

# 基于受激布里渊散射的新型多级慢光延时结构的研究

杨秀峰<sup>1</sup> 李 群<sup>1</sup> 童峥嵘<sup>1</sup> 姚 斌<sup>1</sup> 李 元<sup>2</sup> 赵军发<sup>2</sup> 刘艳格<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 天津理工大学计算机与通信工程学院, 天津 300384)  
<sup>2</sup> 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 设计了一种基于受激布里渊散射(SBS)的新型多级慢光延时结构。该多级延时结构将两段慢光延时介质用两个环形器相连接,使经过一级延时后剩余的抽运光经过环形器进入到第二段慢光延时介质中作为二级延时的抽运。该结构与传统的多级慢光延时结构相比,不需要为每段延时介质提供独立的抽运系统,结构简单,抽运光利用率高,延时效果显著。实验选用两段 12 km 的单模光纤构成两级延时结构,在抽运光功率为 5.0 mW 下,50 ns 的脉冲信号经过一级慢光延时介质获得 40.68 dB 的布里渊增益和 46.163 ns 的延时,经过二级慢光延时介质后,最终获得了 90.552 ns 的延时,抽运光利用率达到 96%。

**关键词** 光通信;抽运光利用率;二级延时;受激布里渊散射;慢光

**中图分类号** O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0323003

## Research of a Novel Configuration of Optically Controlled Delays Based on Stimulated Brillouin Scattering

Yang Xiufeng<sup>1</sup> Li Qun<sup>1</sup> Tong Zhengrong<sup>1</sup> Yao Bin<sup>1</sup> Li Yuan<sup>2</sup> Zhao Junfa<sup>2</sup> Liu Yange<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology,  
Tianjin 300384, China  
<sup>2</sup> Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** A novel configuration of multistage slow-light delay based on stimulated Brillouin scattering is presented. The two fiber segments of slow light delay are cascaded by two circulators in the configuration. The pump which propagates through the first-stage delay medium can launch into the second-stage delay medium through the circulator as the pump of the second delay line. Compared with the conventional configuration, the new one does not need separate pump for each delay medium, has simple structure, high pump efficiency, and good delay effect. When the delay configuration is made of two single-mode fibers which are 12 km long, under the pump power of 5.0 mW, 40.68 dB of Brillouin gain is achieved for the pulse signal of 50 ns, and the delay is up to 46.163 ns through the first section of single-mode fiber. Finally, 90.552 ns delay is obtained through the two segments of fiber, and the efficiency of the pump power is up to 96%.

**Key words** optical communications; efficiency of the pump power; two-line of delay; stimulated Brillouin scattering; slow light

**OCIS codes** 230.1150; 290.5900; 070.6020

## 1 引 言

慢光是当前光学领域研究的热点。虽然产生慢光的方法有多种,但是由于光纤中基于受激布里渊散射(SBS)的可控慢光技术具有与现有的光纤通信网络兼容,工作在通信波段,且其波长可调,构建成

本低等优点<sup>[1,2]</sup>,具有很大的应用前景,成为慢光研究领域的热点。由 SBS 产生的慢光的时延与增益成正比,但是 SBS 存在增益饱和的限制,当抽运光功率超过布里渊饱和阈值,自发布里渊放大(SBA)会在没有信号输入时产生大量抽运光损耗<sup>[3]</sup>,同时,

收稿日期: 2010-07-12; 收到修改稿日期: 2010-10-19

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327605)和天津市自然科学基金(08JCYBJC14400)资助课题。

作者简介: 杨秀峰(1964—),女,博士,硕士生导师,主要从事现代光通信与光传感等方面的研究。

E-mail: yangxfbee@163.com

当信号功率增加到一定程度时,其增益也会达到饱和,这两种情况下可获得的信号最大增益有一定的上限,从而限制了单级延时结构可获得的最大延时<sup>[4,5]</sup>。

为了获得更大的延时,通常采用双抽运光和多级延时结构。双抽运光结构是利用一个抽运光产生的增益峰与另一抽运光产生的损耗峰叠加以增大增益斜率的原理来增加单级延时<sup>[6]</sup>,需要同时对两个抽运进行调制;传统的多级慢光延时结构应用多级延时线提高延时<sup>[7,8]</sup>,每段延时介质采用独立抽运光,抽运光功率只用于本级延时,利用率只有50%左右,效率较低。无论是双抽运光结构还是传统的多级延时结构,系统结构相对复杂。

由于受激布里渊散射的阈值功率很低,抽运光功率在经过受激布里渊散射过程后仍有相当大的剩余功率足以为下一级延时提供抽运。本文在重复利用抽运光的基础上,提出了一种提高抽运光利用率的多级延时结构,抽运光在经过一级延时后剩余的抽运光功率再进入下一级延时介质,作为其抽运功率再次与信号光发生受激布里渊散射,使信号光得到二次延时。如果初始抽运光功率足够大,且不超过布里渊放大饱和阈值,经过二级延时后剩余的抽运光功率还可以进行三级及以上延时。本文采用这种结构在抽运光功率为5.0 mW下,50 ns的脉冲信号获得40.68 dB的布里渊增益,脉冲经过一级慢光介质延时了46.163 ns,经过二级慢光介质后,最终获得了90.552 ns的延时,抽运光利用率达到96%。

## 2 受激布里渊散射的原理

基于受激布里渊散射的延迟系统中,信号光与抽运光满足相位匹配条件

$$f_s = f_p - \nu_B, \quad (1)$$

式中 $f_s$ 为信号光光频, $f_p$ 为抽运光光频, $\nu_B$ 为布里渊频移。由于声子的散射作用,部分抽运光转换为斯托克斯光,对信号光产生指数放大。突然产生的增益会引起群折射率的强烈变化,使信号光的群速度减慢。信号光在 $\nu_B$ 处得到最大增益和最大延迟。信号光的延迟正比于群折射率的变化,可以表示为

$$\Delta T = \Delta n_g \frac{L_{\text{eff}}}{c} = \frac{G}{\Gamma_B}, \quad (2)$$

式中 $G = g_0 I_p L_{\text{eff}}$ 是信号光的增益, $G$ 与布里渊增益系数 $g_0$ ,抽运功率 $I_p$ 以及光纤的有效长度 $L_{\text{eff}}$ 成正比。 $\Gamma_B/2\pi$ 是增益谱的带宽<sup>[2]</sup>。由(2)式可以看出信号光的延迟量与增益成正比,因此通过控制信号光的增

益,即抽运光功率可以实现对信号光延迟的控制。

基于受激布里渊散射慢光系统的传输速率受到系统的布里渊增益谱带宽( $\Delta\nu_B$ )的限制,因此调制信号的频率不能大于布里渊增益带宽。当调制频率大于布里渊增益带宽时,脉冲信号会产生严重失真。当满足 $\tau_{\text{in}}\Gamma_B/4 > 1$ 时,调制信号的速率小于增益带宽,脉冲受系统影响很小,式中 $\tau_{\text{in}}$ 是脉冲持续时间, $\Gamma_B$ 是布里渊增益带宽角频率<sup>[10,11]</sup>。实验中选用10 MHz的正弦信号作为调制信号,此时 $\tau_{\text{in}}\Gamma_B/4 \approx 2.43 > 1$ ,可保持信号在传输过程中的无失真传输。

## 3 实验与讨论

基于SBS的新型多级慢光延时结构如图1所示。选用2段12 km的标准单模光纤作为慢光延时介质,构成二级延时结构。从可调谐激光器(SANTEC TSL-210V)输出的波长1550.478 nm,功率为6.4 dBm的光经隔离器(ISO)后被一个3 dB耦合器分成上下两路。下路的光经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后作为产生受激布里渊散射的抽运光,抽运光功率的大小由可调衰减器1(VOA1)来控制。抽运光经过环形器2(C2)进入到作为第一级延时介质的12 km的单模光纤中。上路的光在进入强度调制器1(IM1)之前通过偏振控制器控制其偏振态,强度调制器1的射频调制频率为10.858 GHz,其数值等于作为慢光介质的普通单模光纤在1550 nm处的布里渊频移<sup>[11]</sup>。经过强度调制器1后,输出的光谱成分中含有中心载波及频率间隔为10.858 GHz的各阶边带。调节直流偏置电压,抑制中心载波,使布里渊频移的一阶边带具有最大的信噪比,实验测得中心载波与一阶边带的功率差可达到15 dB。强度调制器1输出的光波经过环形器1(C1)到达光纤布拉格光栅(FBG),FBG的中心波长与信号光相同,且在短波长具有陡峭的边缘,其可以滤除中心载波成分,使具有布里渊下频移的光波具有最大的信噪比,然后布里渊下频移信号进入强度调制器2(IM2)进行调制,产生具有一定脉宽的脉冲信号。信号光经过环形器3(C3)进入到作为一级延时介质的单模光纤中,与抽运光发生受激布里渊散射被放大,产生延时。用于一级延时的抽运光剩余功率经过环形器3(C3),环形器4(C4)进入到二级延时介质中,经过一级延时的信号光经过环形器2(C2),再由可调衰减器2(VOA2)调节信号光强度,进入到二级延时介质中与一级延时剩余的抽运光再发生受激布里渊散射,使得脉冲信号第二次被延时。放大的信号光用光谱

仪(OSA, ANDO AQ6317B)来进行测量,分辨率设置为 0.01 nm。产生的脉冲信号的延时通过光电探

测器,输入到示波器(Oscilloscope, YOKOGAWA DL9140)进行测量。

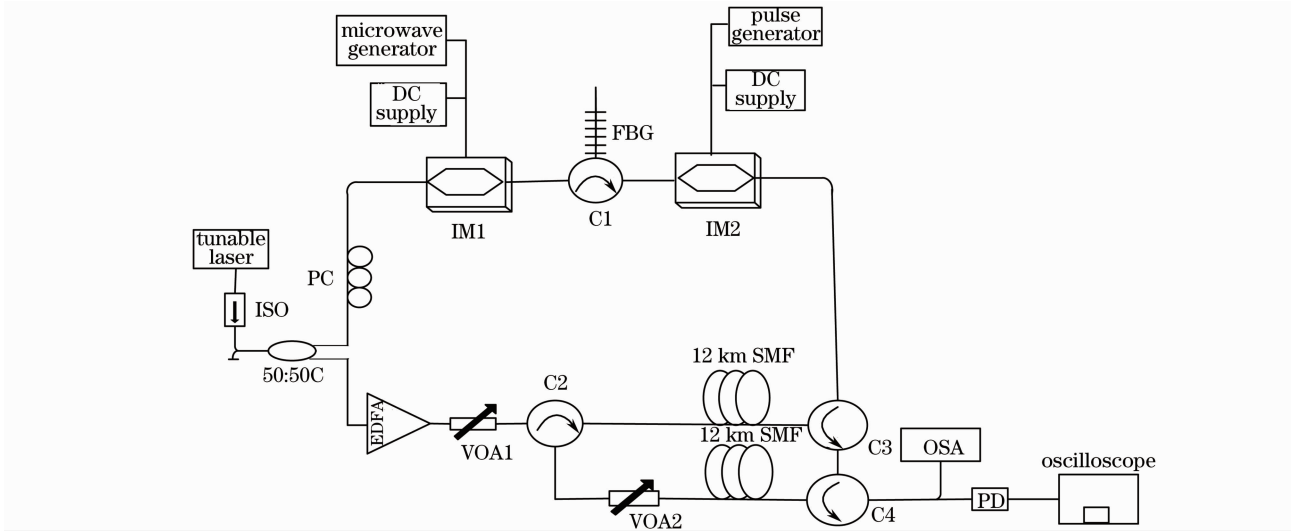


图 1 基于受激布里渊散射的新型二级慢光延时结构

Fig.1 Novel configuration of the two-stage slow light delay based on SBS

实验测得经过一级延时后剩余抽运功率为 2.6 mW,用小信号放大法<sup>[12,13]</sup>测得布里渊增益谱如图 2 所示,布里渊增益带宽为 31.1 MHz。在 1550 nm 处,测得布里渊频移为 10.858 GHz,布里渊阈值为 1.5 mW。

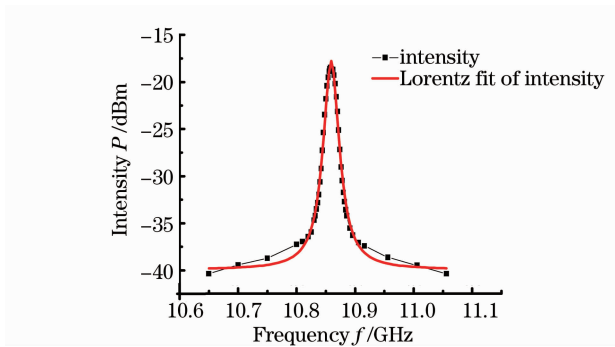


图 2 系统测得的布里渊增益谱

Fig.2 Measured Brillouin gain spectra

图 3 是信号布里渊增益与抽运功率的关系曲线。当信号功率分别为 -23.35, -33.86 和 -43.55 dBm 时,在线性区,随着抽运功率的加大,信号的布里渊增益呈线性增长。当抽运功率达到增益饱和和阈值时,由于自发布里渊散射的加强,放大器开始饱和,信号增益开始变得不明显,且不同功率大小的信号进入饱和时的抽运功率是不一样的,信号功率越大,进入饱和状态越早,所获得的非饱和布里渊增益越小;信号越小,所获得的非饱和布里渊增益越大。实验中,选用功率为 -43.55 dBm 的小信号进行测量,抽运光

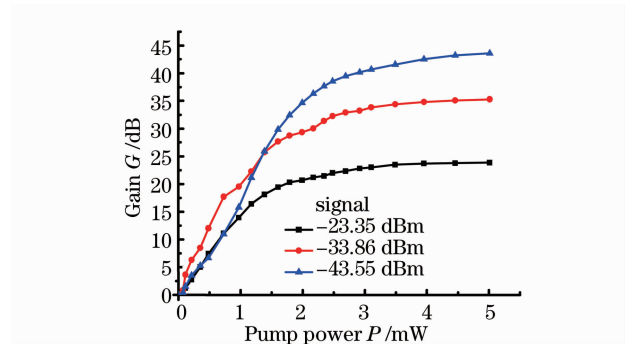


图 3 不同信号功率下信号的增益曲线

Fig.3 Brillouin gain versus pump power for different signal powers

功率设定为 5.0 mW,以保证系统无论是在一级延时还是二级延时都工作在线性非饱和区。

功率为 -43.55 dBm 的小信号经过一级延时,在非饱和增益为 40.68 dB 下得到了 46.163 ns 的延时。而经过一级延时后的剩余抽运光功率为 2.6 mW,保证二级延时系统仍然能工作在线性非饱和区,经过一级延时的信号光被可调衰减器 2 衰减至 -40.57 dBm,后再经过二级延时,信号又获得了 37.87 dB 的非饱和布里渊增益和 44.389 ns 的延时。这样信号经过两级延时后在 78.55 dB 的总非饱和增益下获得了 90.552 ns 的总延时。图 4(a), (b) 分别是 50 ns 脉冲经过一级延时后在非饱和增益 40.68 dB 下和经过二级延时后在非饱和增益 37.87 dB 下的延时直观图。

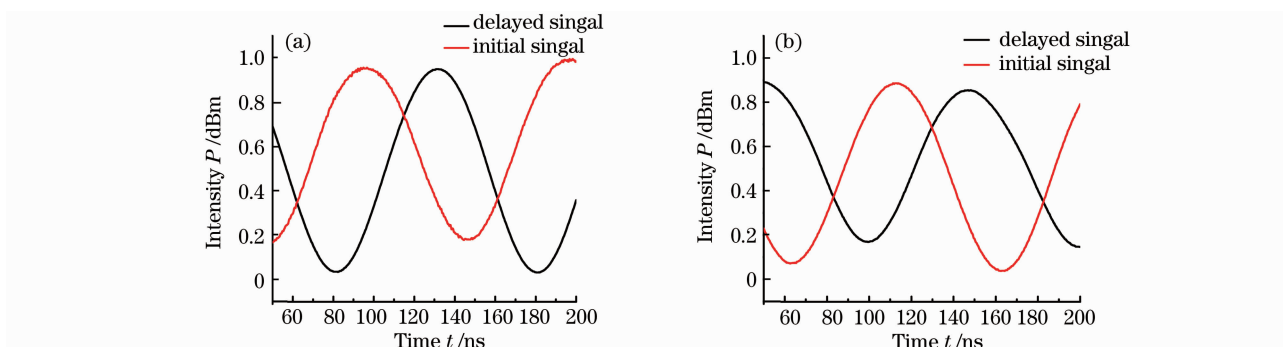


图 4 (a)一级延时后和(b)二级延时后的延时直观图

Fig. 4 Illustrative diagram of delay after (a) the first-stage delay line and (b) the second-stage delay line

图 5(a), (b)分别是在不同的布里渊增益下 50 ns 脉冲经过一级延时和二级延时后的延时时间的变化曲线。基于受激布里渊散射慢光系统的延时曲线的斜率可以由公式  $S_{dg} = \Delta t_d / G_B \approx 1 / (8.686\pi\Delta\nu_B)$  近似得到<sup>[14]</sup>, 斜率与系统的布里渊增益谱带宽有关。理论计算得到系统的延迟斜率约为 1.179 ns/dB, 实验测得的延迟斜率为 1.116 ns/dB, 如图 5(a), (b) 的直线所示, 可以看出实验测得的数据与理论有很好的吻合。该二级延时结构抽运光的利用率达到

96%, 而传统多级延时结构在相同的初始抽运功率下抽运光利用率为 48%, 因此, 该结构可以大大提高抽运光利用率。该新型多级延时结构应用于 SBS 慢光系统不但可以提高抽运光利用率, 降低传统多级延时系统复杂程度, 显著增加系统的时延, 而且通过该延时结构与增益谱展宽机制结合, 也可以显著减小脉冲的展宽, 从而改善整个系统的性能, 具有潜在的应用价值。

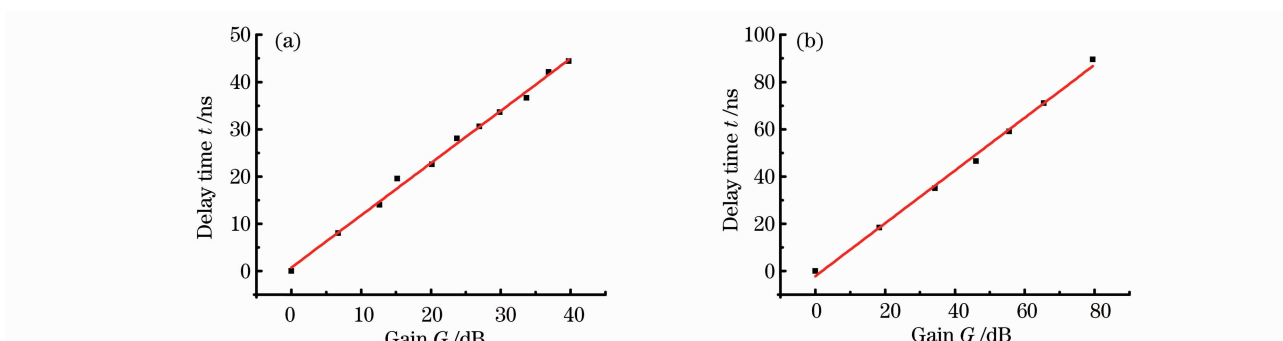


图 5 (a)一级延时下和(b)二级延时下延时时间随增益的变化

Fig. 5 Delay time versus Brillouin gain via (a) one delay line and (b) two delay lines

## 4 结 论

基于重复利用抽运光的多级慢光延时结构, 可以有效的提高抽运光的利用率, 并且可以降低传统多级延时结构系统的复杂度。实验表明, 脉冲信号在最大非饱和增益 78.55 dB 的情况下经过二级延时获得了 90.552 ns 的延迟。该结构应用于 SBS 慢光结构可以有效的提高延时时间, 具有潜在的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 E. Cabrera-Granado, Daniel J. Gauthier. Recent advancements in stimulated Brillouin scattering slow light[J]. *Opt. Pura Apl.*, 2008, **41**(4): 313~323
- 2 Ding Yingchun, Ren Yurong. Latest developments of stimulated Brillouin scattering slow light pulse delays in optical fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 51~56
- 3 Zhan Li, Gu Zhaochang, Xing Liang *et al.*. Advances of fiber Brillouin lasers and amplifiers and their applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 901~911
- 4 Zhaoming Zhu, Daniel J. Gauthier. Numerical study of all-optical slow light delays via stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11): 2378~2384
- 5 Thomas Schneider, Ronny Henker, Kai-Uwe Lauterbach *et al.*. Delay Limits of SBS based slow light[C]. *Slow and Fast Light*, Boston, 2008
- 6 Thomas Schneider, Ronny Henker, Kai-Uwe Lauterbach *et al.*. Comparison of delay enhancement mechanisms for SBS-based slow light systems[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9606~9613
- 7 Kwang Yong Song, Miguel Gonzalez Herraz, Luc Thevenaz. Latest developments of stimulated Brillouin scattering slow light pulse delays in optical fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 51~56
- 8 丁迎春, 任玉荣. 利用受激布里渊散射在光纤中实现慢光延迟线的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 51~56
- 9 Zhan Li, Gu Zhaochang, Xing Liang *et al.*. Advances of fiber Brillouin lasers and amplifiers and their applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 901~911
- 10 詹黎, 顾照昶, 邢亮等. 光纤布里渊激光器和放大器的研究进展及其应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 901~911
- 11 Zhaoming Zhu, Daniel J. Gauthier. Numerical study of all-optical slow light delays via stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11): 2378~2384
- 12 Thomas Schneider, Ronny Henker, Kai-Uwe Lauterbach *et al.*. Delay Limits of SBS based slow light[C]. *Slow and Fast Light*, Boston, 2008
- 13 Thomas Schneider, Ronny Henker, Kai-Uwe Lauterbach *et al.*. Comparison of delay enhancement mechanisms for SBS-based slow light systems[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9606~9613
- 14 Kwang Yong Song, Miguel Gonzalez Herraz, Luc Thevenaz.

- Long optically controlled delays in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1782~1784
- 8 Ronny Henker, Kai-Uwe Lauterbach, Andrzej Wiatrek *et al.*. Gain enhancement in slow-light systems based on stimulated Brillouin scattering with several short fibers[C]. *Optical Fiber Communication*, San diego, 2009.OWU5
- 9 Kwong Yong Song, Kazuo Hotate. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 217~219
- 10 Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(15): 15390
- 11 Liu Yu, Ren Liyong, Wang Shihe. Theoretical study of stimulated Brillouin scattering slow light and pulse-broadening reduction using double broadband pump in optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2077~2082
- 刘宇, 任立勇, 王士鹤. 光纤中双宽带抽运SBS慢光及其脉冲展宽减小的理论研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2077~2082
- 12 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
- 13 K. S. Abedin. Stimulated Brillouin scattering in single-mode tellurite glass fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11766~11772
- 14 G. Qin, H. Sotobayashi, M. Tsuchiya *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in a single-mode tellurite fiber for amplification, lasing, and slow light generation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(5): 492~498