

基于偏振控制技术提高光纤受激布里渊散射慢光稳定性研究

巨海娟 任立勇 梁健 马成举 林霄

(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 基于对光纤中抽运光束和斯托克斯光束的偏振态控制,提出了一种提高受激布里渊散射(SBS)慢光稳定性的实验方案。通过在保偏光纤两端分别熔接保偏光环行器(快轴阻塞)组成一个慢光单元,确保了光纤中抽运光束和斯托克斯光束具有一致的偏振态(沿保偏光纤慢轴)。建立了基于此慢光单元的SBS慢光实验研究系统,对脉宽为38 ns的高斯脉冲获得了0.87 ns/dB的时间延迟;相对于不加偏振控管的单模石英光纤而言,该慢光单元系统的布里渊增益因子提高了3倍。研究表明:该方案能有效地提高SBS效应和SBS慢光时延的稳定性。

关键词 光通信;受激布里渊散射;偏振态;保偏光纤;慢光

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.030603

Stability Improvement of SBS Slow Light in Optical Fibers Based on Polarization Management Technique

Ju Haijuan Ren Liyong Liang Jian Ma Chengju Lin Xiao

(State 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 Based on controlling the polarizations of the pump and Stokes beams in an optical fiber, a simple scheme for enhancing the stability of stimulated-Brillouin-scattering (SBS) slow light is proposed. By fusing a polarization-maintaining circulator (its fast axis is blocked) to each terminal of a polarization-maintaining fiber (PMF), we construct a slow-light element which ensures the two beams always having identical polarizations (along the slow axis of the PMF). Meanwhile, an experimental setup is established to study the slow-light performance. A tunable time delay of 0.87 ns/dB is demonstrated for a Gaussian pulse with a pulse width of 38 ns. The gain factor of the Brillouin gain in this element enhances three times as compared with that in the single-mode fiber. The experiment indicates that such a polarization-managed scheme significantly improves the stability of SBS interaction and thus that of the slow-light time delay.

Key words optical communications; stimulated Brillouin scattering (SBS); polarization state; polarization-maintaining fiber; slow light

OCIS codes 060.4510; 290.5900; 260.5430; 060.2420

1 引言

近年来,对各种光学介质中光脉冲群速度的减慢(慢光)已成为一个研究热点,包括理论分析和实验验证。利用光的高速传播特性,光通信技术在大容量高密度信息获取和传输方面取得高速发展。但是超高的光速给人们在时间上控制和利用光带来了难题,如果可以实现光信息的缓存,则可以解决这个问题。慢光的

收稿日期: 2012-12-30; **收到修改稿日期**: 2013-01-02; **网络出版日期**: 2013-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(60778020,61275149)、中国科学院“西院之光”人才培养计划(2009LH01)和留学人员科技活动项目择优资助经费资助课题。

作者简介: 巨海娟(1988—),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: jhjcumtgx@163.com

导师简介: 任立勇(1971—),男,研究员,主要从事光纤通信与光纤传感等方面的研究。

E-mail: renliy@opt.ac.cn(通信联系人)

出现使得脉冲编码信息能实现可调的延迟。慢光技术还在数据精密同步、全光开关、光信号处理以及增强线性与非线性光学特性等领域有着广泛的应用^[1~4]。

受激布里渊散射(SBS)是光纤中一种常见的非线性效应。SBS因其光功率阈值低、波长可调谐、在室温下工作及与现行通信系统的兼容性好等优点吸引了广大研究者^[5~11]。抽运光和斯托克斯光相互作用,电致伸缩效应产生一个运动的周期性折射率光栅,运动的周期性折射率光栅对抽运光产生强的后向散射从而使斯托克斯光呈现指数性放大。然而,传统的光纤很容易受双折射及外界因素的影响,导致光在光纤中传播时偏振态发生变化,从而不可避免地引起光纤中两束光耦合效率的波动甚至减小。文献^[12,13]论证了布里渊增益与偏振态的变化紧密相关。Zadok等^[12]用微分方程在琼斯空间和斯托克斯空间分析了SBS的耦合效率对偏振态的依赖关系并用实验证明了此分析的正确性。Song等^[14]研究得出抽运光和斯托克斯光沿保偏光纤(PMF)的快轴和慢轴传播的布里渊频移是不同的。这说明偏振态的变化影响着光纤中被放大斯托克斯信号的稳定性。

本文提出了一个可以有效限制偏振态扰动对SBS效应影响的慢光单元,即在550 m保偏光纤两端熔接保偏环行器(快轴阻塞)。基于这个慢光单元,组建了一个实验系统研究偏振态对SBS慢光特性的影响。由于光纤中相互作用的抽运光和斯托克斯光具有一致(沿保偏光纤慢轴)的偏振态,可得到耦合效率高、稳定性增强的SBS作用从而得到稳定的SBS慢光。实验中脉宽38 ns的高斯脉冲实现了0.87 ns/dB的理想线性时间延迟,与不加偏振控管的单模石英光纤系统相比,SBS效应的耦合效率提高了3倍。

2 实验和结果讨论

图1为基于保偏光纤两端熔接保偏环行器慢光单元的SBS慢光系统结构示意图。利用一个波长可调激光器(WTL)做光源,输出光被分成两束,5%的部分被放大后做抽运光,功率计(PM)用来监测进入光纤的抽运光功率大小。95%的部分经电光调制器(EOM1)后实现双边带调制,即载频抑制,用窄带光纤光栅选出双边带中的下频移部分(频移量10.508 GHz)做信号光。

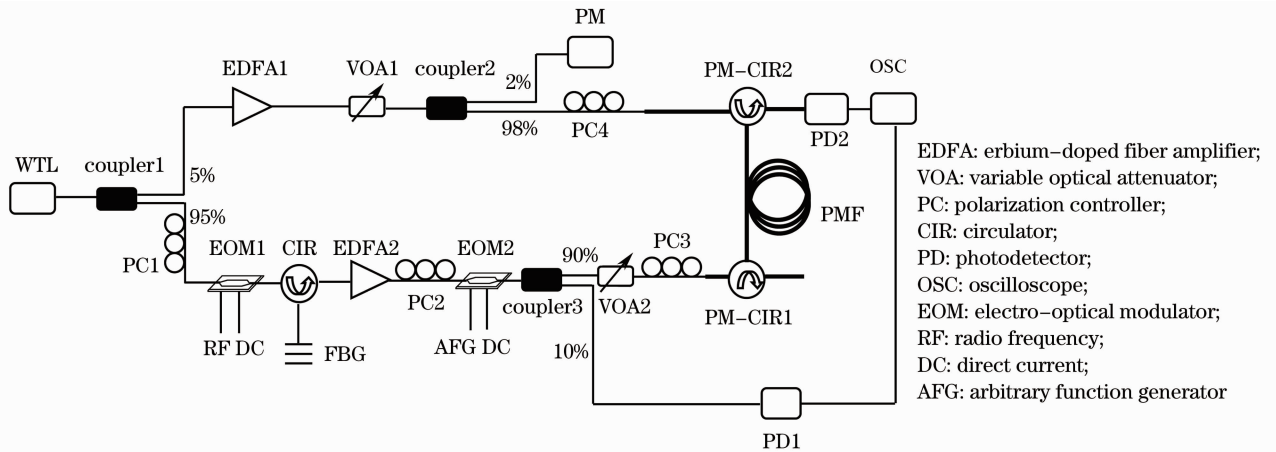


图1 SBS慢光系统结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of the SBS slow-light system

利用另一个电光调制器(EOM2)将被放大的下频移连续光调制成高斯脉冲。EOM2的输出信号分成两束,10%的部分接光电探测器作为触发信号,90%的部分经过一个衰减器作为斯托克斯光。两个偏振控制器(PC3和PC4)调整抽运光和斯托克斯光的偏振态,两束光经两个保偏环行器后以同一的偏振态(沿保偏光纤的慢轴方向)被注入到保偏光纤发生SBS作用,信号脉冲被放大并延迟,用另一个光电探测器探测被延迟的信号脉冲并在示波器上观察。

为了研究本实验系统的慢光特性,调制了一个脉宽为38 ns的高斯脉冲作为信号光。由于布里渊增益正比于抽运光功率,通过调节抽运光功率来控制增益,从而达到对时间延迟的控制。图2是抽运光功率由0增加到31.79 mW时的输出信号脉冲,横坐标表示脉冲传播时间,纵坐标是脉冲的归一化强度。当抽运光功

率为 31.79 mW 时,达到最大增益 22.43 dB。从图 2 可以清楚地看到随着抽运光功率的增大,信号脉冲向右移动,信号脉冲被延迟。

单模光纤具有双折射特性,实际应用中由于外界环境随机扰动,可能引起光纤中双折射特性的变化,从而导致光纤中光的偏振态的变化。任何时间或空间上偏振态的变化都会影响 SBS 作用的稳定性。而本文所提出的慢光单元,由于在整个 SBS 过程中抽运光和信号光具有一致的偏振态,所以有着稳定的 SBS 效应从而有着稳定的 SBS 慢光。理论上布里渊增益与抽运功率成正比^[11],图 3 所示是实验所测布里渊增益与抽运光功率的关系。

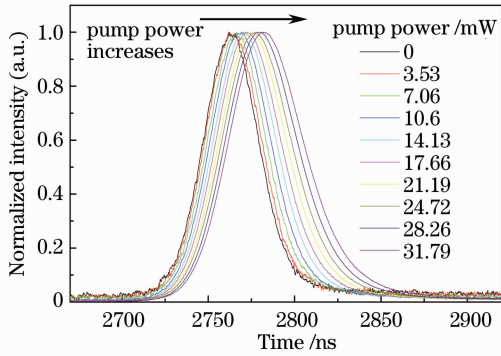


图 2 不同抽运光功率下的信号输出脉冲归一化强度

Fig. 2 Normalized intensity of output signal pulse as a function of time under different pump powers

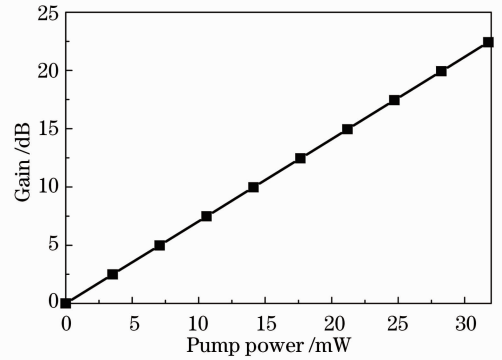


图 3 布里渊增益随抽运光功率的变化

Fig. 3 Brillouin gain as a function of pump power

为了比较我们的实验与单模光纤的 SBS 慢光特性,定义一个表征布里渊增益的因子 FOM^[15]。本慢光单元的增益因子 FOM 是 0.000904 dB/(mW·m),这个数值约是单模光纤中的 3 倍[0.000297 dB/(mW·m)]^[12]。这说明在偏振管理下 SBS 作用的耦合效率提高了。

SBS 过程中斯托克斯光幅度响应和相位响应与 Kramers-Kronig 关系相关^[16],斯托克斯光脉冲在布里渊增益峰值处得到最大的时间延迟^[5,17],慢光时间延迟与布里渊增益呈线性关系,得到 0.87 ns/dB 的时间延迟,如图 4 所示,图中的点代表实验结果,实线代表理论结果,可以看出实验结果与理论结果是相符合的。

对一个脉宽为 τ_{in} (半峰全宽,FWHM) 的高斯脉冲而言,在光纤中经历 SBS 过程被放大的同时,伴随着脉冲的展宽,记输出脉冲宽度为 τ_{out} ,由此可得到脉冲展宽因子^[17]。图 5 是脉冲展宽因子随布里渊增益变化的关系,图中的点代表实验结果,实线代表理论结果,尽管在最大增益 22.43 dB 处有 2.7% 的最大相对误差,实验结果与理论结果基本符合。

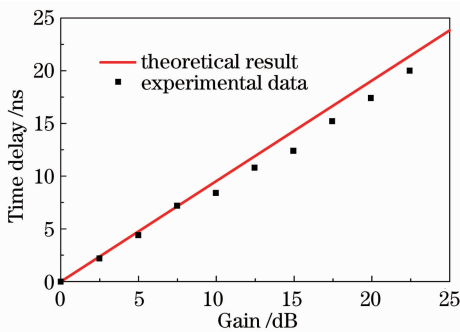


图 4 时间延迟随布里渊增益的变化

Fig. 4 Time delay as a function of Brillouin gain

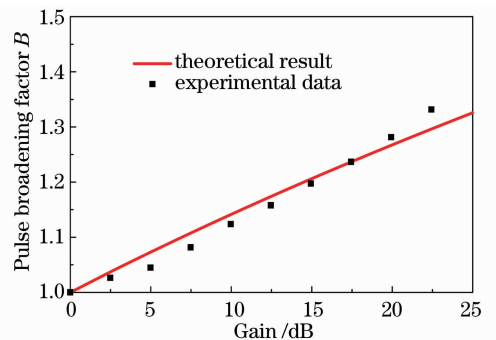


图 5 脉冲展宽因子随布里渊增益的变化

Fig. 5 Pulse broadening factor with respect to Brillouin gain

3 结 论

提出了一个在保偏光纤两端熔接保偏环形器的慢光单元,基于这样的一个慢光单元,组建了实验系统在 550 m 保偏光纤中研究了偏振态对 SBS 的慢光特性影响。实验得到了 0.87 ns/dB 的理想线性时间延迟,

SBS 效应耦合效率是未加偏振控管的单模石英光纤系统的 3 倍, 并且脉冲的展宽因子与理论结果相符合。由于在 SBS 过程中抽运光和斯托克斯光的偏振态始终保持一致, 有效地提高了 SBS 的耦合效率及慢光的稳定性。

参 考 文 献

- 1 D. Dahan, G. Eisenstien. Tunable all optical delay via slow and fast light propagation in a Raman assisted fiber optical parametric amplifier; a route to all optical buffering[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6234~6249
- 2 S. Ha, A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar. Slow-light switching in nonlinear couplers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1429~1431
- 3 F. G. Sedgwick, C. J. Chang-Hasnain, P. C. Ku *et al.*. Storage-bit-rate product in slow-light optical buffers[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(24): 1347~1348
- 4 H. J. Yang, S. J. Ben Yoo. All-optical variable buffering strategies and switch fabric architectures for future all-optical data routers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(10): 3321~3330
- 5 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): 153902
- 6 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
- 7 X. L. Shi, S. L. Zheng, H. Chi *et al.*. Refractive index sensor based on tilted fiber Bragg grating and stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(9): 10853~10858
- 8 Y. Mizuno, M. Kishi, K. Hotate *et al.*. Observation of stimulated Brillouin scattering in polymer optical fiber with pump-probe technique[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(12): 2378~2380
- 9 S. H. Wang, L. Y. Ren, Y. Liu *et al.*. Zero-broadening SBS slow light propagation in an optical fiber using two broadband pump beams[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 8067~8076
- 10 L. Y. Ren, T. Yasuo. 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
- 11 Liu Yu, Ren Liyong, Hu Manli *et al.*. Characteristic measurements of fiber Brillouin scattering using fiber Bragg grating based microwave-sweeping single sideband modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0105002
刘 玉, 任立勇, 忽满利 等. 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[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0105002
- 12 Zadok, E. Zilka, A. Eyal *et al.*. Vector analysis of stimulated Brillouin scattering amplification in standard single-mode fibers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21692~21707
- 13 T. Horiguchi, M. Tateda, N. Shibata *et al.*. Brillouin gain variation due to a polarization-state change of the pump or Stokes fields in standard single-mode fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(6): 329~331
- 14 K. Y. Song, W. W. Zou, Z. Y. He *et al.*. All-optical dynamic grating generated based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 926~928
- 15 K. Y. Song, K. S. Abedin, K. Hotate *et al.*. Highly efficient Brillouin slow and fast light using As₂Se₃ chalcogenide fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 5860~5865
- 16 R. W. Boyd. *Nonlinear Optics*[M]. New York: Academic Press, 2008. 58~63
- 17 Z. M. Zhu, D. J. Gauthier, Y. Okawachi *et al.*. 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