

文章编号: 0253-2239(2008)12-2261-06

逆向注入波长转换方式对转换光脉冲畸变的改善

罗传红¹ 张富巨¹ 郭嘉琳¹ 张建强¹ 孙军强²

(¹ 武汉大学动力与机械学院材料系, 湖北 武汉 430072; ² 华中科技大学光电科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 数值模拟分析了在周期域反转结构的铌酸锂光波导中的脉冲抽运波长转换过程, 通过对转换过程中光脉冲波形的演化分析, 讨论了抽运光和信号光同向和逆向两种注入方式对转换光脉冲波形的影响。研究结果表明在同向注入方式下由于倍频与差频效应是同时进行的, 群速度失配导致的走离效应使倍频光脉冲在波导内不断展宽, 遗传给差频转换时, 使转换光脉冲发生了波形畸变; 为防止转换脉冲发生畸变, 提出了采用单片光波导用抽运光和信号光逆向注入的方式, 将倍频与差频效应分开来, 二次非线性效应不再同时进行, 从而改善了转换光脉冲的波形畸变, 同时提高了转换效率。

关键词 波长转换; 波形畸变; 同向注入; 逆向注入

中图分类号 O437; TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2261

Amendment of Waveform Distortion of Converted Pulses by Reverse-Direction-Injected Wavelength Conversion

Luo Chuanhong¹ Zhang Fujun¹ Guo Jialin¹ Zhang Jianqiang¹ Sun Junqiang²

¹ College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China
² School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A numerical simulation on wavelength conversion based on a periodically poled lithium niobate waveguide is presented. The evolution of pulses is exhibited and the walk-off between pulses is discussed to explore the influence of two different injecting modes that the pump wave and signal wave are injected from the same direction or from the reverse direction. The analysis results demonstrate that the second harmonic generation and the difference frequency generation are simultaneously realized in the same-direction-injected wavelength conversion, which widens the second-harmonic wave continuously because of the walk-off among the reactive pulses due to group-velocity-mismatch, and then the converted pulses produce waveform distortion in the subsequent difference frequency generation. The reverse-direction-injected wavelength conversion is proposed to avoid converted waveform distortion, and it is able to separate two processes of the second order nonlinear effect. It is expected to amend the waveform distortion of converted pulses as well as to improve the conversion efficiency.

Key words wavelength conversion; waveform distortion; same direction injecting; reverse direction injecting

1 引言

全光波长转换器在未来的全光通信网络中有着重要的地位与作用, 利用在具有周期域反转结构的铌酸锂光波导(PPLN)中实现级联的倍频(SHG)和差频效应(DFG)的差频型波长转换是实现全光波长转换的一种可行的方案^[1,2]。在传统的差频型波长转换中, 通常是把抽运光和信号光同时注入到 PPLN 波导中, 1.5 μm 长波段的抽运光通过倍频转

换为 0.8 μm 短波段的光, 同时倍频光与 1.5 μm 波段的信号光进行差频, 结果将产生一个在 1.5 μm 波段新波长的光, 实现波长转换^[3~5]。在实际的通讯系统中需要至少有一路注入光用来承载信息, 则光脉冲之间的波长转换具有如下形式: 1) 当抽运光为 CW, 信号光为脉冲, 差频转换光脉冲是对信号光脉冲的复制, 波长转换发生在信号波长与转换波长之间^[6]; 从信号变换的角度来看, 信号变换只经历了

收稿日期: 2008-03-17; 收到修改稿日期: 2008-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(60577006)资助课题。

作者简介: 罗传红(1969—), 男, 副教授, 主要从事光纤通信中非线性效应和光有源、无源器件等方面的研究。

E-mail: chluo@whu.edu.cn

一次二阶非线性效应(DFG 过程)。2)当抽运光为脉冲,信号光为 CW,差频转换光脉冲是对抽运光脉冲的复制,波长转换发生在抽运波长和转换波长上;信号变换经历了两次二阶非线性效应:从抽运波长到倍频波长(SHG 过程),再从倍频波长到转换波长(DFG 过程)^[7]。3)当抽运光、信号光都为脉冲,转换光脉冲可以实现两组脉冲相互之间的开关控制、码型变换、脉冲压缩^[8]等多种功能。

因此在脉冲抽运波长转换中,由于脉冲之间(特别是倍频光脉冲)的群速度不同导致走离效应,会引起转换光脉冲发生波形畸变^[9]。本文基于耦合波方程组,对脉冲抽运波长转换进行了数值模拟分析,分析了走离效应对转换脉冲波形的影响;针对走离效应的影响及转换光脉冲的波形畸变,提出了采用抽运光和信号光逆向注入的方式可改善转换光脉冲的波形畸变,使转换脉冲为前后沿对称的光脉冲。

2 同向注入方式下转换光脉冲的波形畸变

假设信息加载在抽运波长上,信号光为连续的控制光,抽运光和信号光被耦合在一起并注入到 PPLN 波导内,其方式如图 1 所示。

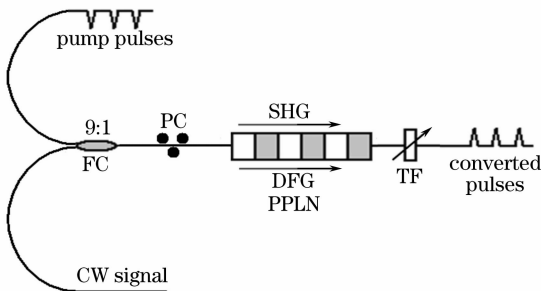


图 1 同向注入波长转换方案

Fig. 1 Setup of the same direction injected wavelength conversion

脉冲抽运光和连续信号光通过偏振控制器(PC)调节偏振方向,以增加非线性作用的效果。质子交换制作的 z 切 PPLN 波导存在较强的偏振效应,其寻常光的折射率被降低,非寻常光的折射率被增加,因此波导支持 TM 模传输,TE 模被抑制。另外,波导中存在较强的波导效应,注入的抽运光、信号光在光波导内为 TM 基模传输,倍频光为多模传输。由于不同的导模具有不同的模折射率,因此传播常数也不一样,当器件设计选定倍频光以某一种导模与基频光的基模进行相位匹配以后,其他导模就不可能满足相位匹配条件,因此可以忽略其他导模的影响。当器件长度

很短时(μm 级),相位匹配条件被放宽,倍频光可以有多种导模参与非线性作用;在波导较长时(cm 级),受到波导长度积累相位的作用,高阶模不满足相位匹配条件,可以忽略高阶模的影响,仅仅考虑零阶导模之间的相互作用^[10]。因此在长的 PPLN 波导内的非线性传播方程可以写为^[3,8,10]

$$\begin{cases} \frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial E_p}{\partial t} = jC_p E_h E_p^* \exp(j\Delta\beta_{\text{SHG}} z), \\ \frac{\partial E_h}{\partial z} + \frac{1}{v_h} \frac{\partial E_h}{\partial t} = jC_h E_p^2 \exp(-j\Delta\beta_{\text{SHG}} z) + \\ \quad jC_h E_s E_i \exp(-j\Delta\beta_{\text{DFG}} z), \\ \frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial E_s}{\partial t} = jC_s E_h E_i^* \exp(j\Delta\beta_{\text{DFG}} z), \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} + \frac{1}{v_i} \frac{\partial E_i}{\partial t} = jC_i E_h E_s^* \exp(j\Delta\beta_{\text{DFG}} z), \end{cases} \quad (1)$$

上面的耦合方程组中, E_m, v_m, C_m ($m=p, h, s, i$) 分别是抽运、倍频、信号和转换光的电场振幅、群速度及耦合系数; $\Delta\beta_{\text{SHG}}, \Delta\beta_{\text{DFG}}$ 分别代表两次非线性效应中相互作用的三个波的相位匹配情况:

$$\Delta\beta_{\text{SHG}} = 2\pi(n_h/\lambda_h - 2n_p/\lambda_p - 1/\Lambda_0),$$

$$\Delta\beta_{\text{DFG}} = 2\pi(n_h/\lambda_h - n_s/\lambda_s - n_i/\lambda_i - 1/\Lambda_0),$$

式中 n_m 表示模折射率,选用 n_e 进行数值分析, Λ_0 表示 PPLN 光波导的光栅周期。利用 PPLN 的周期性域反转结构在两次非线性过程中引入相移 $-2\pi/\Lambda_0$,使得三波作用时相位差在一个相干长度内得到复位。具体地讲,当抽运光波长处在器件的准相位匹配(QPM)波长上,抽运光与倍频光的 TM_{00} 导模满足 SHG 所要求的精确的相位匹配: $\Delta\beta_{\text{SHG}} = 0$,由于信号光波长和转换光波长相对于倍频光波长成镜像对称,也使得在 DFG 中三波的 TM_{00} 导模的相位匹配条件近似地满足: $\Delta\beta_{\text{DFG}} \approx 0$,从而保证了在两次非线性过程中相互作用的光场之间不会随着传播长度积累相位差,两次非线性过程同时而有效地进行。(1)式可以通过数值模拟计算方法进行数值演算。选取 PPLN 波导参数为:波导长度 50 mm,波导层宽 $12 \mu\text{m}$,质子交换深度 $0.8 \mu\text{m}$,QPM 周期 $\Lambda_0 = 14.7 \mu\text{m}$,该器件在室温的准相位匹配波长为 1550 nm ,二阶非线性系数为 $d_{\text{eff}} \approx 15 \text{ pm/V}$,忽略波导损耗;假设输入的抽运光为高斯型: $U(0, t) = \sqrt{P_0} \exp[-0.5(1.76t/\tau_0)^2]$, $P_0 = 500 \text{ mW}$, $\tau_0 = 2 \text{ ps}$; CW 的信号光功率为 $P_i = 1 \text{ mW}$ 。

图 2 是波长转换过程中的脉冲波形演化,图中选取抽运光脉冲为参照坐标系,图 2(a)是抽运光脉冲波形在时间和空间上的演化过程,图 2(b)是倍频

光脉冲波形的演化过程。对于波长为 775 nm 的倍频光和 1550 nm 的抽运光, GVM 参量 δv_{h-p} 约为 0.25 ps/mm, 1 ps 的抽运光脉冲和倍频光脉冲之间走离长度约为 $L_{walk} = 4$ mm, 显然在整个波导长度内 ($L = 50$ mm) 两个脉冲在时间上拉开距离 $\Delta T = L \cdot \delta v$ 约为 12.5 ps。二阶非线性效应的转换效率较低, 可以忽略转换对光功率的耗损, 因此在波导内某一空间位置上产生的倍频光的场强理论上为抽运光

场强的平方。但由于走离效应, 倍频脉冲相对于抽运脉冲不断后拖, 在不同空间位置上 (对应不同的时间) 倍频光场叠加, 使得倍频脉冲在时域上被展宽, 且随波导长度的增长, 倍频光脉冲的宽度是线性展宽的。当超短脉冲在较长的波导中作用时, 理论上在波导输出端输出的倍频光场可以近似为宽度为 ΔT 的矩形脉冲。

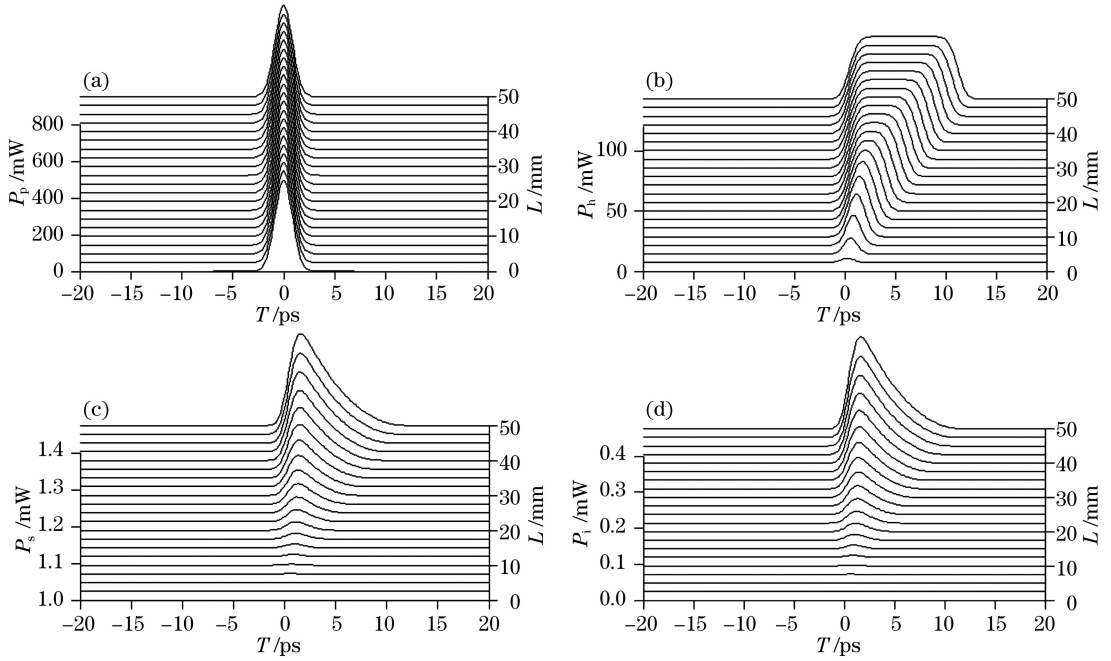


图 2 同向注入波长转换的脉冲波形演化。(a)抽运光脉冲,(b)倍频光脉冲,(c)信号光,(d)差频转换光脉冲
Fig. 2 Waveform evolution of four pulses in same direction injecting. (a) Pump pulse, (b) second harmonic, (c) signal, (d) converted pulse

图 2(c)显示了连续的信号光由于差频转换被调制成脉动的形式,图 2(d)是差频转换光脉冲的波形。抽运光、信号光、转换光都处在 1.5 μm 波段, 波长相近因而群速度相近, 显然倍频光处在 0.8 μm 波段, 与抽运光、信号光、差频光脉冲之间存在近乎相等的群速度之差, 因此倍频光相对于抽运光的运动可以看作是相对于信号光的运动, 这样连续的信号光在不同的空间位置上与不同宽度的倍频光相互作用, 假设单位波导长度上的转换效率一致, 那么转换光脉冲就是不同宽度的倍频光脉冲的叠加, 近似为前陡后缓的锯齿波。

图 3 是不同波导长度处的差频转换光脉冲的自相关迹。随波导长度每增加 10 mm, 转换光脉冲的自相关迹增加相同宽度, 对应的转换脉冲宽度被线性展宽; 在波导的输出端, 转换脉冲宽度约为 8 ps。

计算中忽略了波导的传输损耗, 一方面由于波导较短(50 mm), 传输损耗较小; 另外一方面由于传输损耗与光功率成正比, 损耗只对光脉冲的幅值有影响而对脉冲的形状没有改变。因此忽略波导的传输损耗对计算结果没有太大的影响。

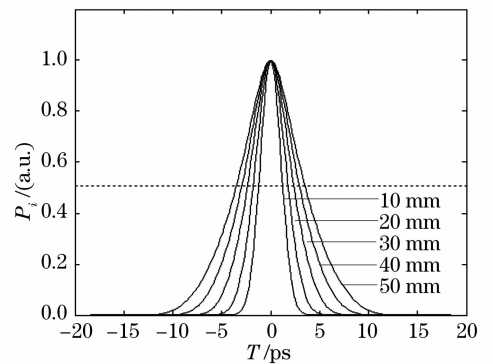


图 3 不同波导长度处差频光脉冲的自相关迹
Fig. 3 Autocorrelation trace for converted pulses at different positions in same direction injecting

3 逆向注入方式下转换光脉冲波形畸变的消除

畸变的脉冲波形将不利于信号在通讯系统中传输,也会影响光接收探头对信号的接收,因此要消除转换脉冲的波形畸变。原理上可以采用两个 PPLN 波导,一个用于倍频产生 $0.8 \mu\text{m}$ 的倍频光,另一个用于差频产生转换脉冲,将两个非线性过程分离开来,那么在差频转换过程时,倍频场是一个稳态的光场,即便倍频光脉冲有相对的群速度时延,但转换脉冲的波形不对称性可以消除。这两个 PPLN 可以合并为一个 PPLN,采用抽运光与信号光逆向注入的方法来分离两次非线性效应,方案如图 4 所示。首先,“正向”注入脉冲的抽运光产生倍频光,将倍频光滤出,再“反向”注入 PPLN 波导,同时注入连续的信号光,再通过差频效应产生转换光。“正向”与“反向”过程分别将倍频过程和差频过程分离开来,两次非线性效应不再同时进行,且参与两次非线

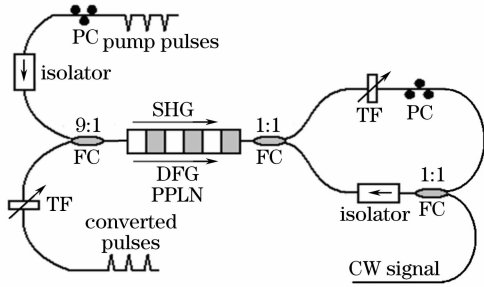


图 4 逆向注入波长转换方案

Fig. 4 Setup of the reverse direction injected wavelength conversion

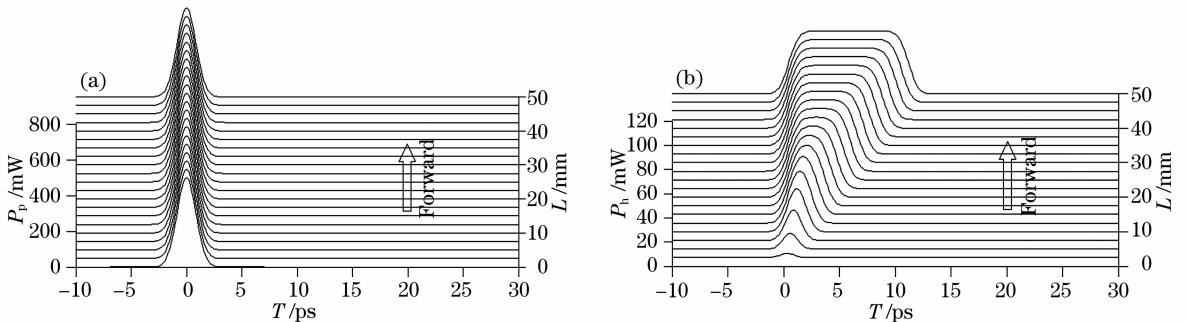


图 5 正向倍频波长转换的波形演化。(a) 正向抽运脉冲, (b) 正向倍频脉冲

Fig. 5 Waveform evolution of pulses in forward wavelength conversion. (a) Pump pulse, (b) second harmonic pulse

图 6 显示了“反向”传播过程中的差频波长转换。由于没有抽运光参与作用,差频转换效率又较低,倍频光场是一个相对稳态的光场,由于群速度延迟,在“反向”传播中落后于与之作用的连续信号光;倍频光脉冲与连续的信号光作用产生差频波长转

性效应的光波传输方向是相反的,所以两次非线性效应相互独立、互不影响。在方案中倍频光被滤出后再耦合进入波导,会引起模式耦合困难,耦合损耗增大,较为理想的办法是在波导末端镀上倍频光波长的反射膜,直接将倍频光反射,而让抽运光透射出波导,这样结构将更加紧凑。

在逆向注入方案中,相应的耦合波方程也被分离成两个,不再是传统的级联方式。倍频过程的非线性效应耦合波方程独立地写为

$$\begin{cases} \frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial E_p}{\partial t} = jC_p E_h E_p^* \exp(j\Delta\beta_{\text{SHG}} z), \\ \frac{\partial E_h}{\partial z} + \frac{1}{v_h} \frac{\partial E_h}{\partial t} = jC_h E_p^2 \exp(-j\Delta\beta_{\text{SHG}} z), \end{cases} \quad (2)$$

差频过程的非线性效应耦合波方程独立地写为

$$\begin{cases} \frac{\partial E_h}{\partial z} + \frac{1}{v_h} \frac{\partial E_h}{\partial t} = jC_h E_s E_i \exp(-j\Delta\beta_{\text{DFG}} z), \\ \frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial E_s}{\partial t} = jC_s E_h E_i^* \exp(j\Delta\beta_{\text{DFG}} z), \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} + \frac{1}{v_i} \frac{\partial E_i}{\partial t} = jC_i E_h E_s^* \exp(j\Delta\beta_{\text{DFG}} z), \end{cases} \quad (3)$$

(2)式和(3)式中的参数与(1)式的完全相同。先对(2)式进行演算求出倍频光场,再对(3)式进行演算求出差频光场。图 5 显示的“正向”传播过程实现了 SHG 波长转换,同样倍频光是一个不断扩展的光场,在波导末端输出一个宽脉冲;由于在同向注入情况下 SHG 和 DFG 两个过程是同时进行的,但差频转换效率不高,对倍频光功率的消耗很小,因此图 5(b)与图 2(b)所示的倍频光没有太大的差别。

换,转换光脉冲是一个对称的脉冲波形。转换脉冲的对称性可以解释为:倍频脉冲在“正向”过程中展宽了约 12.5 ps (波导长度 50 mm),在“反向”过程中由于群速度延迟又整体后移了约 12.5 ps ,每段波导产生的差频光脉冲随倍频场一起产生滞后,不同步

的转换脉冲叠加输出几何形状对称的脉冲,交叠最多的地方形成峰值,因此转换脉冲峰值也就出现在中间位置上。如果把倍频脉冲当作一个矩形脉冲,理论上转换脉冲是矩形脉冲的自相关函数,因此输

出的转换脉冲是一个 sinc 函数的形状。如果不计光纤环路的时延,输出的转换脉冲峰值相对于输入的抽运脉冲峰值后移了约 12.5 ps,这意味着转换后的信息的时钟整体发生了向后偏移约 12.5 ps。

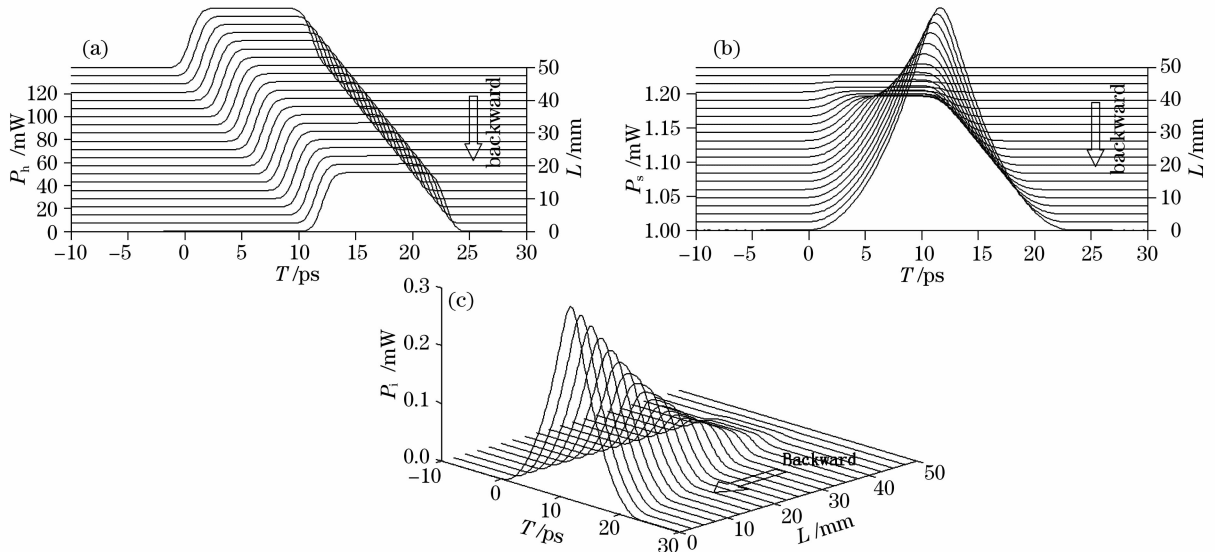


图 6 反向差频波长转换的波形演化。(a) 反向倍频脉冲, (b) 反向 CW 信号, (c) 反向差频转换脉冲

Fig. 6 Waveform evolution of pulses in backward wavelength conversion. (a) Second harmonic, (b) continuous wave (CW) signal, (c) converted pulse

相比于同向注入方式,逆向注入方式在不增加 PPLN 器件数目的基础上,改善了转换脉冲的波形畸变,所带来的问题是转换后的信息时钟整体发生了偏移,另外转换脉冲的宽度增加了:图 7 是转换脉冲的自相关迹,自相关迹的 FWHM 宽度约为 12.5 ps,说明转换脉冲宽度约为 12.5 ps;与同向注入方式下转换脉冲宽度约为 8 ps 相比,转换脉冲变宽了,这将会增加信号的占空比,同时也说明波长转换效率也相应地增加了。

4 结 论

脉冲光抽运取代连续光抽运很容易实现灵活多样的波长转换^[11~13],这在密集波分复用系统中有着潜在的应用价值,另外脉冲抽运有利于改善抽运带宽,这是因为窄的抽运光脉冲具有较宽的频谱,容易满足准相位匹配条件,从而使抽运带宽可以得到加宽^[7]。但是脉冲抽运波长转换在传统的同向注入方式下由于走离效应的影响,转换光脉冲发生了波形畸变,这不利于信息在光网络中传输及接收,提高了误码率。而逆向注入方式下的波长转换在不增加器件成本的基础上,可以改善转换光脉冲的波形畸变,同时提高了转换效率。转换后的脉冲序列是整体向后移动的,但信息的时钟可以被重新提取或定义,这样将不会影响光接收机的光接收探头对信息的读取和判别。

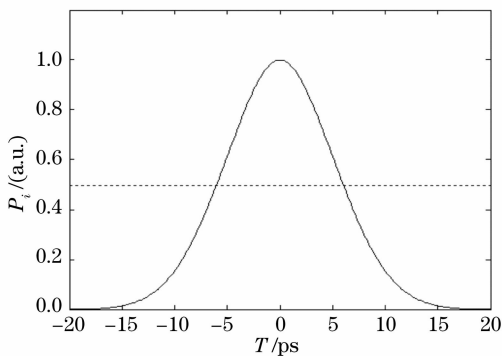


图 7 逆向注入时转换脉冲的自相关迹

Fig. 7 Autocorrelation trace for converted pulses in reverse injecting

参 考 文 献

- 1 Luo Yongfeng, Chen Yunlin, Yuan Jianwei *et al.*. Study of quasi-phase-matched cascaded x^2 all-optical wavelength conversion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 651~654
罗勇峰,陈云琳,袁建伟等. 准相位匹配级联二阶非线性全光波长转换研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 651~654
- 2 Zhang Tieli, Zhang Baigang, Li Haifeng *et al.*. A tunable optical parametric generator by using a quasi phase matched crystal with

- different wedge angles[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10): 234~236
- 3 J. Sun, X. Yuan, D. Liu. Tunable wavelength conversion between picosecond pulses using cascaded second-order nonlinearity in LiNbO₃ waveguides[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**: 681~685
- 4 M. H. Chou, I. Brener, M. M. Fejer *et al.*. 1.5 μm -band wavelength conversion based on cascaded second-order nonlinear susceptibility in LiNbO₃ waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 653~655
- 5 M. H. Chou, I. Brener, G. Lenz *et al.*. Efficient wide-band and tunable midspan spectral invrtter using cascaded nonlinearities in LiNbO₃ waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(1): 82~86
- 6 J. Sun, W. Liu, J. Tian. Multchannel wavelength conversion exploiting cascaded second-order nonlinearity in LiNbO₃ waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12): 1743~1745
- 7 C. Luo, J. Sun, J. Wang. Comparison of two wavelength conversion schemes by exploiting cascaded harmonic and difference frequency generation in PPLN [J]. *Micro. Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(4): 905~910
- 8 H. Ishizuki, T. Suhara, M. Fujimura *et al.*. Wavelength-conversion type picosecond optical switching using a waveguide QPM-SHG/DFG device[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2001, **33**: 953~961
- 9 Luo Chuanhong, Sun Junqiang, Wang Jian *et al.*. Waveform distortion in periodically poled lithium niobate-based wavelength converter with pulse pumping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1084~1089
罗传红,孙军强,王 健等. 周期极化铌酸锂波长转换器脉冲抽运时的波形畸变[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1084~1089
- 10 C. Luo, J. Sun, J. Liu *et al.*. Waveform distortion of wavelength conversion based on a periodically poled lithium niobate waveguide at a pulsed pump[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(8): 50031~50036
- 11 J. Wang, J. Sun, J. Li *et al.*. Single-to-dual channel wavelength conversion of picosecond pulses using PPLN-based double-ring fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(4): 236~238
- 12 J. Wang, J. Sun, C. Luo *et al.*. Flexible all-optical wavelength conversions of 1.57-ps pulses exploiting cascaded sum and difference frequency generation (cSFG/DFG) in a PPLN waveguide[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**: 543~548
- 13 Wang Jian, Sun Junqiang. A novel high-speed all-optical wavelength converter within the 1.5 μm band based on sum-frequency generation [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1384~1388
王 健,孙军强. 基于和频效应 1.5 μm 波段新型高速全光波长转换器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1384~1388