

激光与光电子学进展

布里渊动态光栅的研究进展

吴星亮¹, 宋盈盈¹, 张晓程¹, 张明江¹, 乔丽君¹, 王涛¹, 高少华², 张建忠^{1,2*}

¹太原理工大学新型传感器与智能控制教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

²太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

摘要 基于受激布里渊散射(SBS)效应的布里渊动态光栅(BDG)自提出以来,一直受到人们的广泛关注。相比于光纤布拉格光栅(FBG),BDG具有快速重构、读写分离、参数可控等优点,已在保偏光纤、单模光纤、少模光纤和光子晶体光纤中实现。同时,不同类型的BDG研究也不断出现,如啾啾BDG、相移BDG、混沌BDG和随机BDG等。简要介绍了BDG的产生原理,并对不同光纤中的BDG、不同类型BDG及BDG在分布式光纤传感、全光信号处理领域的应用进行详细阐述,最后,对BDG的发展趋势进行了总结与展望。

关键词 光栅; 受激布里渊散射; 布里渊动态光栅; 光纤传感; 全光信号处理

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0700004

Review of Brillouin Dynamic Grating

Wu Xingliang¹, Song Yingying¹, Zhang Xiaocheng¹, Zhang Mingjiang¹, Qiao Lijun¹,
Wang Tao¹, Gao Shaohua², Zhang Jianzhong^{1,2*}

¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract Brillouin dynamic grating (BDG) based on stimulated Brillouin scattering effect has been extensively investigated globally. Compared with fiber Bragg grating (FBG), BDG has many advantages, such as fast reconstruction, read-write separation, and parameter control. It has been realized in polarization-maintaining, single-mode, low-mode, and photonic crystal fibers. Simultaneously, different types of BDG research, such as chirped BDG, phase-shifted BDG, chaotic BDG, and random BDG, are constantly emerging. This paper briefly introduces the generation principle of BDG and gives a detailed overview of different BDG fibers, different types of BDG, and BDG application in distributed fiber sensing and all-optical signal processing. Finally, the development trend of BDG is summarized and prospected.

Key words gratings; stimulated Brillouin scattering; Brillouin dynamic grating; fiber sensor; all-optical signal processing

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.4370

收稿日期: 2020-07-09; 修回日期: 2020-08-04; 录用日期: 2020-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61875146, 61527819)、山西省重点研发计划(201803D121064, 201803D31044, 201903D121177)、山西省专利推广实施资助专项(20200734)、山西省高等学校科技成果转化培育项目

*E-mail: zhangjianzhong@tyut.edu.cn

1 引言

光纤因其良好的传输特性,在通信和传感领域作为一种传输介质,得到了迅速推广和应用;因其良好的光敏特性,20世纪后期被用于制备光纤光栅。最早出现的光栅为光纤布拉格光栅(FBG),其主要是利用紫外光(UV)相位掩模法或飞秒激光直接在光纤上刻写来制备。然而刻写过程会对光纤结构造成不可逆的破坏,产生的光栅参数无法调节。20世纪90年代,研究人员发现通过四波混频效应可以调制光纤的折射率,从而产生长度可控且可以随着泵浦光撤销而消失的光栅,即布里渊动态光栅(BDG)^[1]。之后,又有研究发现通过光纤的受激布里渊散射(SBS)效应可以产生BDG。

SBS是光纤的一种非线性效应,当光纤两端被注入偏振方向相同、频率差为布里渊频移的两束泵浦光时,两束泵浦光在光纤中相遇并发生受激布里渊散射,进而形成相干声波场,进而调制光纤折射率,最终生成布里渊动态光栅。BDG相比于FBG具有如下优势:1)BDG可以通过从光纤两端实时注入泵浦光来产生,移除泵浦光后光栅几乎同时消失,具有可擦除性;2)BDG具有全光产生、读写分离、位置可调、快速构建、参数可控等优点。目前,BDG已被广泛应用于分布式光纤传感及全光信号处理等领域。

本文从BDG的产生原理出发,详细介绍了不同光纤中产生的BDG和不同类型的BDG,对BDG在分布式光纤传感系统及全光信号处理领域的应用进行了论述,最后探讨了BDG的发展前景。

2 理论基础

2.1 受激布里渊散射机理

光在光纤中传播时会发生不同的散射,包括瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射,其中第一种为弹性散射,后两种为非弹性散射。布里渊散射由法国物理学家布里渊在1922年首次提出,是光波与声波在光纤中传播时发生的光散射过程。根据入射光功率的不同又可以分为自发布里渊散射和受激布里渊散射,入射光功率较小时发生自发布里渊散射,而入射光功率达到一定阈值就会发生受激布里渊散射。发生受激布里渊散射时,会产生频率下移的斯托克斯光和频率上移的反斯托克斯光,并且上移量与下移量相等,即布里渊频移,表达式为

$$\nu_B = 2n\nu_A/\lambda, \quad (1)$$

式中, ν_B 是布里渊频移, n 是光纤折射率, ν_A 和 λ 分别是光栅在光纤中的移动速度和入射光波长。

在受激布里渊散射过程中,当泵浦光满足相位匹配条件且功率达到阈值时会产生相干声波场即BDG,该声波的强度和频率很容易通过控制“写入”泵浦光进行调谐,因此可以通过改变光纤种类和“写入”泵浦光的种类来产生不同性能的BDG。

2.2 布里渊动态光栅的产生原理

布里渊动态光栅的产生原理如图1所示。在光纤两端沿着慢轴(x 轴)注入两束泵浦光 Pump1 和 Pump2,两束泵浦光在频率上的差值落在布里渊频移 ν_B 附近,当两束泵浦光在光纤中相遇时发生受激布里渊散射效应,产生声波场从而调制光纤折射率。然后沿着光纤的快轴(y 轴)注入探测光 Probe,探测光频率与所注入的泵浦光 Pump2 频率之间的差值落在双折射频移 ν_{Bire} 附近。由相位匹配条件可知:当两束泵浦光的频率差等于布里渊频移 ν_B 时,产生的BDG强度达到最大;当探测光与所注入的泵浦光 Pump2 频率差等于双折射频移 ν_{Bire} 时,BDG反射的探测光信号可以达到最强。故通过分析反射信号可以研究BDG相关的特性。

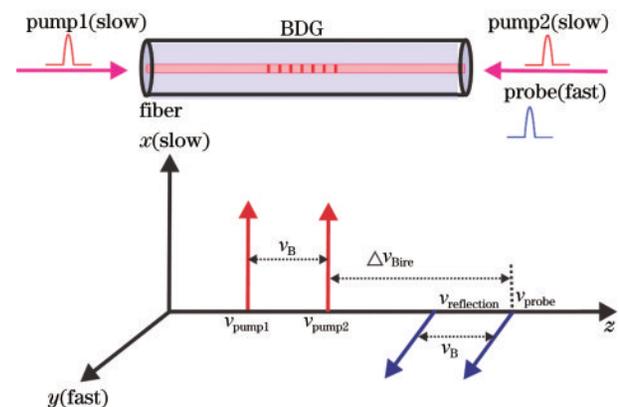


图1 布里渊动态光栅产生的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Brillouin dynamic grating generation

3 不同光纤中的BDG

每种光纤都有独特的优势。保偏光纤可以较好地保持激光的偏振态,利于激发SBS效应产生BDG;单模光纤成本低廉,应用广泛,且折射率分布均匀,利于声波周期性调制光纤折射率产生BDG;而少模光纤的光传输性能较好,可以利用不同模态来产生和读取BDG,更好地分离泵浦光、探测光和反射光;光子晶体光纤具有高非线性,利于激发SBS效应,降低泵浦功率,产生BDG。4种光纤中的BDG优缺点如表1所示。

表 1 不同光纤中的 BDG
Table 1 BDG in different optical fibers

| Optical fiber type | Advantage | Disadvantage |
|--------------------------------|---|----------------------------------|
| Polarization-maintaining fiber | Good polarization state retention is beneficial to stimulate the SBS effect | High cost |
| Single-mode fiber | Uniform refractive index distribution, low cost, wide application | SBS effect is not easily induced |
| Few-mode optical fiber | Different modes are beneficial to separation of pump light, detection light and reflected light | Complex experimental system |
| Photonic crystal fiber | High nonlinearity is beneficial to stimulate SBS effect and reduce pump light power | High cost |

3.1 保偏光纤中的 BDG

2008 年,韩国中央大学的 Song 等^[2]首次在保偏光纤中产生了 BDG,成功将泵浦光、探测光及反射光分离。图 2 为该 BDG 在保偏光纤中产生的实验装置,1550 nm 的激光通过耦合器分为两路作为泵浦光,两束泵浦光都沿着 30 m 的保偏光纤一轴注入,在相遇处产生 BDG,同时,沿着保偏光纤的另一轴注入探测光,得到反射信号。

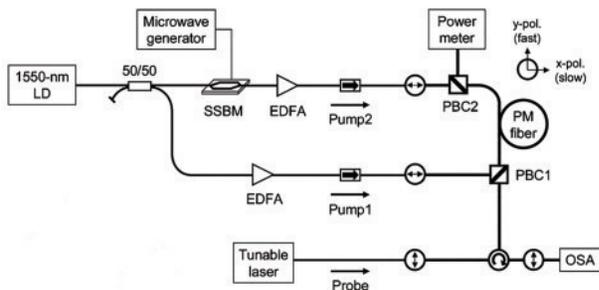


图 2 在保偏光纤中产生 BDG 的实验装置^[2]
Fig. 2 Experimental setup for generating BDG in polarization-maintaining fiber^[2]

2010 年, Dong 等^[3]在保偏光纤中产生了 BDG 并研究其反射谱特性,实验证明 BDG 反射谱与弱光纤布拉格光栅理论一致,其反射谱宽与光栅长度成反比,而光栅长度和泵浦脉冲光脉宽有关,即 $L_{BDG} = (\tau_{p1} + \tau_{p2})c/4n$, 其中 τ_{p1} 和 τ_{p2} 是两束泵浦光的脉冲宽度, c 为光速, n 为光纤折射率,所以反射谱宽与脉冲光脉宽呈负相关。图 3 显示了反射谱宽随光栅长度的变化,其中实线表示弱光纤布拉格光栅的反射谱宽与光栅长度的关系,圆点线和方框线分别表示探测脉冲光脉宽为 8 ns 和 6 ns 时, BDG 的反射谱宽随光栅长度的变化。2019 年,徐志钮等^[4]对保偏光纤中 BDG 的波长、波长差以及拍长与温度和应变的关系进行了研究,结果表明波长的对数与光纤温度近似呈线性关系,波长的相对变化量与光纤应变呈线性关系;

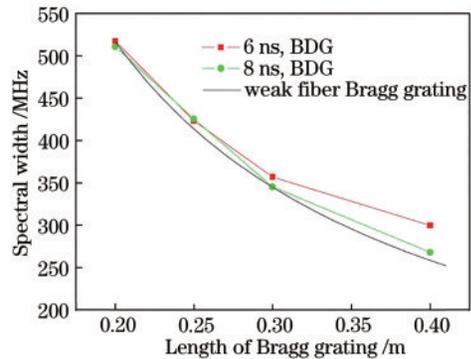


图 3 BDG 反射谱宽与光栅长度的关系
Fig. 3 Relationship between BDG reflection spectrum width and grating length

两轴波长差、拍长的倒数与温度和应变近似呈线性关系。

3.2 单模光纤中的 BDG

与保偏光纤相比,单模光纤折射率分布均匀,制作工艺简单,且成本低、应用广。得益于单模光纤均匀的折射率,在其中产生的 BDG 中可以实现比保偏光纤 BDG 更大的反射率。图 4 为 Song 等^[5]在单模光纤中产生 BDG 的实验装置,1550 nm 激光通过耦合器分为两束偏振方向相同、频差为布里渊频移的泵浦光,他们在光纤中相遇产生 BDG,同时,在

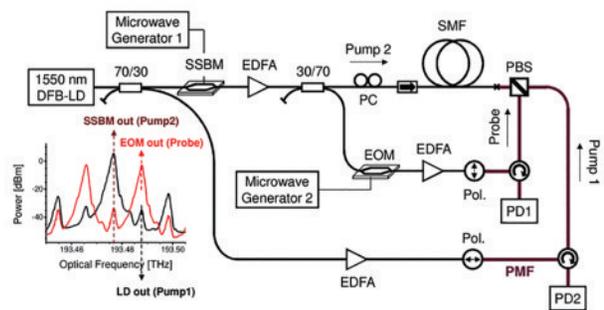


图 4 在单模光纤中产生 BDG 的实验装置^[5]
Fig. 4 Experimental setup for generating BDG in single-mode fiber^[5]

单模光纤的一端注入偏振方向与泵浦光正交的探测光并得到反射信号,实验发现在 100 m 单模光纤中产生的 BDG 最大反射率可达 8%。图 5 为不同光

栅长度下的 BDG 反射谱,由于反射率的提高,反射谱宽随着光栅长度的增加而减小,光栅长度增加到 100 m 时,其频谱带宽低至 2.4 MHz。

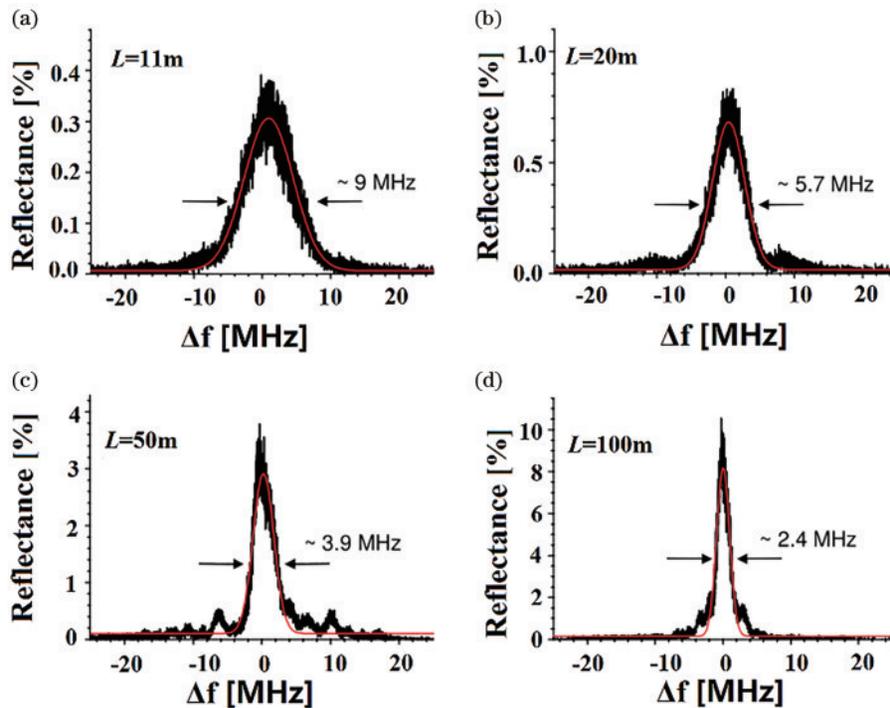


图 5 单模光纤中不同长度 BDG 的反射谱^[5]。(a) $L=11\text{ m}$; (b) $L=20\text{ m}$; (c) $L=50\text{ m}$; (d) $L=100\text{ m}$
 Fig. 5 Reflection spectra of different lengths of BDG in single-mode fiber^[5]. (a) $L=11\text{ m}$; (b) $L=20\text{ m}$; (c) $L=50\text{ m}$; (d) $L=100\text{ m}$

邹卫文等^[6]在单模色散位移光纤中生成了布里渊动态光栅,并利用单模色散光纤存在多模态的多峰布里渊增益谱(BGS)的特性,提出了两种新的非谐波锁相检测方法表征 BGS。图 6 所示为不同波长下 BDG 在几百兆赫兹的色散光纤中的频移特性。

光产生 BDG,并通过不同模态将泵浦光、探测光和反射光分离。2012 年, Li 等^[7]首次在少模光纤中通过受激布里渊散射产生了 BDG。图 7 所示为少模光纤中产生和读取 BDG 的实验装置,实验在一种光纤模式下采用单端泵浦光,在少模光纤中写入 BDG,在另一种光纤模式下以不同波长的探测光进行读取,从而可以成功地分离出泵浦光、探测光和反射光。在 15 km 长的少模光纤中产生的 BDG 的可调反射率为 0.1%。

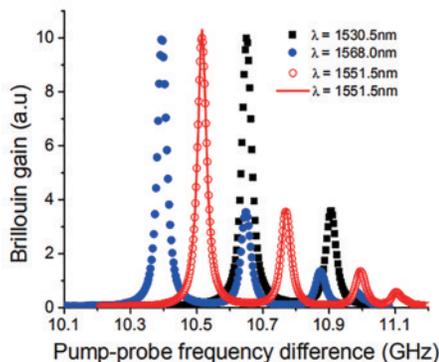


图 6 不同波长的 BDG 在单模色散位移光纤中的增益谱^[6]
 Fig. 6 Gain spectra of BDG with different wavelengths in single-mode dispersion-shifted fiber^[6]

3.3 少模光纤中的 BDG

少模光纤可在不同模式下利用单个泵浦脉冲

2014 年, Li 等^[8]在少模光纤的 LP_{01} 模式下,使用高斯泵浦脉冲,反向传播连续泵浦光,产生了 BDG,同时,利用 LP_{11} 模式激发的第三个高斯探测脉冲,实现了布里渊光学时域分析(BOTDA),通过对反射信号的相干检测和时域分析,实现了少模光纤模态双折射的表征。另外, Kim 等^[9]利用椭圆芯双模光纤产生了 BDG,采用光学时域分析得到了如图 8 所示的 BDG 局部反射光谱,由图可知少模光纤中的 BDG 可以近似看作弱布拉格光栅,因此反射光谱对 BDG 的均匀性很敏感,且谱宽均小于 100 MHz。

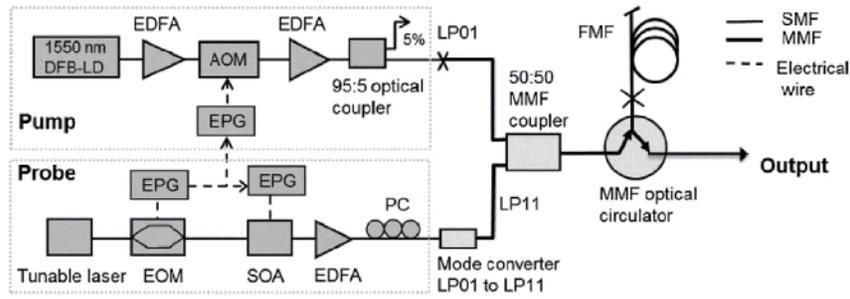


图 7 在少模光纤中产生和读取 BDG 的实验装置^[7]

Fig. 7 Experimental setup for producing and reading BDG in a few-mode fiber^[7]

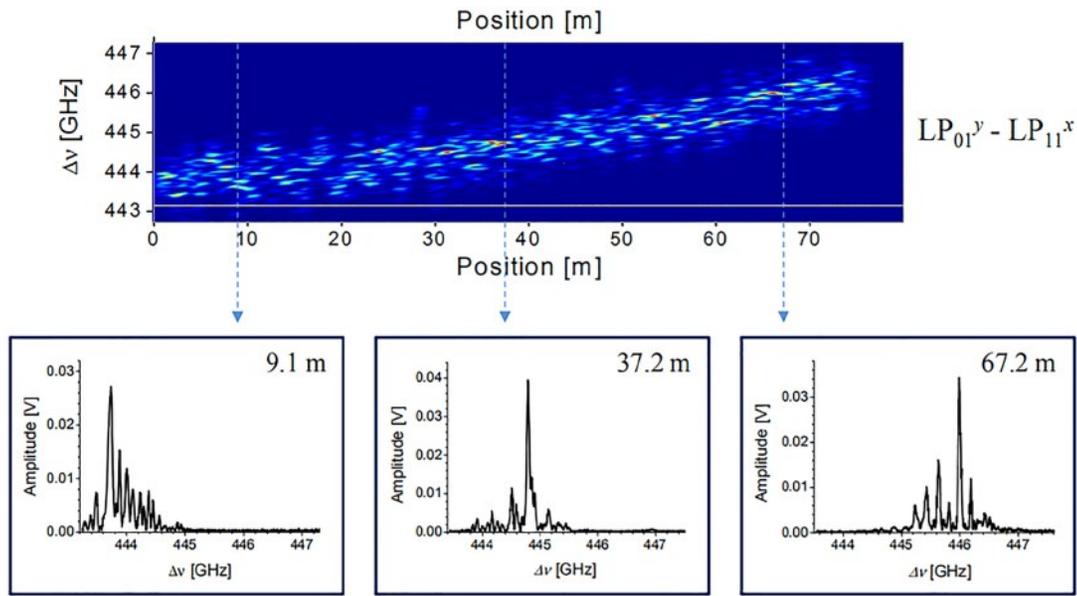


图 8 少模光纤中 BDG 的局部反射谱^[9]

Fig. 8 Local reflection spectra of BDG in a few-mode fiber^[9]

3.4 光子晶体光纤中的 BDG

光子晶体光纤具有结构多样、低色散、高双折射和高非线性等特性,有利于 SBS 效应的激发。将光子晶体光纤应用于受激布里渊散射系统可以有效缩短光纤长度,降低对泵浦光功率的要求,并且,改变光子晶体光纤结构,利用布里渊频移对温度的敏感性可以实现对温度的测量。这些研究为在光子晶体光纤中利用 SBS 效应产生 BDG 奠定了基础。2017 年,董永康课题组^[10]在保偏光子晶体光纤 (PM-PCF) 中将布里渊动态光栅 (BDG) 和布里渊增益谱 (BGS) 结合,实现了温度和应变的同时分布式传感。图 9 所示为利用 BDG 和 BGS 建立分布式温度和应变传感的实验装置,1550 nm 的激光器发出的连续光通过耦合器分为两路,作为两束泵浦光 (Pump1 和 Pump2),在 PM-PCF 中相遇从而发生 SBS 产生 BDG,可调谐激光器经过电光调制器 (EOM) 调制形成探测脉冲从而读取 BDG。通过调

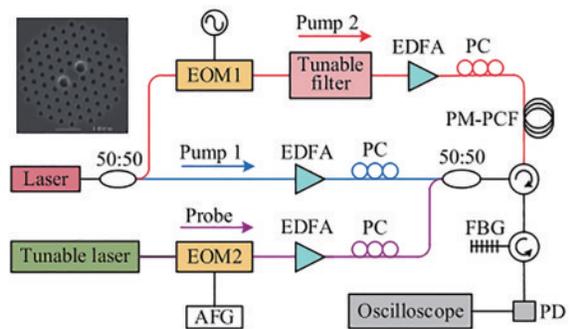


图 9 利用 BDG 和 BGS 建立分布式温度和应变传感的实验装置^[10]

Fig. 9 Experimental setup of distributed temperature and strain sensing using BDG and BGS^[10]

节可调谐激光器的波长可以获取 BDG 的反射谱以确定相应的双折射频移 (ν_{Bire}),图 10 为测得的温度和应变与 ν_{Bire} 的关系,可以看到温度与 ν_{Bire} 在 5~80 °C 范围内有较好的线性关系,而应变与 ν_{Bire} 在

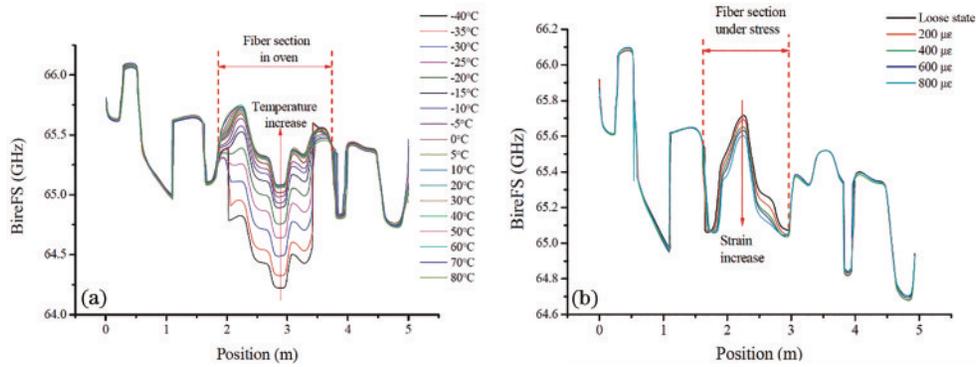


图 10 温度和应变与双折射频移的关系^[10]。(a)不同温度下;(b)不同应变下

Fig. 10 Relationship of ν_{bire} with temperature and strain^[10]. (a) Under different temperature; (b) under different strain

0~800 $\mu\epsilon$ 内有很好的线性关系,利用上述特性即可实现应变和小范围温度的测量。

4 不同类型的 BDG

通过调制泵浦光或利用不同类型的激光作为泵浦光可以产生不同类型的 BDG。利用频率啁啾脉冲光通过受激布里渊散射可以产生啁啾 BDG,啁啾 BDG 光栅强度相对独立于写入的脉冲功率,主要与啁啾系数有关,并且相比于普通的 BDG,其反射谱宽比较窄,一般小于 100 MHz。相移 BDG 则通过调制两个泵浦脉冲产生相移,从而在光纤中发生受

激布里渊散射产生相移 BDG,其反射谱宽可以达到 100 MHz 以上,由于相位的移动,反射谱会出现凹陷,此特性可以用于光子滤波。混沌 BDG 主要基于混沌光的低相干特性,利用混沌光作为泵浦光在光纤中可以产生单个且稳定维持的混沌 BDG,反射谱宽可以达到 GHz 以上。随机 BDG 是利用随机脉冲作为泵浦光,在光纤中发生受激布里渊散射产生多个 BDG,这些 BDG 在光纤中产生的位置是随机分布的,随机 BDG 反射谱也可以达到 GHz 量级,但比混沌 BDG 的反射谱宽窄一些,上述 4 种 BDG 的对比见表 2。

表 2 不同类型的 BDG

Table 2 Different types of BDG

| BDG type | Generation method | Reflective spectral width | Application |
|-----------------|-------------------------------|----------------------------------|--|
| Chirp BDG | Frequency chirped pulse light | Less than 100 MHz | Narrow band filter, dispersion compensator, etc |
| Phase shift BDG | Phase modulated pulse light | More than 100 MHz | Photonic filter, microwave photonics, all-optical signal processing, etc |
| Chaotic BDG | Chaotic laser | It can reach the gigahertz scale | High precision distributed optical fiber sensing |
| Random BDG | Random pulse light | It can reach the gigahertz scale | Random fiber laser |

4.1 啁啾 BDG

在光纤通信领域,啁啾光纤光栅可作为色散补偿器和脉冲整形器发挥着重要的作用,啁啾 BDG 则具有类似的功能。2013 年,Winful^[11]利用频率啁啾脉冲光的受激布里渊散射在光纤中产生了啁啾 BDG,图 11 所示为啁啾 BDG 与非啁啾 BDG 的强度与光纤距离的关系,可以看出频率啁啾脉冲形成的光栅比非频率啁啾脉冲形成的光栅窄得多,这是因为频率扫描可以确保脉冲在更小的区域内相互关联;另外,啁啾 BDG 的强度也更高。在分布式传感应用中,利用频率啁啾脉冲可以实现动态光栅更准确的定位,将其应用于分布式光纤传感系统可以得到更高的空间分辨率。

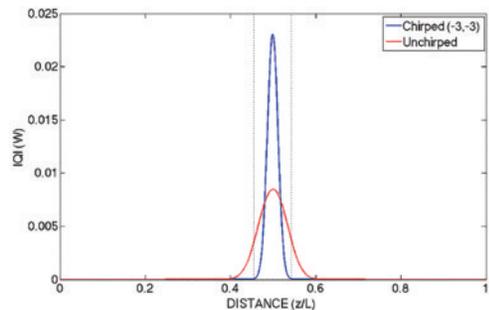


图 11 啁啾 BDG 和非啁啾 BDG 的强度与光纤距离的关系^[11]

Fig. 11 Relationship between fiber distance and intensity of chirped BDG and non-chirped BDG^[11]

Dong 等^[12]进一步研究了啁啾 BDG 的强度与脉冲面积的关系,发现啁啾的存在降低了有效光栅形

成过程中对脉冲面积的要求,同时,啁啾 BDG 相比于普通光栅对脉冲功率的要求也较低。图 12 为不同功率下形成的啁啾 BDG 与非啁啾 BDG 的强度与距离的关系分布图。从图 12 中可以看出:在写入脉冲功率为 78 W 时,非啁啾 BDG 强度很小,可以忽略

不计,而啁啾 BDG 强度较大;在写入脉冲功率增加到 183 W 时,非啁啾 BDG 有一个有效的光栅强度,而啁啾 BDG 强度相比于写入脉冲功率为 78 W 时的光栅强度,变化很小,这说明对于啁啾脉冲,光栅强度相对独立于写入脉冲的功率。

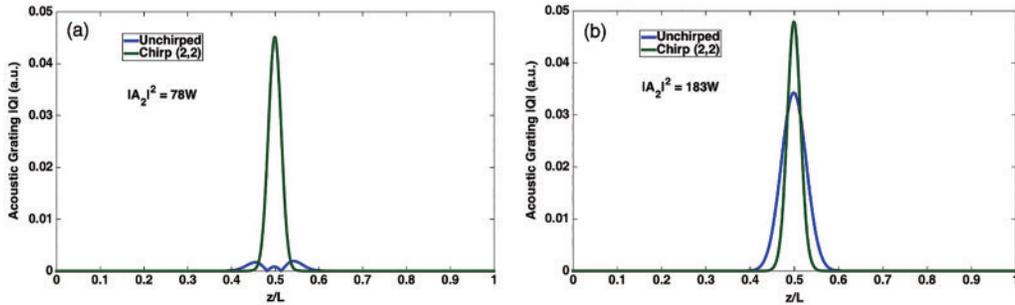


图 12 不同功率下形成的啁啾 BDG 与非啁啾 BDG 的强度与距离的关系^[12]。(a)写入脉冲功率为 78 W;(b)写入脉冲功率为 183 W
Fig. 12 Relationship between the intensity and distance of chirped BDG and non-chirped BDG formed at different powers^[12].

4.2 相移 BDG

相移光纤光栅在光学时间积分器^[13]、全光开关^[14]、光学微分器^[15]和微波光子滤波器^[16]等领域得到了广泛应用。相移 BDG 也具有同样的应用。Dong 等^[17]利用泵浦脉冲的相位调制产生了相移 BDG,图 13 给出所产生的相移 BDG 的声波场图,图中的 BDG₁和 BDG₂之间的相位差为 π 。

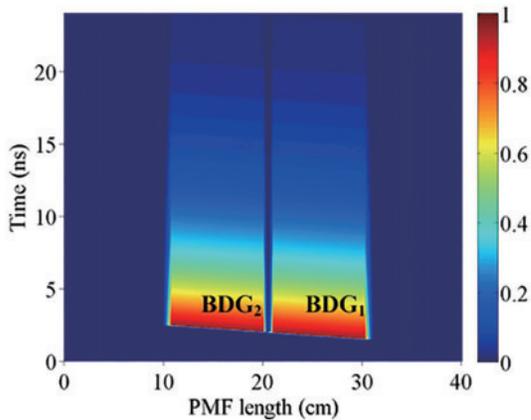


图 13 相移 BDG 的声波场二维分布^[17]
Fig. 13 Acoustic field two-dimension distribution of phase-shifted BDG^[17]

如图 14 所示,相移 BDG 可以得到 3 dB 带宽为 354 MHz 的窄陷积分反射谱,并且通过改变泵浦脉冲的相移可以很容易地调整反射谱中的凹陷频率。图 15 为不同泵浦脉冲相移量下对应的反射谱,可以看到凹陷频率随着泵浦脉冲相移量的变化而变化。

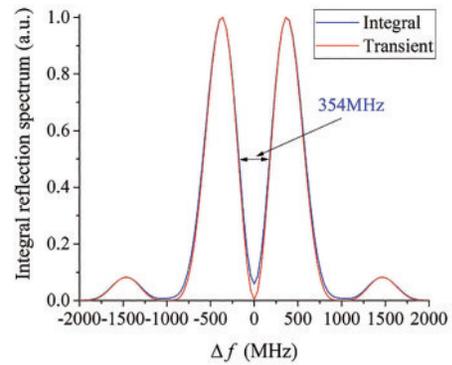


图 14 相移 BDG 反射谱^[17]
Fig. 14 Reflection spectra of phase-shifted BDG^[17]

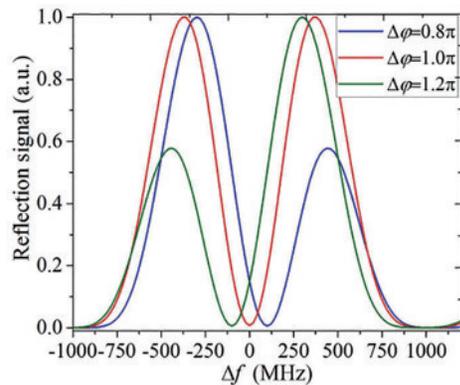


图 15 不同泵浦脉冲相移量下的相移 BDG 反射谱^[17]
Fig. 15 Reflection spectra of phase-shifted BDG under different phase shifts of pump pulses^[17]

4.3 混沌 BDG

混沌激光的自相关曲线具有类 δ 函数的特性^[18],可在光纤中产生单个且稳定维持的 BDG。同

时,混沌激光所具有的低相干性使得产生的 BDG 可以克服光栅长度受限于声子寿命的问题,大大提高了分布式光纤传感系统的空间分辨率。本课题组^[19-21]利用带宽为 50.6 GHz 的混沌激光作为泵浦光,通过五波耦合方程模拟产生了混沌 BDG,并提出反馈滤

波装置,对混沌光的周期性信号进行抑制,得到了无时延旁瓣的混沌 BDG。图 16 所示为保偏光纤中产生的无时延混沌 BDG 声波场^[20],可以看出在长度为 1 m 的保偏光纤的中间位置生成了稳定维持的 0.2 cm 长的混沌 BDG,光栅长度由混沌激光的带宽决定。

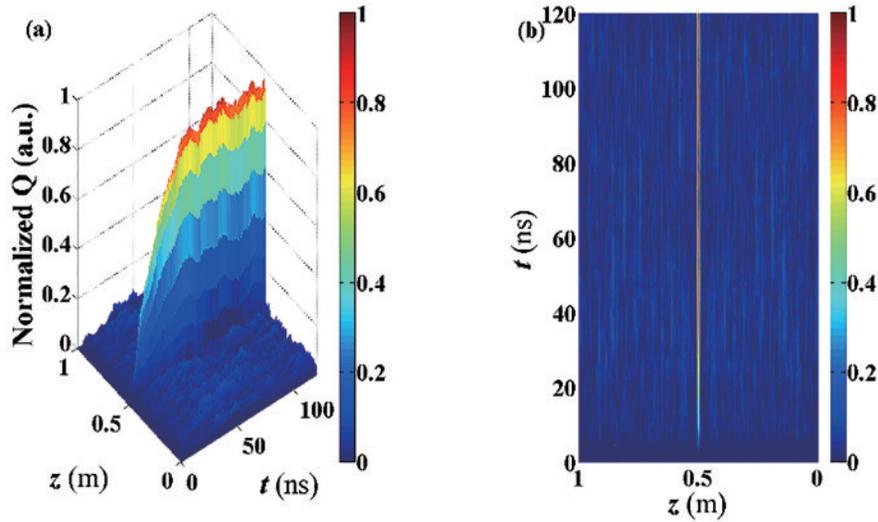


图 16 保偏光纤中产生的混沌 BDG 声波场^[20]。(a)三维分布图;(b)二维分布图

Fig. 16 Chaotic BDG acoustic field generated in polarization-maintaining fiber^[20]. (a) Three-dimensional distribution; (b) two-dimensional distribution

因混沌激光的高带宽,混沌 BDG 可以得到较宽的反射谱,且反射谱宽会随光栅长度的变化而变化,如图 17 所示^[21]。图 17(a)为不同光栅长度

的混沌 BDG 反射谱,可以看出反射谱宽随着光栅长度的增加而减小;图 17(b)量化了反射谱宽与光栅长度的关系。

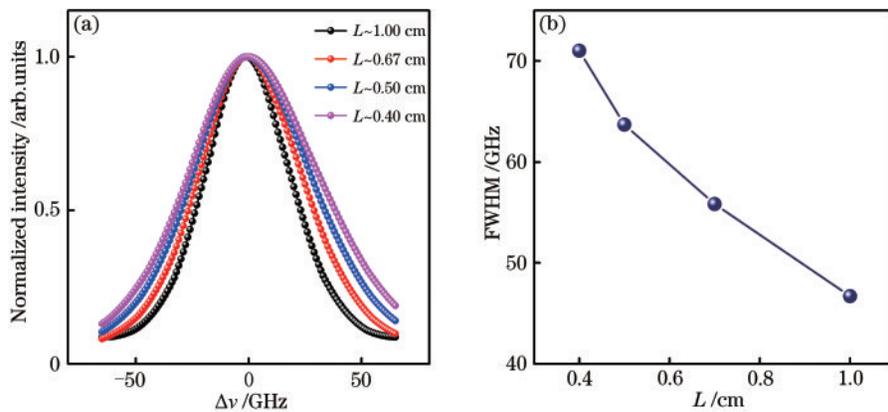


图 17 混沌 BDG 的反射特性^[21]。(a)不同光栅长度的混沌 BDG 反射谱;(b)混沌 BDG 反射谱宽与光栅长度的关系

Fig. 17 Reflection characteristics of chaotic BDG^[21]. (a) Chaotic BDG reflection spectra with different grating lengths; (b) relationship between chaotic BDG reflection spectrum width and grating length

4.4 随机 BDG

现有的随机光纤布拉格光栅已经应用于随机光纤激光器^[22-23]和超声波传感器^[24],随机光栅形成的滤波器通过减少模式竞争有效抑制了随机激光器的强度噪声和频率噪声,得到了小于 100 Hz 的单频线宽。通过随机 BDG 可以实现光子局域化及可

控随机反馈,进一步拓展了随机光纤光栅的使用范围。本课题组对保偏光纤中的随机 BDG 进行了数值仿真^[25],并详细分析了随机 BDG 的特性。图 18 为 8 m 长保偏光纤中产生的 BDG 声波场。图 18(a)为声波场的二维分布,可以看出所产生的光栅在空间中呈随机分布;图 18(b)为 BDG 产生时间与保偏

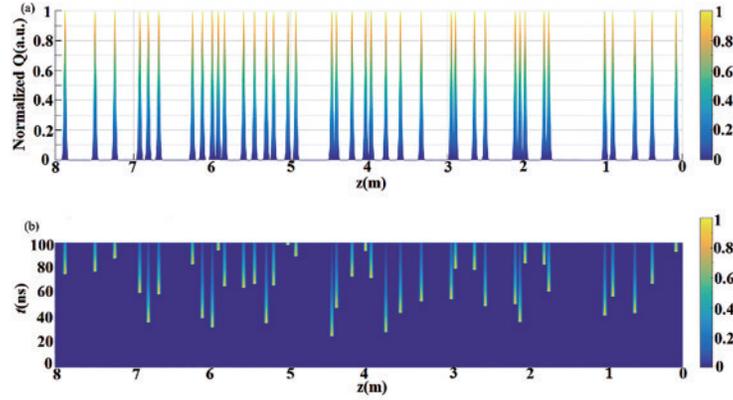


图 18 保偏光纤中产生的随机 BDG 声波场的二维分布图^[25]。(a) 声波场的二维分布; (b) BDG 产生时间随保偏光纤位置的变化
Fig. 18 Two-dimensional distribution of random BDG acoustic field generated in polarization-maintaining fiber^[25]. (a) Distribution of acoustic field; (b) BDG generation time versus position of polarization-maintaining fiber

光纤位置的二维分布图, 可以看到 BDG 的强度会随着时间不断衰减, 衰减速率取决于声子寿命。

随机 BDG 的反射谱如图 19 所示, 图 19(a) 和图 19(b) 分别为随机泵浦脉冲宽度为 1 ns 和 1.2 ns

时的反射谱, 谱宽为 88.0 GHz 和 69.2 GHz。由于 BDG 长度与泵浦脉冲宽度成正比, 而反射谱宽与光栅长度成反比, 故反射谱宽与泵浦脉冲宽度成正比。

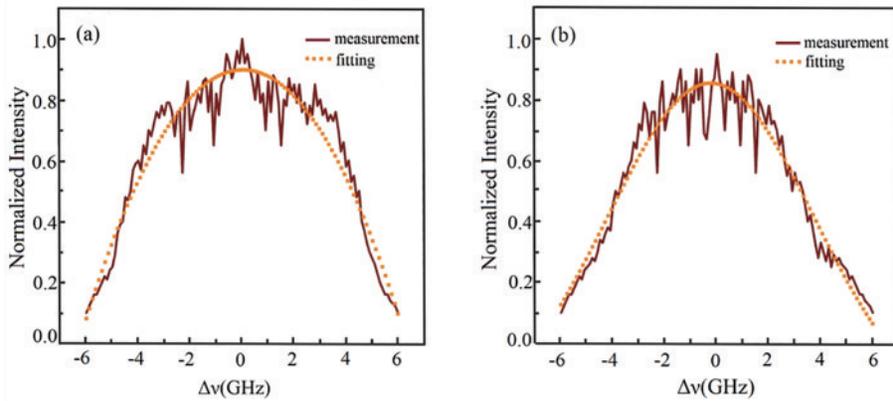


图 19 保偏光纤中产生的随机 BDG 反射谱图^[25]。(a) 随机脉冲宽度 1 ns; (b) 随机脉冲宽度 1.2 ns
Fig. 19 Random BDG reflection spectra generated in the polarization maintaining fiber^[25]. (a) Random pulse width of 1 ns;

5 BDG 的应用

目前 BDG 最主要的两大类应用分别是分布式光纤传感和全光信号处理。分布式光纤传感主要利用 BDG 实现温度与应变的无交叉敏感测量, 提高系统的空间分辨率及测量精度; 全光信号处理则包括可调光延迟线、光信号存储和压缩、全光触发器等。

5.1 分布式光纤传感

5.1.1 温度和应变的无交叉敏感测量

外界的温度变化和对光纤轴向以及径向施加的应变都会导致光纤双折射的变化, 通过对保偏光纤中布里渊频移 $\Delta\nu_B$ 和双折射频移 $\Delta\nu_{Bire}$ 的测量可以

实现温度和应变的解调。在外界温度和应力变化时, 布里渊频移 $\Delta\nu_B$ 和双折射频移 $\Delta\nu_{Bire}$ 可以表示为

$$\Delta\nu_B = C_B^\epsilon \Delta\epsilon + C_B^T \Delta T, \quad (2)$$

$$\Delta\nu_{Bire} = C_{Bire}^\epsilon \Delta\epsilon + C_{Bire}^T \Delta T, \quad (3)$$

式中, $\Delta\epsilon$ 和 ΔT 是应变和温度改变量, C_B^ϵ 和 C_B^T 分别是布里渊频移的应变系数和温度系数, 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。通过该方程组即可由布里渊频移和双折射频移解调出温度和应变。

2009 年, Zou 等^[26] 利用 BDG 测量系统进行了温度和应变双参量的同时测量。从图 20 中可以看出, 通过布里渊增益谱测得的布里渊频移与温度和应

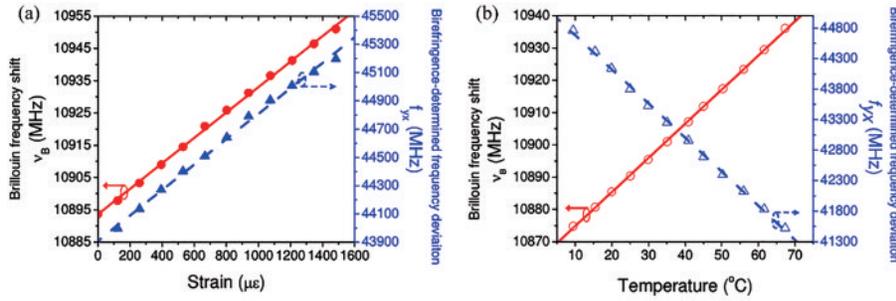


图 20 应变和温度系数测量^[26]。(a)应变；(b)温度

Fig. 20 Strain and temperature coefficient measurement^[26]. (a) Strain; (b) temperature

变都呈线性正相关,并且具有不同的温度和应变系数,由 BDG 反射谱测得的双折射频移与温度呈线性正相关、与应变呈线性负相关,所以通过布里渊增益谱和 BDG 反射谱可以实现对温度和应变的同时测量,实验测得的应变精度为 $3 \mu\epsilon$,温度精度为 $0.08 \text{ }^\circ\text{C}$ 。2010 年他们进一步采用相关 BDG 实验方案进行研究,通过同步正弦调制泵浦光信号,对布里渊频移和双折射频进行同时测量,在 8 m 长的保偏光纤上测得的应变和温度分辨率分别为 $12 \mu\epsilon$ 和

$0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[27]。

2010 年, Dong 等^[28]在熊猫型保偏光纤中实现了对温度和应变的同时测量,如图 21 所示。从图 21(a)可以看出:布里渊频移(BFS)和双折射频移(BireFS)的测量具有相同的空间分辨率;利用所测的布里渊频移和双折射频移可以得到光纤上的温度和应变分布,其结果如图 21(b)所示。实验在 6 m 长的保偏光纤中得到的温度和应变灵敏度分别为 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $9 \mu\epsilon$,空间分辨率为 20 cm。

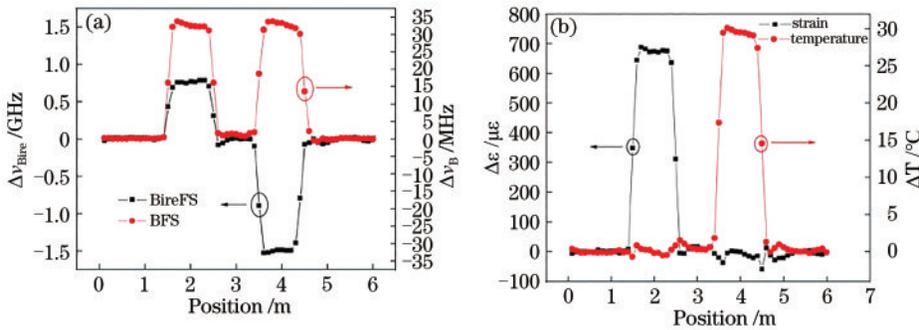


图 21 熊猫型保偏光纤中温度和应变同时测量的仿真结果^[28]。(a)测量的布里渊频移和双折射频移；(b)解调后的温度和应变分布

Fig. 21 Simulation results of simultaneous measurement of temperature and strain in Panda polarization-maintaining fiber^[28].

(a) Measured Brillouin and birefringent frequency shifts; (b) temperature and strain distribution after demodulation

5.1.2 高空间分辨率传感

对于时域布里渊光纤传感系统而言,空间分辨率是由光脉冲宽度决定的,因而提高空间分辨率最直接的方法就是缩短脉冲宽度,但过短的脉冲减小了泵浦光强度,降低了系统的信噪比,并且当泵浦光脉冲宽度小于或接近声子寿命时,布里渊散射谱宽的增大会进一步降低系统测量精度。相比之下, BDG 的产生和探测是两个独立的过程,消除了声子寿命对泵浦光脉冲宽度的限制,通过减小探测脉冲宽度,可以提高空间分辨率,同时可以保证较窄的布里渊增益谱。

2010 年, Song 等^[29]采用基于 BDG 的布里渊光

时域分析技术在 105 m 的保偏光纤中得到了 10 cm 的空间分辨率。2012 年, Song 等^[30]利用 BDG 结合布里渊光时域反射技术在 935 m 长的保偏光纤中实现了空间分辨率为 80 cm 的分布式应变和温度传感。同年, Chin 等^[31]利用 BDG 实现了高空间分辨率的分布式时域布里渊传感,系统采用了宽度为 55 ps 的探测脉冲,实验得到的布里渊频移如图 22 所示,测量结果清晰地表明该方法获得了毫米级空间分辨率。2016 年, Bergman 等^[32]在时域 BDG 中对探测信号采用格雷互补序列编码,在 5 m 长的保偏光纤中得到了 2 cm 的空间分辨率。

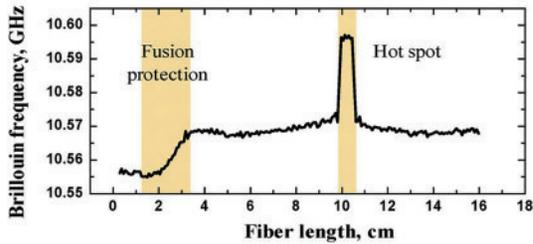
图 22 高空间分辨率分布式光纤传感系统测量结果^[31]

Fig. 22 Measurement results of distributed optical fiber sensing system with high spatial resolution^[31]

5.1.3 高精度分布式传感

2009年, Dong等^[33]搭建了时域BDG测温系统, 因该系统的空间分辨率由两泵浦脉宽决定, 测量精度由布里渊动态光栅谱带宽决定, 采用短泵浦脉冲

可获得高空间分辨率, 采用长探测脉冲可获得高测量精度, 为同时获得较高的空间分辨率和测量精度, 采用了长短脉冲相结合的方案。实验在 3 m 长的光子晶体保偏光纤中利用 2 ns 宽的泵浦脉冲获得了 20 cm 的空间分辨率, 利用 6 ns 宽的探测脉冲实现了 0.07 °C 的测温精度。2015年, 他们又利用 BDG 测量光纤双折射的变化实现了对横向压力的测量^[34]。图 23(a) 为改变压力方向时的测量结果, 可以看到随着压力方向的改变, 双折射频移呈正弦函数变化。图 23(b) 显示当压力方向与光纤慢轴/快轴方向一致时, 双折射频移量与横向压力值之间的关系, 当沿光纤快轴方向时施加横向压力时, 灵敏度为 $-6.217 \text{ GHz}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$, 而沿光纤慢轴方向施加压力时, 灵敏度为 $6.28 \text{ GHz}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$ 。

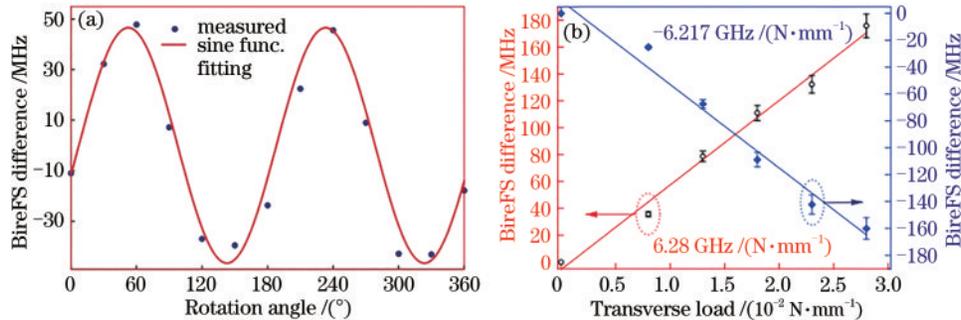
图 23 双折射频移与横向压力的关系^[34]。(a)不同压力方向;(b)施加不同压力值

Fig. 23 Relations between BireFS and transverse load^[34]. (a) Various load direction; (b) various load weight

5.2 全光信号处理

近年来, 随着 BDG 技术不断地深入研究, 发现了其在全光信号处理领域的潜在应用。目前, BDG 在全光信号处理中的应用主要包括可调光延迟线、光信号存储和压缩、全光触发器等。

5.2.1 光延迟线

利用 SBS 效应可以在光纤的任何位置生成局部光栅, 因此信号脉冲也可以在不同点处反射, 由于反射信号传播时间不同导致延迟不同, 相比于慢光延迟线和色散延迟线, BDG 可以实现调节时间更长的光延迟线。2011年, Thevenaz等^[35]在 120 m 长的保偏光纤中成功实现了对半峰全宽为 650 ps 的信号脉冲的可调光延迟, 最高延迟时间达 1.15 μs , 相当于 1769 bit 的小数延迟滤波器, 实验结果如图 24 所示。

5.2.2 光信号存储和压缩

BDG 的建立是通过 SBS 效应产生声波场调制光纤折射率的过程, 涉及到能量的转化和存储, 因此可以利用两个不同频率脉冲信号发生的 SBS 效应,

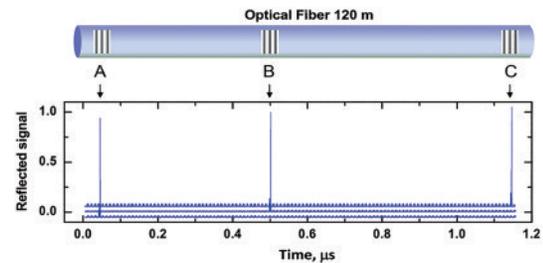
图 24 120 m 光纤中 3 个不同位置(A, B, C)布里渊动态光栅的反射脉冲^[35]

Fig. 24 Reflection pulse of Brillouin dynamic grating at 3 different positions (A, B, C) in 120 m fiber^[35]

将高频的脉冲信号存储到声波场中, 再通过与低频信号相同频率的探测脉冲将声波场中的高频脉冲信号进行还原或压缩, 从而实现了光信号的存储和压缩。2007年, Gauthier 课题组^[36]首次利用 SBS 效应实现了光存储, 即将高频泵浦脉冲视为“数据”脉冲, 将反向传输的低频脉冲视为“写入”脉冲。在光栅写入过程中, “数据”脉冲携带的信息将被存储在声波中, 当通过“写入”脉冲的延迟形式询问该光栅

时,声波中的信息可被检索存储。2013年,Winful^[11]从理论上证明BDG可通过带有频率啁啾的“信号”脉冲和“写入”脉冲在光纤中发生的SBS来创建,当与“写入”脉冲相反的第三啁啾脉冲对光栅进行探测时,可以获得被压缩的信号脉冲,如图25所示。图25(a)为频率啁啾的“信号”脉冲和“写入”脉冲在

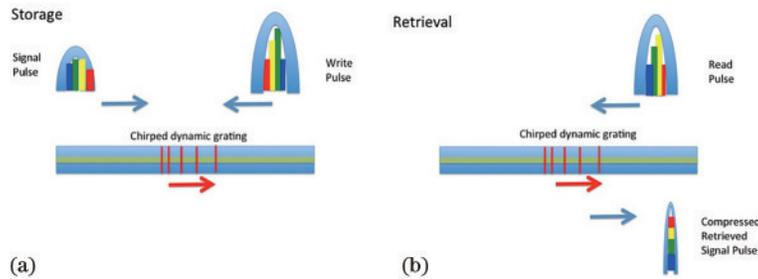


图25 利用SBS效应实现光存储^[11]。(a)通过啁啾BDG存储啁啾信号脉冲;(b)通过相反方向的啁啾“读取”脉冲探测光栅得到被压缩信号脉冲

Fig. 25 Optical storage is realized by using SBS effect^[11]. (a) Chirped BDG is used to store the chirped signal pulse;

5.2.3 全光触发器

全光触发器是具有记忆功能的光逻辑器件,主要是通过正的“设置”信号将输出设置为高电平,再通过正的“复位”信号将输出重置为低电平,从而实现光学开关、全光触发器的存储时间即输出信号的保持时间,是一个重要参数,在利用BDG实现全光触发器的方案中,存储时间取决于动态光栅的长度。2017年,Soto等^[37]在保偏光纤中利用BDG实现了全光触发器,当短脉冲到达BDG时,BDG的输出被置为高状态,一旦输出被切换到高状态,就可使用一个反相的短脉冲进行重置,将响应切换回零,实现触发器的功能。图26所示为基于BDG的全光触发器实现原理。图26(a)中触发器输出经由输入脉冲参数

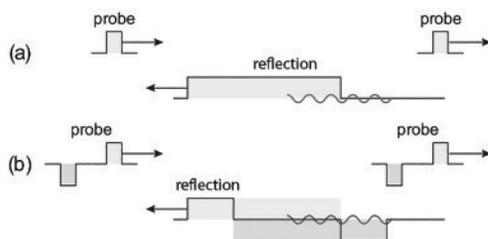


图26 基于BDG的全光触发器^[37]。(a)触发器输出经由输入脉冲参数来设定;(b)通过使用相反相位的第二个探测脉冲,可以将输出切换回低电平

Fig. 26 BDG-based all-optical flip-flop^[37]. (a) Flip-flop output is set by input pulse; (b) output can be switched back to low level by using the second probe pulse in the opposite phase

光纤中发生SBS并产生啁啾BDG的示意图,实现了“信号”脉冲的存储;图25(b)表示通过将“读取”信号输入至光纤中获得被压缩信号脉冲的示意图。2015年,Dong等^[12]再次研究了光存储过程中啁啾脉冲的动态光栅强度和检索效率对脉冲面积的依赖性,发现啁啾调频的存在降低了对脉冲区域的要求。

来设定,这会导致在工作波长下调谐的长BDG的输出产生阶跃响应;图26(b)中通过使用相反相位的第二个探测脉冲,可以将输出切换回低电平。在两个脉冲之间的时间间隔内,输出端保持高电平。

6 结束语

介绍了基于SBS效应的BDG产生原理,对两大类BDG的产生和应用进行了概述及分析比较:一种为不同光纤中的BDG,包括保偏光纤、单模光纤、少模光纤和光子晶体光纤中的BDG;另一种为不同类型的BDG,包括啁啾BDG、相移BDG、混沌BDG和随机BDG。另外,对BDG在分布式光纤传感和全光信号处理方面的应用进行了总结,这些研究和应用推动BDG技术的不断发展。目前已实现的实验装置,受系统光源特性的影响,未能在光纤中得到可以稳定维持的局部BDG,限制了基于BDG的光延迟线等全光器件的性能,难以实现超短时间延迟;另外,迄今尚未有对BDG调制强度的量化指标。未来,BDG系统的性能优化及其应用是一个重要的研究方向,对BDG各项参数(如光栅长度、光纤折射率调制强度、反射谱宽等)的精准调控以及如何有效提高数据采集和处理速度都将成为研究热点。随着研究的进一步深入,BDG技术在分布式光纤传感、全光信号处理、微波光子滤波器、光纤激光器等方面将具有更好的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Scott A, Hazell M. High-efficiency scattering in transient Brillouin-enhanced four-wave mixing [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(8): 1248-1257.
- [2] Song K Y, Hotate K. All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization maintaining fiber [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7004: 70043T.
- [3] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. Characterization of the Brillouin grating spectra in a polarization-maintaining fiber [J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18960-18967.
- [4] Xu Z N, Zhao L J, Chen F F, et al. Temperature and strain sensing mechanism in polarization maintaining fiber based on Brillouin dynamic grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8): 0806001.
徐志钮, 赵丽娟, 陈飞飞, 等. 基于布里渊动态光栅的保偏光纤中温度和应变的传感机制研究 [J]. 光子学报, 2019, 48(8): 0806001.
- [5] Song K Y. Operation of Brillouin dynamic grating in single-mode optical fibers [J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4686-4688.
- [6] Zou W W, Chen J P. All-optical generation of Brillouin dynamic grating based on multiple acoustic modes in a single-mode dispersion-shifted fiber [J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14771-14779.
- [7] Li S P, 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.
- [8] Li A, Hu Q, Chen X, et al. Characterization of distributed modal birefringence in a few-mode fiber based on Brillouin dynamic grating [J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3153-3156.
- [9] Kim Y H, Song K Y. Mapping of intermodal beat length distribution in an elliptical-core two-mode fiber based on Brillouin dynamic grating [J]. Optics Express, 2014, 22(14): 17292-17302.
- [10] Zhang H Y, Yuan Z J, Liu Z Y, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using a polarization-maintaining photonic crystal fiber with stimulated Brillouin scattering [J]. Applied Physics Express, 2017, 10(1): 012501.
- [11] Winful H G. Chirped Brillouin dynamic gratings for storing and compressing light [J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10039-10047.
- [12] 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.
- [13] Quoc Ngo N. Design of an optical temporal integrator based on a phase-shifted fiber Bragg grating in transmission [J]. Optics Letters, 2007, 32(20): 3020-3022.
- [14] Kabakova I V, Corcoran B, Bolger J A, et al. All-optical self-switching in optimized phase-shifted fiber Bragg grating [J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5083-5088.
- [15] Zhang W F, Li W Z, Yao J P. Optical differentiator based on an integrated sidewall phase-shifted Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(23): 2383-2386.
- [16] Li W Z, Li M, Yao J P. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(5): 1287-1296.
- [17] Dong Y K, Zhou D W, Teng L, et al. Phase-shifted Brillouin dynamic gratings using single pump phase-modulation: proof of concept [J]. Optics Express, 2016, 24(10): 11218-11231.
- [18] Liu H, Zhang J Z, Zhang M J. Brillouin scattering light characteristics of chaotic laser in optical fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0406004.
刘慧, 张建忠, 张明江. 混沌光在光纤中的布里渊散射光特性 [J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0406004.
- [19] Li Z P. Generation and optimization of chaotic Brillouin dynamic grating [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018: 21-37.
李铸平. 混沌布里渊动态光栅的产生及优化 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018: 21-37.
- [20] 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.
- [21] Zhang J Z, Li Z P, Zhang M J, et al. Characterization of Brillouin dynamic grating based on chaotic laser [J]. Optics Communications, 2017, 396: 210-215.
- [22] Xu Y P, Gao S, Lu P, et al. Low-noise Brillouin random fiber laser with a random grating-based resonator [J]. Optics Letters, 2016, 41(14): 3197-3200.
- [23] Abdullina S R, Vlasov A A, Lobach I A, et al. Single-frequency Yb-doped fiber laser with distributed

- feedback based on a random FBG[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(7): 075104.
- [24] Xu Y, Zhang L, Gao S, et al. Highly sensitive fiber random-grating-based random laser sensor for ultrasound detection [J]. *Optics Letters*. 2017. 42(7): 1353-1356.
- [25] Song Y Y, Li S C, Zhang J Z, et al. The modeling of random Brillouin dynamic grating [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102034.
- [26] Zou W W, He Z Y, Hotate K. Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1248-1255.
- [27] Zou W W, He Z Y, 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.
- [28] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. 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.
- [29] Song K Y, Yoon H J. High-resolution Brillouin optical time domain analysis based on Brillouin dynamic grating [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(1): 52-54.
- [30] Song K Y, Yoon H J. High sensitivity optical time-domain reflectometry based on Brillouin dynamic grating in polarization maintaining fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 842126.
- [31] Chin S, Primerov N, Thevenaz L. Sub-centimeter spatial resolution in distributed fiber sensing based on dynamic Brillouin grating in optical fibers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 189-194.
- [32] 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.
- [33] Dong Y K, Bao X Y, 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.
- [34] Dong Y K, Zhou D W, Teng L, et al. Principle of Brillouin dynamic grating and its applications in optical fiber sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 075201.
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(7): 075201.
- [35] Thevenaz L, Primerov N, Chin S, et al. Dynamic Brillouin gratings; a new tool in fibers for all-optical signal processing [C] // *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, October 9-13, 2011, Arlington, VA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 12442987.
- [36] Zhu Z M, Gauthier D J, Boyd R W. Stored light in an optical fiber via stimulated Brillouin scattering [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, May 4-9, 2008, San Jose, California United States. Washington, D. C.: Optical Society of America, 2008, QMI: QMI3.
- [37] Soto M A, Denisov A, Angulo-Vinuesa X, et al. All-optical flip-flops based on dynamic Brillouin gratings in fibers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2539-2542.