

# 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究

周子超 王小林\* 粟荣涛 张汉伟 周朴 许晓军

国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

**摘要** 增益光纤中的热效应是限制高功率光纤激光器输出功率的重要因素之一。采用基于分布式温度传感的方法对光纤激光器增益光纤的温度进行测量,有助于对光纤激光器形成保护,并有望对热致模式不稳定(MI)等非线性效应的产生机理提供一种新的认知手段。介绍了目前国内外主要的分布式光纤传感技术,重点介绍了光频域反射法(OFDR)、布里渊光时域分析(BOTDA)、布里渊光频域分析(BOFDA)和布里渊相干域分析(BOCDA)等技术在光纤温度和应力测量方面的应用。最后分析了利用各种分布式传感方案实现高功率光纤激光器温度测量的可行性,为高功率光纤激光器的温度测量提供参考。

**关键词** 光纤光学; 高功率光纤激光器; 温度测量; 光纤传感; 非线性效应

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.080006

## Application of Distributed Fiber Sensing in Fiber Lasers

Zhou Zichao Wang Xiaolin Su Rongtao Zhang Hanwei Zhou Pu Xu Xiaojun

*College of Opto Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China*

**Abstract** Thermal effect in gain fibers is one of the major factors limiting the output power of high power lasers. Measuring the temperature of gain fibers with the distributed temperature sensing method is beneficial to protecting fiber lasers, and may provide a new approach to understand the underlying mechanisms of the mode instability (MI) and other nonlinear effects occurring in fiber lasers. Major technologies on distributed optical fiber sensing are introduced, with more focus on the applications of technologies, such as optical frequency domain reflectometry (OFDR), Brillouin optical time domain analysis (BOTDA), Brillouin optical frequency domain analysis (BOFDA), and Brillouin optical correlation domain analysis (BOCDA), in the measurements of temperature and stress in fiber lasers. Finally, the feasibility of some distributed sensing schemes is analyzed, which provides references for temperature measurement in high power fiber lasers.

**Key words** fiber optics; high power fiber lasers; temperature measurement; fiber sensing; nonlinear effect

**OCIS codes** 060.2370; 190.2640; 290.5825

## 1 引言

近年来,随着高亮度半导体抽运技术、双包层增益光纤技术、功率合束器等技术的进步,高功率光纤激光器迅猛发展。目前,单模光纤激光器的输出功率已经达到了 20 kW<sup>[1]</sup>。在一定的制冷条件下,随着光纤激光器输出功率的提高,增益光纤中的温度也随之迅速升高。由于普通增益光纤涂覆层长时间稳定的许可温度为 80 °C,为了实现长时间的稳定工作,必须对光纤激光器增益光纤的温度进行严格控制。此外,研究发现,

**收稿日期:** 2016-03-14; **收到修改稿日期:** 2016-04-20; **网络出版日期:** 2016-07-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(61505260)、湖南省自然科学基金项目(14JJ3004)

**作者简介:** 周子超(1992—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。

E-mail: zhouzichao@nudt.edu.cn

**导师简介:** 许晓军(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事气动光学、自适应光学和光纤/固体激光器相干合成等方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

\* **通信联系人.** E-mail: chinawxllin@163.com

光纤中的温度分布能够显著影响高功率光纤激光器的性能。增益光纤中的高温会使高功率光纤激光器的稳定性下降,并导致激光器中模式不稳定(MI)现象的发生。相关研究表明,增益光纤中内部温度越高,MI现象越容易产生,低温下则不容易产生MI现象<sup>[2]</sup>。另外,光纤中过高的温度分布会影响其他非线性效应,影响光纤激光器的输出特性。因此,为了保证高功率光纤激光器的稳定输出,避免增益光纤在使用过程中的损伤,对增益光纤中的温度分布进行监测是非常有必要的。目前,对于光纤激光器中增益光纤的温度测量尚无较多研究。本文主要介绍传统分布式光纤传感的基本原理,并根据现有高功率增益光纤温度测量的方法,对比并说明何种传感方式有望用于高功率光纤激光器的温度测量中,以期高功率光纤激光器的温度场测量提供参考,并对MI等非线性效应现象的研究提供一种新的认知手段。

## 2 分布式温度测量的分类

分布式光纤传感技术不仅具有一般光纤传感器精度高的优点,而且可以在沿光纤路径上同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息,在桥梁、油漆罐、高压线路等领域有着广泛的应用前景。目前,分布式光纤传感技术主要是基于光纤中的后向散射来实现传感,如瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射<sup>[3]</sup>。基于后向瑞利散射的全分布式光纤传感技术主要有光时域反射法<sup>[4]</sup>(OTDR)和光频域反射法<sup>[5]</sup>(OFDR)。基于拉曼散射的全分布式光纤传感技术主要有拉曼光时域反射(ROTDR)技术<sup>[6]</sup>和拉曼光频域反射(ROFDR)技术<sup>[7]</sup>。基于布里渊散射的全分布式光纤传感技术主要有布里渊光时域反射(BOTDR)技术<sup>[8]</sup>、布里渊光时域分析(BOTDA)技术<sup>[9]</sup>、布里渊光频域分析(BOFDA)技术<sup>[10]</sup>和布里渊相干域分析(BOCDA)技术<sup>[11]</sup>。其中OTDR技术传感距离长(一般在千米量级),空间分辨率较低(一般在10 m左右)<sup>[12-13]</sup>,适用于测量长距离光纤中的损耗和断点。OFDR技术的传感距离通常不超过100 m,空间分辨率高(可以达到厘米量级甚至是微米量级)<sup>[14-15]</sup>,温度分辨率高,适用于短距离光纤中高空间分辨率的温度测量。ROTDR技术和ROFDR技术的传感距离都较长(几百米至几千米),空间分辨率较低(通常为几十厘米)<sup>[16-18]</sup>。BOTDR技术和BOTDA技术的传感距离长(千米量级),空间分辨率高(可达到厘米量级)<sup>[19-20]</sup>,能够精确测量光纤中的温度和应力。BOFDA技术和BOCDA技术的传感距离较短(一般为几十米至几百米),空间分辨率高(可以达到厘米量级甚至是毫米量级)<sup>[21-23]</sup>,温度分辨率高。表1对比了不同分布式传感方法的优缺点。相比于传统的分布式光纤传感系统,高功率增益光纤中的温度测量具有测量光纤长度相对较短、空间分辨率和温度分辨率要求较高、测量时间要求较短等特点。

表1 不同传感方式的主要特点与应用场合

Table 1 Main features and applications of different sensing methods

Category	Method	Advantage	Disadvantage	Application
Sensing methods based on Rayleigh scattering	OTDR	Long sensing distance	Low spatial resolution	Measuring loss and breakpoint
	OFDR	High spatial resolution, short measuring time	Short sensing distance	Measuring loss, breakpoint, temperature and strain
Sensing methods based on Raman scattering	ROTDR	Long sensing distance	Low spatial resolution	Measuring temperature and strain
	ROFDR			
Sensing methods based on Brillouin scattering	BOTDR	Long sensing distance, high spatial resolution	Long measuring time	Measuring temperature and strain
	BOTDA			
	BOFDA	High spatial resolution	Long measuring time	
	BOCDA	High spatial resolution	Complex system	

## 3 不同传感方式的原理与现状

考虑到高功率增益光纤的温度测量对空间和温度分辨率要求较高,且测量时间要求较短,而OTDR、ROTDR、ROFDR等技术不能够满足上述条件。同时,在基于自发布里渊散射的BOTDR技术中,后向自发布里渊散射光较微弱(其功率比后向瑞利散射光功率低20 dB~30 dB),其信号的检测比较困难。因此,此处主要介绍OFDR、BOTDA、BOFDA、BOCDA技术的原理与现状。

### 3.1 OFDR 技术的原理与现状

#### 3.1.1 OFDR 技术的基本原理

OFDR 技术最初是由德国 Hamburg-Harburg 科技大学的 Eickhoff 等<sup>[5]</sup>于 1981 年提出的,其基本原理如图 1 所示,线性扫频光源输出的连续光被光纤耦合器分为两路。其中一路光波注入到待测光纤中,该路激光在光纤中传播时会不断产生后向瑞利散射光,这些后向瑞利散射光成为信号光通过光纤耦合器耦合到光电探测器中。另一路光束经过固定反射镜反射后作为参考光返回耦合器,同样被耦合到光电探测器中。光电探测器中得到的是参考光和待测后向瑞利散射光的混频信号,将此混频信号输入到频谱仪中,对其进行频谱测量。由于 OFDR 技术中的激光光源为线性扫频光源,故在光纤上不同位置  $x$  处的后向瑞利散射光的光频不同。因此,通过检测探测器上的光频,可以获知光纤上的位置信息,返回的瑞利散射光的振幅与光纤的局部散射因子以及振幅衰减因子成正比。通过在频谱分析仪中进行傅里叶变换,可以同时获知光纤中所有位置的后向散射光信息,这些信息和频谱分析仪中的频率  $\Omega$  直接对应。

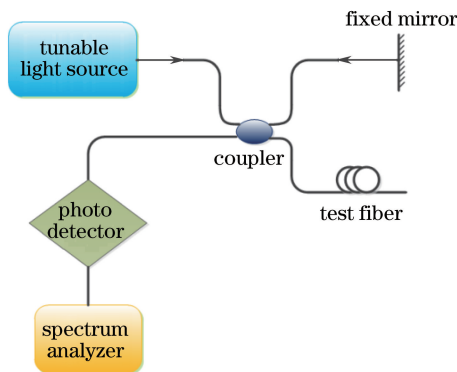


图 1 OFDR 技术的基本原理图

Fig. 1 Schematic diagram of OFDR technology

利用 OFDR 技术进行测温时,可以把待测光纤当作一种连续分布的弱随机周期的布拉格(Bragg)光栅。外界应变、温度的变化会引起 Bragg 光栅光谱的移动,同样,外界应变、温度的变化也会引起待测光纤中瑞利散射光谱的移动。这种瑞利散射光谱的移动可以通过待测瑞利散射光谱(外界施加温度)与本地参考光谱(外界未施加温度)的互相关运算得到,通过计算互相关的峰值位置就可以得到瑞利散射光谱的移动量。瑞利散射光谱的移动量反映了光纤中温度的大小,从而实现了利用 OFDR 技术测温的分布式传感。

#### 3.1.2 OFDR 技术的研究现状

OFDR 技术的主要特点是采用相干探测技术进行探测,具有极高的空间分辨率。受扫频光源相干长度的限制,其最大测量范围通常只有几十米。1998 年,Froggatt 等<sup>[24]</sup>通过利用 OFDR 技术对 1.8 m 长光纤中一段 0.3 m 长的区域所受的应力进行了测量,利用互相关的方法对比了光纤受应力前后瑞利散射信号频谱的偏移,应力分辨率为  $10 \mu\epsilon$ 。2005 年,Soller 等<sup>[15]</sup>利用 OFDR 技术实现了 35 m 长光纤上的 Bragg 光栅(FBG)反射率和损耗点的测量,测量空间分辨率达到了  $22 \mu\text{m}$ 。2006 年,Soller 等<sup>[25]</sup>通过测量后向瑞利散射光谱的偏移,实现了 20 m 长光纤局部温度的测量,测量的空间分辨率达到了 2 mm,温度分辨率达到了  $1^\circ\text{C}$ 。2006 年,Froggatt 等<sup>[26]</sup>提出通过同时测量后向瑞利散射光谱的自相关函数和互相关函数来实现保偏光纤中温度和应力变化的区分。2009 年,Kreger 等<sup>[27]</sup>测量了一段长为 70 m 的塑料光纤上的温度变化,空间分辨率为厘米量级,温度分辨率为  $1^\circ\text{C}$ 。2014 年,Song 等<sup>[28]</sup>利用 OFDR 技术实现了 300 m 长光纤上的温度测量,测量空间分辨率为 7 cm,温度分辨率达到了  $0.7^\circ\text{C}$ 。

目前,国外已有相关的 OFDR 产品面世。2009 年,Luna 公司推出分布式传感系统产品,其最大测量范围为 70 m,空间分辨率达到了 0.1 cm,温度分辨率为  $0.1^\circ\text{C}$ 。2013 年,Luna 公司推出 ODiSI A 产品,其最大测量范围为 50 m,空间分辨率达到了亚厘米量级,温度分辨率为  $0.2^\circ\text{C}$ 。2014 年,Luna 公司推出光背向反射仪(OBR)4600 产品,其最大测量范围为 70 m,空间分辨率达到了  $20 \mu\text{m}$ ,温度分辨率为  $0.1^\circ\text{C}$ 。

2015 年,德国耶拿大学的 Beier 等<sup>[29]</sup>利用 Luna 公司的 OBR 产品测量了高功率光纤放大器增益光纤中

的温度分布,测量装置如图 2 所示,该系统中种子光波长为 1070 nm, OBR 发出的探测光波长为 1.3  $\mu\text{m}$ , 两束光波通过波分复用器共同耦合进掺镱增益光纤中。探测光波在增益光纤中会产生后向瑞利散射,后向瑞利散射光再次通过波分复用器后进入到 OBR 测量仪器中,通过测量后向瑞利散射光波并利用 OFDR 技术,便可得出增益光纤中温度随位置的分布。由于 OBR 中所用的探测光与激光器中抽运光和信号光的波长互不相同,因此三者之间互不影响,OBR 的温度测量不会影响激光器的正常运行。利用该方案测得的增益光纤中的温度分布如图 3 所示。从图 3 中可以看出,随着抽运功率的提高,光纤中的平均温度不断升高。但测量结果显示光纤中某些点的温度会随着抽运功率的提高而急剧升高,远远高于光纤中的平均温度,这与实际经验不符。因此该测量结果的精度和空间分辨率还有待进一步验证。2016 年, Walbam 等<sup>[30-31]</sup>又利用 OBR 温度测量仪器分别对高功率掺铒和掺镱光纤激光放大器中的增益光纤进行了温度测量。通过分析光纤中的温度特性发现,由于掺铒光纤激光放大器中的量子亏损较大<sup>[30]</sup>,其增益光纤中的热效应更加严重,同时放大器中信号光功率的提高可以降低掺杂光纤中的上能级粒子数目,降低量子亏损效应,在一定程度上缓解增益光纤中的热效应。通过对纤芯和内包层直径分别为 25  $\mu\text{m}$  和 400  $\mu\text{m}$  的掺镱增益光纤进行温度测量发现<sup>[31]</sup>, MI 现象的产生对光纤中的温度分布几乎没有影响。但该实验中增益光纤温度测量的周期为几秒,而 MI 现象中光斑变化的周期为微秒量级。因此,该实验中的温度测量结果只能反映光纤中的时间平均温度,不能探究光纤中 MI 现象产生时的瞬态温度变化。综上所述,OFDR 技术由于空间分辨率极高、测温时间相对较短,比较适用于高功率光纤激光器中增益光纤的温度测量。但由于信号光、抽运光及非线性效应等因素对后向瑞利散射光的影响,其测量精度还有待进一步验证。若将测温结果用于分析光纤中 MI 等现象产生的内在机理,还需要大大缩短 OFDR 技术的测温时间,使其小于 MI 现象中光斑变化的周期。

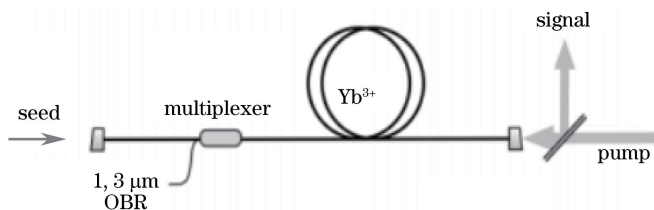


图 2 基于 OBR 测量光纤中温度的原理图<sup>[29]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of fiber temperature measurement based on OBR<sup>[29]</sup>

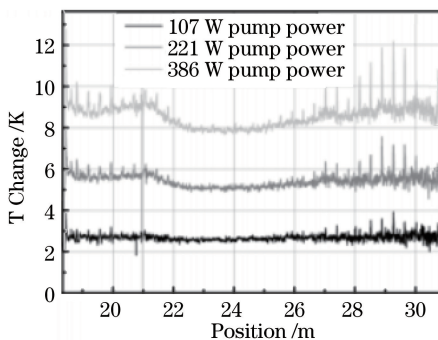


图 3 光纤中的温度分布(环境温度为 22  $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[29]</sup>

Fig. 3 Temperature distribution in optical fibers when the environment temperature is 22  $^{\circ}\text{C}$  <sup>[29]</sup>

## 3.2 BOTDA 技术

### 3.2.1 BOTDA 技术的基本原理

1989 年,日本科学家 Horiguchi 等<sup>[32]</sup>提出利用光纤中的受激布里渊散射机制来进行传感的 BOTDA 技术。BOTDA 传感系统的基本结构如图 4 所示,激光器 1 输出的抽运脉冲光经耦合器输入到传感光纤的一端。激光器 2 输出的连续探测光频率比抽运脉冲光的频率低约一个布里渊频移,称为斯托克斯光。通过检测单元测量斯托克斯光功率的变化并利用 OTDR 技术得到光纤沿线的布里渊增益谱,布里渊增益谱的中心频率和强度与光纤沿线的温度和应变有对应关系,从而实现了对光纤应变和温度的全分布式传感<sup>[33]</sup>。

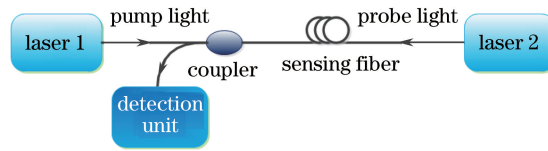


图4 BOTDA技术的基本原理图

Fig. 4 Schematic diagram of BOTDA technology

在基于布里渊散射的光纤传感技术中,空间分辨率和温度分辨率相互制约;为获得高的空间分辨率,传感器必须采用窄脉宽的探测脉冲光,窄脉宽的探测脉冲光产生宽的布里渊增益谱,这会导致布里渊频移测量精度的降低;并且窄脉宽的探测脉冲光意味着抽运光、探测光和声子的相互作用的空间长度变短,因而得到的布里渊信号变弱,探测误差变大,从而降低了应变和温度的分辨率。为了克服以上困难,研究人员提出了一种基于差分脉冲对的 BOTDA(DPP-BOTDA)技术,这种技术在不影响温度分辨率的情况下实现了厘米量级的空间分辨率<sup>[9]</sup>。

DPP-BOTDA 传感系统采用一对脉宽相差几纳秒的光脉冲作为探测光来获得传感光纤的差分布里渊增益谱。这对探测脉冲光在传感光纤中分别与抽运光相互作用,得到两组时域布里渊信号,此两组时域布里渊信号相减,在无应变和温度变化的区域内,布里渊信号相减后发生抵消;在发生应变与温度变化处的区域内,布里渊信号相减后不抵消,最终得到的是这对探测光脉冲在脉宽差内的差分布里渊信号。因此 DPP-BOTDA 传感系统的空间分辨率与探测脉冲对的宽度差有关,从而实现了在不影响温度分辨率的情况下系统空间分辨率的大大提高。

### 3.2.2 BOTDA 技术的研究现状

渥太华大学的 Xiaoyi Bao 实验组<sup>[9]</sup>于 2008 年实现了基于 DPP-BOTDA 技术的全分布式光纤传感。实验中测试的光纤长度为 1 km,其中有两个间隔 1 m、各自长度为 0.5 m 的应力变化区,其应力变化大小分别为 2000  $\mu\epsilon$  和 3000  $\mu\epsilon$ 。实验所达到的空间分辨率小于 0.2 m,传感长度为 1 km,布里渊频移的分辨率为 3 MHz,即温度分辨率为 2~3  $^{\circ}\text{C}$ 。

2010 年,梁浩等<sup>[34]</sup>利用脉宽为 60/55 ns 的脉冲对对光纤进行探测,最大测量范围为 50 km,空间分辨率为 0.5 m,布里渊频移的分辨率达到了 0.7 MHz,相当于应力分辨率达到了 12  $\mu\epsilon$ ,温度分辨率为 0.7  $^{\circ}\text{C}$ 。2011 年, Dong 等<sup>[19]</sup>利用脉宽为 8/8.2 ns、脉冲下降时间为 150 ps 的脉冲对实现了长为 2 km 光纤上的温度测量,其空间分辨率为 2 cm,温度分辨率达到了 2  $^{\circ}\text{C}$ 。

2010 年,Jauregui 等<sup>[35]</sup>利用 BOTDA 方法测量了光纤激光器增益光纤中的温度分布。在该实验中,可调谐光源发出的 1.55  $\mu\text{m}$  光波分为两路,分别作为连续探针光和脉冲抽运光(脉冲宽度为 30 ns)。探针光被掺铒光纤放大器(EDFA)放大后输入到增益光纤中,通过检测探针光的频移和强度,即可求得增益光纤中不同位置处的温度。掺铒光纤激光器的抽运光波长为 915 nm,信号光波长为 1.09  $\mu\text{m}$ 。激光器的波长和探针光的波长互不相同,因此利用该方案对增益光纤进行温度探测不影响激光器的正常运转。但该方案中所用的测量脉冲的脉宽为 30 ns,对应的理论空间分辨率为 3 m,由此可见该种方法的空间分辨率还有待提高。利用 BOTDA 方法测量高功率光纤激光器中增益光纤温度分布的理论实验有待进一步的研究。

## 3.3 BOFDA 技术

### 3.3.1 BOFDA 技术的基本原理

1996 年,德国科学家 Garus 等<sup>[36]</sup>提出了一种基于布里渊频域分析的光纤传感技术(BOFDA 技术)。相对于布里渊时域分析技术,布里渊频域分析技术具有高空间分辨率、低探测光功率的优点。BOFDA 技术的实质是利用基于测量光纤的传输函数实现测量点定位的一种传感方法。这个传输函数把探测光、抽运光的复振幅与光纤的几何长度相互关联起来,通过计算光纤的冲击响应函数确定光纤沿线的温度和应变信息。

BOFDA 传感系统的基本结构如图 5 所示,窄线宽抽运激光器产生的连续抽运光被耦合到传感光纤的一端,窄线宽探测激光器产生的连续探测光经电光调制器(EOM)后被耦合到传感光纤的另一端,探测光的频率低于抽运光的频率低。利用 EOM 对探测光进行振幅调制,调制角频率为  $\omega_m$ 。对于每一个调制频率  $\omega_m$ ,光纤末端( $z=L$ )的探测光和抽运光的强度由光电探测器进行探测,光电探测器探测到的信号输入到网

络分析仪中进行处理,得到传感光纤的基带传输函数,然后对该基带传输函数进行傅里叶逆变换(IFFT),对于线性系统,这一傅里叶逆变换的结果可近似为传感光纤的脉冲响应函数  $h(t)$ ,它包含了光纤不同位置处的温度和应变信息。

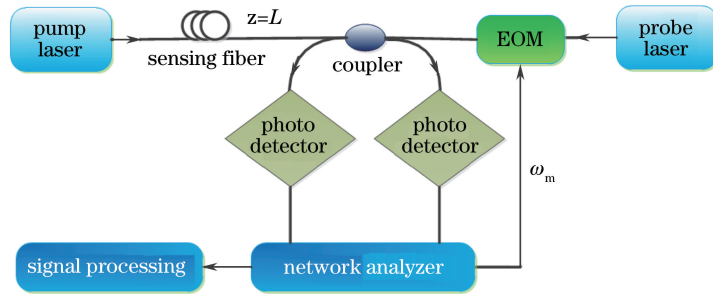


图 5 BOFDA 传感系统的基本结构图

Fig. 5 Schematic diagram of BOFDA sensing system

### 3.3.2 BOFDA 技术的研究现状

2011年, Bernini 等<sup>[22]</sup>利用 BOFDA 技术测量了一段长度为 5.5 m 的光纤上的温度和应力分布。如图 6 所示,从激光光源输出的偏振光经过耦合器后分为两束,分别作为抽运光和信号光。信号光经过电光调制器(IM1)和 FBG 后,光频频移约为 10 GHz。抽运光被电光调制器(IM2)以频率  $f_m$  进行振幅调制。经过 EDFA 放大后,抽运光和信号光传输到光电探测器和网络分析仪中进行探测。该实验中基带传输函数的频率变化范围为 450~980 MHz,步长为 2 MHz,能够实现 29 mm 的空间分辨率。但该种方法的测量时间比较长,在实验中,对于几米量级的光纤,其测量时间达到了 1 min。如果测量长为 1 km 的光纤,要想达到同样的空间分辨率,其测量时间可能需要 1 h。目前,利用 BOFDA 方法进行光纤激光器的增益光纤温度测量的研究尚未见报道。BOFDA 方法的空间分辨率高、温度分辨率高,但该方案的测量装置比较复杂,且测温时间较长,若将其应用于光纤激光器增益光纤的温度测量中,还需要进一步的研究。

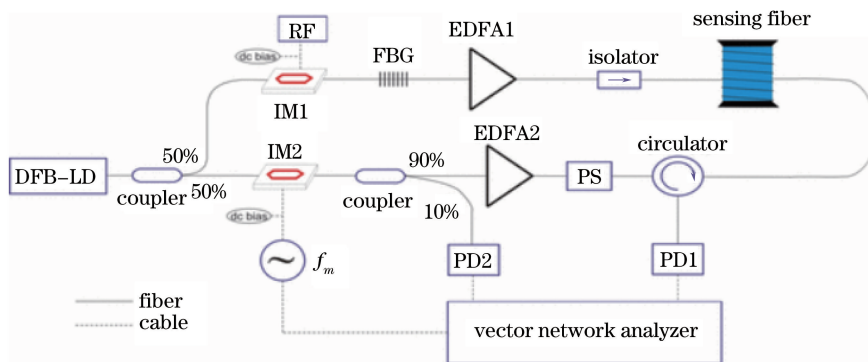


图 6 BOFDA 系统的实验装置图<sup>[22]</sup>

Fig. 6 Experimental setup of BOFDA system<sup>[22]</sup>

## 3.4 BOCDA 技术

### 3.4.1 BOCDA 技术的基本原理

BOCDA 方法是东京大学的 Kazuo Hotate 实验组于 1999 年提出的,该方法基于抽运光和探针光的相干特性共同激发光纤上某一个特定位置的受激布里渊散射<sup>[11]</sup>。在 BOCDA 技术中,对抽运光和探针光进行相同的频率调制(比如正弦波调制),受激布里渊散射只在两光波相关峰位置处发生。通过改变调制频率(FM),可以改变光纤中相关峰的位置,从而实现光纤中布里渊增益谱的分布式测量。在该系统中,测量范围由相关峰的空间间隔决定,空间分辨率由相关峰的宽度决定。

图 7 所示是一个 BOCDA 系统<sup>[37]</sup>。在该系统中,光源为一个波长为 1.5  $\mu\text{m}$  的分布反馈式激光二极管。通过调制激光器的输入电流来调制光源的光频,使光频呈现正弦式的变化。从光源输出的光进入耦合器后被分为两路:在一路中,待测光纤前的单边带调制器(SSBM)将光波频率下移一个布里渊频移,并作为探针

光注入到待测光纤的一端。在另一路中,光波被 EDFA 放大,并作为抽运光注入到待测光纤的另一端。在待测光纤中的相关峰位置处发生受激布里渊散射,在光纤中的其他位置处,抽运光和探针光的频率差不断发生波动,受激布里渊散射被抑制。基于此原理实现了连续光波在光纤中不同位置处的受激布里渊散射。通过改变抽运光和探针光的频率差,可以得到不同位置处(相关峰位置处)的布里渊增益谱(洛伦兹线型),读取增益谱中的峰值频率,即可得到该测量位置处的布里渊频移。

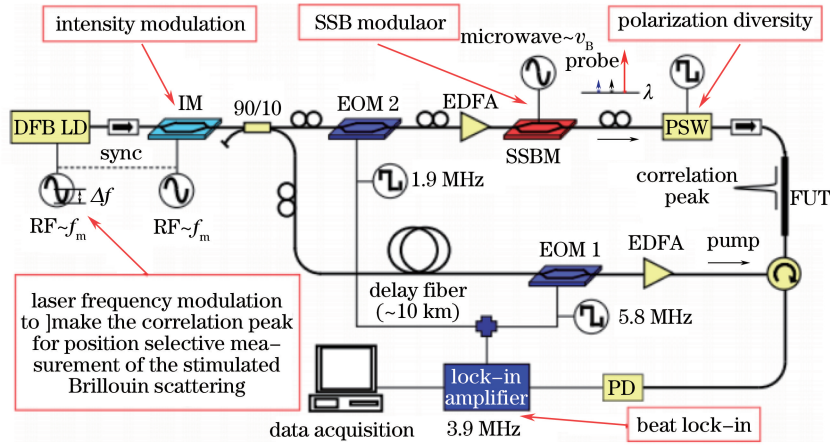


图 7 BOCDA 系统的原理图<sup>[37]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of BOCDA system<sup>[37]</sup>

### 3.4.2 BOCDA 技术的研究现状

2002 年, Kazuo Hotate 课题组测量了绕在一直径为 14.7 cm 的圆柱体上长为 1.5 m 光纤上的应力分布,其空间分辨率达到了 1 cm<sup>[38]</sup>。2007 年, Kazuo Hotate 课题组提出将 BOCDA 系统的光源进行强度调制以抑制背景噪声,实现了 1 km 长光纤上的压力测量,空间分辨率为 30 cm<sup>[39]</sup>。2012 年, Jeong 等<sup>[40]</sup>提出对抽运光进行相位调制来抑制 BOCDA 系统中输出增益谱的背景噪声,实现了 50 m 长光纤上的压力测量,空间分辨率为 10 cm。

在 BOCDA 技术中,要提高空间分辨率,就要增大调制频率的幅度。但当调制频率的幅度过大时,探针光的光谱和抽运光的光谱会发生重叠。为了解决该问题, Kazuo Hotate 课题组于 2006 年提出将抽运光和探针光在不同频率处同时进行拍频锁定探测的方案<sup>[41]</sup>,该方案成功实现了 1.6 mm 的空间分辨率,其理论最大测量范围为 5.3 m。这是目前用 BOCDA 方法得到的最高空间分辨率,为了保证输出信号的信噪比,此次测量所用时间较长,采样频率为 0.1 Hz。

BOCDA 系统的测量时间主要受微波频率的改变速率限制。2003 年, Kazuo Hotate 课题组测量了光纤上一段长为 5 cm 的应力振动,单点的最大采样速率为 8.8 Hz,应力分辨率为 38  $\mu\epsilon$ <sup>[42]</sup>。为了提高 BOCDA 系统的采样速率,2005 年, Kazuo Hotate 课题组提出了一种基于时分复用的抽运光和探针光的产生机制<sup>[43]</sup>,基于此原理,2007 年, Kazuo Hotate 课题组在一段长为 20 m 的光纤上实现了单点最大采样速率为 1 kHz 的应力测量,成功测量了光纤上频率为 200 kHz 的应力变化,其空间分辨率为 10 cm,且该系统可以实现任意空间位置处温度和应力的测量<sup>[44]</sup>。但该系统在测量不同位置处的温度和应力时,其采样速率会大大降低,每秒钟最多只能对几个点进行采样。2012 年, Kazuo Hotate 课题组进一步提高了基于时分复用的 BOCDA 系统的性能,实现了任意不同位置处最大采样速率为 200 Hz 的应力测量<sup>[45]</sup>。利用 BOCDA 技术对光纤温度进行传感的系统空间分辨率较高,但该类系统过于复杂。若将该技术应用于高功率光纤激光器增益光纤的温度测量中,可能会使整个系统过于庞大而难于调试。因此,利用该技术对高功率光纤激光系统进行温度监测还有待进一步的研究与探索。

## 4 对比与分析

OFDR 技术是基于光纤中的后向瑞利散射对待测光纤进行分布式传感,和 OTDR 技术相比,其空间分

分辨率得到大大提高。因此,该技术适用于对空间分辨率要求较高的温度测量系统。Froggat 等<sup>[24,26]</sup>利用此技术对光纤的温度和应力测量进行了一系列的研究,取得了丰硕的研究成果,并制造出高温分辨率、高空间分辨率的测温仪器。但由于受到光源相干长度的限制,利用 OFDR 技术对光纤进行传感的最大传感距离较短,通常只有几十米。为了增加利用 OFDR 技术测温的最大传感距离,2014 年,渥太华大学的 Xiaoyi Bao 实验组对传统 OFDR 技术作了改进,并测量了光纤中的温度和应力分布,取得了良好的效果<sup>[28]</sup>。

和 OFDR 技术不同的是,BOTDA 技术是基于光纤中的布里渊散射来测量光纤中的温度分布。由于布里渊增益谱的强度和频移都与光纤中的温度和应力相关,因此该方法测温的温度分辨率较高,但由于受到声子寿命的限制,该方法的空间分辨率不易提高。Xiaoyi Bao 实验组提出了 DPP-BOTDA 技术,将该方法的空间分辨率提高到了厘米量级<sup>[9]</sup>,但将其应用到增益光纤的温度测量中还有待进一步研究。

和 BOTDA 技术相比,BOFDA 技术不受声子寿命的限制,并且用强度调制的连续光代替脉冲光,因此具有高空间分辨率和低探测光功率的优点。但 BOFDA 技术的信号处理比较复杂,且测量时间较长,因此目前该方案还不太适用于高功率光纤激光器增益光纤中的温度测量。

通过对激光器进行频率调制,BOCDA 技术同样避免了声子寿命的限制,其空间分辨率和温度分辨率都较高,同样避免了声子寿命的限制,其空间分辨率和温度分辨率都较高。但将其用于高功率光纤激光器增益光纤的温度测量中,其系统复杂性可能会比较高。

综上所述,分布式光纤温度测量的方法有多种,但适用于高功率光纤激光器增益光纤温度测量的方法还有待进一步研究。从目前的研究进展来看,以美国 Luna 公司为代表的基于 OFDR 技术的测温方法较为成熟,其空间分辨率极高,测量时间相对较短,且已有性能良好的相关产品问世,比较适用于高功率光纤激光器增益光纤中的温度测量。也有相关文献<sup>[29-31]</sup>进行了基于 OBR 产品测量光纤激光放大器增益光纤中温度分布的实验,但该类实验还有待进一步完善与发展。

## 5 结束语

首先介绍了增益光纤中的高温分布对高功率激光器输出功率的影响,指出高功率光纤激光器中增益光纤温度监测的意义与作用。然后从分布式光纤传感的角度出发,对分布式光纤传感技术进行了分类与介绍。接着根据不同分布式光纤传感技术的优缺点,重点介绍了几种有可能用于高功率光纤激光器中增益光纤温度监测的分布式传感技术。最后,对比分析了 OFDR、BOTDA、BOFDA、BOCDA 技术用于高功率光纤激光器中增益光纤温度监测的可行性与优缺点,为高功率光纤激光器中的温度测量提供了参考。

## 参 考 文 献

- 1 Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- 2 Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11407-11422.
- 3 Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.
- 4 Aoyama K I, Nakagawa K, Itoh T. Optical time domain reflectometry in a single-mode fiber [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(6): 862-868.
- 5 Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber [J]. Applied Physics Letters, 1981, 39(9): 693-695.
- 6 Zhang Z, Liu H, Guo N, *et al.* Optimum designs of 30-km distributed optical fiber Raman photon temperature sensors and measurement network [C]. SPIE, 2002, 4920: 268-273.
- 7 Geng J P, Jin R H, Xu J D, *et al.* An improved model for the fully distributed temperature single-mode fibre optic sensor based on Raman optical frequency-domain reflectometry [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2004, 6(10): 932-936.
- 8 Weng Y, Ip E, Pan Z, *et al.* Single-end simultaneous temperature and strain sensing techniques based on Brillouin optical time domain reflectometry in few-mode fibers [J]. Optics Express, 2015, 23(7): 9024-9039.



- 9 Li W H, Bao X Y, Li Y, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21616-21625.
- 10 Garus D, Gogolla T, Krebber K, *et al.* Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(4): 654-662.
- 11 Hotate K, Hasegawa T. Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2000, 83(3): 405-412.
- 12 Zhang Z, Bao X Y. Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of polarization-OTDR system[J]. *Opt Express*, 2008, 16(14): 10240-10247.
- 13 Wu H, Qian Y, Li H, *et al.* Safety monitoring of long distance power transmission cables and oil pipelines with OTDR technology[C]. *CLEO: Applications and Technology*, 2015: ATu1M.4.
- 14 Kreger S T, Sang A K, Gifford D K, *et al.* Distributed strain and temperature sensing in plastic optical fiber using Rayleigh scatter[C]. *SPIE*, 2009, 7316: 73160A.
- 15 Soller B, Gifford D, Wolfe M S, *et al.* High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 666-674.
- 16 Belal M, Cho Y T, Ibsen M, *et al.* A temperature-compensated high spatial resolution distributed strain sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(1): 15204-15208.
- 17 元秀华, 胡 静, 张传汉. ROFDR 分布式光纤体表温度场监测与麻醉深度研究[C]. *中国光学学会 2006 年学术大会论文摘要集*, 2006: 59.
- 18 王武芳. 基于 ROFDR 的分布式光纤测温系统模型分析[J]. *科技资讯*, 2013, (5): 12-13.
- 19 Dong Y, Zhang H, Chen L, *et al.* 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9): 1229-1235.
- 20 Bernini R, Minardo A, Zeni L. Vectorial dislocation monitoring of pipelines by use of Brillouin-based fiber-optics sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(1): 015006.
- 21 Minardo A, Testa G, Zeni L, *et al.* Theoretical and experimental analysis of Brillouin scattering in single-mode optical fiber excited by an intensity-and phase-modulated pump[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(2): 193-200.
- 22 Bernini R, Minardo A, Zeni L. Distributed sensing at centimeter-scale spatial resolution by BOFDA: Measurements and signal processing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(1): 48-56.
- 23 Elooz D, Antman Y, Levanon N, *et al.* High-resolution long-reach distributed Brillouin sensing based on combined time-domain and correlation-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6453-6463.
- 24 Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735-1740.
- 25 Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, *et al.* Measurement of localized heating in fiber optic components with millimeter spatial resolution[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2006: OFN3.
- 26 Froggatt M E, Gifford D K, Kreger S, *et al.* Distributed strain and temperature discrimination in unaltered polarization maintaining fiber[C]. *Optical Fiber Sensors*, 2006: ThC5.
- 27 Kreger S T, Sang A K, Gifford D K, *et al.* Distributed strain and temperature sensing in plastic optical fiber using Rayleigh scatter[C]. *SPIE*, 2009, 7316: 73160A.
- 28 Song J, Li W H, Lu P, *et al.* Long-range high spatial resolution distributed temperature and strain sensing based on optical frequency-domain reflectometry[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(3): 1-8.
- 29 Beier F, Heinzig M, Haarlamert N, *et al.* *In situ* temperature measurement in high power fiber amplifiers[C]. *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2015: CJ\_10\_6.
- 30 Walbaum T, Heinzig M, Beier F, *et al.* Spatially resolved measurement of the core temperature in a high-power thulium fiber system[C]. *SPIE*, 2016, 9728: 97280P.
- 31 Beier F, Heinzig M, Sattler B, *et al.* Temperature measurements in an ytterbium fiber amplifier up to the mode instability threshold[C]. *SPIE*, 2016, 9728: 97282P.
- 32 Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-Non destructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using brillouin interaction: Theory[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(8): 1170-1176.
- 33 Bao X, Webb D J, Jackson D A. 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber[J]. *Optics*

- Letters, 1993, 18(7): 552-554.
- 34 Liang H, Li W, Linze N, *et al.* High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1503-1505.
- 35 Jauregui C, Richardson D J, Nilsson J, *et al.* *In situ* thermal/Brillouin characterization of a high-power fiber laser based on Brillouin optical time domain analysis[C]. Frontiers in Optics, 2008: FTuG7.
- 36 Garus D, Krebber K, Schliep F, *et al.* Distributed sensing technique based on Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis[J]. Optics Letters, 1996, 21(17): 1402-1404.
- 37 Hotate K. Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 700-719.
- 38 Tanaka M, Hotate K. Application of correlation-based continuous-wave technique for fiber Brillouin sensing to measurement of strain distribution on a small size material[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(5): 675-677.
- 39 Song K Y, He Z, Hotate K. Effects of intensity modulation of light source on Brillouin optical correlation domain analysis [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(5): 1238-1246.
- 40 Jeong J H, Lee K, Song K Y, *et al.* Differential measurement scheme for Brillouin optical correlation domain analysis [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27094-27101.
- 41 Song K Y, He Z, Hotate K. Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis[J]. Optics Letters, 2006, 31(17): 2526-2528.
- 42 Hotate K, Ong S S L. Distributed dynamic strain measurement using a correlation-based Brillouin sensing system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(2): 272-274.
- 43 Hotate K, Yamauchi T. Fiber-optic distributed strain sensing system by Brillouin optical correlation domain analysis with a simple and accurate time-division pump-probe generation scheme [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44 (7L): L1030.
- 44 Song K Y, Hotate K. Distributed fiber strain sensor with 1-kHz sampling rate based on Brillouin optical correlation domain analysis[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 23(19): 1928-1930.
- 45 Hotate K, Numasawa M, Kishi M, *et al.* High speed random accessibility of Brillouin optical correlation domain analysis with time division pump-probe generation scheme[C]. SPIE, 2012, 8351: 83510W.