

# 基于光纤环形腔激光器的可调谐全光波长转换器的研究<sup>\*</sup>

郭永娟 孙军强<sup>†</sup> 王 健 李 婧

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2006 年 5 月 5 日收到, 2007 年 1 月 9 日收到修改稿)

在光纤环形腔激光器中引入周期极化反转铌酸锂(PPLN)光波导, 用该激光器产生的连续光作为抽运光和控制光, 使其与外加的信号光发生非线性效应实现可调谐波长转换. 介绍了基于准相位匹配的 PPLN 光波导中的和频与差频级联型全光波长转换器的基本原理. 对抽运光、信号光、控制光以及转换光的光功率随着 PPLN 光波导的变化进行了模拟, 还对转换效率随着转换光波长的变化进行了数值计算. 实验验证了该波长转换器的可调谐性.

关键词: 周期极化反转铌酸锂, 和频与差频, 可调谐全光波长转换, 光纤环形腔激光器

PACC: 4260D, 4265, 4265K, 4265M

## 1. 引 言

光时分复用技术和光波分复用(OWDM)技术是下一代全光通信光网络中集中研究的技术, 其中 OWDM 是指在一根光纤中同时传输多路具有不同波长的光信号, 且各波长所携带的信息是相互独立的. OWDM 可以充分挖掘光纤的巨大带宽资源, 扩充通信容量. 而波长转换器则是 OWDM 设备中的关键器件, 它能实现一个波长的光载波信息到另外一个波长的光载波信息的复制. 为了解决光电型波长转换的“电子瓶颈”效应, 全光波长转换器近年来一直是国内外研究的一个热点<sup>[1-8]</sup>. 本文在光纤环形腔激光器中引入准相位匹配(QPM)的周期极化反转铌酸锂(PPLN)光波导, 通过 PPLN 中的二阶非线性效应来实现全光波长转换. PPLN 材料中的二阶非线性效应有和频(SFG)、倍频(SHG)与差频(DFG), 本文主要讨论了基于 SFG 与 DFG 级联型(SFG + DFG)全光波长转换器的基本原理. 在信号光是脉冲光而抽运光和控制光是连续光的情况下, 模拟计算了各光场在 PPLN 光波导中光功率的变化情况以及转换效率随着转换光波长的变化. 通过调节光纤环形腔激光器中产生的两个可调抽运光和控制光, 分

别在信号光波长不变和转换光波长不变的情况下实验验证该波长转换器的可调谐性.

## 2. 理论分析及数值模拟

基于 PPLN 的 SFG + DFG 波长转换中, 并不是让两个抽运光发生 SFG 效应<sup>[1-3]</sup>, 而是信号光波长  $\lambda_s$  和其中一束抽运光波长  $\lambda_p$  满足 SFG 过程的 QPM 条件, 发生 SFG 效应, 产生波长为  $\lambda_{sf}$  的和频光, 且满足<sup>[6]</sup>

$$1/\lambda_{sf} = 1/\lambda_p + 1/\lambda_s. \quad (1)$$

波长为  $\lambda_{sf}$  的和频光同时与波长为  $\lambda_c$  控制光(另一束抽运光)发生 DFG 效应, 产生波长为  $\lambda_i$  的差频光(即转换光), 实现波长转换.  $\lambda_i$  和  $\lambda_c$ ,  $\lambda_{sf}$  满足<sup>[5]</sup>

$$1/\lambda_i = 1/\lambda_{sf} - 1/\lambda_c. \quad (2)$$

SFG 过程和 DFG 过程分别满足能量守恒. 信号光和抽运光在 SFG 过程中将能量逐渐转移到和频光中去, 使得信号光和抽运光功率随着在 PPLN 中的传输逐渐减小, 而由信号光和抽运光 SFG 产生的和频光与控制光发生 DFG 效应, 和频光的能量逐渐转移到控制光和差频光中, 使得控制光和差频光的能量随着 PPLN 长度的增加而不断地增大. 该方案实现波长转换的耦合波方程<sup>[5,7]</sup>为

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60177015, 60577006)和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-04-0694)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A_p}{\partial Z} + \frac{1}{V_{gp}} \frac{\partial A_p}{\partial t} - j \frac{\beta_p''}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} &= -j \frac{\lambda_{sf}}{\lambda_p} \kappa_{sf}^* A_{sf} A_s^* \exp(-j\Delta\beta_{sf}Z), \\
 \frac{\partial A_s}{\partial Z} + \frac{1}{V_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} - j \frac{\beta_s''}{2} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} &= -j \frac{\lambda_{sf}}{\lambda_s} \kappa_{sf}^* A_{sf} A_p^* \exp(-j\Delta\beta_{sf}Z), \\
 \frac{\partial A_{sf}}{\partial Z} + \frac{1}{V_{gsf}} \frac{\partial A_{sf}}{\partial t} - j \frac{\beta_{sf}''}{2} \frac{\partial^2 A_{sf}}{\partial t^2} &= -j \kappa_{sf} A_p A_s \exp(j\Delta\beta_{sf}Z) - j \kappa_{df} A_c A_i \exp(j\Delta\beta_{df}Z), \\
 \frac{\partial A_c}{\partial Z} + \frac{1}{V_{gc}} \frac{\partial A_c}{\partial t} - j \frac{\beta_c''}{2} \frac{\partial^2 A_c}{\partial t^2} &= -j \frac{\lambda_{sf}}{\lambda_c} \kappa_{df}^* A_{sf} A_i^* \exp(-j\Delta\beta_{df}Z), \\
 \frac{\partial A_i}{\partial Z} + \frac{1}{V_{gi}} \frac{\partial A_i}{\partial t} - j \frac{\beta_i''}{2} \frac{\partial^2 A_i}{\partial t^2} &= -j \frac{\lambda_{sf}}{\lambda_i} \kappa_{df}^* A_{sf} A_c^* \exp(-j\Delta\beta_{df}Z).
 \end{aligned} \quad (3)$$

这里  $A_m$ 、 $\lambda_m$ 、 $V_{gm}$  和  $\beta_m''$  ( $m = p, s, sf, c, i$ ) 分别为抽运光、信号光、和频光、控制光及差频光的光功率、波长、群速度和群速度色散,  $\Delta\beta_n$  和  $\kappa_n$  ( $n = sf, df$ ) 分别为 SFG 过程和 DFG 过程的波矢失配量和耦合系数. 同时该方案实现波长转换还有很好的可调谐性<sup>[5]</sup>, 可以通过改变  $\lambda_p$  使其与  $\lambda_s$  满足 QPM 条件. 还可以通过改变  $\lambda_c$  来实现对  $\lambda_i$  的控制, 将信息转移到空闲的波段上去.

数值计算中, PPLN 波导的 QPM 周期取为 14.7  $\mu\text{m}$ , 长度为 50 mm, 抽运光和控制光均为功率 100 mW (即 20 dBm) 的连续光, 而信号光为 40 GHz 的双曲正割脉冲, 脉冲宽度为 5 ps, 峰值功率为 1 mW (即 0 dBm).  $\lambda_c = 1580.0 \text{ nm}$ ,  $\lambda_p = 1565.4 \text{ nm}$ ,  $\lambda_s = 1529.0$

nm. 此时抽运光和信号光满足 SFG 过程的 QPM 条件, 即 SFG 过程的波矢失配量  $\Delta k_{sf} = 0$ , 抽运光与信号光产生 SFG 效应得到和频光,  $\lambda_{sf} = 0.7737 \mu\text{m}$ . 同时  $\lambda_{sf}$  与  $\lambda_c$  发生 DFG 效应产生差频光, 即转换光.

图 1 为控制光、抽运光、信号光以及转换光的三维波形图, 其中  $L$  为光波导长度,  $t$  为时间,  $P$  为光功率. 从图 1 可以看出, 抽运光和信号光在 PPLN 波导中传输时, 由于不断地发生 SFG 效应, 产生和频光, 使得抽运光和信号光的光功率不断地减小. 和频光与控制光发生 DFG 效应, 和频光的能量耦合到控制光和差频光中, 使得控制光和差频光的光功率不断增大. 同时差频光继承了信号光的信息, 实现了波长转换.

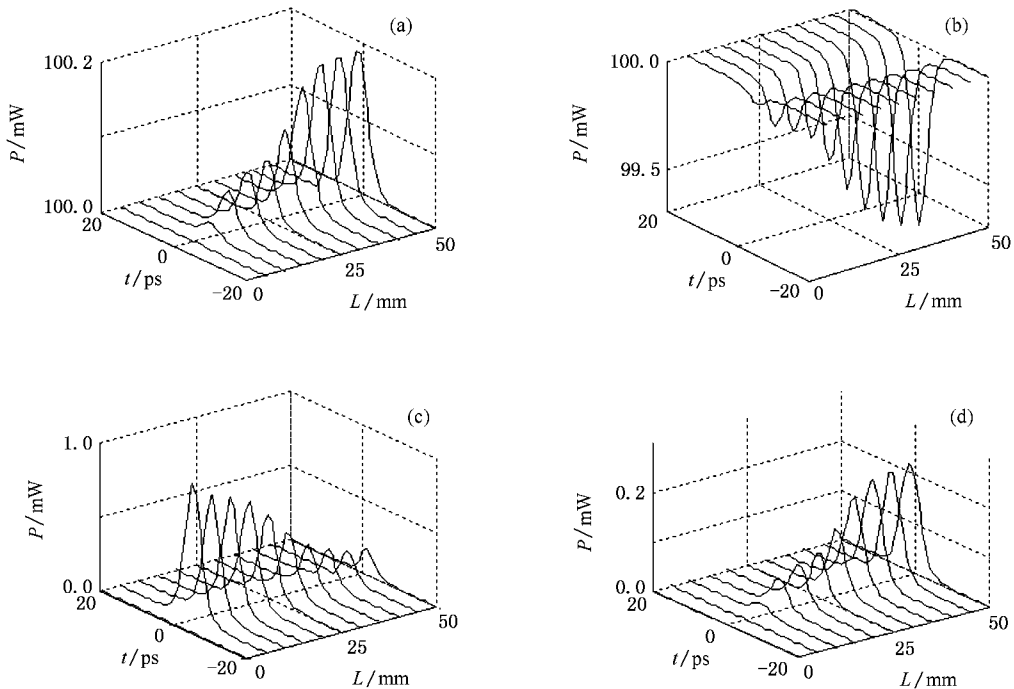


图 1 三维波形图 (a) 控制光, (b) 抽运光, (c) 信号光, (d) 转换光

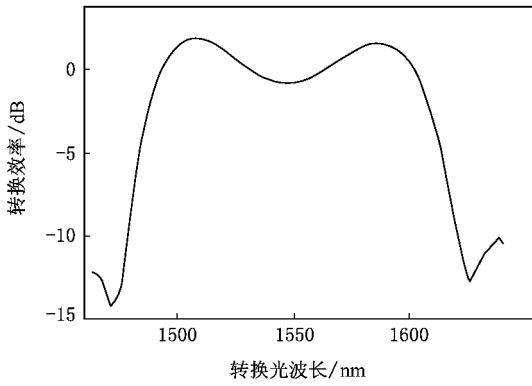


图 2 转换效率随转换光波长的变化曲线

另外,在  $\lambda_s$  和  $\lambda_p$  保持不变,改变  $\lambda_c$  (相应的转换光波长也会改变,因为  $\lambda_c$  和  $\lambda_i$  满足  $1/\lambda_i = 1/\lambda_{st} - 1/\lambda_c$ ) 时,对转换效率进行了数值模拟.如图 2 所示,  $\lambda_i$  在 1500—1600 nm 范围内转换效率大于 -1 dB,因此当节点处空闲光波长在 1500—1600 nm 范围内,适当选择  $\lambda_c$  由 SFG + DFG 波长转换器来实现信息从信号光到差频光的复制.  $\lambda_i$  的调谐范围大

于 100 nm,覆盖了 1500—1600 nm 波段.

### 3. 实验结果

基于光纤环形腔激光器的可调谐波长转换的实验装置如图 3 所示:由饱和输出功率为 30 dBm 的掺铒光纤放大器 EDFA、40 dB 小信号增益的高功率放

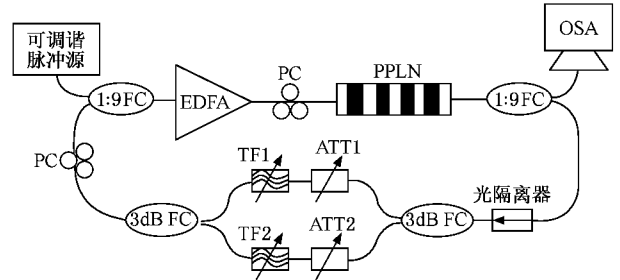


图 3 基于光纤环形腔激光器的可调谐波长转换的实验装置示意图

大器和 PPLN 光波导 (长度为 50 mm、宽度为  $8 \mu\text{m}$ 、深度为 0.6 nm, QPM 周期为  $14.7 \mu\text{m}$ ) 以及偏振控制器

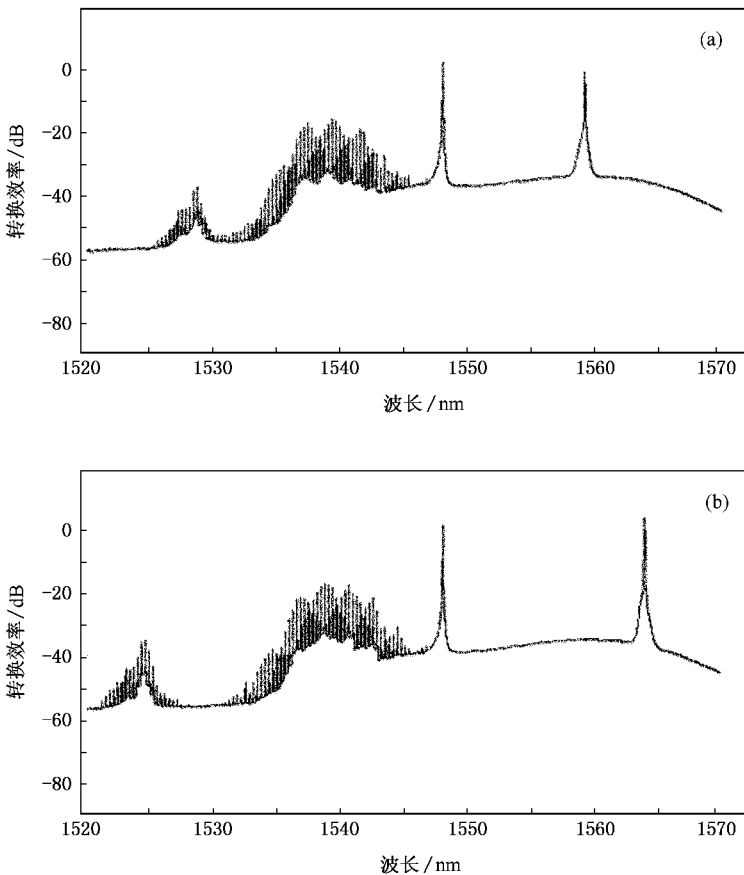


图 4 控制光波长不同时转换光波长的改变 (a)控制光波长为 1559.2 nm (b)控制光波长为 1563.9 nm

PC、耦合器 FC、可调衰减器 ATT、可调窄带滤波器 TF 组成环形腔激光器。由该环形腔激光器产生波长转换所需的抽运光和控制光。40 GHz 高重复频率、脉冲宽度小于 2 ps、波长可调的锁模超短光脉冲光源经耦合器耦合进入环形腔激光器,光谱分析仪 OSA 的最高分辨率为 0.05 nm,由 PC 从环形腔中分出来的光进入到 OSA。

通过调节两个可调窄带滤波器来改变抽运光和控制光的波长,调节可调衰减器来控制抽运光和控制光以平衡 EDFA 中的增益竞争,使得它们在经 EDFA 放大后的光功率相近。经过 EDFA 放大后的抽运光、控制光与脉冲信号光一起耦合进入 PPLN 光波导中。脉冲信号光中心波长  $\lambda_s = 1539.7$  nm 和连续抽运光波长  $\lambda_p = 1548.0$  nm 满足 SFG 过程 QPM 条件,发生 SFG 效应,产生  $\lambda_{sf}$ 。同时,和频光与控制光发生 DFG 效应,产生差频光,将信号光的信息转换到空闲波长上,实现波长转换。图 4 所示为  $\lambda_s$  和  $\lambda_p$  保持不变,通过调节  $\lambda_c$  来改变  $\lambda_i$ 。 $\lambda_c$  从 1559.2 nm

调节到 1563.9 nm 时,  $\lambda_i$  从 1528.8 nm 变化到 1524.7 nm,其转换效率分别是 -20.78 和 -18.24 dB。实验得到的转换效率远小于模拟中得到的转换效率,主要的原因有:PPLN 的端面反射和其中的传输损耗;偏振控制器只允许某个反向的偏振光通过,使得光功率减小,数值模拟中 SFG 过程的波矢失配量  $\Delta k_{sf} = 0$  而实验中却很难做到。同时,PPLN 晶体的温度以及 QPM 周期等对转换效率都有影响<sup>[9]</sup>。由于在理论模拟中没有考虑 PPLN 及偏振控制器的损耗,因此实验得到的转换效率较模拟结果要小。

另外,对于不同的  $\lambda_s$ ,可以通过调节  $\lambda_p$  使得信号光与抽运光满足 SFG 过程的 QPM 条件,即 SFG 过程的波矢失配量  $\Delta k_{sf} = 0$ 。图 5 是在  $\lambda_c$  和  $\lambda_i$  保持不变,当  $\lambda_s$  不同时,调节  $\lambda_p$  而得到波长转换的实验结果。从图 5 可以看出,在信号光中心波长分别在 1538.0 和 1536.0 nm 时,  $\lambda_p$  分别为 1550 和 1552.2 nm,而  $\lambda_c$  和  $\lambda_i$  分别为 1523.5 和 1565.5 nm,此时转换效率分别为 -21.51 和 -24.11 dB。

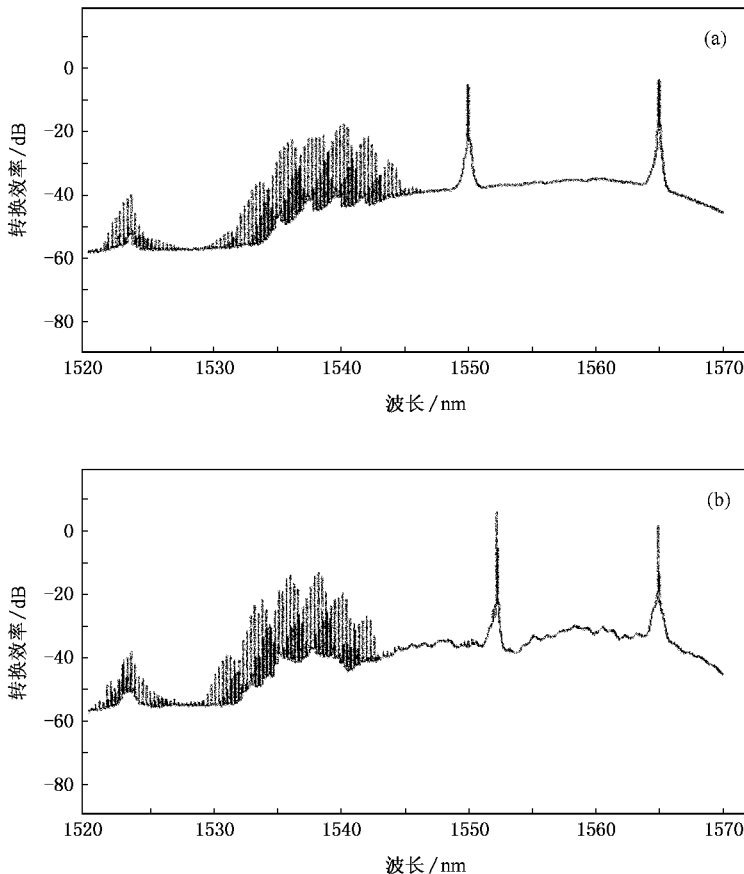


图 5 不同信号光波长的波长转换结果 (a) 抽运光波长为 1550.0 nm (b) 抽运光波长为 1552.2 nm

从以上模拟和实验结果可以看出,该波长转换器可以灵活地实现波长转换.对 S 波段和 C 波段的信号光都可以实现波长转换,而且还具有很好的调谐能力.对于不同波长的信号光,可以通过调节  $\lambda_p$  来满足 SFG 过程的 QPM 条件,而对于空闲光波长不同时,则可以通过调节控制光实现将信号光所携带的信息复制到空闲光上.

## 4. 结 论

在光纤环形腔激光器中引入 PPLN,通过调节环

形腔中的可调滤波器选择适当的  $\lambda_p$  和  $\lambda_c$ ,从而实现波长转换的可调节性.对基于 PPLN 光波导的 SFG + DFG 全光波长转换器的波长转换的研究表明:该波长转换器具有很强的调谐能力,对于转换光有很宽的转换带宽,在 1500—1600 nm 范围内都可以用该波长转换器实现.理论上的转换效率大于 -1 dB,实验得到的转换效率均在 -20 dB 左右.对于固定波长的信号光,可以通过调谐  $\lambda_p$  使得信号光波长  $\lambda_s$  和抽运光波长  $\lambda_p$  满足 SFG 过程的 QPM 条件,实现波长转换.

- [1] Wang J, Sun J Q, Luo C H, Sun Q Z 2005 *Opt. Express* **13** 7405
- [2] Wang J, Sun J, Li J, Guo Y 2006 *Electron. Lett.* **42** 236
- [3] Chen B, Xu C Q 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 256
- [4] Luo Y F, Chen Y L, Yuan J W, Guo J, Zhang W L, Chen S L, Huang Z H, Zhang G Y, Zhang B G, Lu Y, Ding X, Yao J Q 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 651 (in Chinese) [罗勇锋、陈云琳、袁建伟、郭娟、张万林、陈绍林、黄自恒、张光寅、张百钢、路洋、丁欣、姚建铨 2005 光学学报 **25** 651]
- [5] 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]
- [6] Chen Y L, Guo J, Liu X J, Lou C B, Chen S L, Xu J J, Zhang W L, Kong Y F, Zhang G Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 156 (in

Chinese) [陈云琳、郭娟、刘晓娟、楼慈波、陈绍林、许京军、张万林、孔勇发、张光寅 2004 物理学报 **53** 156]

- [7] Chen Y L, Yuan J W, Yan W G, Zhou B B, Luo Y F, Guo J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2079 (in Chinese) [陈云琳、袁建伟、闫卫国、周斌斌、罗勇锋、郭娟 2005 物理学报 **54** 2079]
- [8] Zhang B G, Yao J Q, Ding X, Zhang H, Wang P, Xu D G, Yu G J, Zhang F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 364 (in Chinese) [张百钢、姚建铨、丁欣、张浩、王鹏、徐德刚、禹国俊、张帆 2004 物理学报 **53** 364]
- [9] Xue T, Yu J, Yang T X, Ni W J, Li S C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 565 (in Chinese) [薛挺、于建、杨天新、倪文俊、李世忱 2002 物理学报 **51** 565]

# Tunable all-optical wavelength conversion based on fiber ring lasers<sup>\*</sup>

Guo Yong-Juan Sun Jun-Qiang<sup>†</sup> Wang Jian Li Jing

(*Institute of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 5 May 2006 ; revised manuscript received 9 January 2007)

## Abstract

Introducing a periodically poled  $\text{LiNbO}_3$  (PPLN) waveguide in fiber ring lasers, tunable wavelength conversion has been realized by the nonlinear interactions between the launched signals and the pump and control waves generated through the fiber ring lasers. The principle of all-optical wavelength conversion based on the cascaded sum- and difference-frequency generation in the quasi-phase-matched PPLN waveguide is introduced in the article. The evolution of the power of the pump, the signal, the control and the converted waves along the PPLN waveguide has been numerically simulated respectively. The dependence of the conversion efficiency on the wavelength of the converted wave was calculated. Finally, the tunability of the wavelength conversion was experimentally verified.

**Keywords** : periodically poled  $\text{LiNbO}_3$ , cascaded sum- and difference-generation, tunable all-optical wavelength converter, fiber ring laser

**PACC** : 4260D, 4265, 4265K, 4265M

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60177015, 60577006) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-04-0694).

<sup>†</sup> E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn