

文章编号: 0253-2239(2009)07-1938-05

# 在掺铒光纤中直接观测慢光和超光速信号的演化

王 号 掌蕴东 叶建波 田 赫 王 楠 马 磊 袁 萍

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 最近几年中,慢光和超光速的研究取得了很大进展。慢光和超光速产生的物理机制作为慢光和超光速研究领域的一个重要方面也吸引了研究者的关注。设计了一个新颖的实验,在掺铒光纤中观测了慢光和超光速信号的演化。分别在慢光( $0 < v_g \ll c$ ,  $c$  是真空中光速,  $v_g$  为光传播的群速度)和超光速( $v_g < 0$ )情况下,直接观测了不同波形调制信号通过掺铒光纤的波形变化情况。实验观测和理论分析说明掺铒光纤对周期性调制信号的非对称的吸收和放大是在掺铒光纤中产生慢光和超光速的物理机制。

**关键词** 非线性光学;慢光;信号演化;掺铒光纤

**中图分类号** O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1938

## Direct Observation of Signal Evolution of Slow and Fast Light in Erbium-Doped Optical Fiber

Wang Hao Zhang Yundong Ye Jianbo Tian He Wang Nan Ma Lei Yuan Ping

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** In recent years, researches about the controllable group velocity of light propagation had made many progresses. The mechanism of the generation of slow and fast light, as one of the most important aspects in the research of slow and fast light, had attracted great interest in researchers. In this letter, the authors described a simple experiment for the tracing of light signals in erbium-doped fiber (EDF) at the optical communication wavelength. We have, directly, observed the evolution of slow and fast signals with different waveforms that travel in EDF. Through tracing the wave evolution, when slow light ( $0 < v_g \ll c$ ,  $c$  is the speed of light in vacuum,  $v_g$  is the group velocity of light) or fast light ( $v_g < 0$ ) was got in EDF, we concluded that asymmetrical absorption and amplification on the periodical signal could account for the generation of slow and fast light in EDF.

**Key words** nonlinear optics; slow light; signal evolution; erbium doped optical fiber

## 1 引 言

在过去的几年中,慢光和超光速的研究吸引了很多学者的关注。很多研究小组都相继报道了可控的慢光和超光速的研究结果<sup>[1~11]</sup>。2003年,Boyd等<sup>[6]</sup>在室温条件下利用相干布居振荡技术在红宝石晶体中观测到了慢光传输现象。相干布居振荡技术是一种相比电磁感应透明技术更为简单的实现室温下固体介质中群速可控的实验手段。该技术不需要

额外抽运光的辅助,利用经过调制的单光束即可实现慢光传播,而且相干布居振荡效应不需要满足信号光频率与介质能级的共振,应用方便。因此,该技术迅速被广泛应用于慢光和超光速的研究中。光纤一直以来作为光通信领域中广泛应用的信息载体,在慢光和超光速领域尤其吸引人们的眼光。1993年,Freeman等<sup>[1]</sup>利用调制技术就在掺铒光纤中观察到了慢光现象。1997年Jarabo<sup>[2]</sup>研究了信号延迟与

收稿日期: 2008-10-15; 收到修改稿日期: 2008-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(60272075,60478014,6087806)和国家 863 计划(2007AA12Z112)资助项目。

作者简介: 王 号(1978—),男,博士研究生,主要从事非线性光学,慢光等方面的研究。E-mail: haowang-hit@163.com

导师简介: 掌蕴东(1957—),男,博士,教授,主要从事非线性光学,可调谐激光技术等方面的研究。

E-mail: ydzhang@hit.edu.cn

各个实验参数的关系。最近, Schweinsberg 等<sup>[3]</sup>利用相干布居振荡方法在掺铒光纤中同时实现了慢光和超光速传播现象。关于掺铒光纤中可控光速的研究最近还有学者进行了相继的报道。光纤中的可控光速研究如此吸引人们的注意主要是因为光纤中的可控群速研究在全光通信, 量子计算, 高灵敏度检测等领域有着广泛的应用前景。因此, 深入细致的研究光纤中可控慢光和超光速现象有着十分重要的理论意义和实际意义。本文中作者利用不同的非解析信号波形研究了在掺铒光纤中慢光( $0 < v_g \ll c$ )和超光速( $v_g < 0$ )信号的演化情况。直观地给出了慢光和超光速信号在光纤中的演化情况。实验观测和理论分析表明, 掺铒光纤对周期性调制信号的非对称吸收是慢光和超光速产生的根本原因。

## 2 理论分析

为了分析调制信号在掺铒光纤中的演化情况, 首先给出铒离子基态粒子数布居的速率方程。当幅度调制光信号进入掺铒光纤时, 铒离子基态粒子数  $N_1$  随时间的变化方程可以写为<sup>[12]</sup>

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1 + W_{21}N_2 - R_{13}N_1 + \frac{N_2}{\tau} \quad (1)$$

入射调制信号的功率和信号在光纤中传播距离的关系可以写作

$$\frac{dP_s}{dZ} = -W_{12}AN_1 + W_{21}AN_2 \quad (2)$$

在(1)式和(2)式中

$$W_{12} = \frac{\alpha_s P_s}{\rho A}, \quad W_{21} = \frac{\beta_s P_s}{\rho A}, \quad (3)$$

$$R_{13} = \frac{\alpha_p P_p}{\rho A}, \quad N_1 + N_2 = N$$

其中  $\alpha_s$  和  $\beta_s$  分别表示掺铒光纤对调制信号的吸收和辐射系数。 $\alpha_p$  表示铒离子对抽运光的吸收系数。 $P_p, \rho, \tau, N$  和  $A$  分别表示抽运信号强度, 铒离子浓度, 铒离子亚稳态能级寿命, 铒离子总有效布居数和光纤有效纤芯截面积。在我们实验中所采用的参数如下

$$\alpha_s = 2.86 \text{ dB/m}, \quad \beta_s = 3.715 \text{ dB/m},$$

$$\alpha_p = 4.318 \text{ dB/m}, \quad \rho = 0.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3},$$

$$A = 8.66 \times 10^{-12} \text{ m}^2, \quad \tau = 10.5 \text{ ms}$$

下面我们具体分析调制光场与掺铒光纤中铒离子的相互作用过程。

在不外加抽运的情况下, 当调制周期与铒离子

亚稳态能级寿命相当的周期信号进入到掺铒光纤中时, 处于基态的铒离子将从调制信号前沿吸收光子并迅速跃迁到上吸收带且在很短的时间内弛豫到亚稳态。由于处于铒离子亚稳态粒子的能级寿命大约为 10 ms, 在入射信号激励下大量的粒子将布居在铒离子的亚稳态, 导致铒离子基态粒子数  $N_1$  明显减少。由于铒离子基态粒子数明显减少导致铒离子对入射周期信号后续部分的吸收减弱。也就是说, 铒离子对周期信号前沿的吸收强而对后沿的吸收较弱。这将导致铒离子对周期信号的整个周期非对称的吸收。这种非对称吸收使经过掺铒光纤后出射信号波形向时间轴的正向移动, 相对于参考信号来说有正的时间延迟, 实验表现为慢光传播现象。

如果外加较强的 980 nm 的抽运信号, 首先, 铒离子基态粒子将从 980 nm 的抽运光中吸收光子并迅速跃迁到上吸收带然后再弛豫到亚稳态形成粒子布居。当调制周期与铒离子亚稳态能级寿命相当的周期信号进入到掺铒光纤中时, 探测信号的前沿将激发处于铒离子亚稳态的粒子跃迁到基态, 同时辐射出光子。由于受激辐射作用, 探测信号的前沿被放大。虽然同时信号也经历基态铒离子的吸收, 但是由于较强的抽运光场将铒离子基态粒子几乎抽空, 所以信号前沿经历的放大强于吸收作用。同时, 由于信号前沿导致铒离子亚稳态粒子发生受激发射回到基态。所以铒离子亚稳态的粒子急剧减少, 基态粒子数迅速增加。这样, 进入到掺铒光纤中调制信号的后续部分将经历基态粒子的更强吸收。虽然同时信号也会经历来自抽运信号的放大, 但是由于亚稳态粒子的减少, 信号所经历的放大作用也相应的减小。这样, 对于整个信号周期来说, 在强 980 nm 抽运信号作用下, 信号前沿将经历比后沿更强的放大。这种对于整个信号周期的非对称的放大作用导致了经过掺铒光纤后信号波形向时间轴的负向移动。相对于参考信号来说有时间超前现象, 实验表现出超光速传播。

## 3 实验设计

为了在实验上证明理论分析的正确性, 设计了利用非解析信号的方法观测掺铒光纤中慢光和超光速信号演化的实验装置。利用该装置我们观测了掺铒光纤中铒离子对信号的非对称吸收以及相应的慢光和超光速现象。实验装置如图 1 所示。

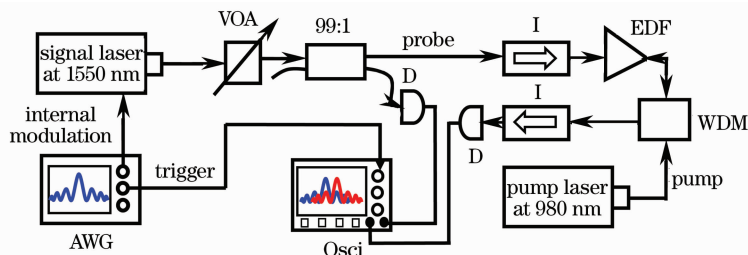


图1 在掺铒光纤中观测慢光和超光速信号演化的实验装置简图

Fig. 1 Experimental setup for the observation of wave evolution in EDF

该装置用工作在 1550 nm 的半导体激光器作为信号光源。另一个工作在 980 nm 的半导体激光器作为抽运光源。利用可调衰减器(VOA)调节输出信号的光强。信号光通过可调衰减器后经过99:1的光耦合器后,一部分(99%)作为探测信号经过光隔离器(I)后注入掺铒光纤。另一部分(1%)直接进入光电探测器作为参考信号。信号光经过掺铒光纤后经过波分复用器(WDM)和光隔离器后进入光电探测器作为信号光。抽运信号经过波分复用器后反向注入到掺铒光纤作为抽运。光电探测器的信号都送入数字示波器(Osci)进行信号的跟踪观测。本文利用任意波形发生器对信号光源进行内调制,同时也为示波器提供外触发信号。

## 4 结果和讨论

在实验中,首先利用具有尖峰脉冲的正弦调制信号重复了在掺铒光纤中的慢光和超光速实验。这里,尖峰脉冲的作用是用来清楚的标定调制信号的峰值位置。

当探测信号强度为 6.0 mW,调制频率为100 Hz时,调节抽运信号的强度分别为 0 和 50 mW时,实验观察到了明显的慢光和超光速现象,如图 2 所示。图中实线为调制频率为 100 Hz 的参考信号的波形。点线为抽运光强为 0 时,信号经过 12 m 的掺铒光纤后

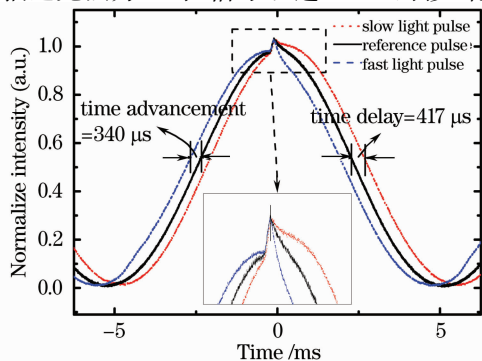


图2 经过掺铒光纤后的慢光和超光速现象

Fig. 2 Slow and fast light signals through EDF

的慢光信号波形。信号被延迟了 417  $\mu\text{s}$ ,相应的相对延迟为 4.17%。利用公式  $t_{\text{del}} = L/c - L/v_g$  计算得到信号的群速度为  $v_g = 28.78 \text{ km/s}$ 。虚线为抽运光强为 50 mW 时超光速信号的波形。信号相对于参考光超前了 340  $\mu\text{s}$ ,相应的相对超前为 3.40%。同样,可以计算得到信号的群速度为  $v_g = -35.30 \text{ km/s}$

从图 2 可以看出,本文结果与文献报道结果相近<sup>[3]</sup>。这说明在抽运光强为 0 以及 50 mW 时,分别工作在掺铒光纤的慢光和超光速区域。实验中选择的尖峰脉冲的时间长度为 300  $\mu\text{s}$  左右。如此短的脉冲长度不在掺铒光纤的延迟和超前范围内<sup>[3]</sup>。因此,无论在慢光还是超光速情况下该脉冲经过掺铒光纤后相对于参考信号都保持不动。我们就可以利用该脉冲作为参考来分析整个信号各个部分经过掺铒光纤后的变化情况。从图 2 的结果可以看出信号经过掺铒光纤后没有明显的形变,并获得了明显的延迟和超前现象。事实上,添加了小的尖峰脉冲后不用参考信号,利用出射信号本身就可以直接看出信号的超前或者延迟现象,如图 2 所示。该方法也可以简化实验测量过程。但是,从图 2 的结果不能直观看出是什么机制导致了掺铒光纤中的慢光和超光速现象。

为了更清楚地看出信号在掺铒光纤中的演化过程,并观测慢光和超光速的产生机制实验中采用了非解析的信号波形。首先,实验采用了一种平顶的周期调制信号,如图 3 所示。该信号每个周期可以分为三部分,前沿为正弦调制的,中间部分强度处处相等,后部为正弦调制的。信号强度发生突变的点称作非解析点,并且非解析点的传播速度不受群速度的影响<sup>[13,14]</sup>。

从图 3 可以看出在输入信号功率为 6.0 mW,调制频率为 17 Hz,抽运功率为 0 时,信号延迟量为 29.1 ms,当抽运功率为 50 mW 时,信号的超前量为 6.7 ms。这里我们并不是追求大的时间延迟量或者超前量。更为重要的是实验中观察到经过掺铒光纤

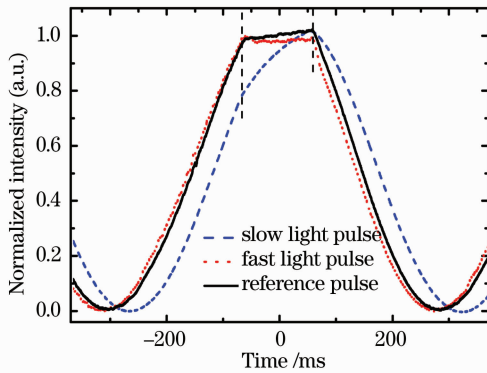


图 3 慢光和超光速情况下,调制频率为 17 Hz 的平顶信号经过掺铒光纤的演化情况

Fig. 3 Evolution of a signal with a flat top through

EDF at 17 Hz under the condition of slow and fast light

后信号的平顶部分变得倾斜了。在慢光情况下,信号平顶部分前沿的强度经过掺铒光纤后变得比后沿低了。相反,在超光速情况下信号平顶部分的前沿强度比后沿变得高了。之所以产生这种现象,可以通过前面的理论分析来进行解释,也就是说,慢光情况下信号前沿经历了比后沿更强的吸收,所以信号经过掺铒光纤后平顶部分的前部比后部强度弱了。而在超光速情况下,由于抽运光的存在,信号前沿经历了比后沿更强的放大。所以,信号经过掺铒光纤后平顶部分前沿比后沿的强度更高。

在上面的实验中观测了平顶信号经过掺铒光纤后的演化情况,分析了信号的平顶部分在慢光和超光速情况下的演化情况。为了对整个信号周期的具体演化情况进行观测,采用图 4 中所示的非解析波形。图 4 中的非解析波形由连续调制的准方波序列

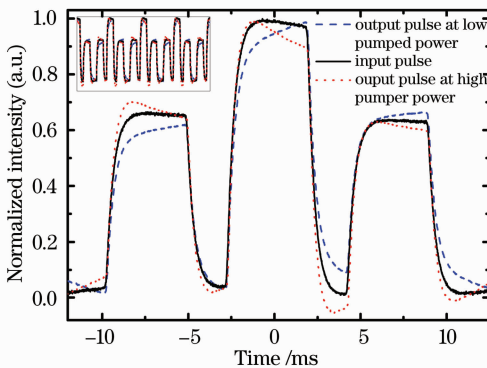


图 4 慢光和超光速情况下,调制频率为 100 Hz 含有三个调制脉冲的连续准方波序列在掺铒光纤中的演化情况

Fig. 4 Evolution of continuous quasi square wave sequence including three modulated pulses through EDF at 100 Hz under the condition of slow and fast light

组成,每个周期中包含三个调制方波。其中两个强度较低的方波相对于中间强度较高的方波对称。

从图 4 中首先可以看出对每一个方波来说,方波平顶在慢光和超光速情况下都发生了倾斜现象。这种现象与图 3 中观测到的结果相似,在此就不再详细解释。对于整个信号周期来说,原本强度相等相对中间方波对称的两个方波强度不再相等了。在慢光条件下,处于信号前部的方波由于经历了强吸收变得比处于信号后部的方波强度低了。在超光速条件下,由于非对称放大作用信号前部经历的放大作用更强。所以信号前部的方波强度比后部的方波强度更高。

当实验中进一步增加每个信号周期中调制方波的个数可以更清楚地看出非对称吸收作用对信号整体的影响。图 5 中给出了我们利用每个周期包含 9 个调制方波的非解析信号观测到的慢光和超光速信号的演化情况。

从图 5 可以更清楚地看出掺铒光纤对信号的非对称吸收和放大作用。在慢光情况下,信号经过掺铒光纤后前沿都比后沿低;而在超光速情况下,信号经过掺铒光纤后前沿都比后沿高。实验结果说明非对称吸收会导致信号整个强度轮廓在时间轴的移动也就是导致慢光或者超光速现象。事实上可以将正弦调制信号分解为头尾相连的方波序列,这样,正弦信号的慢光和超光速现象也可以用非对称吸收来解释。下面,利用相邻调制信号周期具有不同直流分量的正弦调制信号来进一步说明非对称吸收导致正弦信号的慢光和超光速现象。实验结果如图 6 所示。

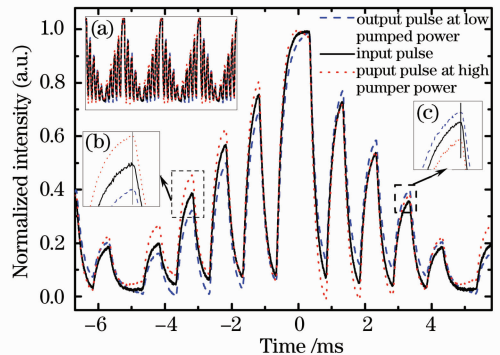
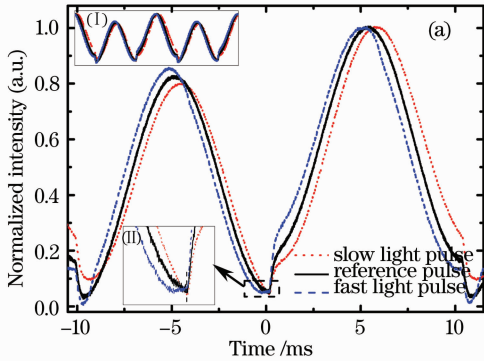


图 5 慢光和超光速情况下,调制频率为 100 Hz 含有九个调制脉冲的连续准方波序列在掺铒光纤中的演化情况

Fig. 5 Evolution of continuous quasi square wave sequence including nine modulated pulses through EDF at 100 Hz under the condition of slow and fast light

图 6(a)为归一化的实验结果。(b)与(a)相同,只是实验结果并没有进行归一化。从图 6(a)可以看出正弦调制信号经过掺铒光纤后在无抽运情况下表现出慢光传播现象,在抽运功率为 50 mW 时,表现为超光速传播现象。由于非解析点的传播速度不随着信号群速度的变化而改变,所以利用直流分量突变的非解析点可以将信号的每个周期区分开来。这样就可以对特定信号周期的演化进行观测。图 6(a)中的插图 II 中可以看出,无论在慢光还是超光速情况下非解



析点的传播速度都不受群速度的影响。图 6(b)中我们通过未归一化的信号波形分析了非对称吸收对信号演化的影响。图中参考信号上  $m$  和  $n$  是具有相同强度并以信号的峰值为中心对称的任意两点。在没有抽运的情况下,信号经过掺铒光纤后由于非对称的吸收作用, $m$  点的强度比  $n$  点的强度低,导致整个信号波形的慢光传播现象。在抽运光功率为 50 mW 时,由于非对称放大作用, $m$  点的强度比  $n$  点的强度高,导致整个信号波形的超光速传播现象。

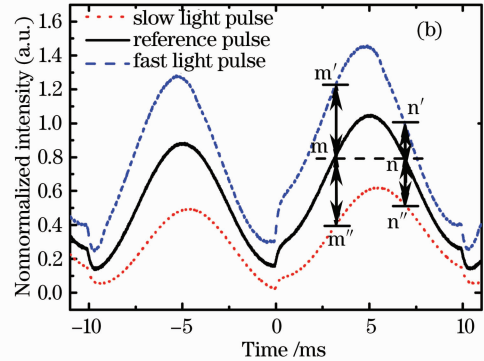


图 6 慢光和超光速情况下,调制频率为 100Hz 相邻周期具有不同直流分量的正弦调制信号的演化情况。

(a)归一化实验结果,(b)非归一化实验结果

Fig. 6 Evolution of a signal with alternated DC offset every one period through EDF at 100 Hz under the condition of slow and fast light. (a)Normalized experimental results, (b)Nonnormalized experimental results

## 5 结 论

本文利用几种不同的非解析信号实验上直接观测了在掺铒光纤中慢光和超光速信号的演化。实验结果说明铒离子对周期性调制信号的非对称吸收和放大是导致掺铒光纤中慢光和超光速现象的根本原因。本文所采用的方法能直观观测信号的演化过程,该方法对于相关研究领域有借鉴意义,同时本论文的结论对于其它具有相似性质的介质也同样合理。

## 参 考 文 献

- 1 J. Freeman, J. Conradi. Gain modulation response of erbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(2): 224~226
- 2 S. Jarabo. Measurement of the phase shift for a low-frequency-modulated signal power in an erbium-doped fiber amplifier[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7): 1846~1849
- 3 A. Schweinsberg, N. N. Lepeshkin, M. S. Bigelow *et al.*. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber[J]. *Europhys. Lett.*, 2006, **73**(2): 218~224
- 4 L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594~598
- 5 L. J. Wang, A. Kuzmich, A. Dogariu. Gain-assisted

- superluminal light propagation[J]. *Nature*, 2000, **406**(6793): 277~279
- 6 M. S. Bigelow, N. N. Lepeshkin, R. W. Boyd. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(11): 113903-1~4
- 7 M. S. Bigelow, N. N. Lepeshkin, R. W. Boyd. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid [J]. *Science*, 2003, **301**(5630): 200~202
- 8 K. Y. Song, M. G. Herráez, L. Thévenaz. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt. Express*, 2004, **13**(1): 82~88
- 9 S. Melle, O. G. Caldero, F. Carren *et al.*. Effect of ion concentration on slow light propagation in highly doped erbium fibers[J]. *Opti. Commun.*, 2007, **279**(1): 53~63
- 10 H. Wang, Y. Zhang, N. Wang *et al.*. Observation of superluminal propagation at negative group velocity in  $C_{60}$  solution[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(12): 121107-1~3
- 11 Y. D. Zhang, H. Wang, L. Ma *et al.*. Negative group velocity in  $C_{60}$  due to RSA effect[J]. *Appl. Phys. B: Laers Opt.*, 2007, **89**(2-3): 141~143
- 12 S. Novak, A. Moesle. Simulink model for EDFA dynamics applied to gain modulation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(6): 986~992
- 13 M. D. Stenner, D. J. Gauthier, M. A. Neifeld. The speed of information in a 'fast-light' optical medium[J]. *Nature*, 2003, **425**(6959): 695~698
- 14 M. D. Stenner, D. J. Gauthier, M. A. Neifeld. Fast causal information transmission in a medium with a slow group velocity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(5): 053902-1~4