

在周期性极化铌酸锂波导中的波长转换与光谱分析

罗传红^{1,2}, 孙军强¹, 朱援祥², 王健¹

1. 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074
2. 武汉大学材料系, 湖北 武汉 430072

摘要 实验研究了在准相位匹配 LiNbO₃ 波导中级联的倍频和差频波长转换, 通过对转换频谱分析和波形对比分析, 讨论了在脉冲泵浦情况下走离效应对光脉冲之间波长转换的影响: 由于波导的色散性能, 不同波长的光脉冲在波导中传播具有不同的群速度, 处在 0.8 μm 光波段的倍频光脉冲比处在 1.55 μm 光波段的泵浦光脉冲的传播速度慢, 导致了倍频光脉冲与泵浦光脉冲在传播的过程中发生走离; 因此倍频脉冲在频域被压缩而在时域被展宽, 并遗传给差频过程使得转换脉冲的谱宽变窄、脉宽增加、占空比变大, 表明脉冲光泵浦波长转换对信号频谱及波形不是严格透明的转换。实验同时实现了一对多通道的波长转换, 表明连续控制光的线宽对转换信号的信噪比有较大的影响。

关键词 波长转换; 倍频效应; 差频效应; 脉冲走离

中图分类号: O734 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2008)06-1209-04

引言

光学晶体中的二阶非线性效应早已被证实并被深入研究, 二阶非线性光学效应包括三种: 倍频效应^[1-3], 和频效应^[4-6], 差频效应^[7-9]。要在光学晶体中产生高效率的二阶非线性效应, 实现相互作用的光场间的相位匹配是关键所在^[10,11]。在周期性极化铌酸锂晶体 (PPLN) 中利用准相位匹配技术进行频率变换可以实现全光波长转换^[12]。本文实验研究了在 PPLN 波导中基于级联的倍频和差频效应的波长转换, 对变换的频谱和波形进行了实验研究和分析。

1 实验方案

采用如图 1 所示的实验装置, 图中基于掺铒光纤放大器 (EDFA) 的光纤环形腔 (EDFL) 输出可调波长的连续激光: EDFA 具有很高的信号增益但有很宽的自发噪声 (ASE) 谱的特性, 通过一个可调窄带滤波器 (TF) 对 EDFA 的 ASE 进行抑制, 只有落在滤波器带内的噪声可以通过 EDFA 进行循环放大, 最后通过 90°/10° 的耦合器 (FC) 输出连续激光, 输出波长由 TF 调节, 可变范围由 EDFA 的增益带宽决定, 为 1530~1570 nm。另一个连续激光 (CW) 光源是可调波长外腔 (ECL) 连续激光器, 谱线宽度很窄, 波长可变范围 1530~

1555 nm, 输出光功率可调。脉冲光源是一个 1.55 μm 波段的输出脉冲频率为 40 GHz 的可调波长锁模脉冲激光器。先用 50/50 的 FC 将两个连续激光耦合, 再使用 90°/10° 的 FC 将脉冲光和两路连续光耦合进同一根单模光纤, 注入到 EDFA 中进行功率放大, 放大后的三路光通过偏振控制器 (PC) 对其偏振态进行调整和控制, 然后进入到 PPLN 波导中, 在 PPLN 光波导中进行波长转换, 转换光谱用光谱仪进行观察, 转换波形通过一个可调窄带滤波器滤出, 再通过波形记录仪观察。

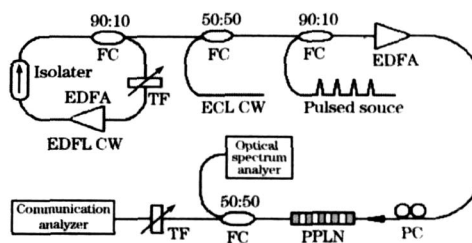


Fig 1 Experimental setup for wavelength conversion

波长转换器是 z 切 PPLN 光波导, 它采用外加电场极化法和质子交换淬火法制备, 长 52 mm, 波导层宽 12 μm, 质子交换深度 0.8 μm, 光场在波导中只能以 TM 模进行传输^[13-15]。QPM 周期, 室温时对应的相位匹配的泵浦波长为 1545 nm 左右, 波导采用斜端面设计以消除谐振效应和减小

收稿日期: 2007-01-28, 修订日期: 2007-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60577006) 资助

作者简介: 罗传红, 1969 年生, 华中科技大学光电子科学与工程学院博士研究生 e-mail: chlue@whu.edu.cn

回波, 两端用单模光纤进行耦合, 波导本身的材料损耗为 $0.35 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ ($1.55 \mu\text{m}$ 波段)。

实验中调节脉冲光中心波长在 PPLN 波导的泵浦波长上, 通过耦合器的比例分配控制连续光和脉冲光输入 PPLN 波导的光功率分配, 光脉冲获有较大的功率放大, 可以用来泵浦 PPLN。脉冲的泵浦光 p 通过倍频效应产生 $0.8 \mu\text{m}$ 波段的倍频光: $h (h = 2 p)$ 再用倍频光 h 与连续光 s 通过差频效应产生 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的转换光: $i = h - s$, 在 PPLN 中发生了两次非线性效应的波长转换, 称为级联的二阶非线性效应^[16, 17]。

2 波长转换及其光谱分析

泵浦脉冲激光器是 40 GHz 的可调波长锁模激光器, 其输出波长可变范围 $1530 \sim 1560 \text{ nm}$, 输出功率和波形稳定。图 2 为激光器输出的脉冲频谱, 谱宽约为 16 nm , 谱间隔 0.31 nm , 对应脉冲重复频率 40 GHz 。通过自相关仪可测得脉冲宽度 (FWHM) 约为 1.57 ps 。

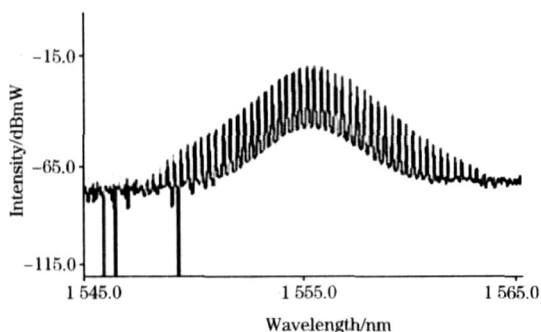


Fig 2 Pulse spectrum of pulsed laser

当泵浦波长被调到 1545 nm , 满足 PPLN 准相位匹配波长时, 在 PPLN 波导中同时发生倍频和差频波长转换^[18, 19]。图 3(a) 为倍频光场的频谱, 从图中可以看出倍频谱宽较宽, 说明倍频光为脉冲形式; 其谱宽较泵浦脉冲的谱线宽度窄, 说明倍频脉冲宽度相比于泵浦脉冲宽度要宽。分析倍频脉冲宽度变宽的原因: 由于波导的色散性能, 不同波长的光脉冲在波导中传播具有不同的群速度, 其中倍频光脉冲处在 $0.8 \mu\text{m}$ 光波段, 而泵浦光处在 $1.55 \mu\text{m}$ 光波段, 倍频光脉冲比泵浦光脉冲的传播速度慢, 这就导致了倍频光脉冲与泵浦光脉冲在传播的过程中发生了走离; 在波导某一位置产生的倍频光, 不能与泵浦光以相同的群速度传播时, 倍频光落后于泵浦光, 经过走离长度后泵浦光与所产生的倍频光分离开, 那么泵浦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, 形成了在时域上展宽的脉冲^[20]。

图 3(b) 为级联的倍频和差频转换的频谱, 图 3(a) 中产生的倍频光脉冲与注入的两路连续光通过差频转换作用实现了一对二信道的波长转换。在图中处在 1555 nm 的连续光是 ECL 激光器的输出光, 处在 1563 nm 的连续光是 EDFL 激光器的输出光。从图中可以看出, 输入一个信道的信号

光, 转换输出两个信道的信号光, 分别处在 1535 和 1527 nm 波长上, 两个信道的输出光波长与两个控制光波长分别以泵浦波长 1545 nm 成镜像对应。从信号变换的角度来看, 泵浦光波长加载了信息(脉冲), 两路转换光波长复制了泵浦光波长的信息, 波长转换发生在转换光与泵浦光波长之间, 分别向下转换了 -10 和 -18 nm , 转换效率被估测为 -24 和 -26 dB 。当调节一路控制光波长, 与之相应的转换光波长被调节, 因此两个信道的输出波长各自独立、分别可调, 波长间隔与两个控制光波长间隔相等。在调节中转换效率基本保持不变, 转换带宽超过 25 nm (由于 EDFL 的调节波长的限制, 输出最大控制波长为 1570 nm , 对应的转换带宽为 25 nm)。

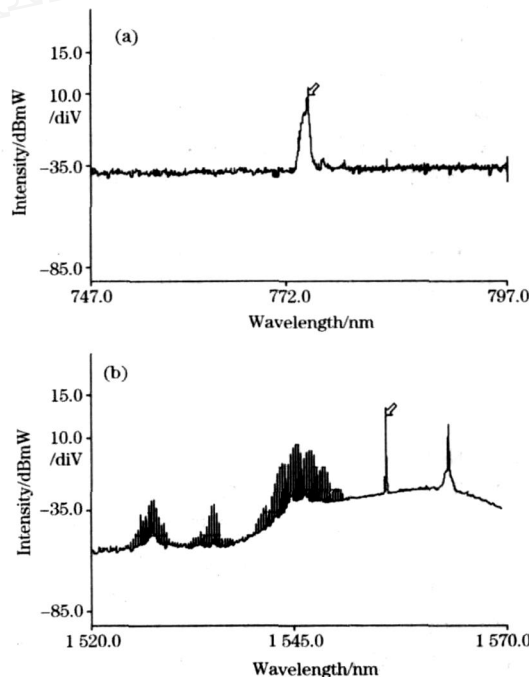


Fig. 3 Spectra of wavelength conversion
(a): Spectrum of SH;
(b): Spectra of converted pulses in cSHG/DRG

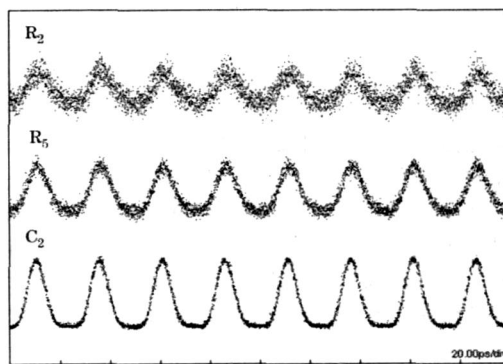


Fig. 4 Waveforms for different optical signals

图 4 为输入信号(泵浦光)和两路差频转换信号波形。C2 为输入信号波形(锁模激光器输出脉冲), R5 为波长 1535

nm 转换光波形 (ECL-CW 为控制光), R2 波长 1 527 nm 转换光波形 (EDFL-CW 为控制光)。对比这三路脉冲序列可以看出: (1) 两路输出脉冲为 40 GHz 脉冲序列, 实现了一对二信道的波长转换; (2) 相对于初始信号信噪比都有所恶化, 其中以 EDFL-CW 作为控制光的转换脉冲信噪比恶化更严重, 分析认为与在 EDFL 环形腔中窄带滤波器 TF 的带宽不够窄 (-3 dB 带宽为 1 nm), 输出的连续光谱线宽度较大, 输出功率不太稳定等因素有关; (3) 转换后的波形有一些变化, 主要表现在脉冲宽度有所展宽, 占空比增加, 反映在频谱上转换脉冲的谱宽比初始泵浦脉冲的谱宽要窄一些, 如图 3(b) 所示, 分析认为是由于在倍频转换中倍频脉冲展宽以后遗传

给差频过程, 导致了差频转换脉冲宽度有所增加。

3 结 论

实验研究了在脉冲光泵浦情况下基于 PPLN 波导的全光波长转换, 研究表明: 脉冲光泵浦时由于走离效应产生的倍频光脉冲是展宽的脉冲, 并遗传给差频过程, 使得差频转换光脉冲在转换过程中会发生频谱和波形的变化; 转换脉冲能够复制泵浦脉冲的信息 (如比特率), 且可以实现可调的、一对多信道的波长转换, 这在全光通讯系统 (DWDM) 中有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] FU Yun-liang, JIN Guo-liang, YUAN Yi-fang, et al (符运良, 金国良, 袁一方, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(3): 303.
- [2] LUO Yong-feng, CHEN Yun-lin, YUAN Jian-wei (罗勇峰, 陈云琳, 袁建伟). Acta Optica Sinica (光学学报), 2005, 25(5): 651.
- [3] Chen B, Xu C Q. IEEE J. Quantum Electron, 2004, 40(3): 256.
- [4] Wang J, Sun J, Luo C, et al. Appl. Phys. B, 2006, 83: 543.
- [5] Wang J, Sun J, Luo C, et al. Optics Express, 2005, 13(9): 7405.
- [6] Yu S, Gu W. IEEE J. Quantum Electron, 2004, 40(11): 1548.
- [7] Sun J, Liu W. Opt. Commun., 2003, 224: 125.
- [8] Ishizuki H, Suhara T, Fujimura M. Optical and Quantum Electron., 2001, 33: 953.
- [9] Luo C, Sun J, Wang J. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(4): 905.
- [10] ZHOU Jun, LOU Qi-hong, ZHU Xiao-zheng, et al (周 军, 楼祺洪, 朱晓峥, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(11): 1473.
- [11] YOU Zhen-yu, TU Chao-yang, ZHU Zhao-jie, et al (游振宇, 涂朝阳, 朱昭捷, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2006, 26(1): 1.
- [12] XUE Ting, YU Jian, YANG Tian-xin (薛 挺, 于 建, 杨天新). Acta Phys. Sin. (物理学报), 2002, 51(3): 00565.
- [13] Chou M H, Brener I, Fejer M M. IEEE Pho. Tech. Lett., 1999, 11(6): 653.
- [14] Sun J, Liu W, Tian J. IEEE Pho. Tech. Lett., 2003, 15(12): 1743.
- [15] Liu W, Sun J, Kurz J. Opt. Comm., 2003, 216: 239.
- [16] Cristiani I, Degiorgio V, Socci L, et al. IEEE Pho. Tech. Lett., 2002, 14(5): 669.
- [17] Chou M H, Brener I, Lenz G. IEEE Pho. Tech. Lett., 2000, 12(1): 82.
- [18] Sun J, Yuan X, Liu D. Appl. Phys. B, 2005, 80: 681.
- [19] Sun J, Huang D, Liu D. Opt. Commun., 2006, 259: 125.
- [20] LUO Chuan-hong, SUN Jun-qiang, WANG Jian, et al (罗传红, 孙军强, 王 健, 等). Acta Optica Sinica (光学学报), 2007, 27(6): 1084.

Wavelength Conversion and Spectral Analysis in Periodically Polarized Lithium Niobate Waveguide

LUO Chuan-hong^{1,2}, SUN Jun-qiang¹, ZHU Yuan-xiang², WANG Jian¹

1. School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. Department of Material Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract Wavelength conversion exploiting cascaded second harmonic and difference frequency generation (CSHG/DFG) in periodically polarized LiNbO₃ (PPLN) waveguides was experimentally researched. While wavelength converter was pumped with a pulsed wave, the pump pulse can be used to carry the information and wavelength conversion occurs between the pump wave and

converted wave, thus wavelength conversion transferring the information from the pump wave to the converted waves includes two processes of second order nonlinear reaction: the first wavelength conversion from pump wave to SH wave occurs with SHG process, and the second wavelength conversion from SH wave to converted wave occurs with DFG process. In the first process the group velocities mismatching (GVM) for pulses at different wavelengths due to material property lead the temporal walk-off between pump pulse and SH pulse located in the 1.5 μm band and in the 0.8 μm band, respectively, so that SH pulse slowly propagates compared with pump pulse, and SH pulse width is broadened along propagation length. As a result, in the second process the converted DF pulse generates waveform distortion owing to the broadening of SH pulse in the first process. Both the waveform and the spectrum of converted pulse in our experimental results testify to the fact that SH pulse possesses a narrow spectral width, which is consistent with a long SH pulse, and the spectral width of converted DF pulse is compressed but its temporal width is broadened correspondingly. Therefore the influence of walk-off between pulses demonstrates that the pulsed pumping wavelength conversion is disadvantageous to the transparency of the data format. However, pulsed pumping wavelength conversion also presents great potential that can be applied in future optical networks. Tunable wavelength conversion can be easily implemented by changing the wavelength of control CW, and single-to-multiple channel wavelength conversion can be realized by increasing the number of the CW lasing pump channels. This is very important and it enhances the flexibility in the management of the multi-channel WDM network. Finally, a tunable and single-to-dual channel wavelength converter based on the scheme of pulsed pumping wavelength conversion achieved by our experiment setup, and two channel converted pulses simultaneously replicate the bit rate carried on pump pulses. It is pointed out that the quality such the signal-to-noise ratio of converted pulse is affected by spectral width of control CW.

Keywords Wavelength conversion; Second harmonic generation; Difference frequency generation; Walk-off

(Received Jan. 28, 2007; accepted May 6, 2007)

《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者,本刊要求作者重写,这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文,要求言简意明、确切地论述文章的主要内容,突出创新之处。
2. 应拥有与论文同等量的主要信息,包括四个要素,即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素,例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下,英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据,如检测限、相对标准偏差等;结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。
3. 句型力求简单,尽量采用被动式,通常应有 2000 个印刷字符,300 个英文单词为宜,不能太短;也不要太长。用 A4 复印纸单面隔行打印。
4. 摘要不应有引言中出现的内容,换言之,摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论,不得简单重复题名中已有的信息;不用非公知公用的符号和术语;不用引文,除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号,除相邻专业的读者也能清楚地理解外,在首次出现时必须加以说明,例如用括号写出全称。