

文章编号: 0258-7025(2010)03-0757-06

基于正交偏振控制的布里渊光时域分析长距离 分布式光纤传感器

宋牟平 鲍 翀 叶险峰

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 对于普通单模光纤的布里渊散射光,其频移是温度或应变的函数,因此通过检测光纤散射光信号的布里渊频移率,即可得到沿光纤一维分布的温度或应变。布里渊光时域分析(BOTDA)仪适合于长距离分布式传感,但存在受激布里渊散射信号的偏振相关性问题,会造成探测信号随偏振状态的随机波动,因此难以得到稳定的布里渊光频移信息。采用正交偏振控制对参与受激布里渊散射的激励和探测光信号进行偏振处理,抑制了受激布里渊散射的偏振相关性,通过检测探测光信号得到了布里渊散射光频移。最后实现了 25 km 普通单模光纤的分布式传感,在 5 m 空间分辨率下分别达到 2 °C 的温度分辨率和 30 $\mu\epsilon$ 应变分辨率。

关键词 传感器;布里渊光时域分析;正交偏振控制;长距离

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0757

Brillouin Optical Time-Domain Analyzer Based on Orthogonal Polarization Control for Long-Distance Distributed Optical-Fiber Sensors

Song Muping Bao Chong Ye Xianfeng

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract For the standard single-mode optical-fiber, the frequency shift of Brillouin scattering light is the function of the temperature or strain. So, the temperature or strain of the optical-fiber can be obtained, when Brillouin frequency shift is able to be detected. Brillouin optical time-domain analyzer (BOTDA) is suitable for long-distance distributed sensing, but the stimulated Brillouin scattering is polarization related, which makes it hard to stably detect the Brillouin optical frequency shift. A method named with the orthogonal polarization control is adopted to reduce the effect of the optical-polarization-related problem. A laboratorial system of 25 km distributed Brillouin optical time-domain analyzer is achieved, with 2 °C in temperature resolution, 30 $\mu\epsilon$ in strain resolution, and 5 m in spatial resolution.

Key words sensors; Brillouin optical time domain analyzer; orthogonal polarization control; long-distance

1 引 言

光纤传感器^[1~5]具有无辐射干扰、抗电磁干扰性好、化学稳定性好等优点,受到越来越多的重视。其中分布式光纤传感器(DOFS)^[3~5]不仅具有一般光纤传感器的优点,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。长

距离 DOFS 主要有:拉曼(Raman)散射 DOFS 和布里渊(Brillouin)散射 DOFS 等。拉曼散射 DOFS^[4,5]利用的是光纤中的自发拉曼散射光,较布里渊散射信号约低一个数量级。布里渊散射 DOFS^[6,7]检测来自传感光纤的布里渊散射光^[8~10]的频移和强度,可得到沿光纤分布的温度或应变。

收稿日期: 2009-04-15; 收到修改稿日期: 2009-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(60507002)资助课题。

作者简介: 宋牟平(1971—),男,博士,副教授,主要从事新型光子器件、光纤通信/传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

工作于 $1.55 \mu\text{m}$ 波长附近的布里渊散射 DOFS, 光信号受到的衰减和色散较小, 且布里渊散射作用强于拉曼散射, 从而使得布里渊散射 DOFS 适合于长距离 (大于 20 km) 分布式传感。

根据光信号处理结构和布里渊散射作用机制的不同, 布里渊散射 DOFS 有布里渊光时域反射计 (BOTDR)^[6] 和布里渊光时域分析 (BOTDA) DOFS^[7] 两种。相对于基于自发布里渊散射的 BOTDR, 基于受激布里渊散射的 BOTDA, 具有检测信号强的优点, 更具有长距离传感的能力。但由于受激布里渊散射的偏振相关性, 长距离布里渊散射分布式光纤传感器具有很强的偏振相关信号衰弱^[11,12], 距离越长偏振影响越严重。在以前实现 BOTDR 系统^[13], BOTDA 系统^[14] 和 BOTDA 偏振相关性理论研究^[12] 的基础上, 本文在实验上实现了基于正交偏振控制的 25 km 普通单模光纤 BOTDA。

2 原理和系统

2.1 传感原理

BOTDA 结构的布里渊散射 DOFS 利用的是光纤中的受激布里渊散射, 受激布里渊散射^[15] 是激励光和探测光通过声波进行的非线性相互作用, 其作用表现为光纤的布里渊散射增益, 布里渊散射增益取决于激励光与探测光之间的频差和光纤的布里渊频移, 当激励光和探测光之间的频差与布里渊频移一致时, 受激布里渊散射作用最强, 探测光功率变化最大。

布里渊频移 ν_B 是温度和应变的函数, 和温度 (T)、应变 (ϵ) 的关系^[9,10] 为

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0)[1 + C_\epsilon \epsilon], \quad (1)$$

$$\nu_B(T) = \nu_B(T_r)[1 + C_T(T - T_r)], \quad (2)$$

式中 T_r 是参考温度, $C_\epsilon = 4.6$, $C_T = 9.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 分别是应变和温度的比例系数。对于 $T = 300 \text{ K}$, 光波长工作在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 附近的普通单模光纤, 布里渊频移变化为

$$\delta\nu_B = C_\epsilon \delta\epsilon + C_T \delta T, \quad (3)$$

式中 $C_\epsilon = 0.0483 \pm 0.0004 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ 为应变频移系数, $C_T = 1.10 \pm 0.02 \text{ MHz/K}$ 为温度频移系数。

因此, 在布里渊光时域分析分布式光纤传感器中, 通过光时域分析方式^[7,14], 即两束相向传输的脉冲激励光和直流探测光之间的受激布里渊散射, 检测探测光可得到传感光纤的布里渊散射增益, 再由布里渊散射增益大小的分布可得到传感光纤的布里

渊频移, 最后根据频移和传感量的关系计算得到沿光纤的温度或应变分布。

2.2 传感系统

在 BOTDA 结构的布里渊散射 DOFS 中, 一个关键是如何得到可控光频差的直流探测光和脉冲激励光^[14], 而且受布里渊散射的制约, 两激光必须是窄带光源。目前一般采用温控 Nd:YAG 激光器产生所需的频移光^[7], 但 Nd:YAG 激光器的光频移难以快速调节且体积较大, 不易成为实用的传感器。这里采用单一的分布反馈式激光器 (DFB-LD, 线宽小于 1 MHz) 作为光源, 应用微波电光调制 (EOM)^[14] 产生可控光频移的直流探测光 (probe light)。

图 1 是基于微波电光调制的 BOTDA 实验系统。各部分光信号如下: 声光调制 (AOM) 产生的脉冲激励光 (pump light), 其光频率为 $\nu_P + \nu_A$ (ν_A 为声光调制器的多普勒频移); 探测光由于微波电光调制产生频移 ν_{LO} , 其光频率为 $\nu_P - \nu_{LO}$ (利用下边带); 两束光在传感光纤中相向传输, 当探测光和激励光之间的频差 ($\nu_{LO} + \nu_A$) 与某处光纤的布里渊频移 ν_B 一致时, 激励光与探测光的受激布里渊散射作用最大, 探测光会受到最大的放大或衰减。再通过变化频移 ν_{LO} 和检测探测光功率信号, 可得到传感光纤各处的布里渊散射频谱 (即探测光功率随光频差的分布), 从而得到布里渊频移, 由布里渊频移与温度或应变的关系式 (1)~(3) 可计算出分布传感量。图 1 中的两个偏振控制器 (PC) 用于下述的正交偏振控制, 以抑制受激布里渊散射的偏振相关性。

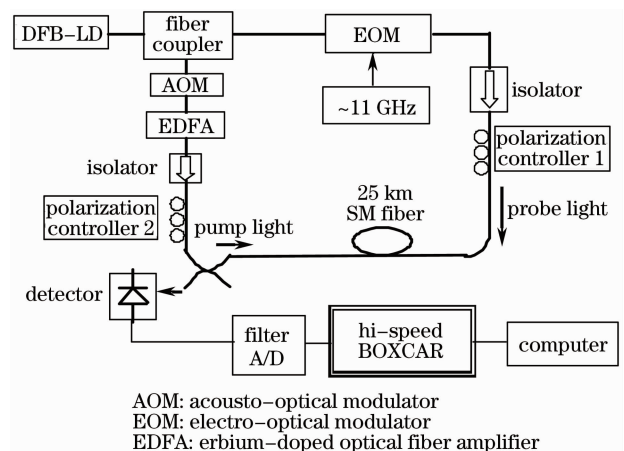


图 1 基于微波电光调制的布里渊散射 BOTDA 系统
Fig. 1 Schematic diagram of BOTDA system based on microwave EOM

2.3 正交偏振控制

在长距离 BOTDA 中, 普通单模传感光纤中的

双折射率是未知且受外界作用影响的,因此激励光和探测光在传感光纤中各处的偏振状态是未知且变化的,取决于入射光的偏振状态和光纤各处的双折射率。由于一次信号采样的时间在毫秒以下,而分布式光纤传感器一般针对的是慢变化传感量。因此可认为在相邻采样周期之间,传感光纤中的双折射率分布近似认为保持恒定。如图 2 所示,这里采用正交偏振来控制受激布里渊散射,图左边是由偏振控制器 1(PC1)产生的两正交偏振激励光,图右边是经过偏振控制器 2(PC2)调整的探测光。

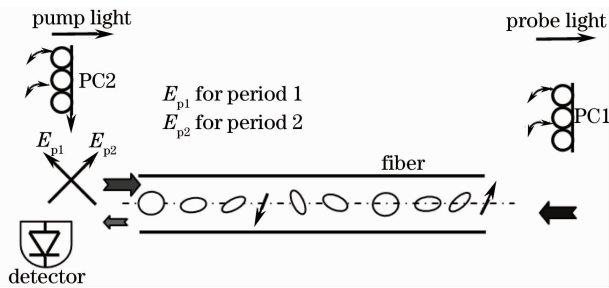


图 2 BOTDA 中光偏振状态的变化及正交偏振控制

Fig. 2 Optical polarization change in the BOTDA and its orthogonal polarization control

在光纤中相向传播的激励光波和探测光信号的偏振态具有如下特点:

1) 在偏振控制器 1(PC1)前探测光偏振态近似为固定的线偏振,通过 PC1 进行输入光的偏振状态调制,使得和激励光作用时探测光能处于较好的偏振状态。但由于光纤内在的(结构不对称)和外加的(温度和应变的影响)双折射效应,探测光的偏振态在传感光纤各处可看作是随机变化的,因而探测光和激励光的受激布里渊散射作用是偏振相关的,探测器接收的是偏振相关的探测光。

2) 在偏振控制器 2(PC2)前激励光偏振态近似为固定的线偏振,经过 PC2 控制后,在传感器的相邻两采样周期中输出两正交的偏振探测光,使得激励光在光纤中产生人为的偏振变化,用于光纤中和探测光进行偏振相关的受激布里渊散射作用。

因此,当不进行偏振控制时,传感器检测信号将产生偏振衰弱,会使得对布里渊散射谱的计算出错。可采用随机偏振控制^[6]来抑制偏振相关性的影响,但由于偏振控制的速度有限(一般为毫秒量级),而布里渊 DOFS 的一次采样也在毫秒量级,甚至以下,因此难以使得光纤各处的光偏振都达到随机化,从而会出现检测信号随时间不稳定。因此,这里采取在采样周期内,对 PC2 进行正交偏振控制后(即只控制到两个偏振状态),再通过累加多次采样周期

信号,从而实现抑制受激布里渊散射的偏振相关性带来的接收信号偏振衰弱,此方法在这里被称为基于正交偏振控制的偏振扩展接收技术^[12]。

3 实验结果

对于 2 节中分析的 BOTDA 实验系统(如图 1),脉冲激励光和直流探测光分别从 25 km 的两端入纤,当激励光和频移探测光的频率差刚好和某处光纤的布里渊频移一致时,由于受激布里渊散射的作用,高功率的脉冲激励光会把一部分能量传给探测光,即探测光经过此处时得到了放大。通过与脉冲激励光同步地接收探测光,可得到特定光频率差下探测光在光纤各处受到的受激布里渊散射。再通过改变微波调制频率,即改变激励光和探测光的光频率差,从而得到传感光纤各处的布里渊散射频谱。图 3 是示波器显示的在光频差为 10.83 MHz 时探测光的光电信号原始波形,这是包含丰富噪声的 4 个采样周期的信号,需进一步的信号处理,得到信噪比改善的检测信号,用于提取传感量。

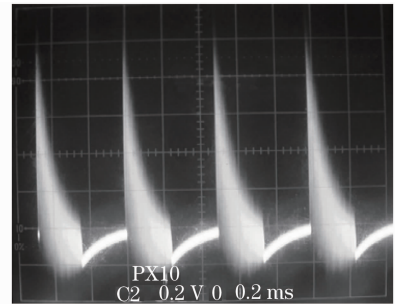


图 3 光电检测信号原始波形

Fig. 3 Original wave of detecting photoelectric signal

再采用数字累加平均器进行处理来提高信噪比,最后把信噪比改善的信号送到计算机进行存储、显示。图 4 是计算机得到的探测光传感信号波形(叠加次数为 2000 次,25 km 光纤),实验中通过改变微波调制(即探测光)的频率,得到整个布里渊散射频谱的曲线,频谱中心点位于 10.82 GHz 附近。由于只使用 PC1 来使得整体上受激布里渊散射信号达到较大,而没有使用偏振控制器 PC2 进行控制,图 4(a)中散射曲线具有较大的不规则起伏,这不是通常的噪声,而是由受激布里渊散射的偏振相关性引起的信号幅度波动。此波动虽然在某些传感距离上使得信号具有较大的幅度,但其他一些点的信号幅值很小,甚至接近于零,从而在这些点上布里渊频移的判断可能失效,甚至出现传感错误。

接着使用光偏振控制器 PC2 进行前述的正交

偏振控制,图 4(b)是不同光频移下的探测光传感信号波形。可看出受激布里渊散射的偏振相关性得到了有效的抑制,但还有明显的残余偏振相关信号起伏。这是由两方面的原因造成的,首先这里使用的是机械驱动的光纤环式偏振控制器,响应速度为几

十毫秒,难以达到理想的偏振控制,预计采用高速偏振控制器可得到更好的曲线;其次即使能达到理想的偏振控制,根据理论分析结果^[11]可知,如激励脉冲的宽度有限,接受探测光仍会有随光纤距离呈指数衰减的偏振相关信号波动。

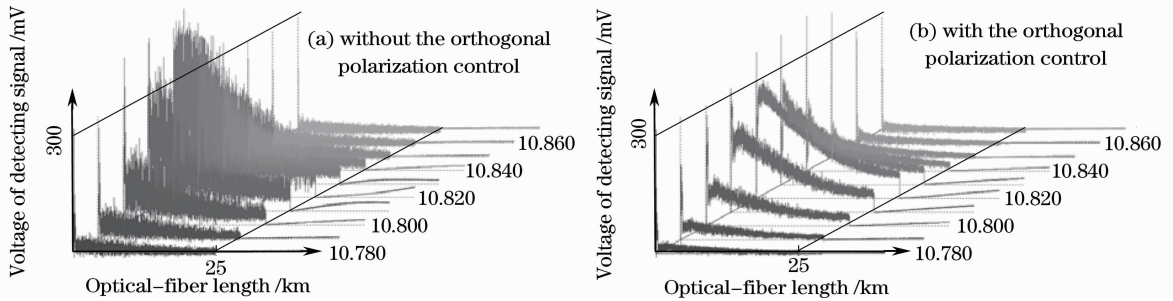


图 4 BOTDA 中传感光纤各处的探测光信号

Fig. 4 ‘Panorama’ of the probe signal in BOTDA

对图 4 的检测数据进行频谱分析,可得到 25 km 传感光纤各处的布里渊频移,再根据(1)~(3)式,计算得到传感光纤各处的应变或温度。图 5 是检测得到的应变曲线,其中的小图表示光纤末端附近有一段光纤被拉伸,产生约 660 $\mu\epsilon$ 的应变。图 5(a)是未采取正交偏振控制的检测结果,可看出曲线中有许多出错的检测应变值。这是由于前

述的偏振相关信号衰弱,造成在某些光纤位置上信号太弱,布里渊频移判断出错引起的。图 5(b)是采用正交偏振控制后的检测结果,可看出没有出现未偏振控制时的出错应变值,而且总体上应变分辨率得到了提高,可达到 30 $\mu\epsilon$,此分辨率可通过增加 BOXCAR 平均器的累加平均次数来实现进一步的提高。

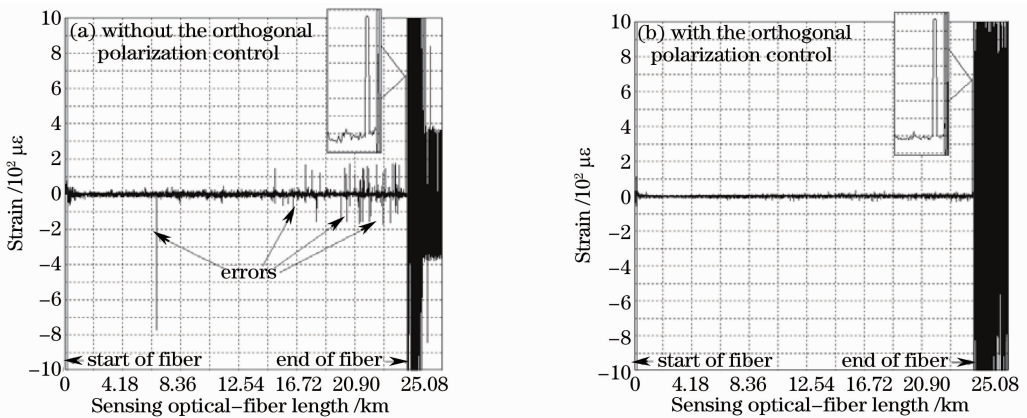


图 5 BOTDA 检测得到的传感光纤各处应变

Fig. 5 Stress distribution of the sensing fiber by the detection of the BOTDA

对 25 km 传感光纤末端附近的一段 5 m 光纤,进行传感量分辨率测试。首先进行温度分辨率的实验,如图 6 把传感光纤末端附近的 5 m 光纤放在温热水杯中,同时有一温度计进行测试温度对比,实验结果如图 7 所示。可看出 BOTDA 具有较好的线性响应,温度分辨率约为 2 $^{\circ}\text{C}$ 。再进行应变分辨率的实验,如图 8 把传感光纤末端附近的 5 m 光纤进行拉伸产生应变,同时有一千分尺进行测试应变对比,实验结果如图 9 所示。可看出 BOTDA 具有较好的线性响应,应变分辨率约为 30 $\mu\epsilon$ 。

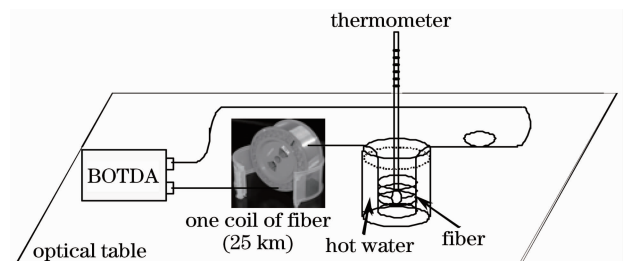


图 6 BOTDA 进行温度分辨率实验

Fig. 6 Temperature-resolution experiment of the BOTDA

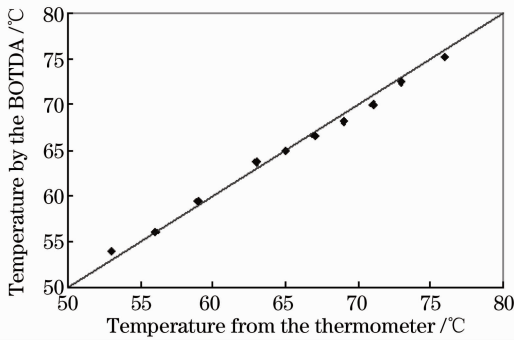


图 7 传感得到的温度与实际温度的对比

Fig. 7 Comparison between the detected temperature and the actual temperature

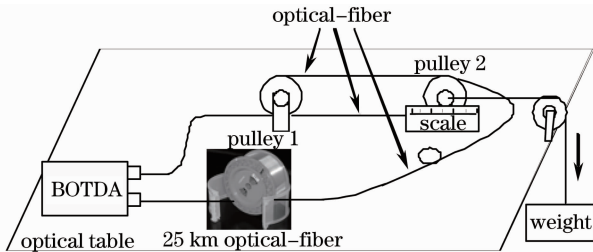
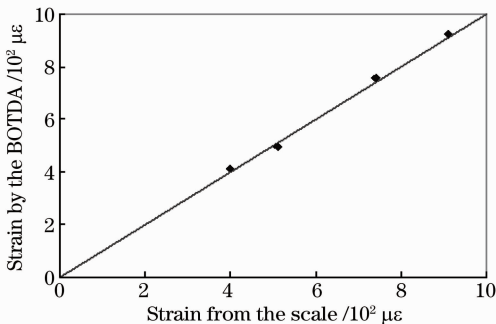


图 8 BOTDA 进行应变分辨率实验

Fig. 8 Strain-resolution experiment of the BOTDA



9 传感得到的应变与实际应变的对比

Fig. 9 Comparison between the detected strain and the actual strain

4 结 论

由于受激布里渊散射的偏振相关性,长距离普通单模光纤的布里渊散射具有很强的偏振相关信号衰弱。采用基于正交偏振控制的偏振扩展接收技术,可有效抑制 BOTDA 的偏振相关信号衰弱。实现了 25 km 普通单模光纤的布里渊光时域分析传感器,在 5 m 空间分辨率下可达到 2 °C 的温度分辨率和 30 με 的应变分辨率,预计增加累加平均器的累加次数可进一步提高传感器的分辨率。

参 考 文 献

1 Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber

laser sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91
 肖浩,李芳,王永杰等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 87~91
 2 Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958
 徐平,庞拂飞,陈娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1955~1958
 3 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 123~127
 杭利军,何存富,吴斌等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 123~127
 4 Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1): 100~105
 王玮,周邦全,张在宣等. 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1): 100~105
 5 Liu Jiansheng, Li Zheng. Physical essentials and design considerations of temperature calibration for distributed optic fiber Raman temperature sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1168~1171
 刘建胜,李铮. 光纤拉曼测温系统的温度标定及设计考虑[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1168~1171
 6 T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi *et al.*. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
 7 X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron *et al.*. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1340~1348
 8 Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 497~500
 沈一春,宋牟平,章献民等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 497~500
 9 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, **1**: 309~312
 10 T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Ohno *et al.*. Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques [C]. *ECOC'98*, 1998, 149~150
 11 Liu Diren, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Polarization-induced fading eliminated technique for coherent detection of Brillouin scattering spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1191~1194
 刘迪仁,宋牟平,章献民等. 布里渊散射谱相干检测的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1191~1194
 12 Song Muping, Zhuang Baiyun. Polarization-induced fading eliminated technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 711~715
 宋牟平,庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 711~715
 13 Song Muping. The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on microwave electric optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114
 宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1111~1114
 14 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical timedomain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electric optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, **25**(8): 1053~1056

- 宋牟平,赵 斌,章献民. 基于微波光电调制的布里渊光时域分析传感器[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1053~1056
- 15 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*. transl., Beijing: Publishing House of Electronics

Industry, 2002. 223~240

G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈 斌等译,北京:电子工业出版社,2002. 223~240



Photonics Asia 2010 International Conference

主办单位: SPIE; COS——中国光学学会

会议地点: 北京 国家会议中心(奥运中心)

会议时间: 2010 年 10 月 18~22 日

专 题

1. High-power Lasers and Applications(高功率激光器及其应用)
2. Semiconductor Lasers & Applications(半导体激光器和应用)
3. Optics in Health Care and Biomedical Optics(保健和生物医学光学)
4. Quantum and Nonlinear Optics(量子和非线性光学)
5. Optoelectronic Devices & Integration(光电器件及其集成)
6. Holography , Diffractive Optics and Applications(全息、衍射光学和应用)
7. Optical Design and Testing(光学设计和检测)
8. Optoelectronic Imaging and Multimedia Technologies(光电成像和多媒体技术)
9. Information Optics and Optical Data storage(信息光学和光存储技术)
10. LED and Display Technologies(LED 和显示技术)
11. Advanced Sensor Systems and Applications(先进的传感系统及其应用)
12. Infrared, Millimeter Wave and Terahertz Technologies(红外、毫米波和太赫兹技术)
13. Optical Metrology and Inspection for Industrial Application
(应用于工业的光学计量学和检验)

中方主席

范滇元
李晋闽
骆清铭 顾 瑛
龚旗煌 郭光灿
张旭莘 明 海
余重秀
王涌天
魏 平
宋菲君 陶世荃
侯延冰
廖延彪
张存林

Peisen Huang

摘要截止日: 2010 年 5 月 15 日

全文截止日: 2010 年 8 月 30 日

会议联系人:

翟 林: 010-62641108 zhailin@hotmail.com

李翠玲: 010-68912564 cuilingli@bit.edu.cn

丁伯瑜: 010-82616603 dingboyu@sohu.com

SPIE 投稿网站: spie.org/pa/ 详情请见中国光学学会网站: www.cncos.org