

文章编号: 0253-2239(2010)08-2437-04

光子晶体光纤中受激布里渊散射慢光研究

赵军发¹ 杨秀峰^{2*} 李 元¹ 童峥嵘² 刘艳格¹ 赵启大¹

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

摘要 基于受激布里渊散射的慢光在全光通信中具有重要的应用前景。传统的光纤作为慢光介质, 具有较低的延迟效率, 对光纤长度和抽运功率要求较高, 而高非线性光子晶体光纤作为慢光介质应用于慢光系统, 可以提高系统的延迟效率。实验选用一段 70 m 长的高非线性光子晶体光纤作为慢光介质, 在抽运功率 101 mW 情况下, 50 ns 脉冲信号获得了 33 dB 的布里渊增益, 脉冲延迟了 30 ns, 延迟效率达到了 0.0046 ns/(mW·m), 是普通单模光纤的 13.7 倍。该光纤应用于受激布里渊散射慢光系统可以有效缩短光纤长度和降低对抽运功率的要求, 具有潜在的应用前景。

关键词 光通信; 受激布里渊散射; 慢光; 高非线性光子晶体光纤; 延迟效率

中图分类号 O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2437

Stimulated Brillouin Scattering Slow Light in Photonic Crystal Fiber

Zhao Junfa¹ Yang Xiufeng² Li Yuan¹ Tong Zhengrong² Liu Yange¹ Zhao Qida¹

¹Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

²School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract There are important applications for stimulated Brillouin scattering slow light in all optical communications network. The conventional optical fibers used as slow light medium have low delay efficiency, so the demands of fiber length and pump power are higher. The delay efficiency can be improved by using highly nonlinear photonic crystal fibers. The Brillouin gain of 33 dB is achieved in a 70 m highly nonlinear photonic crystal fiber under the pump power 101 mW, which results in 30 ns time delay of 50 ns signal pulses. The delay efficiency of this kind fiber is 0.0046 ns/(mW·m), which is about 13.7 times larger than the single mode fiber. The demands of fiber length and pump power are effectively reduced when this kind of fiber is used, and the fiber has a large potential use in stimulated Brillouin scattering slow light system.

Key words optical communications; stimulated Brillouin scattering; slow light; highly nonlinear photonic crystal fiber; delay efficiency

1 引 言

慢光研究是当前光学领域的热点。光纤中利用光学非线性效应实现慢光的方法包括: 受激拉曼散射(SRS)^[1], 受激布里渊散射(SBS)^[2,3], 光参量放大(OPA)^[4]等。光纤中利用 SRS 和 OPA 实现慢光的方法可以获得相对较宽的增益带宽, 因此可以实现宽带信号传输延迟; 但是相对于 SBS 来说增益系

数小几个数量级, 因此对抽运功率的要求达到了瓦数量级, 并且延迟量小, 限制了系统的实际应用价值。光纤中基于 SBS 的可控慢光技术易于同现有光通信网络集成, 波长可调, 可以工作在通信波段, 并且其成本低, 具有很大的应用前景, 是慢光研究中的热点。光纤中 SBS 的增益谱本征带宽有限(30~45 MHz), 窄的带宽限制了系统的传输速率, 只能支

收稿日期: 2009-09-29; 收到修改稿日期: 2009-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(10774077), 国家 973 计划(2010CB327605), 天津市自然科学基金(08JCYBJC14400), 天津市科技发展计划科技攻关项目(05YFGPGX04900)和天津市科技支撑重点项目(07ZCKFGX00200)资助课题。

作者简介: 赵军发(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤中可控慢光方面的研究。E-mail: johnfar@163.com

导师简介: 赵启大(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代光通信与光纤传感等方面的研究。

E-mail: zhaqidada@126.com

* 通信联系人。E-mail: yangxfbee@163.com

撑每秒几十兆比特的传输速率。为了使系统能够传输高速率的数据,与现有光通信系统兼容,通过对抽运光进行相应的调制,进而展宽系统的增益谱带宽,能够满足宽带传输要求^[5,6]。基于 SBS 慢光研究中,慢光介质的选择也是很重要的一个研究方向。在最初的实验研究中,使用标准单模光纤或是高非线性光纤作为慢光介质,这些光纤具有小的布里渊增益系数。为了得到大的延迟,毫瓦量级的抽运功率需要几千米到几十千米长度的光纤;当光纤长度缩减到几百米甚至到更短时,系统对抽运功率的要求将提高到几百毫瓦甚至瓦的数量级。而布里渊增益谱展宽后的系统,在同样延迟的情况下,对抽运功率的要求比未展宽的系统高很多。在慢光系统中,作为慢光介质的光纤长度过长会对脉冲信号的失真以及延迟的稳定性造成影响,抽运功率过大会引起其它的非线性效应。具有大的延迟效率,也就是单位长度、单位抽运功率下具有大的延迟量的光纤作为慢光介质,可以有效减少光纤的长度或降低抽运功率的要求。光子晶体光纤(PCF)在通信、光谱学、生物以及传感等领域的应用早已进行了广泛的研究^[7,8]。高非线性光子晶体光纤的纤芯和包层折射率差大和模场面积小,加强了声光的相互作用^[9],作为慢光介质应用于慢光系统可以提高系统的延迟效率,具有潜在的应用价值。

本文采用一段 70 m 长的高非线性光子晶体光纤作为慢光介质,在抽运功率 101 mW 的情况下,−31 dBm 的信号光获得了 33 dB 的非饱和增益,脉冲相应延迟了 30 ns。延迟效率 $\Delta t_d / (P_{\text{pump}} L_{\text{eff}})$ 达到了 0.0046 ns/(mW·m)。

2 受激布里渊散射延迟效率

基于受激布里渊散射慢光系统中,信号光的延迟正比于群折射率的变化

$$\Delta t_d = \Delta n_g \frac{L_{\text{eff}}}{c} = \frac{G}{2\pi\Delta\nu_B}, \quad (1)$$

式中 Δt_d 为信号的延迟时间, Δn_g 为群折射率的变化量, c 为光速, $\Delta\nu_B$ 是布里渊增益谱带宽。 $G = g_B I_p L_{\text{eff}}$ 是信号光的增益,正比于作为慢光介质的光纤的布里渊增益系数 g_B ,抽运光的强度 I_p 以及光纤的有效传输长度 L_{eff} 。光脉冲的延迟量大小与增益成正比。 $\Delta t_d / (P_{\text{pump}} L_{\text{eff}})$ 是慢光系统中一个重要的参数,它表示每单位长度和单位功率下的延迟时间,用来表征作为慢光介质的各种光纤的延迟效率^[10]。

$$\Delta t_d / (P_{\text{pump}} L_{\text{eff}}) = \frac{g_B K}{A_{\text{eff}} (2\pi\Delta\nu_B)}, \quad (2)$$

式中 A_{eff} 为光纤的有效模场面积; K 为常数,与偏振相关。具有大布里渊增益系数的光纤具有大的延迟效率,作为慢光介质,可以缩短光纤的长度,降低系统对抽运功率的要求。研究表明高折射率的二氧化物^[11]、硫族化合物^[12]、亚碲酸盐^[13]等高非线性光纤具有大的布里渊增益系数,用于慢光系统可以提高系统的延迟效率,有效缩短光纤的长度和减少系统对抽运功率的需求。但是这些非硅材质的光纤同现有的光通信网络存在兼容问题,并且应用范围有限。对于纯硅材质的光纤,相对于具有高折射率的非硅光纤来说, g_B 要小一或两个数量级^[14],为了得到大的延迟效率,可以采用具有小模场面积(A_{eff})的光子晶体光纤作为慢光介质。

3 实验与讨论

在基于受激布里渊散射慢光实验中,选取一段 70 m 长的高非线性纯硅光子晶体光纤(HNL-PCF, Crystal Fiber-NL·1550·POS·1)作为慢光介质。该 HNL-PCF 的横截面如图 1(a)所示,纤芯直径为 2.1 μm ,包层直径为 128 μm 。1550 nm 波长处,模场直径为 2.8 μm ,非线性系数约为 11 (W·km)^{−1}。该

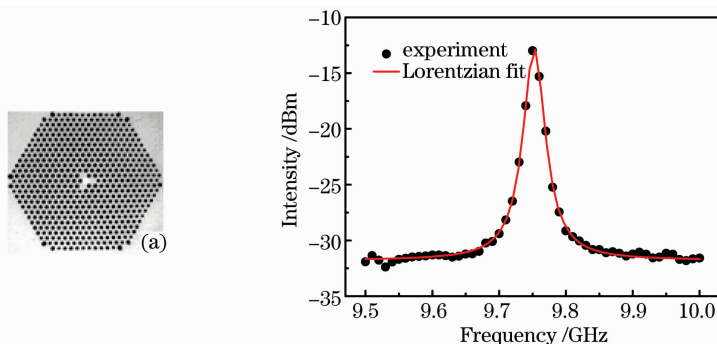


图 1 (a) 光纤横截面图, (b) 1550 nm 的受激布里渊增益谱

Fig. 1 (a) Cross section of PCF, (b) Brillouin gain spectrum at 1550 nm

HNL-PCF 通过一段中间光纤同标准单模光纤连接,总的熔接损耗小于 0.5 dB。在 1510~1620 nm 波长范围内,光纤的传输损耗小于 9 dB/km。实验测得该 70 m 长的 HNL-PCF 的布里渊阈值为 101 mW。使用小信号放大的方法^[10]测得该 HNL-PCF 的布里渊增益谱如图 1(b)所示,1550 nm 处,布里渊频移为 9.749 GHz,布里渊增益谱带宽为 41 MHz。

基于受激布里渊散射的慢光实验装置如图 2 所示。从可调谐激光器(SANTEC TSL-210V)出射的 1550 nm 波长的光波经过光隔离器后被 3 dB 耦合器分成两部分。下面一路被高功率掺铒光纤放大器 2(EDFA2)放大后作为受激布里渊散射的抽运光,抽运功率的大小由可变衰减器 2(VOA2)精确控制,抽运光经过环形器 2 后注入作为慢光介质的高非线性光子晶体光纤(PCF)。上面的一路首先经过掺铒光纤放大器 1(EDFA1)放大,输出功率的大小由可变衰减器 1(VOA1)控制。光波在进入强度调制器 1(EOIM1,Avanex PowerBit F-10)之前,通过偏振

控制器来控制其偏振态。强度调制器 1 的射频调制频率设定值为 9.749 GHz,数值等于作为慢光介质的光子晶体光纤 1550 nm 处的布里渊频移^[15]。经过强度调制器调制后,输出光谱成分中含有中心载波以及频率间隔为 9.749 GHz 的各阶频率成分,如图 3 所示。通过调整强度调制器的直流偏置电压,抑制中心载波,使具有布里渊频移的一阶边带具有最大的信噪比。强度调制器 1 输出的光波由环形器进入光纤光栅进行滤波,滤除掉中心载波成分,使具有布里渊下频移的光波具有最大的信噪比,然后进入强度调制器 2(EOIM2)进行调制,产生具有一定脉宽的脉冲信号。作为信号光的脉冲信号从与抽运光相反的方向进入光子晶体光纤进行布里渊放大。放大信号的强度通过光谱仪(OSA, ANDO AQ6317B)来进行测量,分辨率设置为 0.01 nm。脉冲信号的延迟通过光电探测器转换后,输入到示波器(Oscilloscope, YOKOGAWA DL9140)进行观察测量。

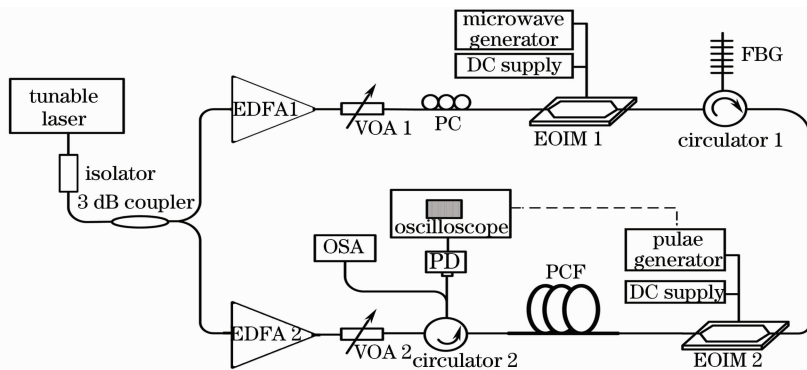


图 2 基于受激布里渊散射慢光实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of SBS slow light

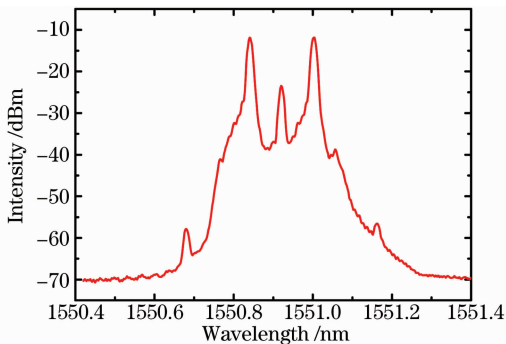


图 3 强度调制器输出光谱图

Fig. 3 Output spectrum of the intensity modulator

基于受激布里渊散射的慢光系统的传输速率受系统的布里渊增益谱带宽 $\Delta\nu_B$ 所限制,进而限制了传输脉冲的宽度。当调制频率小于布里渊增益带宽时, $\tau_m \Gamma_B / 4 \gg 1$, 系统不会对脉冲信号的质量造成明

显影响,式中 τ_m 为信号脉冲持续时间, Γ_B 为布里渊增益谱带宽角频率^[2]。当调制频率大于布里渊增益谱带宽时,脉冲信号会产生严重的失真,影响系统传输质量。实验中用 10 MHz 的正弦信号作为调制信号,调制出半峰全宽(FWHM)为 50 ns 的脉冲信号作为布里渊放大的信号光,此时 $\tau_m \Gamma_B / 4 \approx 3.2$ 。

图 4 表示信号布里渊增益与抽运功率的关系。当抽运功率达到某一点时,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不同,输入信号功率越大,放大器越早饱和,小功率的信号能获得较大的非饱和的布里渊增益。基于受激布里渊散射的慢光实验中,选用功率大小为 -31 dBm 的信号光进行测量。信号光在抽运功率为 101 mW 的情况下获得了 33 dB 的非饱和增益。

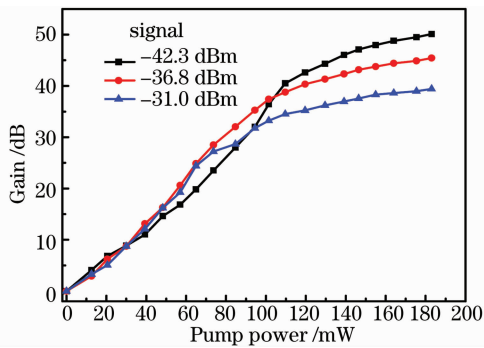


图 4 不同信号功率下增益与抽运功率关系曲线

Fig. 4 Brillouin gain versus pump power for different signal powers

图 5 为脉冲的延迟时间,在 33 dB 增益时,获得了 30 ns 的延迟。基于受激布里渊散射慢光系统的延迟曲线的斜率^[14]

$$S_{dg} = \Delta t_d / G_B \approx 1 / (8.686\pi \Delta v_B), \quad (3)$$

斜率与系统的布里渊增益谱带宽成反比。计算得到系统的延迟斜率约为 0.89 ns/dB(图 5 中虚线)。可见实验测得数据同理论有很好的吻合。计算得到此种光纤的 $\Delta t_d / (P_{\text{pump}} L_{\text{eff}})$ 数值为 0.0046 ns/(mW·m),是普通单模光纤 0.000336 ns/(mW·m) 的 13.7 倍^[14]。该光纤应用于 SBS 慢光系统可以有效缩短光纤长度和降低对抽运功率的要求,具有潜在的应用价值。

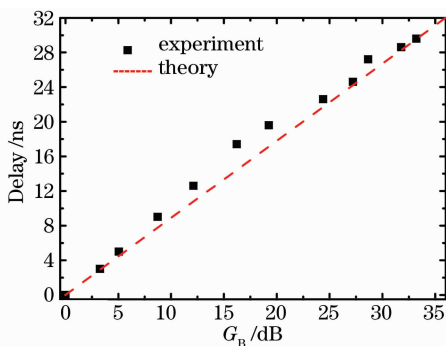


图 5 延迟时间随布里渊增益变化

Fig. 5 Delay time versus Brillouin gain

4 结 论

高非线性光子晶体光纤的包层采用周期排列的微结构空气孔,可以获得比传统的掺杂光纤大得多的折射率差,同时可以使纤芯的尺寸足够小,使光纤具有小的有效模场面积和高的非线性系数。该类光纤作为慢光介质,可以有效提高慢光系统的延迟效率,并且易于同现有光通信网络集成。实验结果表明,本文所使用的高非线性光子晶体光纤的延迟效率达到了 0.0046 ns/(mW·m),是普通单模光纤的 13.7 倍。该光纤应用于 SBS 慢光系统可以有效缩

短光纤长度和降低对抽运功率的要求。

参 考 文 献

- 1 J. Sharping, Y. Okawachi, A. L. Gaeta. Wide bandwidth slow light using a Raman fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6092~6098
- 2 Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. Sharping *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(15):153902
- 3 K. Y. Song, M. G. Herraéz, L. Thevenaz. Observation of pulse delaying and advancement in optical fiber using stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 82~88
- 4 D. Dahan, G. Eisenstein. 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
- 5 M. G. Herráez, K. Y. Song, L. Thévenaz. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1395~1400
- 6 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
- 7 Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin *et al.*. Experimental research on dispersion compensation of 10 Gb/s clock signal using photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1221~1224
- 杨广强,张霞,任晓敏等. 利用光子晶体光纤实现 10 Gb/s 光传输系统的色散补偿[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1221~1224
- 8 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
- 段德稳,朱涛,饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微小型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20
- 9 P. Dainese, P. St. J. Russell, N. Joly *et al.*. Stimulated Brillouin scattering from multi-GHz-guided acoustic phonons in nanostructured photonic crystal fibres[J]. *Nature Physics*, 2006, **2**(6): 388~392
- 10 K. S. Abedin. Stimulated Brillouin scattering in single-mode tellurite glass fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11766~11772
- 11 C. Jauregui, H. Ono, P. Petropoulos *et al.*. Four-fold reduction in the speed of light at practical power levels using Brillouin scattering in a 2 m bismuth-oxide fiber [C]. OFC 2006, Postdeadline Paper PDP2
- 12 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
- 13 K. S. Abedin, G. W. Lu, T. Miyazaki. Slow light generation in singlemode Er-doped tellurite fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(1): 16~17
- 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
- 15 T. Schneider, D. Hannover, M. Junker. Investigation of Brillouin scattering in optical fibers for the generation of millimeter waves[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 295~304