

新型双环腔结构可调谐全光波长转换器的实验研究*

王 健† 孙军强 郭永娟 李 婧 孙琪真

(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, 武汉 430074)

(2006 年 3 月 9 日收到, 2006 年 8 月 29 日收到修改稿)

利用周期性畴反转铌酸锂光波导级联和频与差频的二阶非线性效应, 提出并实验验证了一种新颖的基于无源光波导双环腔结构的可调谐全光波长转换方案, 实现了皮秒脉冲从信号光波长到空闲光波长的转换. 采取的脉冲信号光脉宽为 1.57 ps, 重复频率为 40 GHz, 抽运光和控制光由双环腔激光器提供, 无需任何外界注入连续光.

关键词: 全光波长转换器, 双环腔, 周期性畴反转铌酸锂, 级联和频与差频二阶非线性效应

PACC: 4265, 4265K, 4260D, 4280S

1. 引 言

可调谐全光波长转换器是未来密集波分复用 (DWDM) 光网络的关键器件. 它有助于避免光波长的拥塞、增加网络管理的灵活性和实现动态组网^[1]. 在目前已经报道的全光波长转换方案中, 基于周期性畴反转铌酸锂 (PPLN) 光波导^[2-16]级联二阶非线性效应的波长转换器显示出许多独特的优越性^[2], 不仅对信号比特率和调制格式完全透明, 而且 PPLN 作为无源光波导, 具有无自发发射噪声, 无啁啾以及响应速度快 (f_s 量级) 等优点, 因而在皮秒脉冲的高速全光波长转换方面具有潜在的优势.

基于 PPLN 的级联二阶非线性效应主要包括级联倍频和差频 (cSHG/DFG)^[2, 7-10]以及级联和频与差频 (cSFG/DFG)^[11-16]两种. Chou 等人^[2]以及 Sun 等人^[8, 9]已经实验研究了基于 cSHG/DFG 的波长转换, 显示出了较好的转换性能. 然而, 由于受到 SHG 过程准相位匹配 (QPM) 条件的限制, 抽运光波长调谐范围非常窄 (0.3 nm)^[10], 因而对于固定波长的输入信号光, 难于实现可调谐的转换光输出. 为了克服这一缺点, Min^[12], Yamawaku^[13]以及 Lee^[15, 16]等人提出并在实验中观察到了基于 cSFG/DFG 的可调谐全光波长转换. 不过, 传统的 cSFG/DFG 需要两个外界注入的抽运光和控制光^[11-16], 这在一定程度上增加了系统的复杂性和成本.

本文首次提出一种新型的基于 PPLN 双环腔结构的可调谐全光波长转换器. 信号光采用皮秒脉冲, 无需外界注入连续的抽运光和控制光, 两者由波长转换器内含的双环腔激光器提供. 通过改变抽运光和控制光的激励波长, 实验观察到了皮秒脉冲从信号光波长到空闲光波长的可调谐全光波长转换.

2. 实验装置和工作原理

基于 PPLN 双环腔结构可调谐全光波长转换器的实验装置如图 1 所示. 转换器的主体是内置了 PPLN 光波导的双环腔光纤激光器, 主要由两个可调谐滤波器、两个可变衰减器、共用的一个掺铒光纤放大器 (EDFA)、偏振控制器 (PC)、PPLN 光波导以及光隔离器组成. 实验用的 PPLN 光波导使用电场极化法和退火质子交换技术制得, 长 50 mm, QPM 周期为 14.7 μm , 波导的宽度为 12 μm , 质子交换深度为 0.8 μm , 室温下倍频过程 QPM 波长约为 1544 nm. 该光波导尾纤间的损耗约为 4.7 dB, 主要是由未镀增透膜的端面反射、光纤与波导间模场失配以及光波导的内部传输损耗引起. 脉冲信号光由锁模光纤激光器产生, 脉冲宽度为 1.57 ps, 重复频率为 40 GHz. 两个可调谐滤波器在 1.55 μm 波段内的可调谐范围为 50 nm, 线宽为 1 nm. EDFA 为商业上的高饱和输出功率掺铒光纤放大器, 小信号增益为 40 dB, 饱和输出功率为 30 dBm. 偏振控制器放置在 PPLN 光波导前

* 国家自然科学基金 (批准号 60577006) 资助的课题.

† E-mail: wjhuotoc@yahoo.com.cn

用以调整入射光的偏振态,从而增强光波导内的非线性相互作用.光隔离器用于实现双环腔激光器的单向激励.输入和输出光的光谱和脉冲波形分别用 Anritsu MS9710C 光谱仪(最高分辨率 0.05 nm)和通信信号分析仪(Tektronix CSA 8000B)来观测.

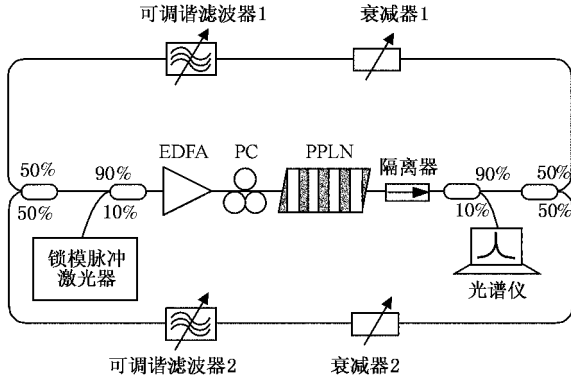


图 1 双环腔结构可调谐全光波长转换器实验装置图

基于 cSFG/DFG 可调谐全光波长转换的工作原理如图 2 所示,双环腔激光器产生的两个连续激光分别作为 cSFG/DFG 过程的抽运光(λ_p)和控制光(λ_c)通过调节可调谐滤波器可以改变 λ_p 和 λ_c 的具体取值.抽运光和信号光(λ_s)在满足和频过程

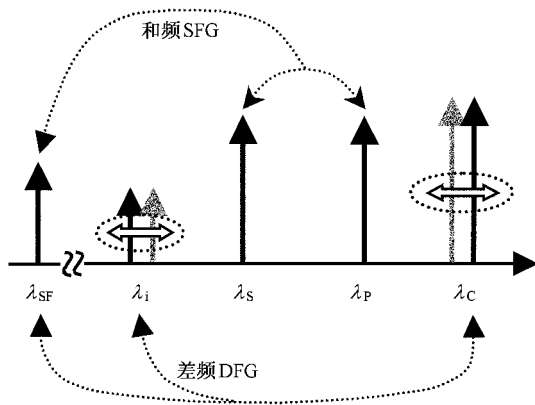


图 2 基于 cSFG/DFG 可调谐全光波长转换原理示意图

(SFG)的 QPM 条件下发生和频效应,生成的和频光(λ_{SF})同时与控制光发生差频效应(DFG)产生新生的空闲光(λ_i).空闲光完全复制了信号光所携带的信息,从而实现了波长转换.由于能量守恒, λ_i 将满足如下的关系:

$$1/\lambda_i = 1/\lambda_s + 1/\lambda_p - 1/\lambda_c, \quad (1)$$

根据(1)式,对于固定波长的输入信号光(λ_s),为了满足和频过程 QPM 条件,虽然抽运光波长 λ_p 也固

定,但通过调节控制光波长 λ_c ,可以实现转换空闲光(λ_i)的可调谐输出.当 λ_s 发生改变时,只要相应地改变 λ_p 使得和频过程 QPM 条件满足,并调节 λ_c 同样可以很方便地实现可调谐的全光波长转换.

3. 实验结果和分析

图 3 所示为双环腔结构可调谐全光波长转换器的输出光谱图,从中可以很清晰的看到基于 cSFG/DFG 的波长转换过程.脉冲信号光的中心波长为 1539.7 nm,为满足 SFG 过程的 QPM 条件,调节抽运光的激光波长为 1548.0 nm,产生的和频光与激光控制光发生 DFG 过程从而生成新的空闲光.当调节控制光的波长由 1565.8 nm 到 1558.5 nm 时,转换输出空闲光波长可以从 1522.9 nm 调谐至 1530.0 nm.

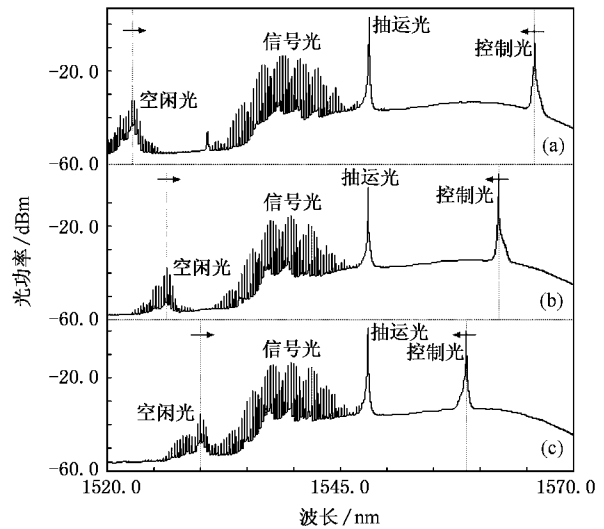


图 3 控制光不同激光波长下可调谐波长转换器的输出光谱图 ($\lambda_s = 1539.7 \text{ nm}$, $\lambda_p = 1548.0 \text{ nm}$) (a) $\lambda_c = 1565.8 \text{ nm}$, $\lambda_i = 1522.9 \text{ nm}$; (b) $\lambda_c = 1562.0 \text{ nm}$, $\lambda_i = 1526.4 \text{ nm}$; (c) $\lambda_c = 1558.5 \text{ nm}$, $\lambda_i = 1530.0 \text{ nm}$

当改变信号光中心波长为 1533.4 nm 时,如图 4 所示,抽运光的激光波长相应地调节为 1553.0 nm 以满足 SFG 过程的 QPM 条件.通过改变控制光的激光波长(1565.5 nm 到 1562.9 nm)可以实现转换空闲光的可调谐输出(1521.6 nm 到 1524.5 nm).

在图 3 和图 4 中,PPLN 输出端激光抽运光和控制光的光功率约为 3 dBm,测得的波长转换效率大于 -21 dB,转换输出空闲光具有和信号光相类似的光谱.图 5 进一步给出了图 3(a)对应的转换输出空

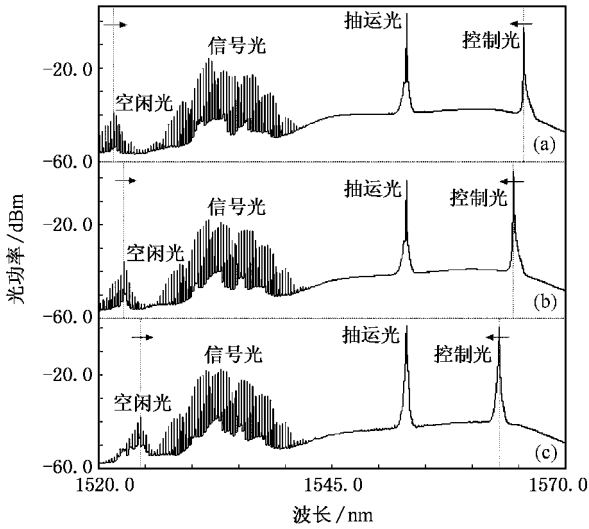


图 4 改变信号光波长时,控制光不同激励波长下可调谐波长转换器的输出光谱图($\lambda_S = 1533.4 \text{ nm}$, $\lambda_P = 1553.0 \text{ nm}$) (a) $\lambda_C = 1565.5 \text{ nm}$, $\lambda_i = 1521.6 \text{ nm}$; (b) $\lambda_C = 1564.4 \text{ nm}$, $\lambda_i = 1522.7 \text{ nm}$; (c) $\lambda_C = 1562.9 \text{ nm}$, $\lambda_i = 1524.5 \text{ nm}$

闲光脉冲(R1)和初始输入信号光脉冲(R2)的时域脉冲波形,空闲光完全复制了信号光的信息,显示出较好的转换效果。

值得注意的是,由于双环腔激光器中使用的 EDFA 在室温下是均匀增益介质,实验装置中连续激励的抽运光和控制光之间存在着增益竞争。实验中可以通过调节双环腔内的偏振控制器和两个可变衰减器来抑制这一增益竞争,从而产生稳定的激励抽运光和控制光。另外,皮秒脉冲可以看作是高速的

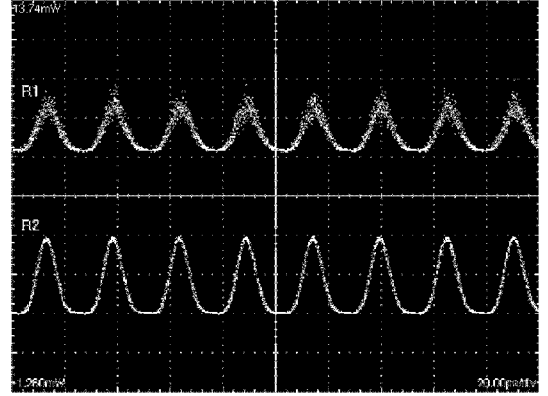


图 5 与图 3(a)对应的转换输出空闲光脉冲(R1)和初始输入信号光脉冲(R2)的波形

数据信号,因此,上述实验方案可以应用于 40 Gbit/s 及以上速率的高速全光波长转换中。

4. 结 论

利用 PPLN 光波导中的级联二阶非线性效应,首次提出了基于无源光波导双环腔结构的可调谐全光波长转换方案,无需外界注入抽运光和控制光。通过改变抽运光和控制光的激励波长,实验观察到了皮秒脉冲从信号光波长到空闲光波长可调谐的全光波长转换。本文提出的实验方案和得到的初步实验结果为其在未来的高速光通信系统中获得应用提供了潜在的可能性。

- [1] Yoo S J B 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 955
- [2] Chou M H, Brener I, Fejer M M, Chaban E E, Christman S B 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 653
- [3] Lin X C, Li R N, Yao A Y, Bi Y, Cui D F, Xu Z Y 2003 *Chin. Phys.* **12** 514
- [4] Zhang B G, Yao J Q, Ding X, Zhang H, Wang P, Xu D G, Yu G J, Zhang F 2004 *Chin. Phys.* **13** 364
- [5] Lin X C, Kong Y P, Zhang Y, Zhang J, Yao A Y, Bi Y, Sun Z P, Cui D F, Li R N, Wu L A, Xu Z Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 1042
- [6] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z 2006 *Opt. Lett.* **31** 1711
- [7] Xue T, Yu J, Yang T X, Ni W J, Li S C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 91 [in Chinese] [薛挺、于建、杨天新、倪文俊、李世忱 2002 物理学报 **51** 91]
- [8] Sun J Q, Liu W, Tian J, Kurz J R, Fejer M M 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1743
- [9] Sun J Q, Liu W 2003 *Opt. Commun.* **224** 125
- [10] Zhou B, Xu C Q, Chen B 2003 *J. Opt. Soc. Amer. B* **20** 846
- [11] Xue T, Yu J, Yang T X, Ni W J, Li S C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 152 [in Chinese] [薛挺、于建、杨天新、倪文俊、李世忱 2002 物理学报 **51** 1521]
- [12] Min Y H, Lee J H, Lee Y L, Grundkötter W, Quiring V, Sohler W 2003 in *Technical Digest of OFC2003 paper* FP4 767
- [13] Yamawaku J, Takada A, Yamazaki E, Tadanaga O, Miyazawa H, Asobe M 2003 in *Conf. Lasers and Electro-Optics* 1135
- [14] Wang J, Sun J Q, Luo C H, Sun Q Z 2005 *Opt. Express* **13** 7405
- [15] Lee Y L, Jung C, Noh Y C, Park M Y, Byeon C C, Ko D K, Lee J 2004 *Opt. Express* **12** 2649
- [16] Lee Y L, Yu B A, Jung C, Noh Y C, Lee J, Ko D K 2005 *Opt. Express* **13** 2988

Experimental investigation of a novel tunable all-optical wavelength converter with a double-ring cavity^{*}

Wang Jian[†] Sun Jun-Qiang Guo Yong-Juan Li Jing Sun Qi-Zhen

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics , School of Optoelectronic Science and Engineering ,
Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 ,China*)

(Received 9 March 2006 ; revised manuscript received 29 August 2006)

Abstract

Exploiting the cascaded sum- and difference-frequency generation in a periodically poled lithium niobate (PPLN) waveguide , a novel scheme of tunable all-optical wavelength conversion is proposed and experimentally demonstrated by use of a PPLN-based double-ring cavity configuration. Wavelength conversion of picosecond pulses from the signal wavelength to the idler wavelength is realized. A pulsed signal source with a repetition rate of 40 GHz and a pulse width of 1.57 ps is adopted. The pump and control waves are generated from the double-ring fiber laser. Therefore , no external continuous-wave (CW) light is required.

Keywords : all-optical wavelength converter , double-ring cavity , periodically poled lithium niobate , cascaded sum-and difference-frequency generation

PACC : 4265 4265K 4260D 4280S

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.60577006).

[†] E-mail :wjhuotoe@yahoo.com.cn