

单模光纤中受激布里渊散射的温度特性

黄文发 汪小超 王江峰 李学春 范薇 卢兴华

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 研究了在不同温度下单模光纤受激布里渊散射的阈值和频移,从受激布里渊散射的基本原理出发,分析和讨论了温度对受激布里渊散射阈值和频移特性的影响.设计并搭建了实验系统,测量了不同温度下 2 km 单模光纤受激布里渊散射的光谱和阈值,实验表明,随着温度的升高,布里渊频移逐渐增大,在一定温度范围内,布里渊频移与温度呈线性关系.低温对斯托克斯光有抑制作用,温度越低受激布里渊散射阈值越高.

关键词 光纤光学;非线性光学;受激布里渊散射;阈值;频移;单模光纤;非线性效应

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0405001

Temperature Characteristic of Stimulated Brillouin Scattering in Single-Mode Fiber

Huang Wenfa Wang Xiaochao Wang Jiangfeng Li Xuechun Fan Wei Lu Xinghua

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold and frequency shift of single-mode fiber are studied under different temperatures. Based on the theory of SBS, the relation of SBS threshold and frequency shift with temperature is analyzed. Experimental system is designed and built, and SBS spectrum and threshold of 2 km single-mode fiber are measured under different temperatures. The experiments indicate that the Brillouin frequency shift increases linearly with the increasing temperature. Low temperature can suppress Stokes lights. The lower the temperature is, the higher SBS threshold is. Temperature has a direct effect on the SBS of fiber.

Key words fiber optics; nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering; threshold; frequency shift; single-mode fiber; nonlinear effect

OCIS codes 060.2430; 060.2270; 060.2300; 060.4370

1 引言

受激布里渊散射(SBS)是一种发生在光纤内抽运光、斯托克斯光通过声波进行的非线性过程.抽运光由于电致伸缩效应产生声波,从而引起光纤折射率的周期性调制,抽运光引起的折射率光栅通过布拉格衍射散射抽运光.光纤中以声速移动的光栅决定了多普勒位移量的大小,散射光相对于抽运光产生了频率下移,形成了斯托克斯(Stokes)^[1].布里渊散射光后向传输不仅损害光源,并造成激光器的相对强度噪声恶化和增加了系统链路的“衰减”,使系统达不到预期的功率^[2];另外,随着高功率半导

体激光抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,目前光纤激光器和放大器的输出功率已经达到了很高的水平,单根光纤的连续输出功率已逾千瓦^[3],然而在光纤激光器和放大器中,由于传输功率高,纤芯的截面小,同时相互作用距离长,受激布里渊散射非常容易产生,成为限制光纤激光器和放大器功率提升的主要因素.而近些年来由于受激布里渊散射(SBS)效应具有线宽窄、频率稳定、相干性高和增益方向敏感等优点,在光纤激光器和放大器、光纤延迟线和光纤传感等应用方面也引起人们极大的关注^[4~8].光纤中受激布里渊散射增益谱、阈值和频

收稿日期: 2012-11-04; **收到修改稿日期**: 2012-12-18

作者简介: 黄文发(1986—),男,博士研究生,主要从事重复频率固体放大器以及光纤应用等方面的研究。

E-mail: huangwf15@163.com

导师简介: 李学春(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术和光纤应用等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn(通信联系人)

移等特性都得到广泛的研究^[9~12],但光纤中受激布里渊散射特性受温度的影响尚未报道。

本文对单模光纤在不同温度下的受激布里渊散射进行了研究,测得了在不同温度下受激布里渊散射的光谱、阈值和频移,并进行了理论分析。

2 理论分析

阈值特性是受激布里渊散射的重要特性之一,即只有当入射激光强度超过一定的激励阈值后,受激布里渊散射才会发生。受激布里渊散射阈值的理论估算有 Smith 模型和 K \ddot{u} ng 模型^[13,14]。但是,通常情况下这些阈值估算都可以用一个通用计算模型^[15]:

$$P_{th} = \frac{GA_{eff}}{g_0 L_{eff}}, \quad (1)$$

式中 P_{th} 为布里渊散射阈值, A_{eff} 为光纤有效截面积, g_0 为布里渊增益峰值, L_{eff} 为光纤有效长度, G 为阈值增益系数。通常情况下,影响光纤中受激布里渊散射阈值有很多因素,除了与光纤长度、面积有关外,还与激光器的波长等因素有关,可在(1)式中阈值增益系数 G 中体现出来,阈值增益系数 G 为

$$G \approx \ln\left(\frac{4A_{eff}\nu_B\bar{G}^{-3/2}\pi^{1/2}}{g_0 k T \Gamma \nu_0 L_{eff}}\right), \quad (2)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数, $\bar{G} \approx 21$, T 为绝对温度, Γ 为声子衰减速率, ν_0 为注入激光的频率, ν_B 为布里渊频移:

$$\nu_B = \frac{2n_p v_A}{\lambda_p}, \quad (3)$$

式中 λ_p 为抽运光波长, v_A 为声速, n_p 为抽运波长 λ_p 处的有效模折射率。

L_{eff} 为光纤的有效作用长度:

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha, \quad (4)$$

式中 L 为光纤长度, α 为光纤衰减系数。

单模光纤中布里渊频移与温度的关系为^[16]

$$d\nu_B/dT = (d\nu_B/dT)_1 + (d\nu_B/dT)_2, \quad (5)$$

式中右边第一项表示裸纤与温度的关系,第二项表示光纤涂覆层热应变导致布里渊频移的变化:

$$(d\nu_B/dT)_2 = (d\nu_B/d\xi) \times (d\xi/dT), \quad (6)$$

热应变主要是裸纤和涂覆材料的热膨胀系数差异引起的,表示为

$$d\xi/dT = \sum A_i E_i \kappa_i / \sum A_i E_i, \quad (7)$$

式中 E 为杨氏模量, A 为横截面积, κ 为热膨胀系数,下标 i 表示裸纤或者涂覆材料。可以看出光纤中的布里渊频移随温度变化的关系与光纤本身的特性有关,如杨氏模量、横截面积和热膨胀系数等。

3 实验装置

3.1 光纤受激布里渊散射测量装置

光纤受激布里渊散射温度特性测量系统如图 1 所示,其中 DFA 为双包层光纤放大器;ISO 为光隔离器;VOA 为可调衰减器;Optical Coupler 为耦合器;FUT 为测试光纤;TCF 为温度控制装置;LN₂ 为液氮;SFPI 为扫描法布里-珀罗干涉仪;PM A, B, C 为功率计。实验中所用的光源为分布反馈 (DFB) 光纤激光器,线宽约为 70 kHz,输出功率为 10 mW,输出光谱如图 2 所示。发射抽运光经过掺镱双包层光纤放大器放大后,通过隔离器、可调衰减器和分束比为 85:15 光纤耦合器注入到光纤中。在受激布里渊散射实验中,必须在激光器和光纤之间加入隔离器,以避免斯托克斯光进入激光器,避免激光腔镜把斯托克斯光反馈回光纤,影响后面的测量结果。抽运光进入光纤后由于布里渊散射效应,产生斯托克斯光,通过光纤耦合器耦合到 4 端口,在 4 端口用光谱仪观测后向斯托克斯波光谱和测量功率。光纤耦合器 3 端口功率计 C 用来监测入纤抽运光功率,光纤末端的传输功率用功率计 B 测量。实验中所用的光纤为单模圆芯石英光纤,模场直径

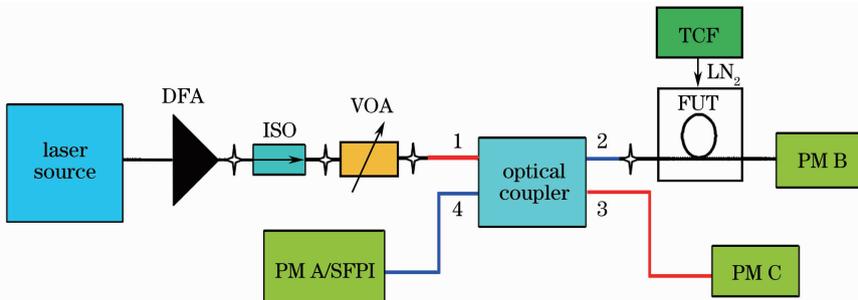


图 1 光纤受激布里渊散射温度特性测量系统

Fig. 1 Experimental setup for SBS temperature characteristic measurement in fiber at low temperature

为 $6.2 \mu\text{m}$, 包层直径为 $245 \mu\text{m}$, 截止波长为 920 nm , 光纤放置在由液氮冷却的温度控制装置中。



图 2 DFB 光纤激光器输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of DFB fiber laser

3.2 温度控制系统

图3为光纤温度控制系统。通过控制箱调节液

氮容器内的气压,使液氮流入管道,进入到真空盒内的液氮经过管道循环将热沉铜块上的热量带走,使其降温。热沉铜块上的温度传感器可以将测试的温度反馈回控制箱,控制箱通过控制低温电磁阀的开关,调节液氮的流量。冷却系统能够将热沉铜块温度稳定在 $-170 \text{ }^\circ\text{C} \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$, 精度为 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 4 为真空盒结构示意图,热沉铜块通过支杆固定在真空盒内,图 4(a)为真空盒的正视剖面图,图 4(b)为侧视剖面图,箭头方向为侧视剖面方向。单模光纤经过光纤输入端口进入真空盒腔体,密布盘绕在热沉铜块上面,然后通过光纤输出端口输出,光纤输入输出端口利用真空低温胶进行密封,以保证真空盒内稳定的真空度,主要是为了防止在降温的过程中光纤表面凝霜,从而对测量结果产生影响。

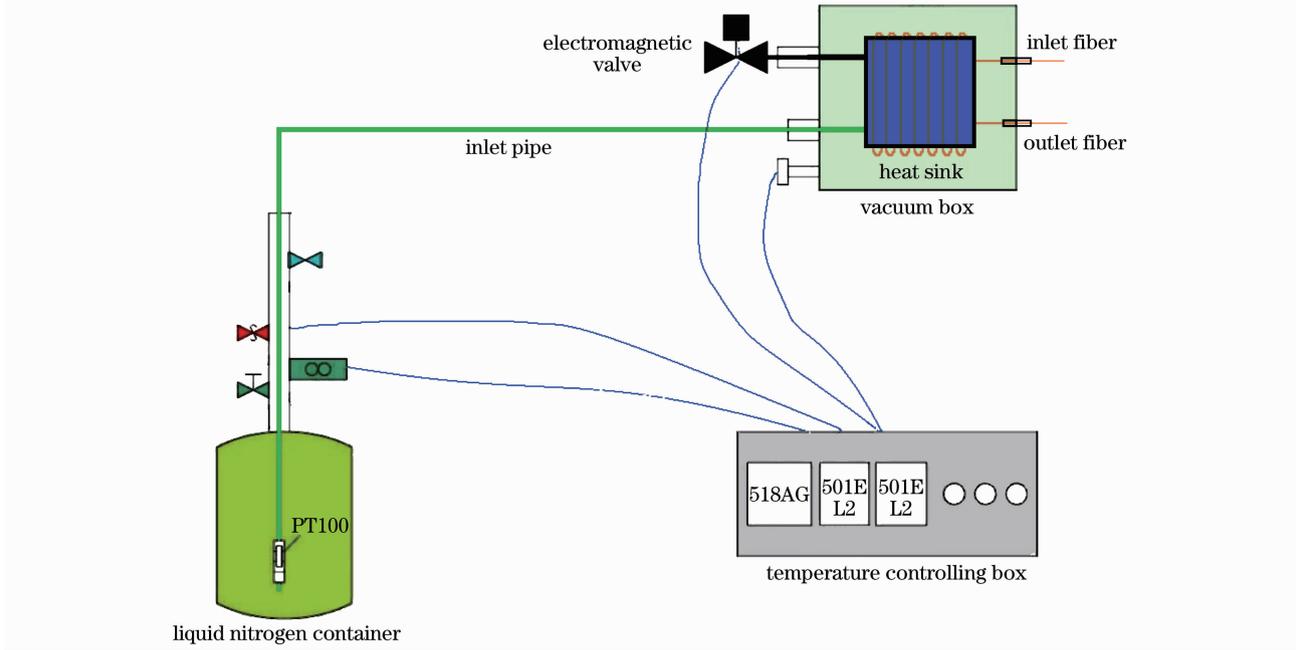


图 3 温度控制系统

Fig. 3 Temperature control system

4 实验结果与分析

4.1 常温下受激布里渊散射阈值和布里渊频移测量

在不对光纤进行低温制冷的条件下,通过对光纤的传输光和反向散射光的测量来确定单模光纤在常温条件下受激布里渊散射阈值的大小。图 5 为实验中测量得到的单模光纤传输光功率、反向散射光功率与入射光功率之间的关系。随着入射光强的增加,传输光强也随之迅速增大,但是当入射光功率超

过 94.2 mW 后,传输光出现了饱和趋势;反向散射光随着入射光强的增加缓慢增长,但当入射光功率在 94.2 mW 附近时,反向散射光开始迅速增加。受激布里渊散射阈值定义为反向散射光强开始迅速增加或者传输光强开始出现饱和时的入射光功率,可以测得在常温条件下单模光纤的受激布里渊散射阈值约为 94.2 mW 。由于单模光纤中的受激布里渊散射仅在后向发生,所以在实验中可以利用波长计在光纤输出端口和图 1 中光纤耦合器 4 端口分别测

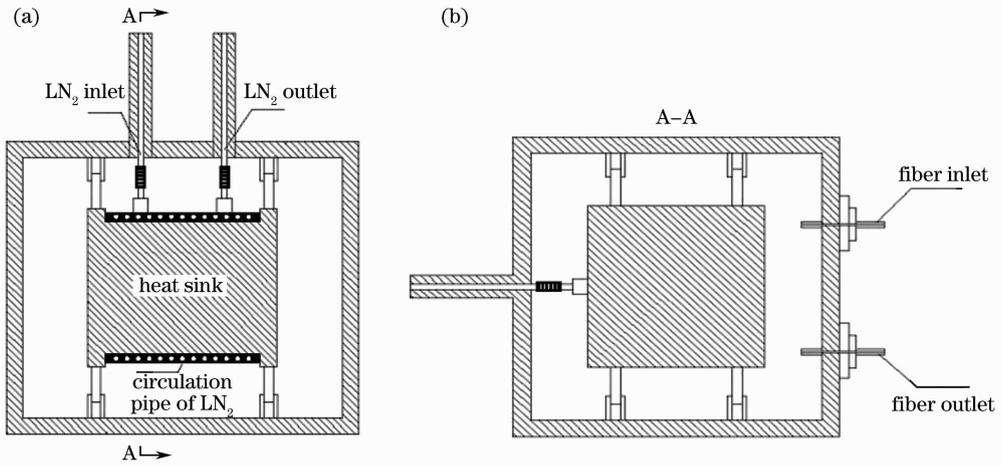


图 4 真空盒结构。(a)正视剖面图;(b)侧视剖面图

Fig. 4 Structure of vacuum box. (a) Front cross-sectional view; (b) side cross-sectional view

量抽运光和受激布里渊散射光的中心波长,然后计算布里渊频移的大小。布里渊频移大小的计算公式为

$$|\nu'_B| = \left| \frac{c\Delta\lambda}{\lambda_c^2} \right|, \quad (8)$$

式中 λ_c 为抽运光的中心波长, c 为光速。图 6(a)、(b)为温度 293 K 时波长计测得的抽运光和受激布里渊散射的中心波长,分别为 1030.3235 nm 和 1030.3845 nm,图中上下两行是波长计中参考光和输入光的干涉图样。计算得到温度为 293 K 时的布里渊频移为 17.24 GHz。

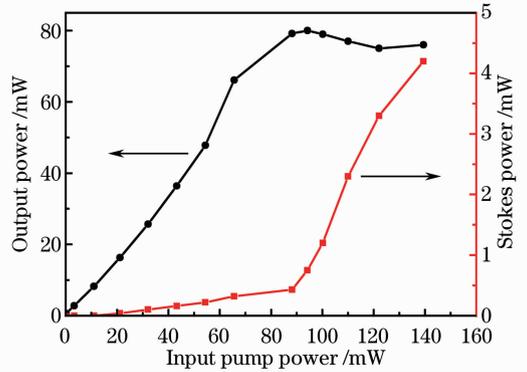


图 5 输出光功率、反向散射光功率与入射光功率之间的关系

Fig. 5 Stokes power and output power versus input pump power

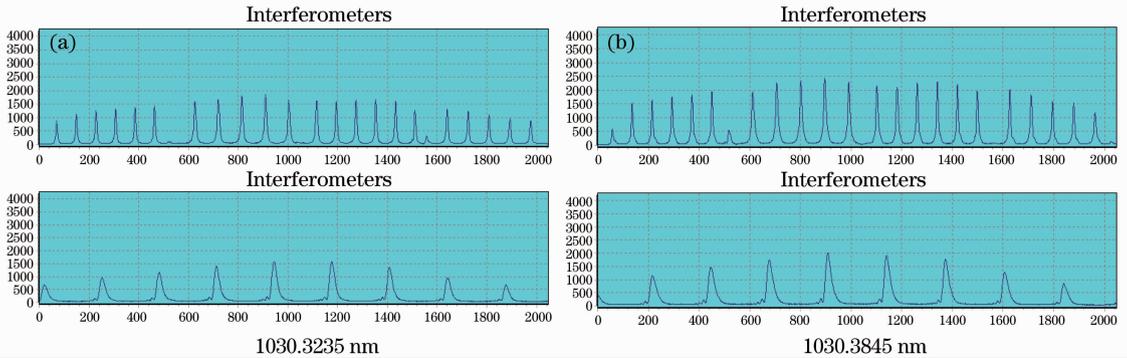


图 6 温度为 293 K 时中心波长。(a)抽运光;(b)受激布里渊散射

Fig. 6 Central wavelength at 293 K. (a) Pump light; (b) SBS

4.2 温度对阈值的影响

实验中利用温度控制系统对光纤进行低温制冷,图 7 给出了受激布里渊散射阈值与温度的关系曲线,从图中可以看出,温度越低,受激布里渊散射的阈值越高,即低温提高了反向斯托克斯光的阈值。受激布里渊散射阈值与热噪声中布里渊声子强度和声子寿命两个因素的影响有关。当温度降低时,粒

子热运动的剧烈程度下降,声子强度降低,斯托克斯种子光强度也就降低,受激布里渊散射发生阈值也就越高;另外,在低温条件下,声子更为稳定,因而寿命更长,声子衰减系数就越小,从(2)式可以知道阈值增益系数 G 就越大,发生阈值也就越高。

4.3 温度对布里渊频移的影响

布里渊频移是受激布里渊散射的一个重要参

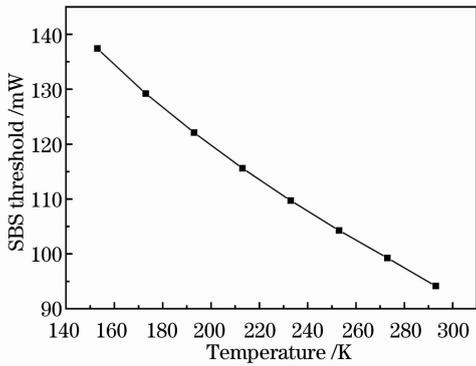


图 7 受激布里渊散射阈值与温度的关系
Fig. 7 SBS threshold versus temperature

量。由于受激布里渊散射是由介质声学声子引起的非弹性散射,因此受激布里渊散射的频移主要取决于介质的声学、弹性力学和热弹性力学等特性,这些介质特性会受光纤温度变化的影响而引起布里渊频移的变化。在实验中利用扫描法布里-珀罗干涉仪来测量布里渊频移变化与温度的关系,图 8 是布里渊频移随温度变化的曲线。可以看出,在低温状态下,受激布里渊散射斯托克斯光的频移的总变化趋势是随温度的增长而增长,在一定温度范围内(113 K~293 K)呈线性关系。对于受激布里渊散射过程可以看成是一个抽运光子的湮灭,同时产生一个斯托克斯光子和一个受激声学声子。这受激声学声子再与一个入射抽运光子相作用,又增加一个受激声学声子,同时又产生一个斯托克斯光子,像这样重复下去,形成一种雪崩过程。而热振动声子的波矢受温度影响,在不同的温度下有所变化,从而必然导致布里渊频移的变化。

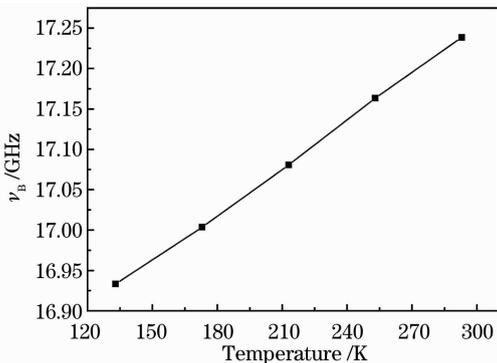


图 8 布里渊频移与温度的关系

Fig. 8 Brillouin frequency shift versus temperature

5 结 论

测量了不同温度下单模石英光纤受激布里渊散射的阈值、布里渊频移,对于反向斯托克斯光,温度

越低其阈值越高。随着温度的升高,布里渊频移增大,在一定范围内布里渊频移与温度呈线性关系。从实验分析知道,温度对单模光纤中布里渊频移的影响较小,但受激布里渊散射阈值受温度影响则较为明显,因此在高功率光纤放大器中,可以利用对光纤进行温度控制来抑制光纤中的受激布里渊散射,从而提高放大器阈值输出功率,突破光纤放大器向高功率发展的瓶颈,具有一定的借鉴意义;另外,对研究光纤中受激布里渊散射的应用,如解决光纤布里渊激光器和光纤布里渊放大器的性能(波长、增益和光谱宽度等)受温度变化的影响等,适当进行温度补偿,也提供了实验依据。

参 考 文 献

- Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics, Second Edition[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 245~246
- Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用(第二版)[M]. 贾东方, 余震虹译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 245~246
- Zhao Lijuan. Analysis and calculation of SBS threshold in single mode fibers[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2009, **3**(3): 24~26
- 赵丽娟. 单模光纤受激布里渊散射阈值分析与计算[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2009, **3**(3): 24~26
- D. Gapontsev. 6 kW single mode ytterbium fiber laser in all-fiber format [C]. Albuquerque: Solid State and Diode Laser Technology Review, 2008. 258
- Liu Chi, Leng Jinyong, Qi Yunfeng *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency, single-mode, linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502001
- 刘 驰, 冷进勇, 漆云凤等. 单频偏偏掺 Yb 光纤放大器中的受激布里渊散射实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502001
- V. Leconuche, S. Randoux, R. Segard *et al.*. Dynamics of a Brillouin fiber ring laser: off-resonant case[J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **53**(4): 2822~2828
- Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 650~654
- 宋牟平, 鲍 翀, 裘 超等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 650~654
- Takuo Tanemura, Yuichi Takushima, Kazuro Kikuchi. Narrowband optical filter, with a variable transmission spectrum, using stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17): 1552~1554
- Yang Xiufeng, Li Qun, Tong Zhengrong *et al.*. Research of a novel configuration of optically controlled delays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0323003
- 杨秀峰, 李 群, 童峥嵘等. 基于受激布里渊散射的新型多级慢光延时结构的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0323003
- A. Yeniay, J. M. Delavaux, J. Toulouse. Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8): 1425~1432
- Andrey Kobayakov, Shiva Kumar, Dipak Chowdhury *et al.*. Design concept for optical fibers with enhanced SBS threshold[J].

- Opt. Express*, 2005, **13**(14): 5338~5346
- 11 Lufan Zou, Xiaoyi Bao, Shahraam Afshar V. *et al.*. Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29** (13): 1485~1487
 - 12 Wang Zhenbao, Shao Bibo, Zhang Lei *et al.*. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 090603
王振宝, 邵碧波, 张 磊 等. 光纤受激布里渊散射阈值分析与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 090603
 - 13 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
 - 14 R. G. Smith. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2489~2494
 - 15 A. Kong. Laser Emission in Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers[D]. Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1997
 - 16 Toshio Kurashima, Mitsuhiro Tateda. Thermal effects on the Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(15): 2219~2222

栏目编辑: 王晓琰