

基于半导体光放大器瞬态交叉相位调制效应的高速反相和同相波长转换的研究*

董建绩¹⁾ 张新亮^{1)†} 付松年²⁾ 沈 平²⁾ 黄德修¹⁾

1) 华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

2) 南洋理工大学网络技术研究中心, 新加坡 637553)

(2006 年 5 月 30 日收到, 2006 年 11 月 17 日收到修改稿)

采用半导体光放大器(SOA)中的瞬态交叉相位调制效应是实现高速全光信号处理的有效途径. 利用 SOA 和带宽为 0.4 nm 的窄带滤波器同时实现了重复频率为 10 GHz、脉冲宽度为 10 ps 的同相和反相全光波长转换. 当滤波器的中心波长相对于探测光载波波长蓝移 0.25 nm 或者红移 0.05 nm 时, 得到反相波长转换; 当滤波器的中心波长相对于探测光波长蓝移 0.29 nm 或者红移 0.25 nm 时, 得到同相的波长转换. 同时用数值模拟了从同相到反相波长转换的极性演化过程, 理论分析和实验结果基本相符.

关键词: 半导体光放大器, 波长转换, 瞬态交叉相位调制

PACC: 4265P, 4255P, 4265K

1. 引 言

近年来, 半导体光放大器(SOA)作为全光信号处理技术的一种功能性器件以其小体积、低功耗和易集成等优点得到学界的广泛关注, 例如利用 SOA 的非线性效应实现了各种不同功能的全光逻辑门^[1-3]. 利用锁模机理产生超短光脉冲源^[4], 然而 SOA 较慢的增益恢复时间(约 100 ps)一直是阻碍其在 40 Gbit/s 以上的高速光通信系统应用的主要原因^[5,6]. 目前, 利用 SOA 的瞬态交叉相位调制(T-XPM)效应辅助以窄带滤波器是一种新颖的加速 SOA 增益恢复、实现高速全光信号处理的有效途径^[7]. 其关键技术是把高速脉冲信号和一路连续光(探测光)同时注入 SOA, 由于高速脉冲信号对载流子的消耗, 使得探测光在 SOA 内产生瞬时非线性相移, 再利用窄带滤波器滤出探测光的蓝移频谱分量或者红移频谱分量, 从而实现 SOA 的高速信号处理. 利用 SOA 的 T-XPM 效应不仅可以获得超快动态特性, 而且具有十分简单的结构. 目前已有报道利用这项技术, 辅助以滤波器蓝移实现 160 Gbit/s^[8]和 320 Gbit/s^[9]的反相波长转换, 也有报道利用滤波器

蓝移实现了 40 Gbit/s 同相波长转换^[10], 利用滤波器蓝移实现 10 Gbit/s 的全光逻辑与门、或门和异或门^[11]. 利用滤波器红移分量和蓝移分量延时干涉实现了反相和同相波长转换^[12].

上述的波长转换方案可以分成两类, 即反相波长转换和同相波长转换, 其实现的方法都是利用光带通滤波器选择探测光信号的蓝移频谱分量^[8-11]. 文献^[12]虽然利用了探测光信号的红移分量, 但是得到的波长转换结果是利用滤波器的红移分量和蓝移分量的延时干涉得到的, 而且延时干涉装置会使系统变得非常复杂. 本文从实验上报道了无论利用滤波器的红移还是蓝移都可以实现重复频率为 10 GHz、脉冲宽度为 10 ps 的反相波长转换和同相波长转换. 还数值模拟了当滤波器的中心波长改变时波长转换从反相到同相的演化过程, 表明理论计算和实验结果基本相符.

2. 工作原理

基于 SOA 和滤波器的波长转换原理如图 1(a)所示, 当重复频率是 10 GHz, 脉冲宽度为 10 ps 的高速光脉冲信号 P_m 和一束连续光 P_c 耦合后注入到

* 国家自然科学基金(批准号: 60577007)、湖北省杰出青年基金(批准号: 2006ABB017)和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-04-0715)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

SOA 由于高速光脉冲的注入会导致探测光的增益和相位发生急剧变化,进而使得探测光光谱展宽,出现了蓝移和红移频谱分量.假设位于 SOA 输出端的光滤波器的中心波长为

$$\lambda_0 = \lambda_c \pm \Delta\lambda_{det},$$

其中 $\Delta\lambda_{det}$ 表示滤波器中心波长相对于探测光中心波长 λ_c 的失谐量, \pm 表示滤波器中心波长的红移或蓝移.这样滤波器就会选取探测光在 $\lambda_c \pm \Delta\lambda_{det}$ 处的分量.值得注意的是,与输入脉冲相比,波长转换后脉冲形状是反相还是同相将会取决于滤波器失谐量 $\Delta\lambda_{det}$,如图 1(b)所示.

我们首先通过数值仿真,模拟波长转换过程中的极性演化随滤波器失谐量的变化情况.应用 SOA 分段模型^[13]得到 SOA 的输出端探测光的光场分布为

$$E_{con}(t) = \sqrt{P_{con}(t)} \exp[i(\omega_0 t + \Phi(t))], \quad (1)$$

式中 ω_0 为探测光的中心角频率, $\Phi(t)$ 为瞬时相位, $P_{con}(t)$ 为 SOA 输出端探测光功率.

经过滤波器后输出的光功率为

$$P_{out}(t) = |F^{-1}\{H(\omega)F[E_{con}(t)]\}|^2, \quad (2)$$

式中 $F[\cdot]$ 和 $F^{-1}[\cdot]$ 分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换, $H(\omega)$ 是光带通滤波器在频域的数学表示.

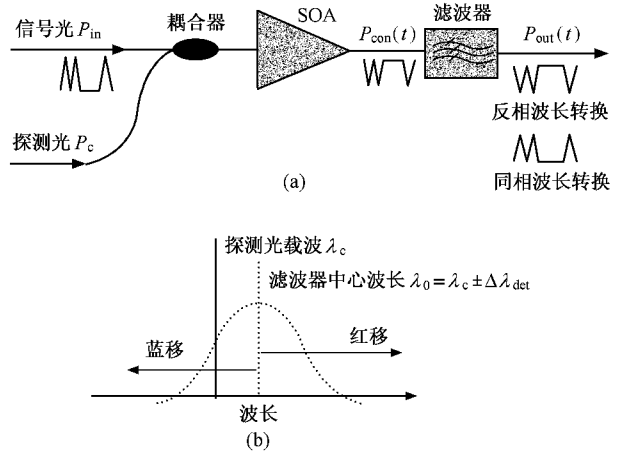


图 1 基于 SOA 和滤波器的波长转换工作原理示意图 (a) 波长转换原理示意图 (b) 输入探测光和滤波器的频域形状

假设滤波器为高斯型,则

$$H(\omega) = \exp\left[-2\ln 2 \left(\frac{\omega - \omega_f}{B_0}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中 ω_f 为滤波器的中心角频率, B_0 为 3 dB 带宽.

根据(1)(2)式进行数值仿真,输入信号光是调制速率为 10 Gbit/s、脉冲宽度为 10 ps 的伪随机码.图 2 是仿真得到的波长转换演化图.图 2(a)是 $\Delta\lambda_{det} = 0$

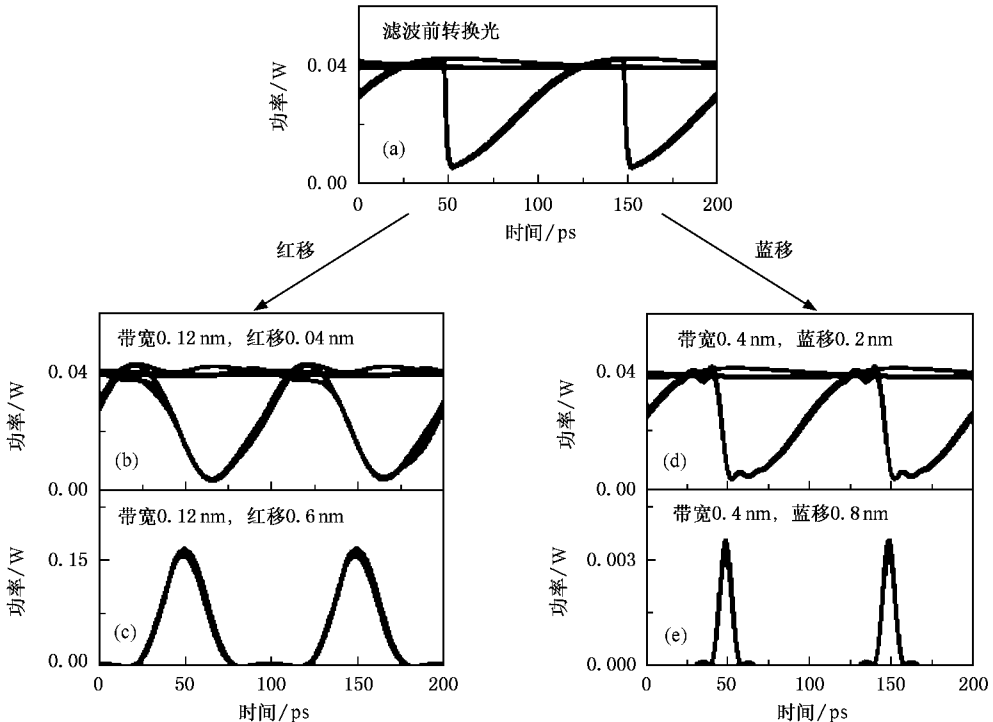


图 2 当调节滤波器中心波长时得到波长转换从反相到同相的演化过程 (a)是未经过滤波器滤波得到的转换光眼图 (b)和(c)是滤波器失谐量分别为 0.04 和 0.6 nm 得到的反相和同相波长转换光眼图 (d)和(e)是滤波器失谐量分别为 -0.2 和 -0.8 nm 时得到的反相和同相波长转换光眼图

nm 时 SOA 输出端的探测光的眼图, 计算可得增益恢复时间为 96 ps (所谓增益恢复时间, 是指当一路输入光脉冲经过 SOA 有源区后, SOA 的增益从其稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间^[51]), 可以看出受限于过长的增益恢复时间, 眼图质量较差. 若直接应用于高速通信系统中则会产生严重的码型效应. 图 2(b) 显示的是当 $\Delta\lambda_{\text{det}} = 0.04$ nm 时得到的反相波长转换的数据信号眼图, 此时增益恢复时间缩短到 56 ps, 可以看出此时脉冲信号眼图具有很好的对称性. 图 2(c) 显示的是当 $\Delta\lambda_{\text{det}} = 0.6$ nm 时得到转换光眼图, 这时输出信号保持与输入信号相同的极性, 实现功能为同相波长转换. 图 2(d) 是 $\Delta\lambda_{\text{det}} = -0.2$ nm 后得到的输出眼图, 为反相波长转换, 增益恢复时间变为 67 ps, 相对于滤波前的波长转换, 增益恢复时间有所改善. 图 2(e) 是 $\Delta\lambda_{\text{det}} = -0.8$ nm 得

到的同相波长转换探测光眼图, 与图 2(c) 相比脉冲变得更窄.

以上模拟计算表明: 滤波器的红移和蓝移均可获得同相和反相波长转换, 当滤波器相对于探测光中心波长的失谐量较小时为反相波长转换, 此时滤波器起到改善动态特性的作用. 当失谐量较大时, 为同相波长转换, 而波长转换得到的脉冲宽度和滤波器带宽有关, 滤波器带宽越大, 输出脉冲宽度越窄, 这可从图 2(c) 和 (e) 的比较得知.

3. 实验研究

基于 T-XPM 效应的 SOA 波长转换实验装置如图 3 所示. 自制的锁模光纤激光器产生重复频率为 10 GHz、脉冲宽度为 10 ps 的光时钟信号, 输出波长

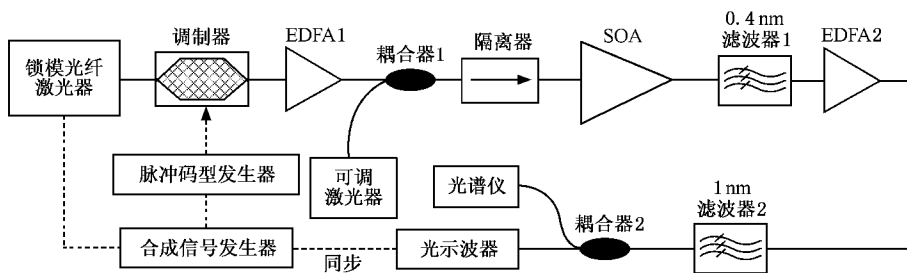


图 3 基于 SOA 和滤波器的波长转换实验装置示意图

为 1550 nm. 数据分析仪(Anritsu 公司 MP1763C 系列) 中的脉冲码型发生器提供字节长度为 $2^7 - 1$ 、速率为 10 Gbit/s 非归零的伪随机电信号, 然后驱动 12.5 GHz 铌酸锂外调制器, 产生一个重复频率为 10 GHz, 脉冲宽度为 10 ps 的伪随机光信号. 此高速信号经过掺铒光纤放大器(EDFA1) 放大后与波长为 1556.5 nm 的连续探测光一起耦合注入 SOA 中, 探测光信号由可调波长激光器(Anritsu 公司 MG9541A 系列) 产生, 实验过程中固定其功率为 0 dBm. 图 3 中的隔离器用以保证光信号的单向传播. 实验中采用的 SOA(Inphenix 公司 IPSAD1501 系列) 偏置电流为 200 mA, 小信号增益为 18 dB, 饱和输出功率为 6 dBm. 当两束光信号混合后, 在 SOA 的输出端测量得到光谱图如图 4(a) 所示, 易见探测光的光谱发生了展宽. 这是由于高速数据信号注入造成的 T-XPM 效应引起的. SOA 后面的滤波器 1 的 3 dB 带宽为 0.4 nm, 中心波长固定在 1556.5 nm, 在滤波器 1 的输出端, 测量得到的光谱如图 4(b) 所示, 波长为 1550 nm 的信号光功率被抑制, 探测光和信号光的功率比为

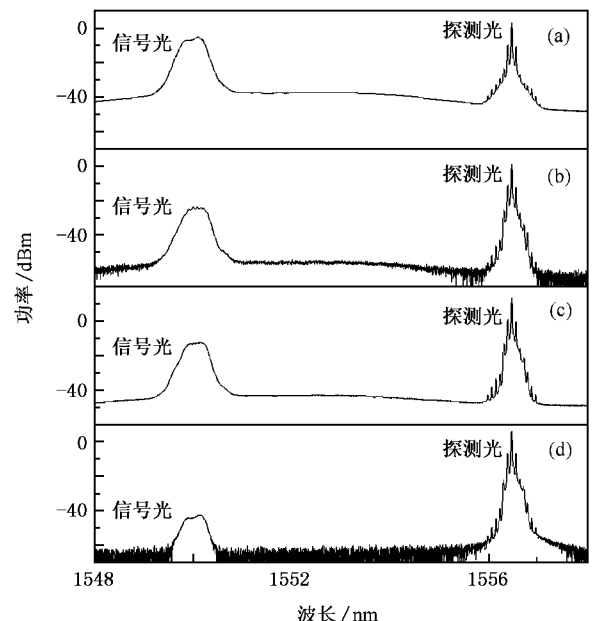


图 4 输出光谱演化图 (a) SOA 输出端的光谱 (b) 滤波器 1 的输出端光谱 (c) EDFA2 的输出端光谱 (d) 滤波器 2 的输出端光谱

25 dB. 第二个掺铒光纤放大器(EDFA2)用于放大探测光信号功率,与此同时信号光也得到放大,如图4(c)所示.为了消除串扰,我们采用另一个1 nm带宽的滤波器2抑制信号光功率,测量其输出端的光谱如图4(d)所示,探测光和信号光功率比为56 dB.最后用光谱仪和示波器分别测量输出光的光谱和时域波形.实验过程中,我们固定滤波器1和滤波器2的中心波长,而通过调节可调激光器的输出波长,来改变滤波器中心波长和探测光波长之间的失谐量.

图5是输入信号的光谱和波形,由于输入信号调制频率为10 GHz,所以从光谱图观测到相邻峰值波长的间隔为0.08 nm,输入信号编码为

“11101010”.图6显示的是当滤波器的失谐量改变时得到的输出波形和光谱.当 $\Delta\lambda_{det} = 0$ nm时,从光谱图上读出峰值波长恰好是1556.5 nm,从波形图看是反相波长转换,由于增益恢复时间约为80 ps,所以脉冲波形严重畸变.当 $\Delta\lambda_{det} = -0.25$ nm时,从波形图看,得到的结果是反相波长转换且增益恢复时间约为50 ps,从光谱图上可以看出峰值功率在1556.75 nm,说明输入探测光的频率分量并未被滤波器抑制,从而导致反相波长转换.当 $\Delta\lambda_{det} = -0.29$ nm时,从波形图可以清晰地看到输出变为同相波长转换,从光谱图看,输入探测光功率受到滤波器的抑制作用,所以输出波形是同相的.当 $\Delta\lambda_{det} =$

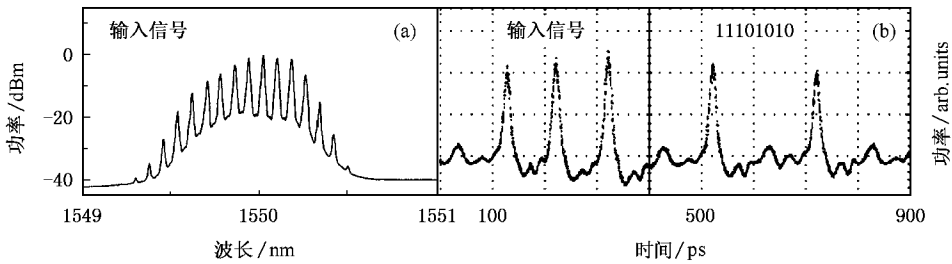


图5 输入信号光的光谱和波形 (a)输入信号的光谱 (b)输入信号的波形

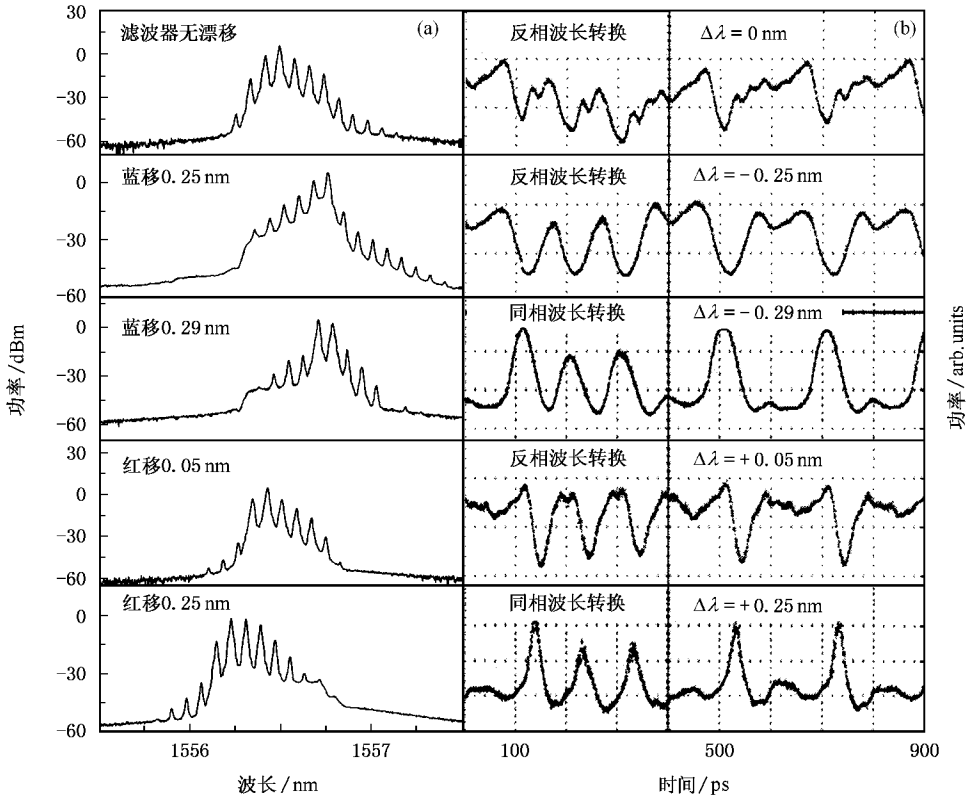


图6 当滤波器红移和蓝移时,得到反相波长转换和同相波长转换的输出光谱和时域波形 (a)从上到下分别是滤波器失谐量为0, -0.25, -0.29, +0.05, +0.25 nm时得到的输出光谱 (b)从上到下分别是滤波器失谐量为0, -0.25, -0.29, +0.05, +0.25 nm时得到的输出波形

0.05 nm 时观察输出的光谱图和波形,由于此时的探测光波长在滤波器的 3 dB 带宽之内,探测光中心波长功率得到放大,所以输出为反相波长转换,且测量增益恢复为 44 ps. 当 $\Delta\lambda_{\text{det}} = 0.35$ nm 时,由于输入探测光的载波功率受到滤波器的抑制,所以输出为同相波长转换.

综上所述,由于探测光频谱展宽同时包含了蓝移分量和红移分量,所以通过滤波器的红移和蓝移均可获得波长转换. 如果探测光中心波长的功率未受到滤波器的抑制(通常失谐量很小),那么输出是反相波长转换. 这时 SOA 的交叉增益调制效应起到主导作用,如果探测光中心波长功率经过滤波后,受到滤波器抑制作用(通常失谐量较大),那么输出是同相波长转换,这时 SOA 的 T-XPM 效应起主导作用. 在反相波长转换中,滤波器的适当失谐量(本实验中小于 0.25 nm)可以缩短增益恢复时间,提高工作速率,实验结果证实了这一点. 虽然窄带滤波器能够辅助 SOA 实现超高速信号处理,但是在反相和同相波长转换中滤波器发挥的作用并不相同. 在反相波长转换过程中,由于滤波器的失谐量较小,探测光的中心载波并没有被完全抑制,在增益恢复过程的某时刻,发生漂移的探测光频率刚好对准滤波器的中心频率,虽然增益未达到最大值,但输出功率却较大. 当增益完全恢复时,由于探测光载波频率漂移量恢复为零,虽然增益恢复到最大值,但载波的部分光功率被滤波器衰减,所以滤波器的较小失谐量使得探测光的频率漂移补偿了较长的增益恢复时间,从而使得滤波器输出功率从最低迅速上升到一个稳定值. 如果把 SOA 及其后的滤波器看成一个系统,则从整体上表现为加快了系统的有效增益恢复. 在同相波长转换过程中,由于滤波器的失谐量较大,探测

光的中心载波被完全抑制,而探测光频率漂移是一个瞬态效应,只发生在输入光脉冲的上升沿和下降沿,只有此时才有光信号经过滤波器输出. 在增益恢复完全后,探测光频率漂移量为零,载波信号将被滤波器滤掉而没有光信号输出,频率漂移的瞬态效应决定了同相波长转换的高速工作状态. 另外受硬件条件限制,本实验中信号重复频率仅为 10 GHz,而 SOA 的 T-XPM 效应还有一个特点是速率越高就越容易实现. 因为工作速率越高,探测光频谱可以展得越宽^[9],越有利于滤波器对不同频谱分量的滤波. 所以利用该方案可以实现更高速率同相或反相的波长转换. 值得注意的是,本实验得到的转换光脉冲均有不同程度的展宽,这是因为本实验中使用了带宽为 0.4 nm 的窄带滤波器. 从上述理论分析可知,如果使用的滤波器带宽越大,输出的脉冲宽度就越窄,所以使用带宽更宽的滤波器或许能够抑制输出脉冲的展宽.

4. 结 论

利用 SOA 的 T-XPM 效应辅助以窄带滤波器是改善 SOA 超快动态特性、实现高速全光信号处理的有效途径. 本文研究了基于 SOA 和窄带滤波器实现高速率全光波长转换极性演化的过程. 从实验上证实利用滤波器的中心波长相对于探测光波长的蓝移和红移均可获得同相和反相的波长转换. 当输入信号重复频率为 10 GHz, 脉冲宽度为 10 ps 时,将滤波器蓝移 0.25 nm 或者红移 0.05 nm,可以得到反相的波长转换;将滤波器蓝移 0.29 nm 或者红移 0.25 nm,可以得到同相的波长转换,理论仿真和实验结果基本符合.

- [1] Zhang X L, Wang Y, Sun J Q *et al* 2004 *Opt. Express* **12** 361
- [2] Wang Y, Zhang X L, Huang D X 2004 *Chin. Phys.* **13** 92
- [3] Zhao C, Zhang X L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4150 (in Chinese) [赵 婵、张新亮 2006 物理学报 **55** 4150]
- [4] Xu F, Zhang X L, Liu D M *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2165 (in Chinese) [徐 帆、张新亮、刘德明等 2006 物理学报 **55** 2165]
- [5] Dong J J, Zhang X L, Huang D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 763 (in Chinese) [董建绩、张新亮、黄德修 2005 物理学报 **54** 763]
- [6] Jiang Z, Huang D X, Zhang X L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4714 (in Chinese) [蒋 中、黄德修、张新亮 2006 物理学报 **55** 4714]
- [7] Nakamura S, Tajima K 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 3498
- [8] Liu Y, Tangdiongga E, Li Z *et al* 2006 *IEEE J. Lightwave Technol.* **24** 230
- [9] Liu Y, Tangdiongga E, Li Z *et al* 2006 *OFC PDP* 28
- [10] Nielsen M L, Lavigne B, Dagens B 2003 *Electron. Lett.* **39** 1334
- [11] Li Z, Liu Y, Zhang S *et al* 2005 *Electron. Lett.* **41** 1397
- [12] Leuthold J, Marom D M, Cabot S *et al* 2004 *IEEE J. Lightwave Technol.* **22** 186
- [13] Dong J J, Zhang X L, Jiang J *et al* 2005 *Opt. Quantum Electron.* **37** 1011

Investigation on inverted and non-inverted wavelength conversion based on transient cross phase modulation of semiconductor optical amplifier^{*}

Dong Jian-Ji¹⁾ Zhang Xin-Liang^{1)†} Fu Song-Nian²⁾ P. Shum²⁾ Huang De-Xiu¹⁾

¹⁾ *Institute of Optoelectronics Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*

²⁾ *Network Technology Research Centre, Nanyang Technological University, Singapore 637553, Singapore*

(Received 30 May 2006; revised manuscript received 17 November 2006)

Abstract

All-optical wavelength conversion based on transient cross phase modulation of semiconductor optical amplifier (SOA) is a promising approach to achieve high-speed all-optical signal processing. We experimentally demonstrate inverted and non-inverted wavelength conversion (WC) based on single SOA and an optical bandpass filter with 0.4 nm bandwidth. When the central wavelength of the following filter is blue shifted by 0.25 nm or red shifted by 0.05 nm with respect to the wavelength of probe signal, the WC is inverted. When the filter detuning is blue shifted 0.29 nm or red shifted 0.25 nm, the WC is non-inverted. The polarity evolution from inverted WC to non-inverted WC is also presented with numerical simulation. The obtained results are in good agreement with the experiment.

Keywords: semiconductor optical amplifier, wavelength conversion, transient cross phase modulation

PACC: 4265P, 4255P, 4265K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577007), the Outstanding Youth Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2006ABB017) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-04-0715).

[†] Corresponding author. E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn