

文章编号: 0253-2239(2007)06-1084-6

周期极化铌酸锂波长转换器脉冲抽运时的波形畸变^{*}

罗传红^{1,2} 孙军强¹ 王 健¹ 陈金林¹

(¹ 华中科技大学光电系, 武汉 430074)
(² 武汉大学材料系, 武汉 430072)

摘要: 理论分析了周期性结构的 LiNbO₃ 晶体(PPLN)光波导在脉冲光抽运时的级联二阶非线性效应,并通过数值计算得到了抽运、倍频、信号及转换四个光脉冲的波形在波导中的演化。研究表明,使用脉冲光抽运时,由于抽运光脉冲与倍频光脉冲之间的群速度失配导致的走离,将使倍频光脉冲产生展宽;再通过差频转换使得转换光脉冲产生了波形畸变和峰值偏移。最后通过实验验证了转换光脉冲的波形畸变。

关键词: 非线性光学; 倍频效应; 差频效应; 走离效应; 脉冲抽运; 脉冲展宽; 波形畸变

中图分类号: O437; TN252 文献标识码: A

Waveform Distortion in Periodically Poled Lithium Niobate-Based Wavelength Converter with Pulse Pumping

Luo Chuanhong^{1,2} Sun Junqiang¹ Wang Jian¹ Chen Jinlin¹

(¹ Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)
(² Department of Material Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract: Theoretical research on the cascaded second-order nonlinearity based on periodically poled lithium niobate waveguide in pulsed pumping is presented. By numerical simulations the propagation figure is obtained and it exhibits the waveform evolution of pump, second harmonic, signal and difference frequency pulse. The analyses demonstrate that harmonic pulse is continually broadened along propagation length because the walk-off occurs among four pulses due to group-velocity-mismatch, and then converted-pulse-waveform distorts with peak offset. The wavelength conversion experiment has been completed in pulsed pumping and converted-pulse-waveform distortion has been demonstrated.

Key words: nonlinear optics; second harmonic generation; difference frequency generation; walk-off; pulsed pumping; pulse broadening; waveform distortion

1 引 言

在未来的光网络中,需要通过波长转换来实现信号的路由选择,波长转换成为全光通信的关键技术之一。利用周期极化的 LiNbO₃ 晶体(PPLN)中的两次二阶非线性效应,首先把 1.5 μm 长波段的抽运光通过倍频(SHG)转换为 0.8 μm 短波段的光,然后再使它与 1.5 μm 波段的信号光进行差频(DFG),结果将产生一个在 1.5 μm 波段新波长的

光^[1~3],实现了波长转换。这种基于级联的二阶非线性效应(cSHG/DFG)的波长转换技术有望成为未来光通信系统中波长转换的首选技术。此外,级联的二阶非线性效应在光开关^[4]、光交换、光再生等技术中也有着广泛的应用。许多学者都对于利用级联的二阶非线性效应实现波长转换的方案在理论与实验上进行了详细的研究,取得了许多成果^[3,5,6]。但研究中发现:由于苛刻的相位匹配条件,连续光抽

^{*} 国家自然科学基金(60577006)资助课题。

作者简介: 罗传红(1969—),男,湖北荆门人,博士研究生,主要从事光纤通信中非线性效应和光有源、无源器件的研究。
E-mail: chluo@whu.edu.cn

导师简介: 孙军强(1965—),男,浙江湖州人,教授,博士生导师,主要从事新颖光纤激光器、基于无源光波导的全光信号处理、微波光子学以及光纤射频传输技术等方面的研究。E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-11-14

运情况下抽运带宽很窄, -3 dB 带宽小于 $0.5 \text{ nm}^{[2,7]}$, 不利于在实际的通信系统中使用。为改善抽运带宽, 人们曾做过许多工作, 如通过采用非周期性的周期极化铌酸锂^[7], 或采用两个抽运光的和频效应等^[8~10], 其中以脉冲光抽运取代连续光抽运在改善抽运带宽方面有很好的应用前景^[11], 这是因为抽运光脉冲具有较宽的频谱, 容易满足准相位匹配(QPM)条件, 从而抽运带宽可以得到加宽。同时脉冲抽运很容易实现灵活多样的波长转换^[11,12], 这在密集波分复用系统中有着潜在的应用价值。

本文针对脉冲抽运下的波长转换进行了理论分析和数值模拟, 分析了由于群速度差导致的倍频光的脉冲展宽、转换光脉冲的波形畸变及其峰值偏离中心的偏移等现象, 并通过实验验证了理论分析的结果。

2 理论分析及数值模拟

对于级联的二阶非线性效应波长转换器, 利用脉冲光抽运的原理与利用连续光抽运基本相同, 参与作用的四个光分别处于两个波段, 其中倍频光位于 $0.8 \mu\text{m}$ 波段, 抽运光、信号光、转换光都位于 $1.5 \mu\text{m}$ 波段。虽然不同波长的光在波导中传播具有不同的相速度, 但利用周期极化铌酸锂的周期性结构可以实现准相位匹配, 从而解决了由相速度不同引起的相位失配问题, 保证倍频及差频有效发生^[1,2]。另一方面, 不同波长的光脉冲在波导中将不同的群速度 v_g 传播, 其中倍频光脉冲的群速度最慢, 其他三个波长相近的光脉冲群速度也相近, 这就导致了倍频光脉冲与另外三个光脉冲在传播过程中出现走离, 使得脉冲光抽运的波长转换具有许多不同于连续光抽运的特点。

2.1 传播方程及数值模拟

在连续光抽运时波长转换不需要考虑走离效应, 但当抽运光和信号光都为脉冲时, 考虑光脉冲以群速度运动, 忽略因群速度色散而引起的脉冲展宽及波导内的传输损耗, 波导内的非线性传播方程可以写为^[4,9,11]

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

上面的耦合方程组中, 各等式的右边项表征非线性作用, 等式左边两项表征各光场的电场振幅随传播距离和传播时间的演化。其中 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。 $C_m = \omega_m d_{\text{eff}} / (n_m c)$, 且 $d_{\text{eff}}, \omega, n, c$ 分别是有效非线性系数、光频、折射率及真空中光速。 $\Delta\beta_{\text{SHG}}, \Delta\beta_{\text{DFG}}$ 分别代表倍频和差频两次非线性效应中相互作用的三个波的相位匹配情况, 可用如下的式子表示:

$$\begin{aligned} \Delta\beta_{\text{SHG}} &= \beta_h - 2\beta_p - 2\pi/\Lambda_0 = \\ &\quad 2\pi \left(\frac{n_h}{\lambda_h} - \frac{2n_p}{\lambda_p} - \frac{1}{\Lambda_0} \right), \quad (2) \\ \Delta\beta_{\text{DFG}} &= \beta_h - \beta_s - \beta_i - 2\pi/\Lambda_0 = \\ &\quad 2\pi \left(\frac{n_h}{\lambda_h} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda_0} \right), \quad (3) \end{aligned}$$

(2)式、(3)式中 β_m ($m = p, h, s, i$) 分别是抽运、倍频、信号和转换光的传播常量, 折射率 n_m 可以通过 Hobden 等^[2] 给出的铌酸锂晶体折射率与波长的关系式得到, Λ_0 是周期极化铌酸锂波导的准相位匹配周期。通过设计合适的 Λ_0 , 引入相移量 $-2\pi/\Lambda_0$, (2)式、(3)式表征的倍频、差频中各个光波的相位关系满足准相位匹配条件: $\Delta\beta_{\text{SHG}} \approx 0$ 和 $\Delta\beta_{\text{DFG}} \approx 0$, 即满足三波相互作用时的动量守恒。这样耦合方程组(1)通过倍频及差频不断地将能量耦合到转换光上。

图 1 为在脉冲光抽运时利用分步傅里叶方法对方程组(1)进行数值模拟得到的抽运光、信号光、倍频光以及转换光脉冲在波导中的演化[计算参量: 输入脉冲均为高斯型, $\tau_{p0} = \tau_{s0} = 2 \text{ ps}$ (FWHM); $\lambda_{p0} = 1545 \text{ nm}$, $P_{p0} = 500 \text{ mW}$; $\lambda_{s0} = 1560 \text{ nm}$, $P_{s0} = 100 \text{ mW}$; 周期极化铌酸锂波导 $L = 50 \text{ mm}$, $\Lambda_0 = 14.7 \mu\text{m}$, $d_{\text{eff}} \approx 23.5 \text{ pm/V}$]。从图 1(a)可以看出抽运光强随传播距离增加而下降, 这是因为在脉冲光抽运时, 由于走离效应的作用倍频光子不断地移出倍频效应区域, 导致了倍频效应的逆过程(一个倍频光子分解为两个抽运光子)较弱, 打破了倍频效应的正逆过程的平衡, 所以抽运光的光功率消耗较快。图 1(c)显示信号光强随传播距离的增加而略有增加, 图 1(d)显示了转换光强随传播距离的增加而增加, 这是由于差频转换将倍频光子分解为信号光子和转换光子的结果。图 1(b)显示了倍频光脉冲随传播距离增加而扩展, 这是因为群速度失配导致倍频光脉冲和抽运光脉冲走离的结果。

2.2 倍频光脉冲的展宽

图 2 是倍频光脉冲和抽运光脉冲的走离示意

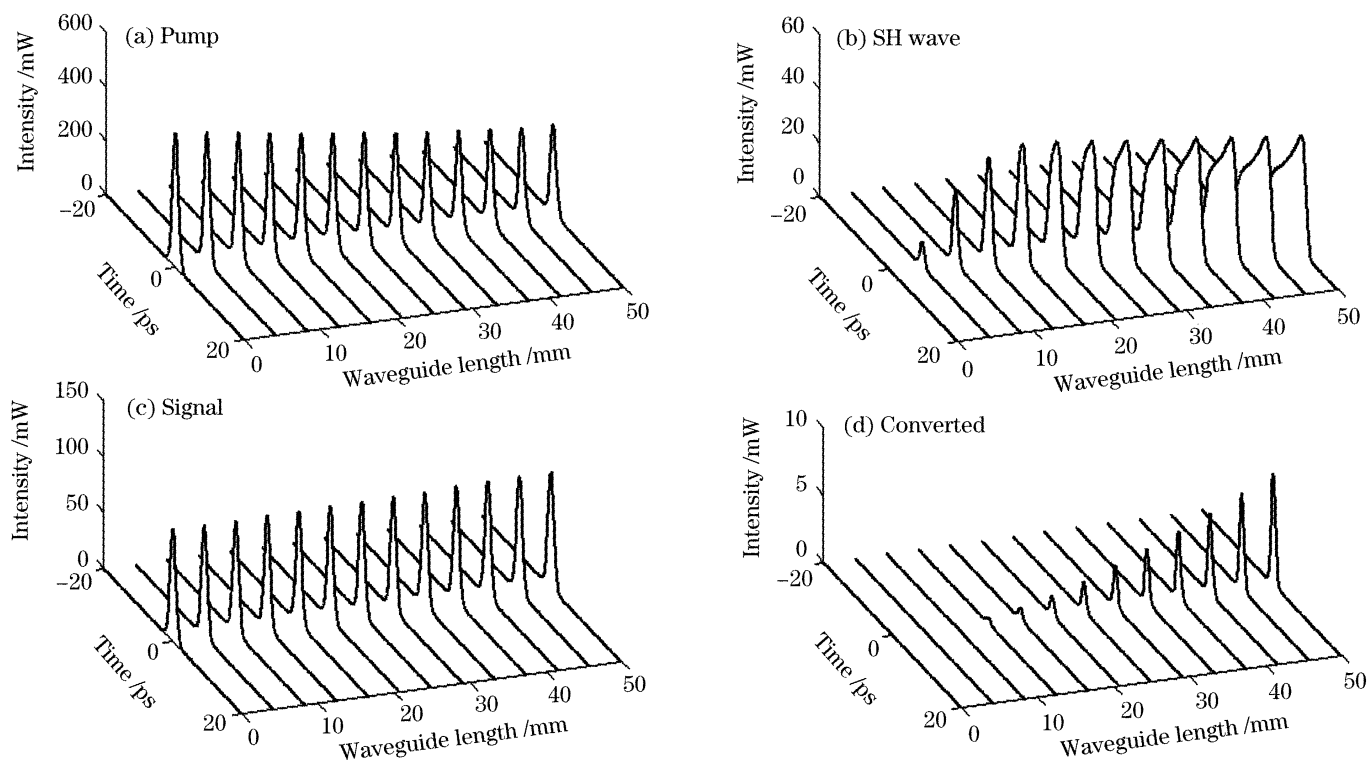


图 1 抽运光(a)、信号光(b)、倍频光(c)以及转换光(d)在波导中的波形演化

Fig. 1 Waveform evolution of four pulses: (a) pump, (b) second harmonic, (c) signal, (d) converted pulse

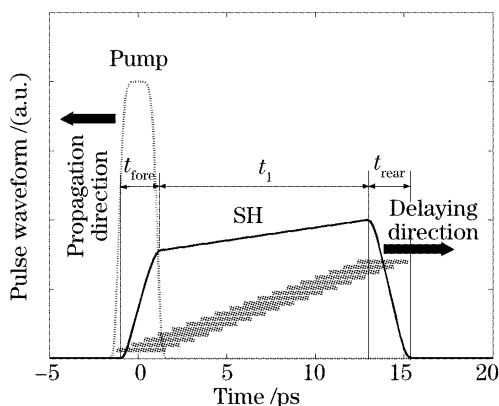


图 2 在波导内的倍频光脉冲形状

Fig. 2 Waveform of second harmonic pulse in the waveguide 图。两个光脉冲之间的群速度差(GVM)可用参量 $\delta v_{p-h} = v_h^{-1} - v_p^{-1}$ 及走离长度 $L_{walk-off} = \tau_{p0} / \delta v_{p-h}$ 来衡量。当 $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, $\lambda_h = 775 \text{ nm}$ 时, 群速度差系数 $\delta v_{h-p} = 0.233 \text{ ps/mm}$, 对于 $\tau_{p0} = 2 \text{ ps}$, 抽运光脉冲与倍频光脉冲之间走离长度 $L_{walk-off} = 4.29 \text{ mm}$ 。在波导某一位置产生的倍频光, 不能与抽运光以相同的群速度传播时, 倍频光落后于抽运光, 经过走离长度后抽运光与倍频光分离, 那么抽运光在新的位置上产生的倍频光在空间上超前前面产生的倍频光, 因此不同空间位置上的倍频光脉冲相加, 使得脉冲展宽。可见展宽是由于倍频光脉冲群速度小而使后沿延迟的结果。当传播长度超过抽运光脉冲的走离长度时, 每一小段波导所产生的倍频光处于不同空间位置, 光强不再累加。另外考虑到脉冲光抽运

的耗损比连续光抽运时大, 倍频光脉冲是一个前沿低后沿高的宽脉冲。

假设波导长度 $L = 50 \text{ mm}$, 在整个波导长度内群速度差导致的倍频光脉冲展宽为 $t_1 = L \times \delta v_{h-p} \approx 11.65 \text{ ps}$, 可见 $t_1 \gg \tau_{p0}$ 。因此当波导长度大于几倍的走离长度时, 可以近似认为倍频光脉冲的宽度与抽运光脉冲宽度无关, 初始的抽运光脉冲波形对倍频光脉冲波形的影响可以忽略。这正是脉冲光抽运的波长转换不同于连续光抽运的主要特征之一, 这将进一步影响到差频过程, 并导致差频转换光脉冲波形畸变及峰值产生偏离中心的偏移。

2.3 差频转换光脉冲的波形畸变及峰值偏移

转换光是倍频光与信号光通过差频产生的, 但在波长转换中倍频光脉冲是一个脉宽不断展宽的脉冲, 因此转换光不是简单地复制信号光的相位、幅度等信息, 会发生波形畸变及峰值偏离脉冲中心的偏移。

1) 抽运光脉冲宽度大于信号光脉冲宽度的情形, 如图 3(a) 所示, $\tau_{p0} = 7 \text{ ps}$, $\tau_{s0} = 2 \text{ ps}$, 其他参量同图 1。由抽运光在波导开始的很短一段距离内所建立的倍频光脉冲宽度大于信号光脉冲宽度, 在空间位置上信号光被倍频光所覆盖。由宽的倍频光与窄的信号光通过差频所产生的转换光基本能复制信号光的信息, 脉冲波形有轻微的畸变, 这是由于在作用区域里倍频光功率不均匀所致。在这种抽运光脉冲宽度大于信号光脉冲宽度的波长转换中, 转换脉冲

相对于抽运脉冲来讲被压缩了。假如信息承载在抽运光上,信号光作为控制光,用这种波长转换方案可以用作光开关同时实现脉冲压缩,也可以用这个方案作全光的逻辑与门。

2) 抽运光脉冲相对于信号光脉冲很窄的情形,如图 3(b)所示, $\tau_{po} = 7$ ps,信号是连续光,波长转换发生在抽运光波长与转换光波长之间。随着传播,倍频光脉冲不断地展宽,与信号光作用的区域相应也增宽了,所以在波导的后部产生的转换光脉宽也相应增加。应该注意到,波导的前后段所产生的转换光其脉冲宽度是不一样的,但所有小段的转换脉冲前沿是同步的,都对准倍频光脉冲的前沿,所以叠加输出的转换光波形理论上是个三角形,而且前部

的有效积累长度大于后部的有效积累长度,输出的转换光脉冲具有前沿陡后沿缓的特征。由于转换光脉冲波形发生畸变,波形是不对称的,脉冲峰值偏离了参照的中心,有一个非线性偏移量 γ 。可见这种波长转换的转换光脉冲不再是抽运光脉冲的码形、相位等信息的复制,这完全不同于连续光抽运时对信号光脉冲的码型、相位透明的波长转换。两者的区别是:在连续光抽运时信息从信号波长到转换波长只经历了一次二阶非线性效应(DFG),而在脉冲光抽运时信息从抽运波长到转换波长经历了两次二阶非线性效应(SHG+DFG),且在倍频过程中由于走离导致了倍频光脉冲展宽,然后在差频过程中转换光脉冲的波形发生变化。

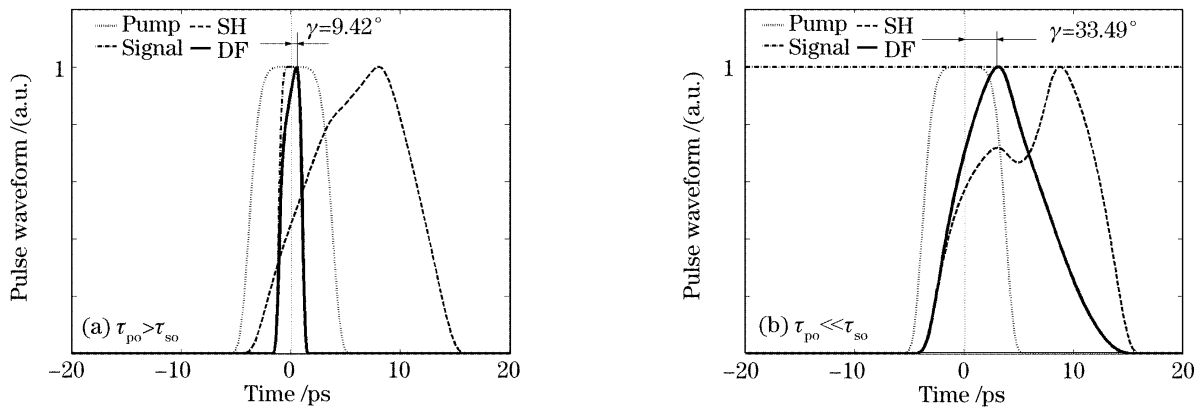


图 3 转换光脉冲的波形畸变和非线性相移

Fig. 3 Waveform asymmetry and nonlinear phase shift of converted signal

图 3(b)所示的转换脉冲峰值的偏移量 γ 出现在抽运脉冲的后沿附近区域,因为在抽运脉冲作用区域差频作用长度等于波导长度,出了作用区域差频作用长度小于波导长度;同时倍频脉冲相对于抽运脉冲向后逐步移动,在离开抽运的作用区之前,积累了大量的倍频光子数目,在这个区域频差作用最强,所以偏移量 γ 会出现在抽运脉冲的后沿附近区域。可见转换脉冲的畸变取决于两个参量:初始的抽运光脉宽和波导长度。抽运光脉冲越窄,转换光脉冲的峰值前移、前陡后缓的波形畸变越明显;波导长度越长,转换光脉冲底部宽度越大,前陡后缓的波形畸变也越明显。如果采用两个周期极化铌酸锂波导,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光,两次非线性效应被隔离开来,转换光脉冲的这种波形不对称性可以消除。在图 3(b)中倍频光产生了凹陷,可以解释为在偏离前沿的部位发生了差频转换的能量转移而没有得到倍频转换的能量补充。因为在非线性作用的中心区域,两个抽运光子转换成一个倍频光子,一个倍频光子

分成一个信号光子和一个转换光子,对于倍频光来讲前一个过程是补充能量后一个过程是消耗能量,离开了作用的中心区域,只发生了差频转换的能量消耗而没有得到倍频转换的能量补充,所以倍频光脉冲中间段产生了凹陷。倍频光后沿光功率较高,是由于在波导开始阶段抽运光功率较高导致倍频转换较强而积累的倍频光子并保留下来的结果。

3 实验验证

为了考察在脉冲光抽运情况下转换信号的波形畸变,采用如图 4 所示的实验装置,图中激光器 1 是一个作为抽运光源的 40 GHz 可调波长锁模脉冲激光器,激光器 2 是可调波长的分布反馈(DFB)连续激光器,使用 9:1 的耦合器(FC)将脉冲光和连续光耦合到一起后注入掺铒光纤放大器(EDFA)中进行功率放大,再注入周期极化铌酸锂光波导中进行波长转换,这里假设将信息加载到脉冲抽运光上,连续光为辅助的控制光。该周期极化铌酸锂经过电场极化和质子交换淬火制备而成,长度为 50 mm,准相

位匹配周期为 $14.7 \mu\text{m}$ 。转换结果可以通过光谱和波形记录仪观察。

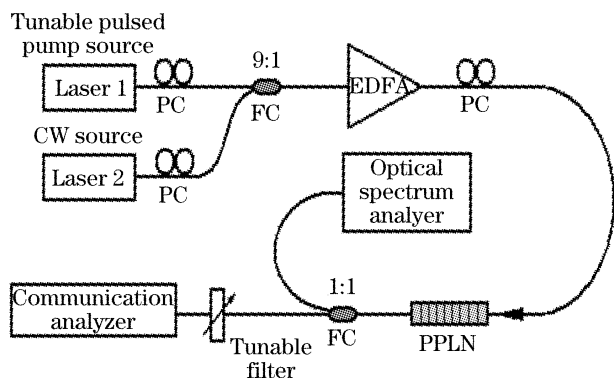


图4 实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup for DFG-based wavelength conversion. EDFA: erbium-doped fiber amplifier, PPLN: periodically poled lithium niobate, DFG: different frequency generation, PC: polarization controller, FC: fiber coupler

波长转换的实验结果如图5,从5中可以看出,抽运光中心波长为 1545 nm ,控制光波长为 1565.6 nm ,转换光波长中心在 1525 nm 处,转换效率大于 -20 dB 。由图5可见,转换光脉冲复制了抽运光脉冲信息,实现了波长转换。在实验中调节控制光的波长,转换光波长也相应被调节。图6显示了倍频光的光谱,倍频光的光谱与抽运光的光谱明显不同,倍频光谱的外形包络不同于抽运光谱的外形包络,意味着波形发生了改变,同时倍频光的谱宽比抽运光的谱宽窄,这意味着时域上倍频脉冲比抽运脉冲宽,这与前面的倍频光展宽的理论分析结果相符。

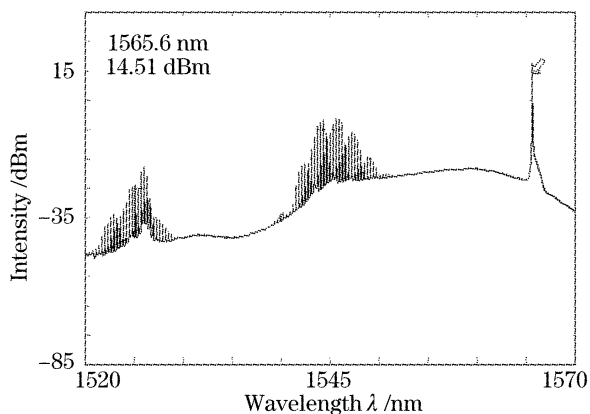


图5 脉冲抽运波长转换光谱

Fig. 5 Measured output spectrum from the wavelength converter under pulsed pumping

转换光脉冲波形与抽运光脉冲波形对比如图7所示,抽运光脉冲初始脉宽为 $\tau_{p0} = 7.5 \text{ ps}$ 的高斯型脉冲,转换光脉冲形状近似锯齿波。从波形对比上可以看出尽管输入的抽运光脉冲波形对称,但转换

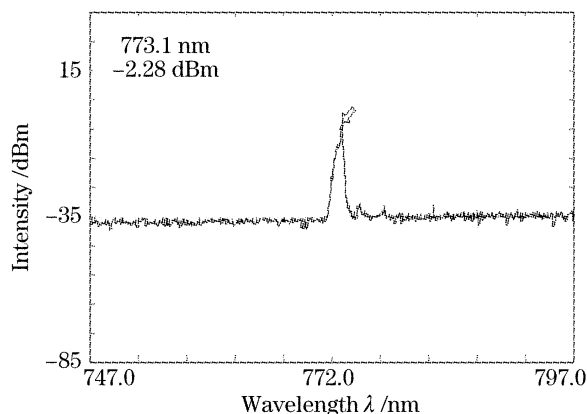


图6 脉冲抽运下的倍频光谱

Fig. 6 Measured output spectrum of second harmonic pulse

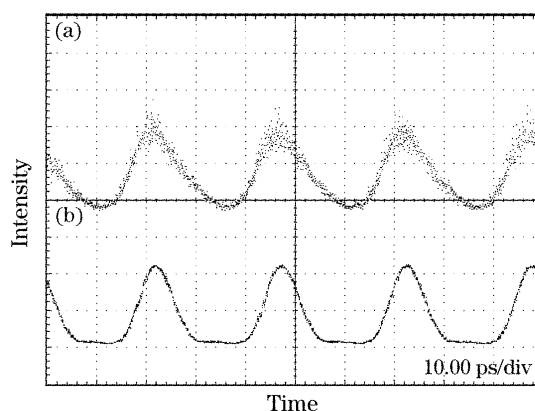


图7 转换脉冲(a)和抽运脉冲(b)的波形比较

Fig. 7 Comparison of waveforms between the output converted signal (a) and the launched pump pulse (b)

光脉冲波形是不对称的,它的下降沿变得平缓,波形发生了畸变。对照实验结果图7(a)与数值模拟结果图3(b),两者波形非常一致,都是不对称的且后沿缓降的波形。在图6所示的频谱上也可以看出转换光脉冲的频谱相对于抽运脉冲的频谱也发生了改变,转换光脉冲的频谱是不对称的。由于实验中所用通信分析仪只有一个信号通道,转换光与抽运光脉冲之间的峰值相移没有做对比分析。尽管转换脉冲发生了波形畸变,图7所示抽运脉冲于转换脉冲的信号比特率是一致的。所以这种脉冲光抽运的波长转换是将承载于抽运光的信息转载到转换波长上的过程。

4 结 论

本文通过理论分析和实验验证研究了在脉冲光抽运情况下周期极化铌酸锂波导的全光波长转换,研究表明脉冲光抽运时由于走离效应,产生的倍频光脉冲是一个随波导长度不断展宽的脉冲;转换光脉冲在转换过程中会发生波形畸变和峰值偏移,且

取决于抽运光脉冲宽度和波导长度,抽运光脉冲宽度越窄或波导越长,转换光脉冲波形畸变越大。此外,由于转换光脉冲的发生了波形畸变,这就要求在高速的波长转换中波导长度尽可能短一些,但是要获得大的转换光效率要求波导长度长一些,因此,在基于此原理的全光波长转换及其他应用中,必须在速度与效率、速度与畸变之间作出权衡。

参 考 文 献

- 1 Luo Yongfeng, Chen Yunlin, Yuan Jianwei *et al.*. Study of quasi-phase-matched cascaded χ^2 all optical wavelength conversion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 651~654 (in Chinese)
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 Xue Ting, Yu Jian, Yang Tianxin *et al.*. Numerical analysis and optimization quasi-phase-matched second-harmonic-generation in LiNbO₃ waveguide [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(3): 565~572 (in Chinese)
薛挺,于建,杨天新等. 准相位匹配铌酸锂波导倍频特性分析与优化设计[J]. *物理学报*, 2002, **51**(3): 565~572
- 3 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
- 4 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**(7~10): 953~961
- 5 J. Sun, W. Liu, J. Tian. Multichannel wavelength conversion exploiting cascaded second-order nonlinearity in LiNbO₃ waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12): 1743~1745
- 6 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
- 7 W. Liu, J. Sun, J. Kurz. Bandwidth and tenability enhancement of wavelength conversion by quasi-phase-matching difference frequency generation[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **216**: 239~246
- 8 Song Yu, Wanyi Gu. Wavelength conversions in quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide based on double-pass cascaded $\chi^{(2)}$ SFG+DFG interactions[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(11): 1548~1554
- 9 Zhou Minjuan, Sun Junqiang. All optical wavelength conversion based on LiNbO₃ waveguides [J]. *Study on Opt. Commun.*, 2006, **2**: 68~70 (in Chinese)
周敏娟,孙军强. 基于铌酸锂光波导的全光波长转换[J]. *光通信研究*, 2006, **2**: 68~70
- 10 B. Chen, C. Q. Xu. Analysis of novel cascaded SFG + DFG wavelength conversions in quasi-phase-matched waveguides[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(3): 256~261
- 11 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**(6): 681~685
- 12 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): 2,16