

基于光纤光栅的微波扫描单边带调制法测量 光纤布里渊散射特性

刘 玉^{1,2} 任立勇² 忽满利¹ 梁 健² 韩 旭² 马成举²

¹西北大学物理学系, 陕西 西安 710069
²中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 利用光纤布拉格光栅(FBG)和马赫-曾德尔电光调制器实现了单边带光调制输出。基于微波扫描的单边带调制技术提出了一种测量光纤受激布里渊散射(SBS)特性的方法,可有效地将布里渊频移与布里渊增益谱的测量统一起来。对一段 50 m 长的光子晶体光纤(PCF)的 SBS 特性进行了测量,得到了 PCF 的 SBS 谱的布里渊频移为 9.7443 GHz,布里渊增益谱线宽为 22.472 MHz,布里渊增益系数为 7.874×10^{-12} m/W。

关键词 光纤光学;单边带调制;受激布里渊散射;光纤布拉格光栅

中图分类号 TN929.1; O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0105002

Characteristic Measurements of Fiber Brillouin Scattering Using Fiber Bragg Grating Based Microwave-Sweeping Single Sideband Modulation

Liu Yu^{1,2} Ren Liyong² Hu Manli¹ Liang Jian² Han Xu² Ma Chengju²

¹Department of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China
²State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract Single sideband modulation output is demonstrated by using of the fiber Bragg grating (FBG) and the Mach-Zehnder electro-optic modulator. Based on the microwave-sweeping single sideband modulation technique, a method to measure the characteristics of the fiber stimulated Brillouin scattering (SBS) is proposed. It can be used to measure the Brillouin frequency shift together with the Brillouin gain spectrum effectively. The properties of the stimulated Brillouin scattering in a 50 m photonic crystal fiber are measured, where the Brillouin frequency shift is 9.7443 GHz, the linewidth of the Brillouin gain spectrum is 22.472 MHz, and the Brillouin gain coefficient is 7.874×10^{-12} m/W, respectively.

Key words fiber optics; sideband modulation; stimulated Brillouin scattering; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.4080; 350.4010; 190.2640; 060.3735

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)是介质中一种典型的三波(高功率入射光波、光波在介质中产生的电磁伸缩效应所激起的超声波和入射光波被超声波非弹性散射产生的后向散射光波)非线性效应,是光子场与声子场之间的相干散射过程。SBS 是光纤中一种常见

的非线性效应,通常会对光通信系统造成危害。但是,近年来光纤中的 SBS 效应由于在光纤放大器、光纤激光器和光纤传感器等方面的应用而备受研究者的关注^[1~6]。此外,光纤中 SBS 过程的窄带大效应引起介质折射率的剧烈变化,形成大的正常色散,从而产生光纤中光脉冲的群速度减慢的现象,即

收稿日期: 2011-07-04; **收到修改稿日期**: 2011-09-26

基金项目: 中国科学院“西部之光”(2009LH01)、中国科学院创新基金(CXJJ-11-M22)、留学人员科技活动项目择优资助经费和教育部留学回国人员科研启动基金资助课题。

作者简介: 刘 玉(1985—),女,硕士研究生,主要从事慢光技术及其应用等方面的研究。E-mail: liuyuxbdx@sina.com

导师简介: 任立勇(1971—),男,博士,研究员,主要从事信息光子学和光传感技术等方面的研究。

E-mail: renliy@opt.ac.cn (中国光学学会会员号: s040m615s)

慢光现象^[7~13]。需要注意的是,对 SBS 增益谱特性的研究是这些应用和效应的基础。描述介质 SBS 效应的主要参数包括布里渊频移、布里渊阈值^[14]、布里渊增益系数、布里渊增益谱及其半峰全宽(FWHM)等。人们通常采用外差检测法来测量布里渊频移^[15~19];利用小信号放大的方法来测量布里渊增益谱和增益系数^[16,20]。目前,还没有在一套测试系统下实现对这些参数的统一测量的报道。

本文提出使用一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的单边带调制技术^[21]测量光纤布里渊散射特性的方法。这种方法操作简单,测量精度高,并且可有效地将布里渊频移与布里渊增益谱的测量统一起来。另外,由于实验系统中抽运光和单边带调制产生的信号光来自于同一激光光源,因此两光束具有很好的相干性、高稳定性和低随机噪声。相对于传统的采用两个不同激光光源的方案,所测得的布里渊增益谱稳定性更好。对一段 50 m 长的光子晶体光纤(PCF)的 SBS 特性进行了测量实验,得到了 PCF 中 SBS 增益谱的一些基本特性,如布里渊频移、布里渊增益系数、布里渊增益谱及其 FWHM 等。

2 单边带调制方案

在马赫-曾德尔电光调制器(EOM)上加载一微波,即射频(RF)正弦信号,调节 EOM 上所加载的直流偏置电压 V_{bias} 的大小,可以获得不同频谱分布的输出。特别地,调节 V_{bias} 的大小可使 EOM 达到载频抑制(即抑制入射到 EOM 中的光波载波频率)而输出两个较强的边频(± 1 级边带)。图 1 为采用光谱分析仪(AQ6370C-20,光谱分辨率为 10 pm)所测得的光谱。实验中采用载波波长为 1549.952 nm,RF 信号的频率为 9.7443 GHz,RF 功率为 20 dBm, $V_{bias} = 9.16$ V。

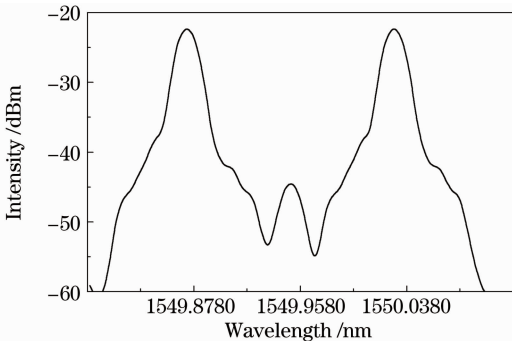


图 1 EOM 在载频抑制下的输出光谱

Fig. 1 Output spectrum of the EOM under carrier frequency suppression

由图 1 可知,EOM 经载频抑制后产生了 ± 1 级双边带信号,每个边带的幅度相对于载波高出了约 23 dB。在 EOM 后通过环形器(CIR)接入一个 FBG,利用 FBG 的波长选择特性可得到其中的一个边带信号,这就实现了单边带调制输出。图 2 为经 FBG 反射和掺铒光纤放大器(EDFA)放大后光的单边带信号的输出光谱。需要说明的是,由于实验所用 FBG 的 3 dB 带宽为 0.12 nm,而光波 ± 1 级双边带之间的波长间隔为 0.156 nm,所以 FBG 的反射谱中仍包含了部分的上边频($+1$ 级边带)。但是由于其单边带幅度抑制比大于 25 dB,因此 $+1$ 级边带的影响可以忽略不计,这就能保证获得很好的单边带调制输出。

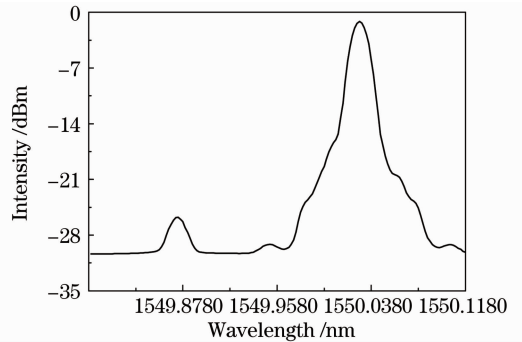


图 2 经 FBG 反射和 EDFA 放大后的单边带调制信号的输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of single sideband modulation signal via FBG and EDFA

3 光纤布里渊散射特性实验测量和分析

在测量光纤布里渊散射特性实验中,选用 50 m 长的高非线性纯硅 PCF(Crystal Fiber A/S: NL-1550-NEG-1)作为增益介质。该 PCF 的横截面如图 3 所示,其纤芯直径为 $2.1 \mu\text{m}$,包层直径为 $128 \mu\text{m}$,涂覆层直径为 $250 \mu\text{m}$ 。相比于普通的单模光纤,这种 PCF 具有更小的模场面积,在 1550 nm 波长处,模场直径为 $2.8 \mu\text{m}$;具有更高的非线性效应,非线性系数大约为 $11 / (\text{W} \cdot \text{km})$ 。此外,在 1550 nm 波长处,这种光纤的损耗为 9 dB/km。PCF 两端通过中间光纤与单模光纤(SMF)相连接,其熔接损耗小于 0.6 dB。同时,PCF 的包层与纤芯之间的折射率差比较大,从而使得声光相互作用得到了加强。

基于 FBG 的微波扫描单边带调制法测量光纤布里渊散射特性的实验装置如图 4 所示。窄带宽可

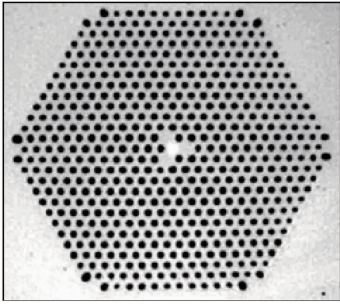


图 3 PCF 横截面图

Fig. 3 Cross section of PCF

调谐激光器 (TWL-1550, Optilab, LLC) 的输出光经 95:5 的光耦合器 (OC) 分为两束激光。其中 95% 的光经光纤偏振控制器 FPC 1, EOM 和 CIR 1 产生单边带调制的信号光。信号光再通过 EDFA 1、可调衰减器 VOA 1、隔离器 ISO 和 FPC 2 进入 50 m 长的 PCF。另一路中 5% 的光经 EDFA 2, VOA 2, FPC 3 和 CIR 2 作为抽运光反方向 (相对于信号光而言) 进入 PCF。当反向传播的抽运光和信号光在 PCF 中满足 SBS 条件时, 抽运光将被后向布里渊散射而使得信号光被相干放大, 放大后的信号光经由 CIR 2 后用光功率计 PM (PM20CH) 进行测量。实验装置中, FPC 1 用来调节光的偏振状态以保证获得高对比度的载波抑制, 而 FPC 2 和 FPC 3 分别用来调节信号光和抽运光的偏振态以便在 PCF 中获得良好的 SBS 效应。

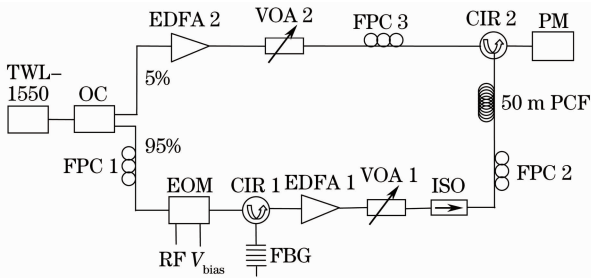


图 4 以微波扫描单边带调制法测量 SBS 特性的装置图

Fig. 4 SBS characteristics measurement setup using microwave-sweeping single sideband modulation

考虑到石英基光纤的布里渊频移在 10 GHz 附近, 以及实验所用的 FBG 在自由状态下的布拉格波长为 1550.030 nm, 所以将激光器的输出波长调节到 1550 nm 附近, 逐渐改变加载于 EOM 上 RF 信号的频率, 即改变单边带调制信号与抽运光之间的频率差值, 信号增益会发生相应的变化。在实验中, 一方面需要适当调节信号光的功率, 使之工作在小信号增益范围内; 另一方面需要调节抽运光的功率, 使信号光得到明显的放大。实验中使用的激光器输

出功率为 20 mW, FWHM 为 0.016 nm。

根据 SBS 理论, 布里渊增益具有洛伦兹频谱轮廓:

$$g(\Omega) = g_0 \frac{(\gamma/2)^2}{(\Omega - \Omega_B)^2 + (\gamma/2)^2}, \quad (1)$$

式中 g_0 为 SBS 的峰值增益系数, Ω_B 为布里渊频移, γ 为布里渊增益谱的 FWHM。逐渐调节 RF 源的频率 Ω , 实验测得了图 5 所示的 PCF 和普通单模光纤的增益谱分布。在图 5(a) 中当 $\Omega = \Omega_B$ 时, 满足最佳的 SBS 频率匹配, 此时信号增益系数达到最大值 g_0 。

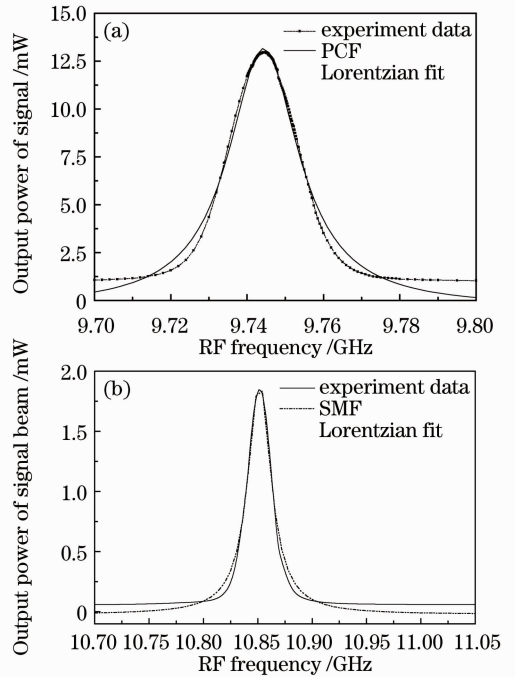


图 5 PCF (a) 和 SMF (b) 的 SBS 增益谱

Fig. 5 Gain spectra of (a) PCF and (b) SMF of SBS

对布里渊增益谱实验结果进行洛伦兹拟合, 如图 5(a) 所示, 可以测得 $\Omega_B = 9.7443$ GHz, $\gamma = 22.472$ MHz。需要指出的是, 实验中所用 RF 源 (HMC-T2100) 频率调节精度为 10 kHz, 以此作为步长调节 RF 源频率, 测得的结果具有很高的精确度。以上结果与同种类型的 PCF 的测量结果^[15,20,22] 相比是比较吻合的。同一波长下, 光纤中 Ω_B 正比于光纤的有效折射率。当光纤中的掺杂物质或掺杂浓度不同时, 光纤的有效折射率会略有差别, 从而导致 Ω_B 略有不同。

图 5(b) 为测量 11 km 普通 SMF 的布里渊增益谱, 可见 SMF 的布里渊增益谱为洛伦兹分布, 其布里渊频移 $\Omega_B = 10.851$ GHz, FWHM $\gamma = 27.1$ MHz。与图 5(a) 相比, 二者的布里渊频移有所不同, 这是由两

种光纤的不同结构造成的,布里渊 FWHM 均为几十兆赫兹,这说明布里渊增益是一个窄带放大的过程。

根据测得的 $\Omega_B = 9.7443$ GHz,将 RF 源的频率调节到该值上,由于 FBG 的中心波长为 1550.030 nm,计算后将激光器的波长设置在 1549.952 nm 处,这样就保证了抽运光与单边带调制信号之间的频率差值刚好为 9.7443 GHz。适当改变信号光功率 P_{signal} 的大小,使之工作在小信号增益的范围内。调节 VOA 以改变抽运光的功率,可以得到不同抽运条件下信号光的增益情况,如图 6 所示。从图中可以看出,信号光随抽运功率的变化呈指数增长。一般定义光在光纤中产生 SBS 时的入射光功率为布里渊阈值,此时抽运光会将绝大部分功率传递给信号光,即信号光被显著地放大。实验结果表明,在抽运光功率大于 40 mW 时,才能观察到信号的明显放大。因此实验采用的 PCF 的布里渊阈值大约为 40 mW。

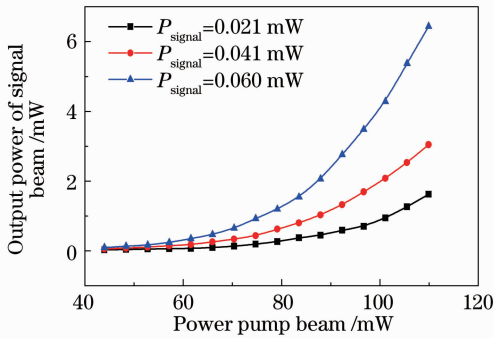


图 6 不同信号功率下,输出信号与抽运光功率的关系
Fig. 6 Output signal power versus pump power with different input signal powers

由图 6 可知,信号光功率随抽运光功率呈指数变化,即

$$I_{s,\text{out}} = I_{s,\text{in}} \exp(G - \alpha L_{\text{eff}}), \quad (2)$$

式中 $I_{s,\text{in}}$, $I_{s,\text{out}}$ 分别为输入与输出的信号光强度, G 与 α 分别为信号光的增益指数与损耗系数, $L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$ 为光纤的有效长度, L 为光纤的长度。由(2)式很容易计算得到信号增益为

$$G = \ln \frac{I_{s,\text{out}}}{I_{s,\text{in}}} + \alpha L_{\text{eff}}. \quad (3)$$

在小信号增益的情况下,信号增益与抽运光功率之间呈线性关系为

$$G = g_0 I_p L = g_0 \frac{P_p}{A_{\text{eff}}} L_{\text{eff}}, \quad (4)$$

式中 P_p 为抽运光功率, A_{eff} 为 PCF 的有效模场面积。

图 7 为不同信号光功率下信号增益随抽运光功率的变化,在小信号情况下,信号增益随抽运光功率正比变化。选定图 7 中任意一个信号光功率对应的实验结果(例如 $P_{\text{signal}} = 0.041$ mW)并对其进行线性拟合,得到增益随抽运光功率变化的斜率,再由(4)式即可计算出实验用 PCF 的增益系数 $g_0 = 7.874 \times 10^{-12}$ m/W。

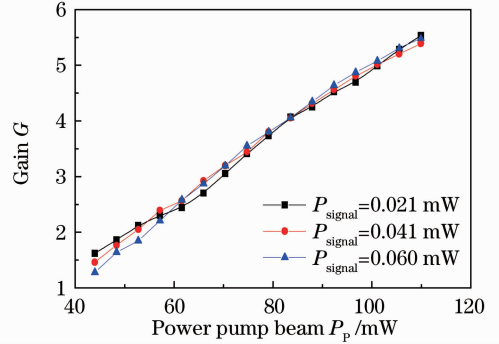


图 7 不同信号光功率下,增益随抽运光功率的变化关系
Fig. 7 Brillouin gain versus power of pump beam for different input signal powers

4 结 论

提出了一种基于 FBG 的微波扫描单边带调制法测量光纤布里渊散射特性的新方法。这种方法能有效地将布里渊频移与布里渊增益谱的测量统一起来。对一段 50 m 长的 PCF 的 SBS 特性进行了实验测量,得到了 PCF 的 SBS 谱的布里渊频移为 9.7443 GHz,布里渊增益谱 FWHM 为 22.472 MHz,布里渊增益系数为 7.874×10^{-12} m/W。

参 考 文 献

- 1 K. S. Abedin. Single-frequency Brillouin lasing using single-mode As₂Se₃ chalcogenide fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9): 4037~4042
 - 2 S. Norcia, S. Tonda-Goldstein, D. Dolfi *et al.*. Efficient single-mode Brillouin fiber laser for low-noise optical carrier reduction of microwave signals[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1888~1890
 - 3 A. Loayssa, D. Benito, M. J. Garde. Optical carrier-suppression technique with a Brillouin-erbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 197~199
 - 4 I. Dajani, C. Vergien, C. Robin *et al.*. Experimental and theoretical investigations of photonic crystal fiber amplifier with 260 W output[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 24317~24333
 - 5 L. Wang, B. Zhou, C. Shu *et al.*. Stimulated Brillouin scattering slow-light-based fiber-optic temperature sensor[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(3): 427~429
 - 6 Chen Hongwei, Wang Xiaolin, Yang Chunbo *et al.*. 4.5 W all-fiber narrow-linewidth two-tone fiber laser based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2477~2481
- 谌鸿伟, 王小林, 杨春波等. 基于受激布里渊散射效应的 4.5 W 全光纤窄线宽双波长激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10):

2477~2481

- 7 M. G. Herráez. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1395~1400
- 8 G. M. Gehring, R. W. Boyd, A. L. Gaeta *et al.*. Fiber-based slow-light technologies [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(23): 3752~3762
- 9 L. Ren, Y. Tomita. Transient and nonlinear analysis of slow-light pulse propagation in an optical fiber via stimulated Brillouin scattering[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(7): 1281~1288
- 10 S. Chin, M. Gonzalez-Herraez, L. Thévenaz. Complete compensation of pulse broadening in an amplifier-based slow light system using a nonlinear regeneration element[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21910~21917
- 11 S. Yang, H. Chen, C. Qiu *et al.*. Slow-light delay enhancement in small-core pure silica photonic crystal fiber based on Brillouin scattering[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(2): 95~97
- 12 Y. Wang, W. Zhang, Y. Huang *et al.*. SBS slow light in high nonlinearity photonic crystal fiber [C]. OFC/NFOEC, 2007, JWA13
- 13 Zhang Zhiyao, Zhou Xiaojun, Liang Rui *et al.*. Theoretical study of Brillouin slow light using broadband pump with rectangular spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1254~1260
张旨遥, 周晓军, 梁锐等. 矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光理论研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1254~1260
- 14 Chen Wei, Meng Zhou. Effects of phase modulation on threshold of stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0305002
陈伟, 孟洲. 相位调制对光纤受激布里渊散射阈值的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0305002
- 15 J. E. McElhenny, R. K. Pattnaik, J. Toulouse *et al.*. Unique characteristic features of stimulated Brillouin scattering in small-core photonic crystal fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(4): 582~593
- 16 K. S. Abedin. Stimulated Brillouin scattering in single-mode tellurite glass fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11766~11772
- 17 P. Sevillano, J. Subías, C. Heras *et al.*. Brillouin induced self-heterodyne technique for narrow line width measurement [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(14): 15201~15206
- 18 J.-C. Beugnot, T. Sylvestre, D. Alasia *et al.*. Complete experimental characterization of stimulated Brillouin scattering in photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(23): 15517~15522
- 19 M. N. M. Nasir, Z. Yusoff, M. H. Al-Mansoori *et al.*. Widely tunable multi-wavelength Brillouin-erbium fiber laser utilizing low SBS threshold photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12829~12834
- 20 Zhao Junfa, Yang Xiufeng, Li Yuan *et al.*. Stimulated Brillouin scattering slow light in photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2437~2440
赵军发, 杨秀峰, 李元等. 光子晶体光纤中受激布里渊散射慢光研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2437~2440
- 21 A. Loayssa, R. Hernández, D. Benito *et al.*. Characterization of stimulated Brillouin scattering spectra by use of optical single-sideband modulation[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6): 638~640
- 22 J. H. Lee, K. Y. Song, H. J. Yoon *et al.*. Brillouin gain-coefficient measurement for bismuth-oxide-based photonic crystal fiber under significant beam reflection at splicing points[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(17): 2670~2672

栏目编辑: 谢 婧