

# 基于高非线性光子晶体光纤 Sagnac 环形镜的全光开关\*

刘建国<sup>†</sup> 开桂云 薛力芳 张春书 刘艳格 王 志 郭宏雷 李 燕 孙婷婷 袁树忠 董孝义

(南开大学现代光学研究所,天津 300071)

(2006 年 5 月 16 日收到,2006 年 8 月 8 日收到修改稿)

设计了一种新颖的、低开关功率的全光开关.将高非线性光子晶体光纤和双向抽运掺饵光纤放大器引入 Sagnac 环形镜内,破坏了环形镜的对称性,利用交叉相位调制作用使反向传输的两路信号光产生非线性相移,从而实现开关效应.理论分析表明:开关功率与放大器的增益倍数和光子晶体光纤非线性系数的积成反比,在实验中所获得开关功率约 40 mW,消光比约为 15.9 dB,并且信号光透过率随脉冲控制光峰值功率呈余弦变化,实验结果与理论分析相吻合.

关键词:全光开关,高非线性光子晶体光纤,环形镜,交叉相位调制

PACC:4280M,4280S,4265P

## 1. 引 言

全光开关是解决“电子瓶颈”问题、实现全光网络的关键元件,因此近些年一直倍受人们关注,从 20 世纪 80 年代末至今,许多研究组对基于光纤的全光开关进行了深入的研究<sup>[1-13]</sup>.例如人们将普通光纤或者将具有高非线性效应的特殊光纤<sup>[1,9]</sup>(如掺铒的光纤<sup>[1,5,8]</sup>)应用于 Bragg 光栅<sup>[1-3]</sup>、长周期光栅<sup>[4-7]</sup>、激光谐振腔<sup>[8,13]</sup>、干涉仪<sup>[10,11,13]</sup>、耦合器<sup>[12,13]</sup>等光纤功能器件中,利用激光传输过程中所产生的自相位调制(SPM)作用、交叉相位调制(XPM)作用、光学推扫作用以及四波混频等非线性效应实现开关功能.大量研究结果表明:高开关阈值、低消光比、低开关速率是阻碍全光开关迅速发展和应用最主要的三大障碍.

光子晶体光纤作为一种设计灵活,特性奇异的光纤,它的出现为解决上述三个问题提供了一种可能<sup>[14-22]</sup>.Petrooulos 等人利用光子晶体光纤中 SPM 的频谱展宽效应,通过可调窄带滤波器实现了 2R 再生和全光开关<sup>[18]</sup>;Sharping 等人利用高非线性光

子晶体光纤(HN-PCF)做 Sagnac 非线性光纤环境,通过 XPM 产生非线性相移实现光开关功能<sup>[11]</sup>;Larsen 等人通过在光子晶体光纤的空气孔中填充液晶,实现了光开关的功能<sup>[19]</sup>;Salgueiro 和 Zheltikova 分别提出利用光子带隙光纤的 Kerr 效应和双芯光子晶体光纤耦合器也实现了光开关的功能<sup>[12,20]</sup>.

本文提出将 HN-PCF 和双向抽运掺饵光纤放大器(BP-EDFA)引入 Sagnac 环形镜内,利用 XPM 作用实现全光开关效应.对此模型进行了理论分析,结果表明:此光开关的开关功率与 BP-EDFA 的增益倍数和 HN-PCF 非线性系数的积成反比,因此可以通过选择高增益倍数的 BP-EDFA 和高非线性系数的 HN-PCF 降低开关功率.在实验中所获得开关功率约 40 mW,消光比约为 15.9 dB,并且信号光透过率随脉冲控制光峰值功率呈余弦变化,实验结果与理论分析相吻合.

## 2. 实验装置与原理

实验装置如图 1 所示,其中 FBG1 和 FBG2 是利用相位掩模法自行写制的、两个完全相同的 Bragg

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2003CB314906),国家自然科学基金(批准号:60407005,60137010),天津市重点基金项目(批准号:06YFJZJC00300)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: luckyjgliu@163.com

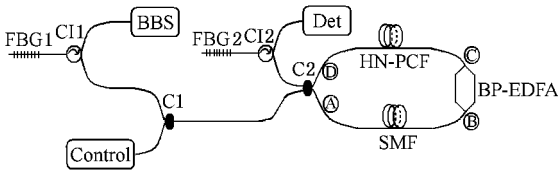


图 1 实验装置图

光纤光栅,其中心波长为 1547.5 nm,反射率接近 100% ;C1,C2 分别是 1×2 和 2×2 的 3 dB 耦合器 ;C11,C12 是两个环形器 ;BBS 和 Control 分别是 C 波段的宽带光源和中心波长是 1552.5 nm,功率可调的脉冲控制源 ;SMF 是 20 m 长普通单模光纤,HN-PCF 是由丹麦 Crystal Fiber 公司生产的 NL-1550-ZERO-1 型高非线性 PCF,其长度、模场面积和零色散波长分别是 20 m、2.5 μm<sup>2</sup> 和 1550 nm,在出厂前,该 HN-PCF 已通过过渡光纤与 SMF 熔接,每个熔接点损耗约为 0.5 dB ;Det 是探测器 ;BP-EDFA 是由两个 980 nm 的激光二极管(LD)双向抽运的掺铒光纤放大器,其双向增益近似相等且约为 20 dB.

BBS 所发出的光由 FBG1 滤波产生中心波长为 1547.5 nm 的连续信号光,Control 产生中心波长为 1552.5 nm 的脉冲控制光,两束光由 C1 耦合到一起,如图 2 所示 ;入射光经过 C2 后,对称的分为顺时针和逆时针传输的两部分,由于控制脉冲的功率远远高于信号光,因此每路信号光在环内绕行一周、返回 C2 前,都会携带由控制光对其 XPM 作用所产生的非线性相移 ;又由于 BP-EDFA 的引入,破坏了对称性,使两路信号光所携带的非线性相移不等,从而有一部分信号光将透射,因此通过调整控制光的功率,就可以实现全光开关功能 ;由于信号光和控制光分居在零色散点两侧,因此可忽略由群速度色散所引起的走离效应 ;透射光经过 C12,并由 FBG2 滤

波,最终在 Det 处由示波器、光谱仪和功率计探测.

### 3. 理论分析

首先假设控制脉冲光与信号光对称地分布在零色散点两侧,由于两束光的群速度相同,可忽略传输过程中的走离效应 ;其次假设衰减系数  $\alpha = 0$ ,即忽略衰减对非线性相移的影响 ;最后假设连续信号光的功率  $P_s$  远小于控制脉冲光的峰值功率  $P_p$ ,即  $P_s \ll P_p$ ,此时信号光由 SPM 所产生的非线性相移远小于 XPM 所产生的非线性相移.如图 1 所示,当信号光和控制光经过 3 dB 耦合器 C2 后在 Sagnac 环内都对称地分成两束,在这里我们不但要关心信号光的功率变化,而且要考虑其相位变化,而对于控制脉冲光我们仅关心其功率的变化.假设信号光在射入 C2 时的初始相位为 0,同时根据耦合器的传输矩阵可以得知,对于顺时针方向传输的光引入了  $\pi/2$  的相移,因此 A,D 两点的信号光场振幅可以表示为

$$A_{AC} = \sqrt{0.5} \sqrt{P_s}, \quad A_{AC} = i \sqrt{0.5} \sqrt{P_s}, \quad (1)$$

其中  $A_C$  和  $A_{AC}$  分别表示顺时针和逆时针传输的光场振幅.两路光在 Sagnac 环内反向传输,当返回 C2 时,信号光场变为

$$A'_{AC} = \sqrt{0.5} \sqrt{G} \sqrt{P_s} \exp(i\phi_{AC}^L + i\phi_{AC}^{NL}), \quad (2)$$

$$A'_C = i \sqrt{0.5} \sqrt{G} \sqrt{P_s} \exp(i\phi_C^L + i\phi_C^{NL}), \quad (3)$$

其中  $G$  是放大器的增益倍数 ; $\phi_C^L, \phi_{AC}^L$  分别表示两路信号光在 Sagnac 环内传输一周所产生的线性相移 ; $\phi_C^{NL}, \phi_{AC}^{NL}$  分别表示顺时针和逆时针两路信号光在 Sagnac 环内传输一周后所产生的非线性相移.利用光纤耦合器的传输矩阵可以得到反射和透射光场为

$$\begin{pmatrix} A_t \\ A_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{0.5} & i\sqrt{0.5} \\ i\sqrt{0.5} & \sqrt{0.5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A'_{AC} \\ A'_C \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中  $A_t$  和  $A_r$  分别表示透射和反射的光场振幅.所以 Sagnac 环的透过率为

$$T = |A_t|^2 / P_s = \frac{G}{2} (1 - \cos \delta \phi), \quad (5)$$

式中  $\delta \phi$  表示反向传输的两路信号光的相移差,且  $\delta \phi = |(\phi_{AC}^L - \phi_C^L) + (\phi_{AC}^{NL} - \phi_C^{NL})|$ ,可见信号光的透过率增大了  $G$  倍,并且随相移差呈余弦变化.

由于控制脉冲光与信号光同步传输,因此信号光的非线性相移是由 SPM 和 XPM 共同作用产生的,并且非线性相移可分为三部分,一部分是在 HN-PCF

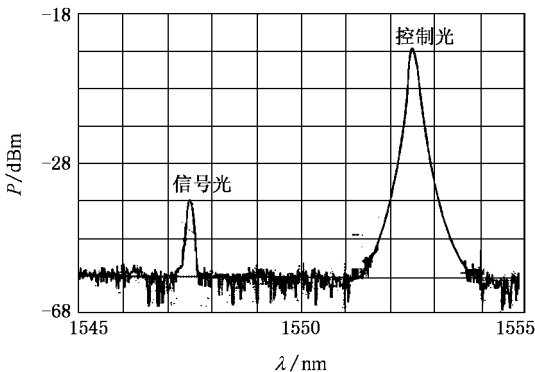


图 2 输入信号光与脉冲控制光的光谱图

中传输产生的,另一部分是在 SMF 中传输产生的,第三部分是在 BP-EDFA 内部产生的.假设脉冲间隔不小于光波在环内传输一周所用的时间,则顺时针非线性相移可表示为

$$\begin{aligned} \delta\phi_{\text{C}}^{\text{NL}} = & \frac{1}{2} \gamma_{\text{p}} (P_{\text{s}} + 2P_{\text{p}} + 2GP_{\text{s}}) L_{\text{PCF}} \\ & + \frac{1}{2} \gamma_{\text{s}} [\alpha (P_{\text{s}} + 2P_{\text{p}}) + 2P_{\text{s}}] L_{\text{SMF}} + \delta\phi_{\text{EDFA}}^{\text{C}}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $\gamma_{\text{p}}$  和  $\gamma_{\text{s}}$  分别表示光子晶体光纤和单模光纤的非线性系数,  $L_{\text{PCF}}$  和  $L_{\text{SMF}}$  分别表示 HN-PCF 和 SMF 的长度,  $\delta\phi_{\text{EDFA}}^{\text{C}}$  是在 EDFA 内部由 SPM 和 XPM 共同作用产生的非线性相移.同样逆时针非线性相移为

$$\begin{aligned} \delta\phi_{\text{AC}}^{\text{NL}} = & \frac{1}{2} \gamma_{\text{s}} (P_{\text{s}} + 2P_{\text{p}} + 2GP_{\text{s}}) L_{\text{SMF}} \\ & + \frac{1}{2} \gamma_{\text{p}} [\alpha (P_{\text{s}} + 2P_{\text{p}}) + 2P_{\text{s}}] L_{\text{PCF}} + \delta\phi_{\text{EDFA}}^{\text{AC}}. \end{aligned} \quad (7)$$

由于双向传输的信号光和双向传输的控制脉冲光在经过 BP-EDFA 前强度近似相同,同时放大器双向增益也近似相同,因此在 BP-EDFA 内所产生的双向信号光非线性相移相同,即  $\delta\phi_{\text{EDFA}}^{\text{C}} = \delta\phi_{\text{EDFA}}^{\text{AC}}$ ,令  $L_{\text{PCF}} = L_{\text{SMF}} = L$  时,则非线性相移差可表示为

$$\begin{aligned} \delta\phi^{\text{NL}} = & |\delta\phi_{\text{AC}}^{\text{NL}} - \delta\phi_{\text{C}}^{\text{NL}}| \\ = & \frac{1}{2} (\gamma_{\text{p}} - \gamma_{\text{s}}) (G - 1) (2P_{\text{p}} - P_{\text{s}}) L. \end{aligned} \quad (8)$$

当  $\gamma_{\text{p}} \gg \gamma_{\text{s}}$ ,  $G \gg 1$ ,  $P_{\text{p}} \gg P_{\text{s}}$  时, (8) 式简化为

$$\delta\phi^{\text{NL}} = G\gamma_{\text{p}} P_{\text{p}} L. \quad (9)$$

另外,由于两路信号光所走的路径相同,因此  $\phi_{\text{C}}^{\text{L}} = \phi_{\text{AC}}^{\text{L}}$ ,所以两路信号光的相移差

$$\delta\phi = \delta\phi^{\text{NL}} = G\gamma_{\text{p}} P_{\text{p}} L. \quad (10)$$

将(10)式代入(5)式可得

$$T = |A_{\text{t}}|^2 / P_{\text{s}} = \frac{G}{2} (1 - \cos(G\gamma_{\text{p}} P_{\text{p}} L)). \quad (11)$$

由(5)式和(11)式可知信号光的透过率随相移差呈余弦变化,且当相移差等于  $\pi$  的奇数倍时,透射率最大,即  $\delta\phi = (2m - 1)\pi$ ,其中  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,所以开关功率可表示为

$$P_0 = \frac{\pi}{G\gamma_{\text{p}} L}. \quad (12)$$

可见通过在 Sagnac 环形镜内引入高非线性系数的 HN-PCF 和高增益倍数的 BP-EDFA 可使开关功率急剧下降,同时开关功率与光纤长度成反比.将非线性系数  $\gamma_{\text{p}} = n_2 \omega / c A_{\text{eff}}$  带入(12)式可得

$$P_0 = \frac{\lambda A_{\text{eff}}}{2n_2 GL}, \quad (13)$$

式中  $n_2$  是非线性折射率常数,  $A_{\text{eff}}$  是有效模场面积.假设 BP-EDFA 的增益系数是 20 dB,即  $G = 100$ , PCF 长度  $L = 20$  m, PCF 非线性常数  $n_2 = 2.8 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ , PCF 有效模场面积  $A_{\text{eff}} = 2.5 \mu\text{m}^2$ ,则对于 1547.5 nm 的信号光,开关功率约为 34.6 mW.

## 4. 实验结果及分析

在实验中我们发现当控制脉冲光峰值功率很低时,例如当  $P_{\text{p}} < -20$  dBm,我们从光谱仪和示波器观测不到信号光,随着  $P_{\text{p}}$  的增加,信号光逐渐明显,图 3 是控制脉冲光峰值功率约为 4.3 dBm 时,透射信号光的光谱图.根据(8)~(11)式可知,这是由于在无控制脉冲光或信号控制脉冲光峰值功率较小的情况下, Sagnac 环内顺时针和逆时针两路信号光间的相移差可以忽略不计,随着控制脉冲光峰值功率的增加,  $\delta\phi^{\text{NL}}$  逐渐增大,即  $\delta\phi$  逐渐增大,因此信号光逐渐透射出来.

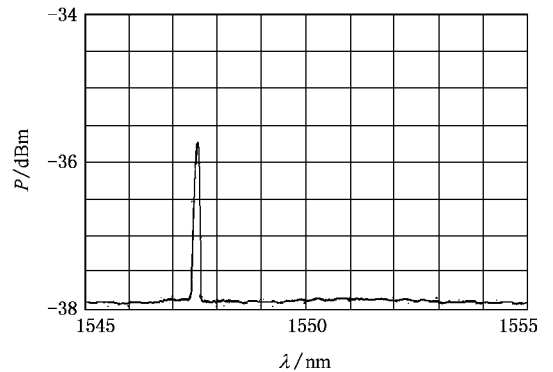


图 3 透射信号光的光谱图

图 4(a)和图 4(b)分别是入射控制脉冲和透射的信号脉冲,此时控制脉冲的峰值功率约为 15 dBm,脉冲频率为 1.50 MHz,由图 4(a)和图 4(b)可知,信号脉冲的频率由控制脉冲的频率决定,实验中信号脉冲的频率与控制脉冲的频率相同,都等于 1.5 MHz;且信号脉冲的半极大全宽度(FWHM)小于控制脉冲的 FWHM,例如图中控制脉冲的 FWHM 为 61.9 ns,而此时信号脉冲的 FWHM 为 38.7 ns,这是由于信号光的透射率主要取决于控制脉冲的功率,只有较大的控制脉冲功率,才会产生明显的非线性相移,信号光才能透射的缘故.在实验中当控制脉

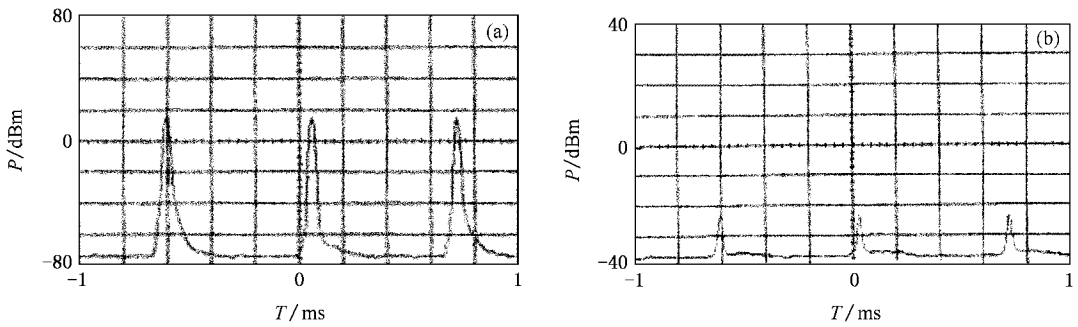


图 4 (a) 入射控制光的脉冲谱 (b) 透射信号光的脉冲图

冲约等于 16 dBm 时, 所得信号脉冲的消光比为 15.9 dB.

图 5 给出了信号脉冲的透射率随峰值控制脉冲功率的变化关系, 实线是根据 (5) 式和 (11) 式计算所得的理论值, 其中参数的选取与实验中的参数相同, 即  $G = 100$ ,  $L = 20$  m,  $n_2 = 2.8 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup>/W,  $A_{\text{eff}} = 2.5$   $\mu\text{m}^2$ ,  $\lambda = 1547.5$  nm; 圆点是实验中所得的结果. 由图可见, 实验结果与理论值随抽运脉冲峰值功率的变化趋势是一致的, 即随着控制脉冲峰值功率的增加, 信号透射率先增大, 当达到峰值后, 又有减小的趋势, 这是由于透射率随控制光峰值功率近似呈余弦关系, 如 (11) 式所示; 但是实验中信号脉冲的开关功率比理论值略大, 例如实验中所得的开关功率约为 40 mW, 而理论计算的开关功率仅为 34.6 mW; 另外实验中信号脉冲透射率的振幅也比理论结果小, 实验中信号脉冲透射率的振幅约为 67.4, 而理论计算的值为 100. 这主要是在理论计算中忽略了损耗, 而在实验中 HN-PCF 的损耗比较大, 同时由于 HN-PCF 与 SMF 的模场不匹配所带来的熔接损耗, 削弱了环路中控制脉冲和信号光的功率. 由于控制脉冲功率的衰减, 导致非线性相移减小, 在实验参数一定的情况下, 只有通过增大输入控制脉冲峰值功率去弥补非线性相移差的损失, 因此实验中的开关功率要比理论计算值大; 同时由于信号光的衰减, 使得信号光在环内绕行一周后, 其功率增加的倍数比放大器的增益  $G$  小, 因此最后信号脉冲透射率比

理论计算值小.

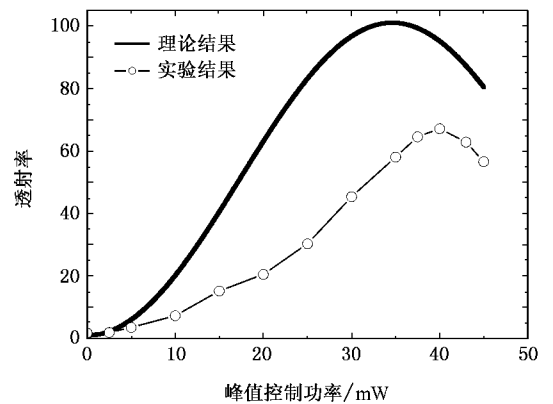


图 5 信号脉冲的透射率随峰值控制脉冲功率的变化

## 5. 结 论

将 HN-PCF 和 BP-EDFA 引入 Sagnac 环形镜内, 由于此光开关的开关功率与放大器的增益倍数和光子晶体光纤非线性系数的积成反比, 因此可以通过提高放大器的增益倍数和增大 HN-PCF 的非线性系数降低开关功率, 由于控制光与信号光分居零色散点的两侧, 从而避免了走离效应. 在实验中所获得开关功率约 40 mW, 消光比约为 15.9 dB, 并且信号光透过率随脉冲控制光峰值功率呈余弦变化, 理论分析与实验结果相吻合.

[1] Guo Y, Huang Y Q, Chen X, Ren X M, Song J 2002 *Appl. Opt.*

[2] Broderick N G R, Taverner D, Richardson D J, Ibsen M 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* 17 345

- [ 3 ] Melloni A , Chinello M , Martinelli M 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 42
- [ 4 ] Eggleton B J , Slusher R E , Judkins J B , Stark J B , Vengsarkar A M 1997 *Opt. Lett.* **22** 883
- [ 5 ] Kim Y H , Kim N S , Chung Y J , Paek U C , Han W T 2004 *Opt. Exp.* **12** 651
- [ 6 ] Perlin V E , Winful H G 2000 *J. of Lightwave Tech.* **18** 329
- [ 7 ] Jeong Y , Baek S , Lee B 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 1216
- [ 8 ] Arkwright J W , Elango P , Atkins G R , Digonnet M J F 1998 *J. of Lightwave Tech.* **16** 798
- [ 9 ] Asobe M , Kobayashi H , Itoh H , Kanamori T 1993 *Opt. Lett.* **18** 1056
- [ 10 ] Bananej A , Li C 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2102
- [ 11 ] Sharping J E , Fiorntino M , Kumar P , Windeler R S 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 77
- [ 12 ] Salgueiro J R , Kivshar Y S 2005 *Opt. Lett.* **30** 1858
- [ 13 ] Li J Q , Li L , Zhao J Q , Li C F 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 2005
- [ 14 ] Li Y F , Wang Q Y , Hu M L , Hou L T *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1396 ( in Chinese ) [ 栗岩峰、王清月、胡明列、侯蓝田等 2004 物理学报 **53** 1396 ]
- [ 15 ] Cheng C F , Wang X F , Lu B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1826 ( in Chinese ) [ 成纯富、王晓方、鲁波 2004 物理学报 **53** 1826 ]
- [ 16 ] Ren G B , Wang Z , Lou S Q , Jian S S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1856 ( in Chinese ) [ 任国斌、王智、姜淑琴、简水生 2004 物理学报 **53** 1856 ]
- [ 17 ] Zhang D S , Dong X Y , Zhang W G , Wang Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1235 ( in Chinese ) [ 张德生、董孝义、张伟刚、王志 2005 物理学报 **54** 1235 ]
- [ 18 ] Petropoulos P , Monro T M , Belardi W , Furusawa K , Lee J H , Richardson D J 2001 *Opt. Lett.* **26** 1233
- [ 19 ] Larsen T T , Bjarklev A , Hermann D S , Broeng J 2003 *Opt. Exp.* **11** 2589
- [ 20 ] Zheltikova S M , Zheltikov D A , Bloemer A M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026609
- [ 21 ] Lou S Q , Wang Z , Ren G B , Jian S S 2004 *Chin. Phys.* **13** 74
- [ 22 ] Li S G , Xing G L , Zhou G Y , Han Y , Hou L T , Hu M L , Li Y F , Wang Q Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 437

## A all-optical switching based on highly nonlinear photonic crystal fiber Sagnac loop mirror\*

Liu Jian-Guo<sup>†</sup> Kai Gui-Yun Xue Li-Fang Zhang Chun-Shu Liu Yan-Ge Wang Zhi

Guo Hong-Lei Li Yan Sun Ting-Ting Yuan Shu-Zhong Dong Xiao-Yi

( Institute of Modern Optics , Nankai University , Tianjin 300071 , China )

( Received 16 May 2006 ; revised manuscript received 8 August 2006 )

### Abstract

We designed a novel and low switching-power all-optical fiber switch. The highly nonlinear photonic crystal fiber and the bi-directional pumped Er-doped fiber amplifier are inserted into the Sagnac loop mirror simultaneously. The switching is realized based on cross-phase modulation because the symmetry of the loop is broken. The theoretical analysis shows that the switching-power is inverse proportional to the product of the amplifier gain and the nonlinear coefficient of the photonic crystal fiber. In our experiment , 40 mW switching-power and 15.9 dB switching-extinction are obtained ; furthermore , the transmission of signal light is a cosine function of the peak power of the control pulse. All the results of experiment well agree with the theory.

**Keywords :** all-optical switching , high nonlinear photonic crystal fiber , Sagnac loop mirror , cross-phase modulation

**PACC :** 4280M , 4280S , 4265P

\*Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2003CB314906 ) , the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60407005 , 60137010 ) and the Tianjin Science Foundation Project ( Grant No. 06YFJJC00300 ).

<sup>†</sup> E-mail : luckyjgliu@163.com