

基于光子晶体光纤中脉冲俘获的超高速光开关*

李善甫, 文双春**

(湖南大学 计算机与通信学院, 长沙 410082)

摘 要:提出一种基于光子晶体光纤中脉冲俘获现象的超高速全光开关. 信号脉冲处于正常色散区, 它们彼此的时域间隔为 1 ps. 通过数值求解光子晶体光纤中脉冲传播满足的耦合非线性薛定谔方程, 发现用孤子脉冲可俘获信号脉冲串中的任何一个脉冲, 被俘获的信号脉冲的中心波长明显蓝移, 在频域上和其他信号脉冲分离开来, 于是让信号脉冲串在输出端通过布喇格光纤光栅, 被俘获的信号脉冲将被过滤掉. 数值模拟表明, 用脉冲俘获实现的光开关响应速率可以达到 1 THz.

关键词:全光开关; 光子晶体光纤; 脉冲俘获; 光孤子

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)02-0270-5

0 引言

超高速全光开关是实现超高速光通信的一项重要关键技术. 近年来, 采用了多种途径来实现全光开关, 如利用光纤或半导体光放大器在非线性光环路镜 Mach-Zehnder 干涉仪^[1-3]中实现光开关、用交叉相位调制和四波混频^[4-5]实现光开关等. 本文提出一种基于光子晶体光纤中脉冲俘获现象的超高速全光开关. 众所周知, 在光纤中传输的两个光脉冲发生碰撞时, 彼此间会有相互作用^[6]. 最近, Islam 发现双折射光纤中, 一个孤子脉冲的两个正交偏振分量间存在俘获现象^[7]; Nishizawa 和 Goto 发现处于零色散波长附近的孤子脉冲也有俘获现象^[8-9]; 处于正常色散区的光脉冲被处于反常色散区的飞秒孤子脉冲俘获, 被俘获的脉冲频谱蓝移后与孤子脉冲达到群速度匹配, 两个脉冲以相同的群速度沿光纤共同传输^[10]. 由于脉冲俘获具有频移和易控制特性, 它可被用来实现波长控制和光开关. 光子晶体光纤是在石英光纤中沿轴向均匀排列着空气孔, 从光纤端面看存在周期性的二维结构的特殊光纤^[11]. 光子晶体光纤的特殊物理结构使其拥有普通光纤所不具备的物理特性: 无休止的单模特性、全新的群速度色散特性(红外波段的零色散)、更强的非线性等. 这些特性使得光子晶体光纤在光通信领域具有广阔的应用前景. 尤其, 光子晶体光纤独特的色散特性和非线性效应能够显著的缩短用来实现光开关的光纤长度, 同时可以提高响应速率. 同时, 由于光子晶体光纤的可调零色散波段, 针对不同的工作窗口, 都可以用光子晶体光纤实现光开关. 本文的研究表

明, 利用 60 cm 长的光子晶体光纤可有效地实现响应速率为 1 THz 的超高速光开关, 如果改变光子晶体光纤的结构, 增大其非线性特性, 还可进一步减小实现开关功能的光纤长度.

1 光子晶体光纤中抽运脉冲和信号脉冲传播的物理模型

光子晶体光纤中抽运脉冲和信号脉冲的传播满足如下耦合非线性薛定谔方程^[12]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \sum_{n=2}^6 \beta_{nA} \frac{i^{n-1}}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial T^n} = i\gamma \left\{ |A|^2 A + 2|B|^2 A + \frac{i}{\omega_{oA}} \frac{\partial |A|^2 A}{\partial T} - T_{RA} \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial B}{\partial z} - \delta \frac{\partial B}{\partial T} + \sum_{n=2}^6 \beta_{nB} \frac{i^{n-1}}{n!} \frac{\partial^n B}{\partial T^n} = i\gamma \left\{ |B|^2 B + 2|A|^2 B + \frac{i}{\omega_{oB}} \frac{\partial |B|^2 B}{\partial T} - T_{RB} \frac{\partial |B|^2}{\partial T} \right\} \quad (2)$$

式中 A 和 B 分别表示抽运脉冲和信号脉冲的振幅, 其中抽运脉冲为孤子脉冲, z 是沿光子晶体光纤的传播距离, 其中通过变换 $T = t - \beta_{1A} z$ 引入了以抽运脉冲的群速度运动的参考系, β_{1A} 是抽运脉冲的一阶色散, β_n 是脉冲中心波长为 ω_0 时的第 n 阶色散系数, 这儿考虑到最高 6 阶色散, γ 是非线性系数, ω_{oA} 和 ω_{oB} 分别是抽运脉冲和信号脉冲的中心角频率, T_R 表示喇曼散射, 这儿取值为 5 fs, 参量 δ 表示两脉冲间的走离长度. 在方程(1)、(2)中等号左边为传输和色散项, 右边为非线性项, 包括自相位调制、交叉相位调制、自陡效应、脉冲内喇曼散射.

采用分步傅里叶方法求解上述耦合非线性薛定谔方程. 设光子晶体光纤的零色散波长为 767 nm, 抽运脉冲的初始中心波长为 800 nm, 非线性系数 $\gamma = 0.075 \text{ Wm}^{-1}$, 色散系数 $\beta_2 = -5.9998 \times 10^{-6} \text{ fs}^2/\text{nm}$, $\beta_3 = 6.0445 \times 10^{-5} \text{ fs}^3/\text{nm}$, $\beta_4 = -3.3683 \times 10^{-5} \text{ fs}^4/\text{nm}$, $\beta_5 =$

*教育部新世纪优秀人才支持计划和高等学校博士点基金(20040532005)资助

** Tel: 0731-8821759 Email: scwen@vip.sina.com

收稿日期: 2005-07-22

$-4.7893 \times 10^{-5} \text{ fs}^5/\text{nm}$, $\beta_6 = 3.3037 \times 10^{-4} \text{ fs}^6/\text{nm}$. 信号脉冲的初始中心波长为 740 nm, 非线性系数 $\gamma = 0.081 \text{ Wm}^{-1}$, 色散系数为: $\beta_2 = 4.9731 \times 10^{-6} \text{ fs}^2/\text{nm}$, $\beta_3 = 5.4568 \times 10^{-5} \text{ fs}^3/\text{nm}$, $\beta_4 = -2.9155 \times 10^{-5} \text{ fs}^4/\text{nm}$, $\beta_5 = 6.3452 \times 10^{-5} \text{ fs}^5/\text{nm}$, $\beta_6 = -1.1828 \times 10^{-4} \text{ fs}^6/\text{nm}$, 光子晶体光纤长为 60 cm, 其光纤损耗可以忽略不计. 抽运脉冲和信号脉冲的输入波形设为

$$A(z=0, T) = \sqrt{P_1} \text{sech}(T/T_1) \quad (3)$$

$$B(z=0, T) = \sqrt{P_2} \text{sech}[(T - T_d)/T_2] \quad (4)$$

式中, $P_1 = A_0^2$ 和 $P_2 = B_0^2$ 分别代表抽运脉冲和信号脉冲的输入峰值功率, $T_1 = 100 \text{ fs}$ 和 $T_2 = 200 \text{ fs}$ 表示抽运脉冲和信号脉冲的脉冲半宽度, T_d 为信号脉冲对抽运脉冲的时域中心延迟, 取值为 $T_d = 100 \text{ fs}$.

2 脉冲俘获及开关特性分析

图 1(a)和图 2(a)分别为抽运脉冲和信号脉冲的初始输入时域和频域波形, 其中信号脉冲串中脉冲间的时间间隔为 1 ps, 初始功率为 1 W. 抽运脉冲早于第二个信号脉冲耦合到光子晶体光纤中, 时域中心延迟 $T_d = 100 \text{ fs}$, 初始功率为 200 W. 通过改变抽运脉冲的耦合时间, 可以俘获信号脉冲串中的任何一个脉冲. 由于信号脉冲串中的每个脉冲都取相同的双曲正割脉冲, 四个信号脉冲的频谱完全重叠, 其中心波长为 740 nm, 处于正常色散区(图 2(a)). 抽运脉冲中心波长为 800 nm, 处于反常色散区.

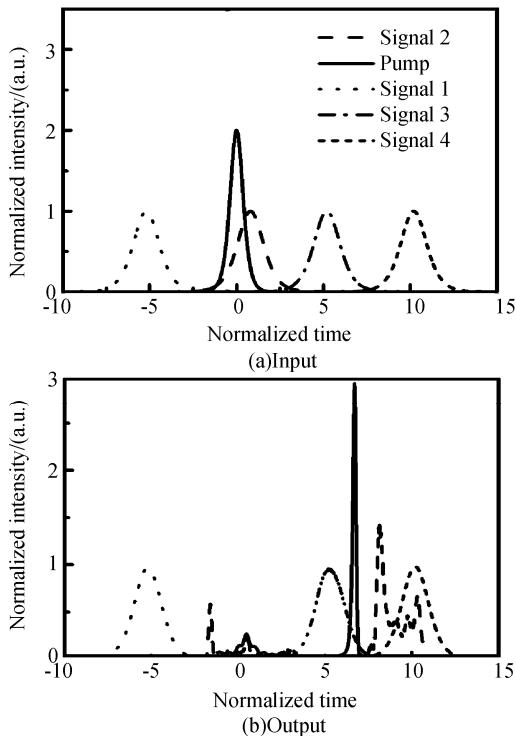


图 1 信号脉冲串与抽运脉冲的输入和输出时域波形
Fig. 1 Temporal waveforms of signal train and pump pulse at input and output

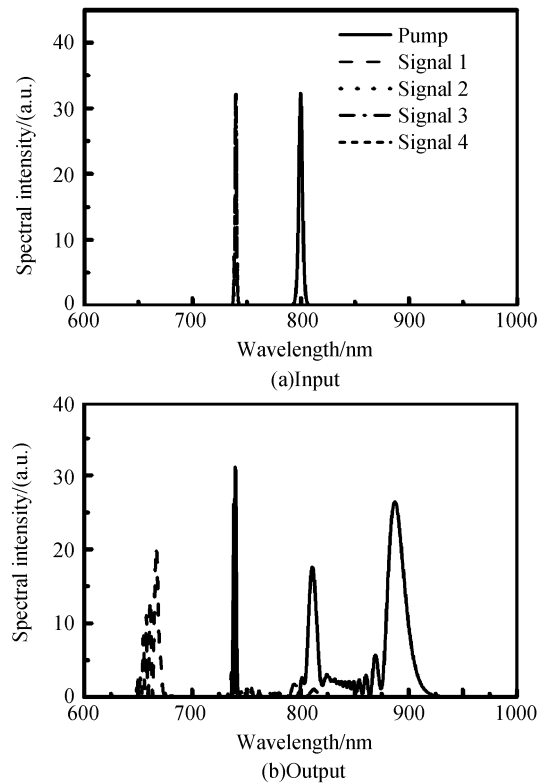


图 2 信号脉冲串与抽运脉冲的输入和输出频谱
Fig. 2 Spectrogram of signal train and pump pulse at input and output

图 1(b)是信号脉冲串和抽运脉冲共同沿光子晶体光纤传输后的时域输出波形. 从中可以看出, 抽运脉冲俘获了第二个信号脉冲. 处于反常色散区的抽运脉冲的群速度要小于处于正常色散区的信号脉冲的群速度. 但在沿光纤传输的过程中, 第二个信号脉冲并没有超越抽运脉冲. 抽运脉冲好像横亘在信号脉冲前面的一堵墙, 使得二者以相同的群速度沿光纤传输. 同时, 在光纤的输出端, 发现第三个信号脉冲超越了第二个信号脉冲和抽运脉冲. 当第二个信号脉冲被抽运脉冲俘获后, 由于交叉相位调制作用使其频谱蓝移, 从 740 nm 频移到 650 nm, 处于零色散波段附近的抽运孤子脉冲受喇曼散射^[13]的影响, 频谱红移. 这样它们的群速度匹配, 而其它三个信号脉冲没有被俘获, 它们的频谱和群速度没有受到影响(图 2(b)). 特别是第三个信号脉冲, 它与抽运脉冲在传输的过程中会时域重叠, 彼此有交叉相位调制作用, 可是没有形成群速度匹配, 没有被抽运脉冲俘获, 它在继续传输后又与抽运脉冲分离, 频谱也恢复到初始状态. 这样让信号脉冲串在光子晶体光纤的输出端通过波长滤波器^[14], 如布喇格光纤光栅^[15], 频谱蓝移的信号脉冲被滤掉, 从而实现了光脉冲的开与关.

通过分析第二个和第三个信号脉冲以及抽运脉冲在传输中的时域演变过程, 利用脉冲俘获实现光

开关的优势得以充分体现. 图 3(a)中, 孤子脉冲的自频移导致其群速度下降. 可是第二个信号脉冲有如碰到墙壁一样, 无法超越前面的喇曼孤子脉冲(图 3(a)、(b)、(c)、(d)、(e)). 这样二者达到群速度匹配, 实现了脉冲俘获. 在图 3(c)中, 抽运脉冲俘获了信号脉冲, 此时也实现了光开关. 这种脉冲俘获的物理机制是喇曼孤子脉冲的连续的交叉相位调制, 使得信号脉冲频谱蓝移. 当忽略喇曼散射作用时, 俘获现象将不能形成. 同时, 在脉冲俘获的过程中, 抽运脉冲和被俘获的信号脉冲的展宽受到抑制, 被俘获的信号脉冲能量增加. 抽运脉冲俘获信号脉冲后, 它们在继续传输的过程中, 由于连续的交叉相位调制的作用, 抽运脉冲继续红移, 信号脉冲继续蓝移. 抽运脉冲和被俘获的信号脉冲以同样的群速度传输时, 第三个信号脉冲会与抽运脉冲重叠(图 3(d)), 二者也有交叉相位调制作用, 但不是连续的. 第三个信号脉冲没有频移, 其群速度也没有减小到能与抽运脉冲匹配, 从而在继续传输过程中, 二者分离开来(图 3(e)), 抽运脉冲没有俘获第三个信号脉冲. 当抽运脉冲俘获一个信号脉冲后, 其它信号脉冲对俘获现象不产生任何影响. 这样, 可以高效率的对任何一个信号脉冲实现开关功能, 而不受制于其它脉冲.

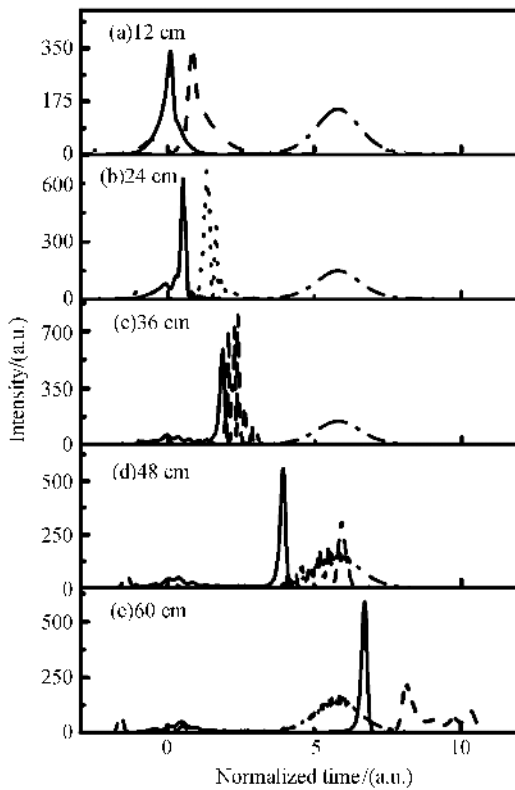


图 3 抽运脉冲、第二个和第三个信号脉冲的时域波形演变
Fig. 3 Temporal evolutions of pump pulse, the Second and the third signal pulse along photonic crystal fiber
由于信号脉冲间的时域间隔为 1 ps, 所以光开

关的响应速率可达到 1 THz. 信号脉冲间的时间间隔决定了用脉冲俘获现象实现光开关的响应速率. 如果为了提高响应速率而缩短信号脉冲间的时间间隔, 则在抽运脉冲俘获第二个信号脉冲的过程中(二者的群速度都在下降, 但没有达到匹配时), 抽运脉冲将会与第三个信号脉冲的前沿有交叉相位调制作用, 这样抽运脉冲会俘获第三个信号脉冲的前沿, 从而对第三个信号脉冲产生影响. 图 4 是信号脉冲串的时间间隔为 0.5 ps 时信号脉冲串与抽运脉冲的初始输入时域波形(图 4(a))和经光子晶体光纤传输后的时域波形(图 4(b)). 此时, 抽运脉冲俘获了第二个信号脉冲的后沿, 同时也俘获了第三个信号脉冲的前沿(图 4(b)), 所以严重影响了光开关的有效性. 为了保持光开关的 100% 的消失率, 信号脉冲间的时间间隔必需得到保证. 研究发现, 光开关的响应速率受到很多因素的影响, 包括走离长度、非线性系数、抽运脉冲的中心延迟、抽运脉冲的能量、抽运脉冲的时域宽度等. 在本文的计算参量情形下, 上述数值计算结果表明, 光开关的速率为 1 THz 时, 开关性能很好.

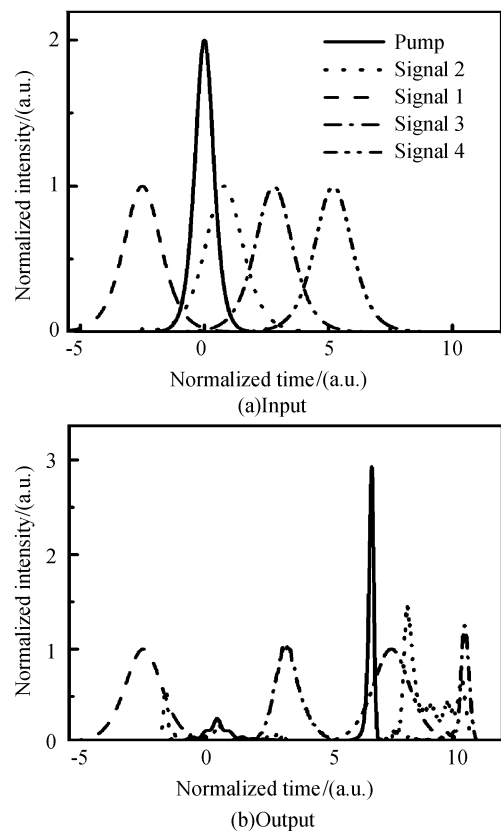


图 4 信号脉冲串与抽运脉冲的输入和输出时域波形
Fig. 4 Temporal waveforms of signal train and pump pulse at input and output

同时, 发现孤子脉冲的输入功率的选择对孤子红移和被俘获的信号脉冲蓝移有突出的贡献. 在保持信号脉冲初始输入功率为 1 W 时, 选择孤子脉冲

的三个不同初始输入功率分别为:100 W、200 W、300 W. 当 $P_1=100$ W 时(图 5(a)),抽运脉冲中心波长从 800 nm 移到 850 nm,信号脉冲中心波长从 740 nm 移到 720 nm;当增大 $P_1=200$ W 时(图 5(b)),抽运脉冲中心波长从 800 nm 移到 900 nm,信号脉冲中心波长从 740 nm 移到 700 nm;如果 $P_1=300$ W (图 5(c)),抽运脉冲中心波长移到 980 nm,信号脉冲中心波长移到 620 nm. 得出,当孤子脉冲的初始输入功率增大时,孤子的自频移和被俘获的信号脉冲频谱蓝移更明显. 这可以理解为:当抽运功率增大时,它对信号脉冲的交叉相位调制作用也增加,而导致信号脉冲的蓝移更明显.

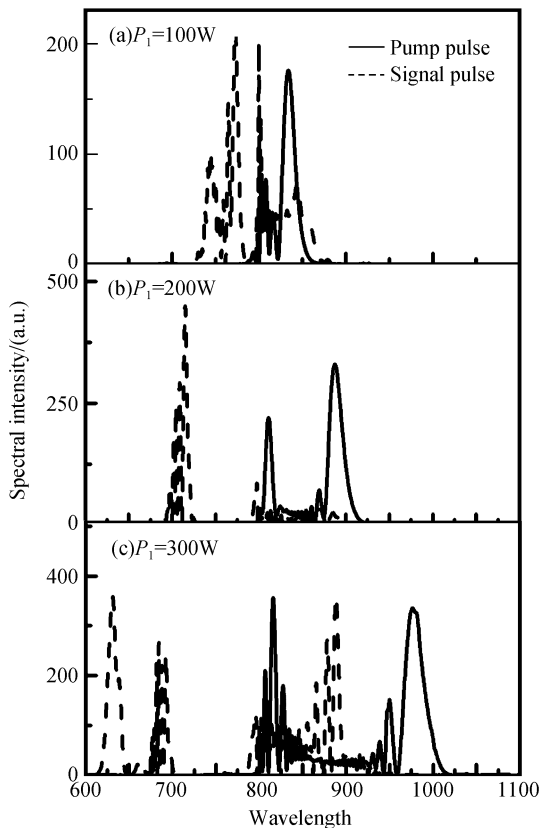


图 5 不同初始抽运脉冲功率对应的抽运脉冲与被俘获的信号脉冲的频谱

Fig. 5 Spectra of the pump pulse and the trapped signal pulse for different input peak power of pump pulse

3 结论

通过数值求解耦合非线性薛定谔方程,从理论上分析了在光子晶体光纤中利用脉冲俘获实现全光开关. 信号脉冲处于正常色散区,它们彼此的时域间隔为 1 ps. 可以用孤子脉冲俘获信号脉冲串中的任何一个脉冲. 被俘获的信号脉冲的中心波长明显蓝移,在频域上和其它信号脉冲分离开来. 让信号脉冲串在输出端通过布喇格光纤光栅,被俘获的信号脉冲将过滤掉. 同时,发现其它的信号脉冲在传

输过程中也会与孤子脉冲时域重叠,但它不会被孤子脉冲俘获. 在数值模拟中,用脉冲俘获实现的光开关响应速率可以达到 1 THz. 增大孤子脉冲的初始输入功率,被俘获的信号脉冲频谱蓝移更明显.

参考文献

- [1] BLOW K J, DORAN N J, NELSON P B. Demonstration of the nonlinear fiber loop mirror as an ultrafast all-optical demultiplexer[J]. *Electron Lett*, 1990, **26**(11): 962-964.
- [2] SOKOLOFF J P, PRUCNA P R, GLESK I. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD) [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1993, **5**(7): 787-790.
- [3] NAKAMURA S, UENO Y, TAJIMA K. Ultrafast (200 fs switching, 1.5 Tb/s demultiplexing) and high-repetition (10GHz) operations of a polarization-discriminating symmetric Mach-Zehnder all-optical switch [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(6): 1575-1577.
- [4] ANDREKSON P A, OLSSON N A, SOMPMSON J R. 16Gbit/s all-optical demultiplexing using four-wave mixing [J]. *Electron Lett*, 1991, **27**(4): 922-924.
- [5] OLSSON B E, BLUMENTHAL D J. All-optical demultiplexing using fiber cross-phase modulation (XPM) and optical filtering [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(3): 875-877.
- [6] ISLAM M N, POOLE C D, GORDON J P. Soliton trapping in birefringent optical fibers [J]. *Opt Lett*, 1989, **14**(10): 1011-1013.
- [7] NISHIZAWA N, GOTO T. Characteristics of pulse trapping by use of ultrashort soliton pulses in optical fibers across the zero-dispersion wavelength [J]. *Opt Exp*, 2002, **10**(11): 1151-1159.
- [8] MITSCHKE F M, MOLLENAUER L F. Discovery of the soliton self-frequency shift [J]. *Opt Lett*, 1986, **11**(8): 659-661.
- [9] NORIHIKO N, TOSHIO G. Trapped pulse generation by femtosecond soliton pulse in birefringent optical fibers [J]. *Opt Exp*, 2002, **10**(12): 256-262.
- [10] NISHIZAWA N, GOTO T. Characteristics of pulse trapping by use of ultrashort soliton pulses in optical fibers across the zero-dispersion wavelength [J]. *Opt Exp*, 2002, **27**(6): 152-159.
- [11] PHILIP R. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5): 358-362.
- [12] CHENG C. Nonlinear copropagation of two optical pulses of different frequencies in photonic crystal fibers [J]. *Appl Phys B*, 2005, **80**(6): 291-296.
- [13] ZHU Zhi-hong, YE Wei-min, JI Jia-rong, et al. Analysis of photonic crystal filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 700-703.
朱志宏, 叶卫民, 季家榕, 等. 光子晶体滤波特性分析 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 700-703.
- [14] HUANG Xiao-qin, CUI Yi-ping. Analysis of nonlinear dispersive properties of one dimensional photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 71-75.
黄晓琴, 崔一平. 一维光子晶体非线性色散特性的分析 [J]. *光子学报*, 2004, **34**(6): 71-75.

[15] CHEN Lin, WEN Shuang-chun, ZHOU Guang-tao, *et al.* The method of increasing the response range of DOP ellipsoid to polarization mode dispersion in 40 Gb/s RZ system[J]. *Acta*

Photonica Sinica, 2005, **34**(5):706-0709.

陈林, 文双春, 周光涛, 等. 提高 RZ 码偏振度椭圆对偏振模色散响应范围的方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(5):706-709.

Ultrafast All Optical Switching Based on Pulse Trapping in Photonic Crystal Fibers

LI Shan-fu, WEN Shuang-chun

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Received date: 2005-07-22

Abstract: A theoretical investigation of the ultrafast all optical switching by using pulse trapping in photonic crystal fibers was presented. The characteristics of all optical switching were analyzed numerically based on the strict coupled nonlinear Schrödinger equation. Only an arbitrary single pulse among pulse train with temporal separation of about 1 ps was trapped by soliton pulse, the trapped pulse was blue-shifted and the optical spectra of trapped pulse was distinctly separated from those of the untrapped signal pulses. The trapped pulse can be easily picked off using a wavelength filter such as a fiber Bragg grating. All optical switching with 1 THz switching rate was demonstrated numerically.

Key words: All optical switching; Photonic crystal fiber; Pulse trapping; Optical soliton



LI Shan-fu: was born in 1979. He received the B. S. degree from Hunan University in 2003. And now he is a master candidate at the School of Computer and Communication, Hunan University. His research interest is in optical fiber communication.