwidth optical filter is realized by operating a BDG in a single-mode fiber, and the optical spectrometry is performed by sweeping the center wavelength of the BDG-based filter through a swept-tuned laser, where a 4 fm (0.5 MHz) spectral resolution is achieved by operating a BDG in a 400 m single-mode fiber.

**Keywords:** stimulated Brillouin scattering, Brillouin dynamic grating, optical fiber sensing

**PACS:** 52.38.Bv, 42.79.Dj, 07.07.Df

**DOI:** 10.7498/aps.66.075201

\* Project supported by the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (Grant No. 2013YQ040815), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575052, 61308004), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2014AA110401).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [aldendong@gmail.com](mailto:aldendong@gmail.com)