

文章编号: 0253-2239(2006)10-1453-6

周期域反转铌酸锂可调谐波长转换器的 皮秒脉冲实验*

王 健^{1,2} 孙军强^{1,2} 孙琪真²

(¹ 武汉光电国家实验室, 武汉 430074
² 华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 实验研究了周期域反转铌酸锂光波导级联和频与差频二阶非线性效应(cSFG/DFG)皮秒脉冲间的可调谐波长转换。信号光采用重复频率为 40 GHz, 脉宽为 1.57 ps 的脉冲信号。当输入信号光和第一个控制光波长分别为 1554.4 nm 和 1532.5 nm 时, 通过调节第二个控制光波长由 1550.5 nm 到 1541.0 nm, 输出信号光波长可从 1536.0 nm 调谐至 1545.2 nm。当输入信号光波长改变时, 通过改变第一个控制光波长以满足和频过程的准相位匹配条件, 同时调节第二个控制光波长可以实现输出信号光波长的可调谐。实验中利用两个窄带可调谐滤波器有效抑制了掺铒光纤放大器引入的放大自发辐射噪声, 同时观察到了波长下转换和波长上转换。

关键词: 波长转换器; 周期域反转铌酸锂; 级联和频与差频二阶非线性效应; 波长下转换和上转换

中图分类号: O437; TN252 文献标识码: A

Tunable Wavelength Converters of Picosecond Pulses Based on Periodically Poled LiNbO₃ Waveguides

Wang Jian^{1,2} Sun Junqiang^{1,2} Sun Qizhen²

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074
² Institute of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: A tunable wavelength conversion between picosecond pulses is experimentally demonstrated by using the cascaded sum- and difference-frequency generation (cSFG/DFG) in a periodically poled LiNbO₃ (PPLN) waveguide. The pulsed signal with 40 GHz repetition rate and 1.57 ps pulse width is adopted. When the input signal and the first control wavelengths are kept at 1554.2 nm and 1532.5 nm, respectively, the output signal wavelength can be tuned from 1536.0 nm to 1545.2 nm as the second control wavelength is varied from 1550.5 nm to 1541.0 nm. By varying the first control wavelength to satisfy the quasi-phase matching (QPM) condition for the sum-frequency generation (SFG), and simultaneously adjusting the second control wavelength, the tunable output signal wavelength can be also obtained when the input signal wavelength is changed. In the experiment, the amplified spontaneous emission (ASE) noise from the erbium-doped fiber amplifier (EDFA) is effectively suppressed by employing two narrow band tunable filters. Therefore, the wavelength down- and up-conversions are simultaneously observed.

Key words: wavelength converter; periodically poled LiNbO₃; cascaded sum- and difference-frequency generation; wavelength down- and up-conversions

1 引 言

波长转换器(WC)是组成未来全光网络的一项关键器件,它允许波长重用,避免波长竞争,能够提供波

长交换网络的重构,提高网络容量,实现灵活的网络管理和动态组网^[1]。目前常见的波长转换技术主要包括在半导体光放大器(SOA)中的交叉增益调制

* 国家自然科学基金(60577006)资助课题。

作者简介: 王 健(1981~),男,江苏南京人,武汉光电国家实验室,华中科技大学光电子科学与工程学院博士研究生,主要从事非线性光学、无源光波导的高速全光信号处理技术方面的研究。E-mail: wjhustoe@163.com

导师简介: 孙军强(1965~),男,华中科技大学教授,博士生导师,主要从事光通信系统与技术、光有源无源器件、激光器器件与技术方面的研究。E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2005-12-12; 收到修改稿日期: 2006-03-06

(XGM)^[2]、交叉相位调制(XPM)^[3]、交叉吸收调制(XAM)^[4]、四波混频(FWM)^[5]以及基于光波导的二阶非线性效应^[6~18]。在这些方案中以基于周期域反转铌酸锂(PPLN)光波导二阶非线性效应^[6~18]的波长转换具有特殊优势,除了能够实现输入信号光承载的信息转换外,还具有响应速度快,便于波长调谐,自发辐射噪声小,无啁啾等优点。因而近年来基于准相位匹配(QPM)周期域反转铌酸锂光波导差频(DFG)^[9,10]、级联倍频和差频(cSHG/DFG)^[10~13]以及级联和频与差频(cSFG/DFG)^[14~18]二阶非线性效应的全光波长转换技术正在受到众多学者越来越多的关注。不过,大部分的研究还仅仅局限于信号光连续工作的情形^[9~16],有些虽然引入了脉冲信号^[17,18],但由于实验系统中使用了掺铒光纤放大器(EDFA)而引入了放大自发辐射(ASE)噪声,因此对波长上转换形成一定的干扰,降低了输出信号的信噪比。另外值得注意的是,由于差频和级联倍频和差频过程中控制光的调谐范围非常窄(0.15 nm, 0.3 nm)^[10],因此难于实现波长转换的宽带调谐。

本文利用周期域反转铌酸锂光波导中级联和频与差频的二阶非线性效应,采用脉宽为 1.57 ps, 重复频率为 40 GHz 的脉冲信号光,实验研究对于皮秒脉冲的可调谐波长转换。特别地,通过在实验装置中同时使用两个窄带可调谐滤波器,有效地抑制了长波段的放大自发辐射噪声,从而同时观察到了波长下转换和波长上转换。

2 基本原理

图 1 示意了周期域反转铌酸锂光波导中发生的级联和频与差频过程。在周期域反转铌酸锂光波导输入端,输入信号光(λ_{in})和两个控制光(λ_{c1} , λ_{c2})三波同时耦合进入周期域反转铌酸锂光波导,信号光

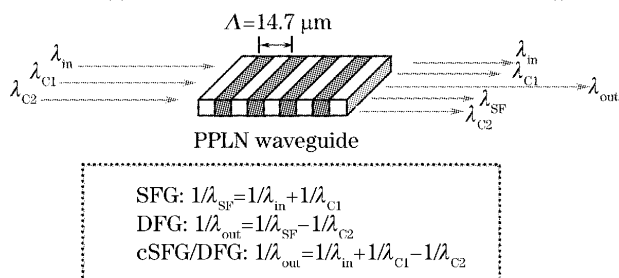


图 1 周期域反转铌酸锂光波导中级联和频与差频过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of cascaded sum- and difference-frequency generation in a periodically poled LiNbO₃ waveguide

和其中一个控制光(λ_{c1})在满足准相位匹配的条件下发生和频效应(SFG),生成的和频光(λ_{SF})同时又与另一个控制光(λ_{c2})发生差频(DFG)相互作用,从而生成和输入信号光以及两个控制光在同一波段的转换光,即输出信号光(λ_{out})。因而,加上级联和频与差频过程产生的和频光和输出信号光,在周期域反转铌酸锂光波导输出端共有五个光波输出。根据能量守恒原理,输出信号光波长满足如下关系式:

$$\frac{1}{\lambda_{out}} = \frac{1}{\lambda_{SF}} - \frac{1}{\lambda_{c2}} = \frac{1}{\lambda_{in}} + \frac{1}{\lambda_{c1}} - \frac{1}{\lambda_{c2}}, \quad (1)$$

所谓可调谐波长转换,即对于给定波长的输入信号光,输出信号光的波长可根据需要调谐。传统的差频和级联倍频和差频很难实现这一功能。但对于级联和频与差频,根据(1)式,当 λ_{in} 取定某一确定值时,首先调节 λ_{c1} 使得和频过程满足准相位匹配条件,这时生成的和频光波长 λ_{SF} 是固定的,然后通过改变 λ_{c2} 就可以方便地实现 λ_{out} 的可调谐输出。显然,在级联和频与差频过程中,第一个控制光波长 λ_{c1} 的选择由输入信号光波长决定,而第二个控制光波长 λ_{c2} 的选择则由所需的输出信号光波长决定。

3 实验装置

周期域反转铌酸锂可调谐波长转换器的实验装置如图 2 所示:两个控制光分别由两个连续外腔激光器提供,两者通过 3 dB 耦合器耦合在一起并经过高功率掺铒光纤放大器放大。注意,在掺铒光纤放大器输出端虽然两个控制光的光功率得到了明显的放大,但在掺铒光纤放大器的增益谱范围内同时也会引入严重的放大自发辐射噪声。为了抑制这部分噪声的不利影响,在掺铒光纤放大器后再使用一个 3 dB 耦合器将输出光分为两路,每一路各放置一个窄带可调谐滤波器(TF1 和 TF2),调节 TF1 滤出第一个控制光,调节 TF2 滤出第二个控制光,这样一来掺铒光纤放大器引入的放大自发辐射噪声就可以被大大地抑制了。利用一个 3×1 耦合器将经过放大并抑制了放大自发辐射噪声的两个控制光与锁模脉冲激光器产生的脉宽为 1.57 ps, 重复频率为 40 GHz 的脉冲信号光耦合在一起,经过偏振控制器(PC)后进入周期域反转铌酸锂光波导并在其中发生级联和频与差频二阶非线性效应,级联和频与差频过程生成的输出信号光完全复制了输入信号光携带的信息,从而实现了从输入信号光到输出信号光的波长转换,转换器的输出光谱以及输入和输出信号光的脉冲波形分别用 Anritsu MS9710C 光谱仪

(最高分辨力 0.05 nm)和信号分析仪(Tektronix CSA 8000B)来观测。图 2 中掺铒光纤放大器的小信号增益为 40 dB,饱和输出功率为 30 dBm。两个可调谐滤波器在 1.55 μm 波段内的调谐范围为 50 nm,线宽为 1 nm。周期域反转铌酸锂光波导长为 50 mm,准相位匹配周期为 14.7 μm ,波导宽度为

12 μm ,质子交换深度为 0.8 μm ,采用电场极化法和退火质子交换技术制得。这些参量允许室温下倍频(SHG)过程的准相位匹配波长为 1543.2 nm。周期域反转铌酸锂光波导尾纤间的损耗约为 4.7 dB,主要由未镀增透膜的端面反射、光纤与波导间的模场失配以及光波导内部的传输损耗引起。

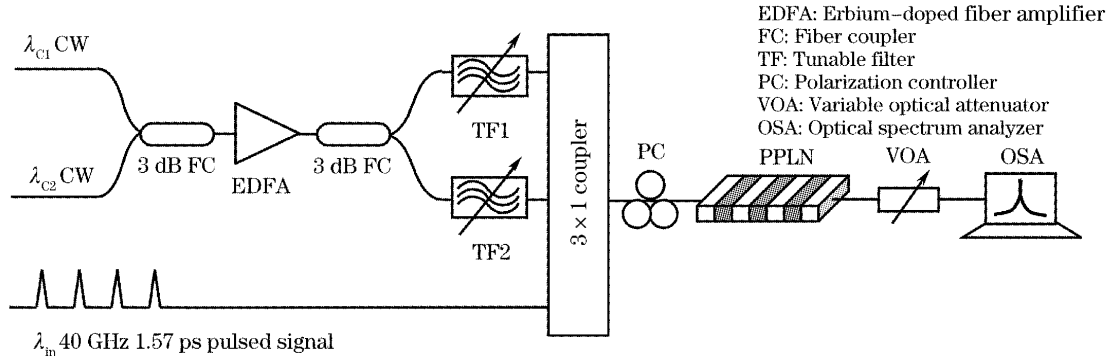


图 2 周期域反转铌酸锂可调谐波长转换器的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of PPLN-based tunable wavelength converter

4 实验结果和分析

图 3 给出了第二个控制光取不同波长时图 2 可调谐波长转换器的输出光谱图,从中可以很清晰地看到基于级联和频与差频的可调谐波长转换过程。输入信号光的中心波长为 1554.4 nm,为满足和频过程的准相位匹配条件,第一个控制光波长调节为

1532.5 nm。当改变第二个控制光波长由 1550.5 nm 到 1541.0 nm 时,可以实现输出信号光波长由 1536.0 nm 到 1545.2 nm 的可调谐输出。

图 4 所示为输入信号光中心波长改为 1548.9 nm 时第二个控制光取不同波长情况下可调谐波长转换器的输出光谱图,此时第一个控制光波

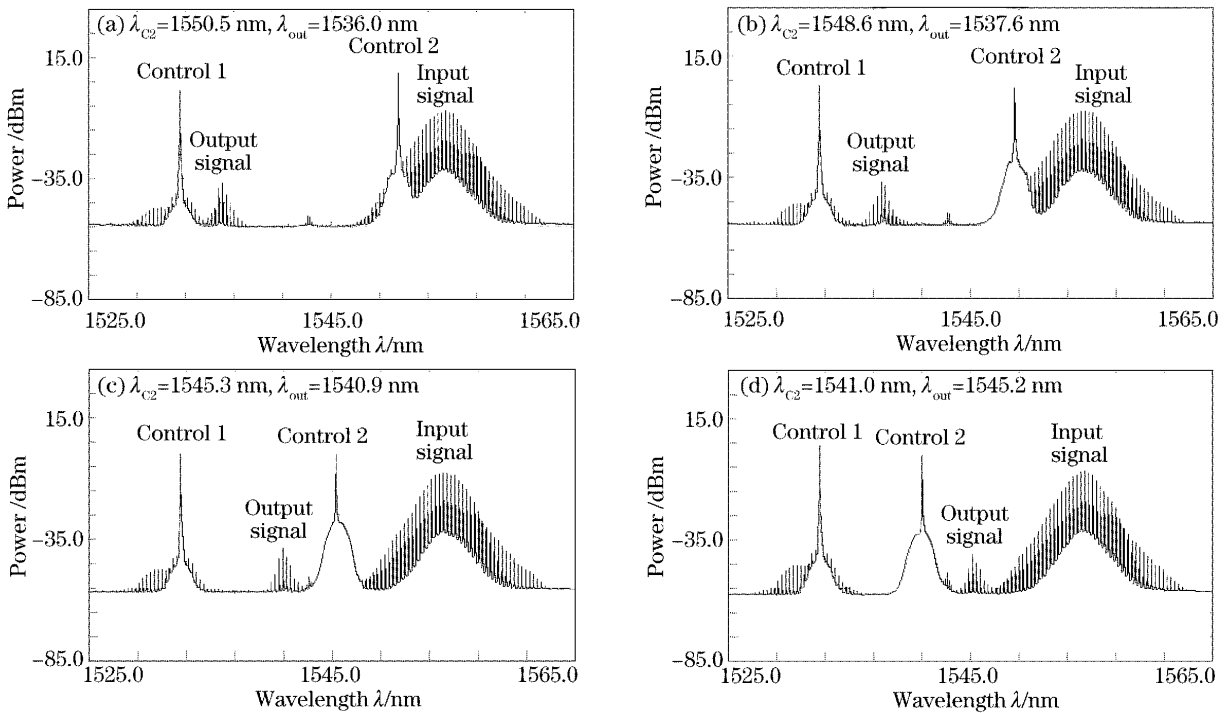


图 3 第二个控制光取不同波长时可调谐波长转换器的输出光谱图($\lambda_{in} = 1554.4 \text{ nm}$, $\lambda_{c1} = 1532.5 \text{ nm}$)

Fig. 3 Measured output spectra from the tunable wavelength converter for different wavelengths of the second control wave ($\lambda_{in} = 1554.4 \text{ nm}$, $\lambda_{c1} = 1532.5 \text{ nm}$)

长相应的调节为 1536.7 nm 以满足和频过程的准相位匹配条件。当第二个控制光波长由 1554.5 nm

调节为 1528.4 nm 时,输出信号光波长可以相应的由 1531.7 nm 调谐至 1558.4 nm。

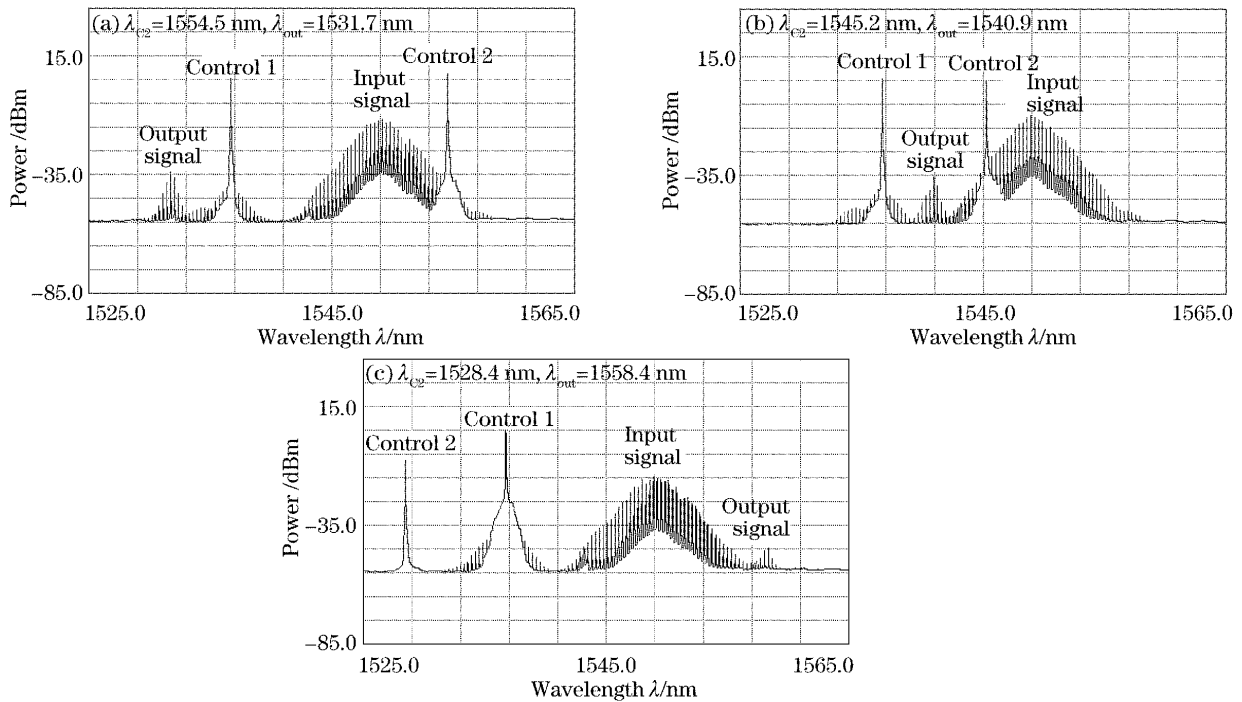


图 4 信号光波长改变时,第二个控制光取不同波长时可调谐波长转换器的输出光谱图($\lambda_{in} = 1548.9 \text{ nm}$, $\lambda_{C1} = 1536.7 \text{ nm}$)
 Fig. 4 Measured output spectra from the tunable wavelength converter for different wavelengths of the second control wave when changing the signal wavelength ($\lambda_{in} = 1548.9 \text{ nm}$, $\lambda_{C1} = 1536.7 \text{ nm}$)

值得注意的是,由于实验装置中两个可调谐滤波器的使用,图 3 和图 4 在 1525.0~1565.0 nm 的波长范围内放大自发辐射噪声得到了有效的抑制,表现为光谱的基准线在短波段和长波段几乎一样

高,因此,从图 4(c)很容易观察到了波长上转换。

图 5 进一步给出了波长上转换时的输出光谱图。第二个控制光位于短波段,输出信号光位于长波段。如图 5(a)(b)所示,当输入信号光固定时,第一个控制

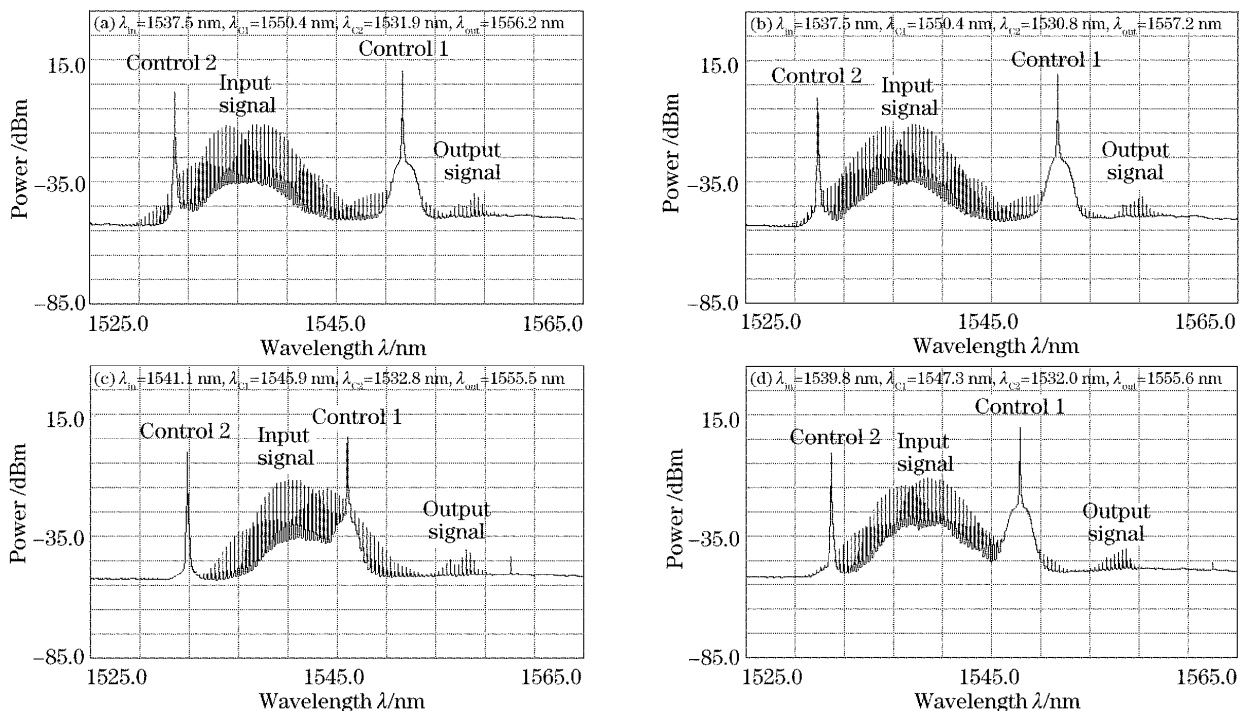


图 5 波长上转换对应可调谐波长转换器的输出光谱图
 Fig. 5 Measured output spectra for wavelength up-conversion from the tunable wavelength converter

光也固定,调节第二个控制光波长可以改变输出信号光波长;当输入信号光波长改变时,如图 5(b)~图 5(d)所示,通过适当调节第一个和第二个控制光的波长仍然可以实现输出信号光的可调谐输出。

实验过程中,测得周期域反转铌酸锂光波导输出端第一个和第二个控制光的光功率图 3 分别约为 2.4 dBm 和 4.8 dBm,图 4(a)、图 4(b)约为 5.7 dBm 和 6.5 dBm,图 5 约为 9.1 dBm 和 0.4 dBm;图 3 测得转换效率大于 -35 dB,图 4 和图 5 测得转换效率大于 -30 dB,其中测得的最大转换效率可达 -22 dB,如图 4(a)所示。图 3、图 4 和图 5 中转换效率的差别一方面可以归因于两个控制光光功率的不同以及光源光功率的抖动;另一方面,不同测量时间段内偏振态的变化以及周围环境的影响如温度也是影响转换效率的一个重要原因。虽然图 3~图 5 中转换效率不是特别高,但由于放大自发辐射噪声非常低,因此还是可以清晰观察到转换输出的信号光。

图 6(a)、图 6(b)分别给出了波长下转换和波长上转换时输出信号光和输入信号光的脉冲波形。值得注意的是,实验中由于受到信号分析仪(Tektronix CSA 8000B)中内置光电探测器响应速度的限制,图 6 通过此信号分析仪所观察到的输入信号光的半峰全宽(FWHM)要大于实际用自相关

仪测得的 1.57 ps。不过,这并不影响实验观察从输入到输出信号光的波长转换。通过比较图 6(a)、图 6(b)中输入和输出信号光的脉冲波形,显然,输出信号光完全复制了输入信号光所携带的信息。图 6 中的横坐标单位为 20.00 ps/div,在 200 ps 范围内共有 8 个脉冲,这说明输入和输出信号光的重复频率均为 40 GHz。另外,比较图 6(a)、图 6(b)可以看出波长下转换时输出信号光的质量要好于波长上转换,这可以从图 4(a)和图 5(d)的光谱给予解释。定义“输出信号光的光信噪比(OSNR/dB)等于输出信号光光谱的峰值功率(dBm)减去噪声功率(dBm)”,波长下转换时,如图 4(a)所示,第二个控制光处于掺铒光纤放大器增益谱范围内,因此可以得到有效的放大,相应的输出信号光光功率较大,输出信号光的光信噪比较高(>20 dB);相比之下,波长上转换时,如图 5(d)所示,第二个控制光处于短波段,甚至离开了掺铒光纤放大器的增益谱范围而得不到有效的放大,从而导致输出信号光光功率较小,输出信号光的光信噪比较低(<8 dB)。输出信号光的光信噪比的差别使得波长下转换的效果要好于波长上转换。尽管如此,因为有效抑制了放大自发辐射噪声,因此我们还是成功的同时观察到了波长下转换和波长上转换。

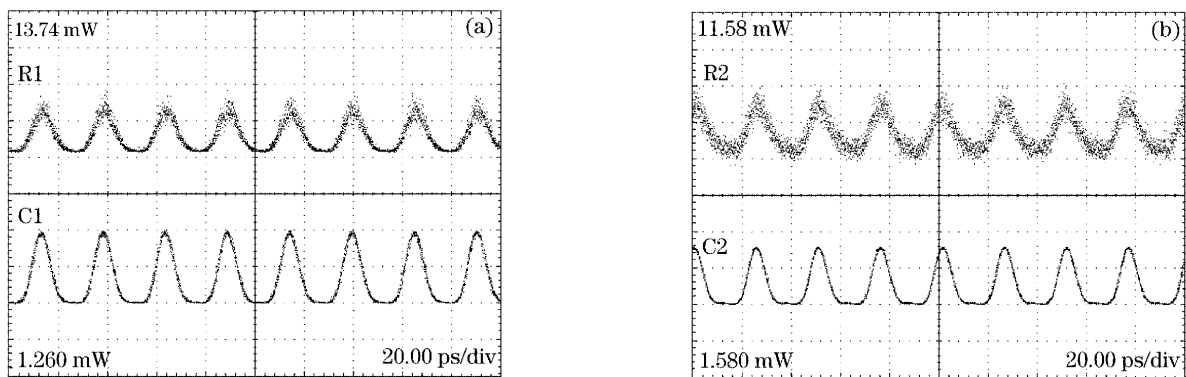


图 6 输出信号光(R1,R2)和输入信号光(C1,C2)的脉冲波形。(a)波长下转换,对应图 4(a),(b)波长上转换,对应图 5(d)

Fig. 6 Waveforms for the output signal pulses (R1,R2) and input signal pulses (C1,C2). (a) Wavelength down-conversion shown in Fig. 4(a), (b) wavelength up-conversion shown in Fig. 5(b)

5 结 论

本文对于周期域反转铌酸锂光波导级联和频与差频二阶非线性效应的波长转换器进行了实验研究,实现了脉宽为 1.57 ps,重复频率为 40 GHz 的输入脉冲信号光的可调谐波长转换。通过在实验装置中使用两个可调谐窄带滤波器有效抑制了放大自发辐射噪声,因此同时观察到了波长下转换和波长

上转换。

参 考 文 献

- 1 S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 955~966
- 2 A. D. Ellis, A. E. Kelly, D. Nasset *et al.*. Error free 100 Gbit/s wavelength conversion using grating assisted cross-gain modulation in 2 mm long semiconductor amplifier[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(20): 1958~1959

- 3 C. Joergensen, S. L. Danielsen, T. Durhuus *et al.*. Wavelength conversion by optimized monolithic integrated Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(4): 521~523
- 4 Sune Højfeldt, Svend Bischoff, Jesper Mørk. All-optical wavelength conversion and signal regeneration using an electroabsorption modulator[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(8): 1121~1127
- 5 Liu Wei, Sun Junqiang. A novel scheme for polarization-insensitive optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1047~1051 (in Chinese)
刘 威, 孙军强. 一种新颖的偏振不敏感的基于半导体光放大器的四波混频光波长转换方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1047~1051
- 6 Zhu Xiaozheng, Zhou Jun, Lou Qihong *et al.*. Experimental investigation of quasi-CW frequency-doubling of broad band fiber laser in periodically poled lithium niobate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1330~1334 (in Chinese)
朱晓峥, 周 军, 楼祺洪等. 宽带准连续光纤激光在周期极化铌酸锂中倍频特性的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1330~1334
- 7 Zhu Xiaozheng, Zhou Jun, Lou Qihong *et al.*. 59 mW green light second harmonic generation of quasi-CW double-cladding fiber laser in periodically poled lithium niobate[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 777~779 (in Chinese)
朱晓峥, 周 军, 楼祺洪等. 准连续双包层光纤激光在周期性极化铌酸锂晶体中倍频产生 59 mW 绿光[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 777~779
- 8 Baigang Zhang, Jianquan Yao, Hao Zhang *et al.*. Angle-tuned signal-resonated optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6): 346~349
- 9 M. H. Chou, J. Hauden, M. A. Arbore *et al.*. 1.5- μm -band wavelength conversion based on difference-frequency generation in LiNbO₃ waveguides with integrated coupling structures[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13): 1004~1006
- 10 B. Zhou, C. Q. Xu, B. Chen. Comparison of difference-frequency generation and cascaded $\chi^{(2)}$ based wavelength conversions in LiNbO₃ quasi-phase-matched waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(5): 846~852
- 11 M. H. Chou, I. Brener, M. M. Fejer *et al.*. 1.5- μm -band wavelength conversion based on cascaded second-order nonlinearity in LiNbO₃ waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 653~655
- 12 J. Q. Sun, W. Liu, J. Tian *et al.*. Multichannel wavelength conversion exploiting cascaded second-order nonlinearity in LiNbO₃ waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12): 1743~1745
- 13 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): 236~237
- 14 B. Chen, C. Q. Xu. Analysis of novel cascaded $\chi^{(2)}$ (SFG+DFG) wavelength conversions in quasi-phase-matched waveguides [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(3): 256~261
- 15 S. Yu, W. Gu. A tunable wavelength conversion and wavelength add/drop scheme based on cascaded second-order nonlinearity with double-pass configuration[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2005, **41**(7): 1007~1012
- 16 Y. L. Lee, B. A. Yu, C. Jung *et al.*. All-optical wavelength conversion and tuning by the cascaded sum- and difference frequency generation (cSFG/DFG) in a temperature gradient controlled Ti:PPLN channel waveguide[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 2988~2993
- 17 J. Wang, J. Q. Sun, C. H. Luo *et al.*. Experimental demonstration of wavelength conversion between ps-pulses based on cascaded sum- and difference frequency generation (SFG+DFG) in LiNbO₃ waveguides[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7405~7414
- 18 Y. Min, J. Lee, Y. Lee *et al.*. Tunable all-optical wavelength conversion of 5 ps pulses by cascaded sum- and difference frequency generation (cSFG/DFG) in a Ti:PPLN waveguide[C]. In: *Tech. Dig. OFC'03*, Atlanta, GA/USA, 2003, **2**: 767~768