

# 高非线性微结构光纤中基于受激布里渊散射的慢光延迟\*

魏巍<sup>1)</sup> 张霞<sup>1)†</sup> 于辉<sup>1)</sup> 李宇鹏<sup>1)</sup> 张阳安<sup>1)</sup> 黄永清<sup>1)</sup>  
陈伟<sup>2)</sup> 罗文勇<sup>2)</sup> 任晓敏<sup>1)</sup>

1) (北京邮电大学, 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

2) (烽火通信科技股份有限公司光纤研发部, 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 武汉 430074)

(2013年4月12日收到; 2013年6月6日收到修改稿)

全光连续可调的慢光技术在全光网络和光信息处理等领域具有重要的应用前景. 利用自行设计并控制的高非线性微结构光纤, 实验研究了基于受激布里渊散射的可调谐慢光延迟. 采用单抽运光和单级延迟方案, 当抽运光功率为 162.6 mW 时, 在长度为 120 m 的高非线性微结构光纤中获得了最大 76 ns 的延迟量, 相当于 0.76 个脉冲宽度. 通过调节抽运光功率的大小, 可以实现对慢光延迟量的可调谐. 该慢光延迟方案具有延迟量大、全光可调谐及与现有光通信系统兼容等优势.

**关键词:** 慢光, 微结构光纤, 受激布里渊散射

**PACS:** 42.65.Es, 42.81.Dp

**DOI:** 10.7498/aps.62.184208

## 1 引言

减慢光脉冲的传输速度(慢光)被认为是未来光通信系统中的关键技术之一, 在光延迟线、数据同步和光缓存等方面均具有重要的应用前景<sup>[1]</sup>. 在光纤中实现慢光的方法主要包括受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)和光参量放大(OPA)等. 其中, 基于SBS的慢光技术具有阈值低、能在较低的抽运功率下获得较大的延迟量, 并且易与现有的光通信系统兼容等优势<sup>[2]</sup>. 在较早的文献报道中, 大多采用普通单模光纤(SMF)作为SBS慢光介质. 为了获得明显的延迟量, 通常需要几千米的光纤或瓦级的抽运功率, 这些都限制了它的实用性<sup>[3,4]</sup>. 因此, 在获得较大的慢光延迟量的前提下, 减小光纤长度和降低抽运功率是把光纤中基于SBS慢光延迟技术推向应用的重要途径.

近年来, 微结构光纤(又称光子晶体光纤)作为一种新型的光波导以其优异的高非线性和色散可控等特性成为国际上的研究热点<sup>[5-10]</sup>. 微结构光纤具有大的纤芯-包层折射率差, 可以增强光纤中的声光相互作用<sup>[11]</sup>, 进而提高基于SBS的慢光延迟效果. 例如, 清华大学Yang等<sup>[12]</sup>利用50 m的微结构光纤在抽运功率为158.5 mW时获得了约半个脉宽的慢光延迟量; Duke大学Zhang等<sup>[13]</sup>利用10 m长的微结构光纤在抽运功率为760 mW时获得了38 ns的慢光延迟量.

本文利用自行设计并控制的高非线性微结构光纤进行了基于SBS的慢光传输实验. 实验中采用脉冲宽度为100 ns的光脉冲作为信号光, 调节抽运光的载频使之与信号光的载频相差布里渊频移. 当抽运光功率高于布里渊阈值时, 调节抽运光的功率大小, 信号光的延迟量将随之改变, 从而达到调谐延迟量的目的. 当抽运光功率为162.6 mW时, 信号

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB327605, 2010CB735904)、国家自然科学基金(批准号: 61077049)和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-08-0736)和北京邮电大学优秀博士研究生创新基金(批准号: CX201322)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xzhang@bupt.edu.cn

光被延迟了 76 ns, 相当于获得了 0.76 个脉宽的延迟量. 实验中采用的微结构光纤具有的高非线性是实现大的慢光延迟量的主要原因.

## 2 实验装置

基于 SBS 的慢光延迟实验装置如图 1 所示. 从可调谐激光器输出的连续光由掺铒光纤放大器放大后作为抽运光, 抽运光经过环行器 1 进入高非线性微结构光纤用来激发 SBS. 一旦抽运光的功率达到布里渊阈值, 其大部分功率会转移到后向的斯托克斯波中, 产生 SBS 增益. 从分布反馈激光器输出的连续光经过隔离器进入电光强度调制器, 脉冲信号发生器采用频率为 5 MHz 的方波信号作为调制

信号, 调制出的脉宽为 100 ns 的光脉冲经过 3 dB 耦合器分成两部分: 一部分作为信号光, 由环行器 2 的 2 端口以与抽运光相反的方向进入高非线性微结构光纤, 故 SBS 信号光将被延迟; 另一部分用作初始信号, 与延迟的信号光同时进入示波器观测其波形. 抽运光产生的 SBS 增益谱和获得增益的信号光光谱通过环行器 1 的 3 端口进入光谱仪. 当抽运光和信号光的载频恰好相差布里渊频移时, 信号光会落在布里渊增益峰值处获得最大增益. 此时, 由于 SBS 的增益, 介质折射率会发生微小的改变, 从而可实现对光脉冲的延迟. 实验装置中的偏振控制器分别用来使 SBS 增益 (偏振控制器 1 和偏振控制器 3) 和经过强度调制器的透射光 (偏振控制器 2) 最大化.

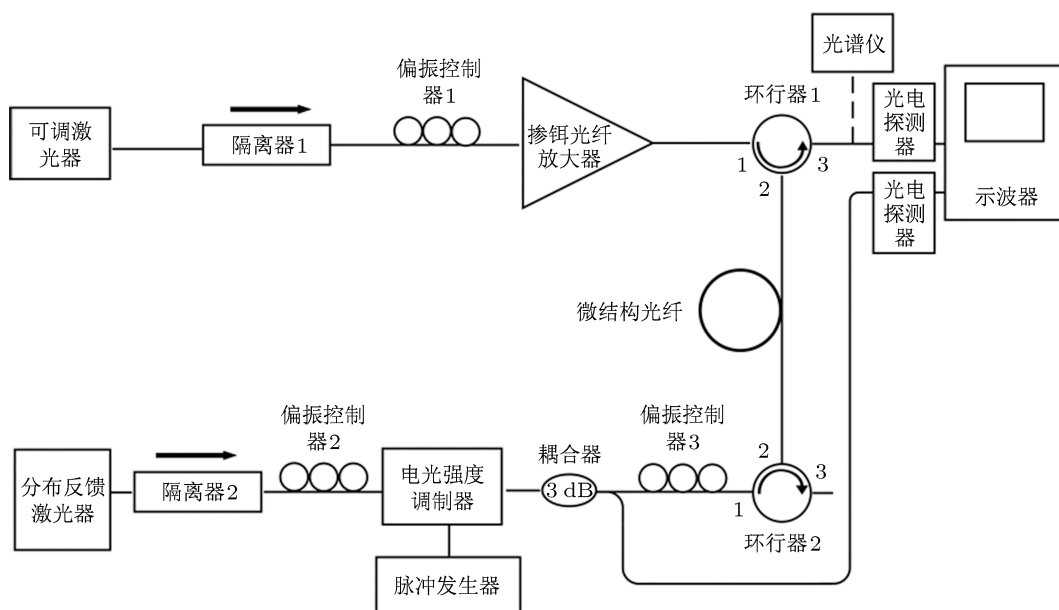


图 1 实验装置图

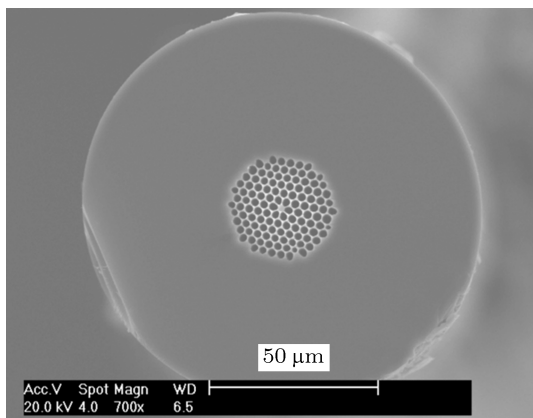


图 2 高非线性微结构光纤横截面的扫描电镜图

实验中, 作为 SBS 慢光介质的是长度为 120 m 的高非线性微结构光纤, 该光纤由烽火通信科技股份有限公司拉制, 其在 1550 nm 的非线性系数高达  $136 \text{ W}\cdot\text{km}^{-1}$ , 总损耗 (包括接头熔接损耗和传输损耗等) 约为 10 dB. 高非线性微结构光纤的端面扫描电镜图, 如图 2 所示. 从图 2 中可以看出: 光纤由围绕纤芯的一层柚子形空气孔和外围五层圆形空气孔组成. 具体结构参数为: 纤芯直径约  $1.46 \mu\text{m}$ ; 圆形空气直径为  $2.1 \mu\text{m}$ ; 孔间距为  $2.6 \mu\text{m}$ . 第一层柚子形空气孔可以有效地减小模场面积, 进而增大微结构光纤的非线性系数.

### 3 结果与讨论

图 3(a) 是没有信号光输入时不同抽运光功率对应的自发布里渊增益谱. 从图 3(a) 中可以看出: 当抽运光功率为 19.5 mW 时, 在低于抽运光载频处基本没有能量的转移, 未产生布里渊增益; 当抽运光功率增大到 52.2 mW 时, 在低于抽运光载频处出现了能量的转移, 从而产生了布里渊增益; 继续增大抽运光功率至 86.7 mW, 与抽运光功率为 52.2 mW 时相比, 在抽运光载频处的功率并没有明显增加, 而大部分的抽运光功率都转移到了位于低频的布里渊增益中. 所以, 我们可以得到布里渊阈值约为 52.2 mW, 相应的布里渊频移为 10.99 GHz. 在此需要说明的是, 与之前文献报道相比 [12,13], 我们利用高非线性微结构光纤为 SBS 增益介质所测得的布里渊阈值并没有明显降低, 这是由于所拉制的微结构光纤样品损耗还比较大的缘故. 图 3(b) 是反向通入信号光并使其载频与抽运光的载频恰好相差布里渊频移时相应的信号光增益谱. 从图 3(b) 中可见, 当抽运光功率未达到布里渊阈值时, 信号光的频谱与初始信号光的频谱完全重合; 当抽运光功率达到布里渊阈值后, 信号光便开始获得了增益; 继续增大抽运光功率, 信号光则被极大地增益了.

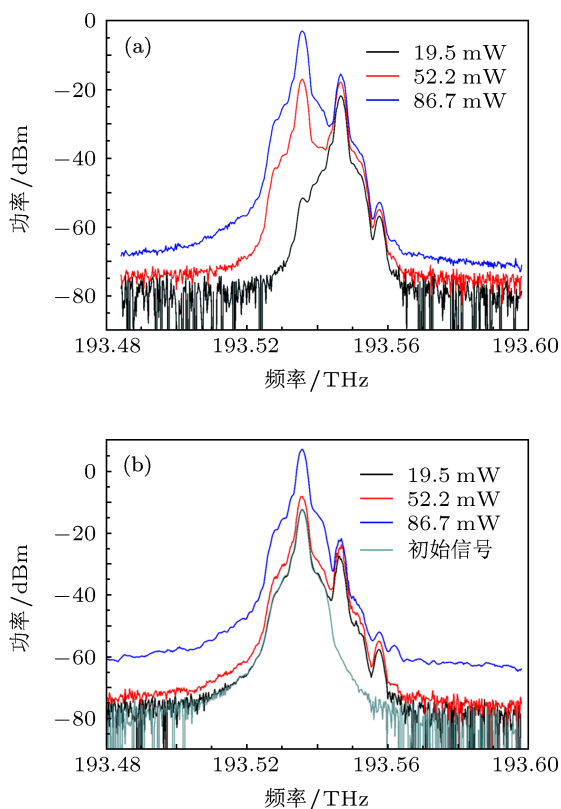


图 3 不同抽运光功率下的 (a) 自发布里渊增益谱, (b) 信号光增益谱

当抽运光功率高于布里渊阈值时, SBS 在布里渊频移处产生了增益. 根据 Kramers-Kronig 关系, 介质增益 (或损耗) 的变化总是伴随折射率的改变 [14], 当信号光的载频落在布里渊频移处时, 其与未加入抽运光的信号光相比便产生了一定的延迟量. 实验中, 初始信号光是采用频率为 5 MHz 的方波信号调制出来的, 脉冲宽度为 100 ns, 如图 4(a) 所示. 初始信号光经过高非线性微结构光纤传输后势必会产生一定的延迟, 测量得到的延迟为 77.6 ns. 此时, 我们通入抽运光, 当抽运光功率为 162.6 mW 时, 延迟变为了 153.6 ns. 所以, 由于高非线性微结构光纤中的 SBS 产生的脉冲信号延迟量为 76 ns, 相当于 0.76 个脉冲宽度. 从图 4(a) 中可以看出, 由 SBS 延迟后的脉冲有一定的畸变, 这是由 SBS 有限的带宽和由此产生的群速度色散所导致的 [15]. 因此, 我们标定延迟量时是以零电平为参考点的.

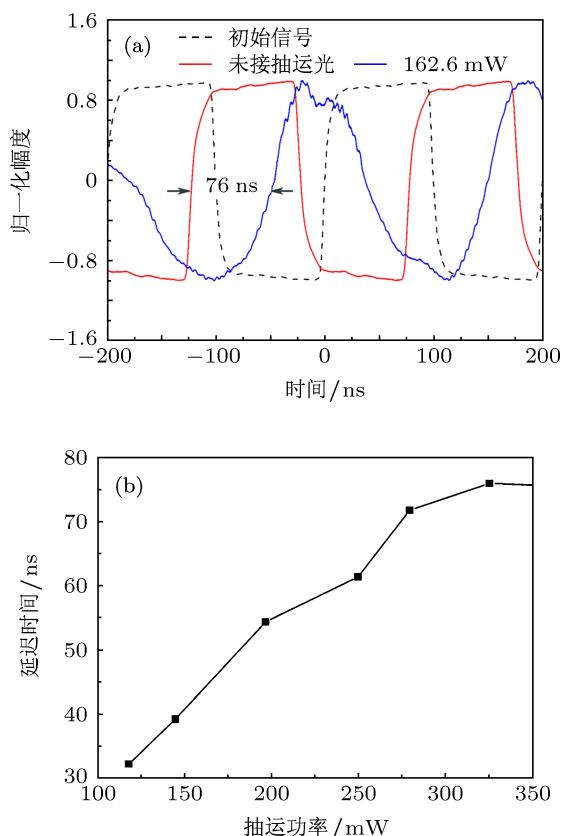


图 4 (a) 初始和延时后的信号脉冲时域图; (b) 不同抽运光功率与延迟量的关系

改变抽运光功率的大小, 信号光的延迟量会随之发生改变, 进而可实现延迟量可调谐的目的. 当抽运光功率为 58.9 mW (略大于布里渊阈值) 时, 信号光的延迟量为 32.2 ns. 增大抽运光功率, 信号光获得的延迟量基本随之线性增加, 如图 4(b) 所

示. 当抽运光功率超过 170 mW 后, 信号光的延迟量基本不再改变, 这是由于受到 SBS 增益饱和的限制<sup>[16]</sup>.

## 4 结论

基于高非线性微结构光纤的 SBS 慢光延迟方案可以减小对抽运光功率的需求或利用较短的光纤长度便可获得较大的慢光延迟量. 本文采用自

行设计并控制的高非线性微结构光纤作为慢光介质, 实验上获得了 76 ns (相当于 0.76 个脉宽) 的慢光延迟量, 相应的布里渊阈值和布里渊频移分别为 52.2 mW 和 10.99 GHz. 本文中微结构光纤样品的损耗还较大, 随着今后控制工艺的提高, 微结构光纤的性能会进一步得到改善. 利用微结构光纤中 SBS 的慢光技术有延迟量大、可调谐及与现有光纤通信系统兼容等优势, 在数据同步和光缓存等方面具有重要的应用前景.

- 
- [1] Mok J T, Eggleton B J 2005 *Nature* **433** 811
- [2] Okawachi Y, Bigelow M S, Sharping J E, Zhu Z, Schweinsberg A, Gauthier D J, Boyd R W, Gaeta A L 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 153902
- [3] Song K Y, González-Herráez M, Thévenaz L 2005 *Opt. Express* **13** 82
- [4] González-Herráez M, Song K Y, Thévenaz L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 08111
- [5] Russell P St J 2003 *Science* **299** 358
- [6] Birks T A, Knight J C, Russell P St J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [7] Wang Q Y, Hu M L, Li Y F, Li S G, Ji Y L, Zhou G Y, Hou L T, Wei Z Y, Zhang J, Liu X D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 478 (in Chinese) [王清月, 胡明列, 栗岩峰, 李曙光, 冀玉领, 周桂耀, 侯蓝田, 魏志义, 张军, 刘晓东 2004 物理学报 **53** 478]
- [8] Xia C M, Zhou G Y, Han Y, Liu Z L, Hou L T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094213 (in Chinese) [夏长明, 周桂耀, 韩颖, 刘兆伦, 侯蓝田 2011 物理学报 **60** 094213]
- [9] Zhang X Q, He H, Hu M L, Yan X, Zhang X, Ren X M, Wang Q Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 076102 (in Chinese) [张晓青, 贺号, 胡明列, 颜鑫, 张霞, 任晓敏, 王清月 2013 物理学报 **62** 076102]
- [10] Dudley J M, Taylor J R 2009 *Nature Photon.* **3** 85
- [11] Dainese P, Ruseell P St J, Joly N, Knight J C, Wiederhecker G S, Frangnito H L, Laude V, Khelif A 2006 *Nature Phys.* **2** 388
- [12] Yang S G, Chen H W, Qiu C Y, Chen M H, Xie S Z, Li J Y, Chen W 2008 *Opt. Lett.* **33** 95
- [13] Zhang R, Zhu Y H, Wang J, Gauthier D J 2010 *Opt. Express* **18** 27263
- [14] Agrawal G P 2006 *Nonlinear Fiber Optics* (4th Ed.) (Salt Lake City: Academic Press) pp245–249
- [15] Zadok A, Eyan A, Tur M 2011 *Appl. Opt.* **50** E38
- [16] Zhu Z M, Gauthier D J, Okawachi Y, Sharping J E, Gaeta A L, Boyd R W, Willner A E 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 2378

# Slow light based on stimulated Brillouin scattering in microstructured fiber\*

Wei Wei<sup>1)</sup> Zhang Xia<sup>1)†</sup> Yu Hui<sup>1)</sup> Li Yu-Peng<sup>1)</sup> Zhang Yang-An<sup>1)</sup>  
Huang Yong-Qing<sup>1)</sup> Chen Wei<sup>2)</sup> Luo Wen-Yong<sup>2)</sup> Ren Xiao-Min<sup>1)</sup>

1) (State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

2) (State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Optical Fiber Department of Fiberhome Telecommunications Technologies Co. Ltd, Wuhan 430074, China)

(Received 12 April 2013; revised manuscript received 6 June 2013)

## Abstract

All-optical tunable slow light technology has promising applications in all-optical network and optical information process. Tunable slow light based on stimulated Brillouin scattering is experimentally investigated, using highly nonlinear microstructured fiber which is designed and drawn by ourselves. The experiment setup is composed of single pump and a single-stage delay. When the pump power reaches 162.6 mW, a maximum delay of 76 ns, equal to 0.76 pulse width, is achieved in the highly nonlinear microstructured fiber of 120 m in length. In addition, by adjusting the pump power, the tunable slow light can be realized. This scheme of slow light has advantages such as large delay, being all-optical tunable and compatible with optical communications systems.

**Keywords:** slow light, stimulated Brillouin scattering, microstructured fiber

**PACS:** 42.65.Es, 42.81.Dp

**DOI:** 10.7498/aps.62.184208

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2010CB327605, 2010CB735904), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61077049), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-08-0736), and BUPT Excellent Ph. D. Students Foundation, China (Grant No. CX201322).

† Corresponding author. E-mail: xzhang@bupt.edu.cn