

文章编号: 0258-7025(2004)07-0777-03

# 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

朱晓峥<sup>1</sup>, 周 军<sup>1</sup>, 楼祺洪<sup>1</sup>, 董景星<sup>1</sup>, 魏运荣<sup>1</sup>, 陈险峰<sup>2</sup>, 夏宇兴<sup>2</sup>, 陈理军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

**摘要** 将周期性极化晶体和双包层光纤激光相结合获得绿光激光输出, 是实现高光束质量、全固化、小型化、高效率绿光激光器的一个非常有前途的方向。采用周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)光栅周期 6.5  $\mu\text{m}$ , 长 20 mm, 宽 5 mm, 厚 0.5 mm, 对种子光注入式掺 Yb 双包层光纤激光器的准连续输出进行了倍频。研究了倍频光功率和转换效率随抽运光功率的变化关系, 保持 PPLN 的控制温度为 193.1 $^{\circ}\text{C}$ , 在抽运功率为 650 mW 时, 得到 6.7% 的最高谐波转换效率, 在抽运功率为 970 mW 时, 得到了 59 mW 的最高绿光功率输出。

**关键词** 非线性光学; 倍频; 周期性极化铌酸锂晶体; 双包层光纤激光

**中图分类号** TN 248.1; O 437 **文献标识码** A

## 59 mW Green Light Second Harmonic Generation of Quasi-CW Double-Cladding Fiber Laser in Periodically Poled Lithium Niobate

ZHU Xiao-zheng<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>1</sup>, LOU Qi-hong<sup>1</sup>, DONG Jing-xing<sup>1</sup>,  
WEI Yun-rong<sup>1</sup>, CHEN Xian-feng<sup>2</sup>, XIA Yu-xing<sup>2</sup>, CHEN Li-jun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** The combination of the double-cladding fiber laser and the periodically poled material provides a compact and high efficiency approach for wavelength conversion with high beam quality. Green laser source is demonstrated using a combination of laser-diode-seeded Yb-doped double-cladding fiber laser and quasi-phase-matched second harmonic generation in periodically poled lithium niobate (PPLN). The uncoated 20-mm-long, 5-mm-wide, 0.5-mm-thick PPLN has 6.5  $\mu\text{m}$  poling period and is temperature stabilized at 193.1 $^{\circ}\text{C}$ . The 6.7% conversion efficiency and the 59 mW green light power are achieved with the pump fundamental average power of 650 mW and 970 mW, respectively.

**Key words** nonlinear optics; frequency doubling; periodically poled LiNbO<sub>3</sub>; double-cladding fiber laser

### 1 引 言

随着包层抽运技术的发展, 双包层光纤激光器能在很宽的频谱范围内提供高功率, 大有取代半导体激光抽运固体激光器(DPSSL)的趋势。固体激光器技术已经相对成熟, 但是在小型化、柔性化方面光纤激光器有着固体激光器所不能比拟的优势, 更

重要的是光纤激光器更容易获得高光束质量的激光输出<sup>[1]</sup>。近年来, 周期性极化晶体制作工艺的完善, 使得准相位匹配技术在非线性频率转换中的地位越来越重要<sup>[2,3]</sup>。准相位匹配技术就是: 周期性地改变晶体的自发极化符号, 重新安排相位, 从而充分利用晶体的二阶非线性极化张量中的最大张量达到高的非线性系数, 同时还避免了走离效应。准相位匹

收稿日期: 2003-04-21; 收到修改稿日期: 2003-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(60244005)、上海市光科技(036105034)和中国科学院知识创新工程资助项目。

作者简介: 朱晓峥(1976—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 从事固体激光的非线性频率变换研究。

E-mail: zhuxiaozheng95@tsinghua.org.cn

配技术还可以通过改变周期性极化晶体的光栅周期来对角度匹配无法实现倍频的波段进行倍频,在科学技术和激光应用方面有着广阔的前景。利用周期性极化晶体对光纤激光进行倍频实现绿光激光器,具有光纤激光器小型化、全固化等特点,同时能获得高转换效率的绿光输出<sup>[2,4~6]</sup>。

本文采用光栅周期为  $6.5 \mu\text{m}$  的周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)对准连续光纤激光输出进行倍频,获得了高转换效率的绿色激光。

## 2 实验装置

实验中采用的抽运源是 IPG 公司生产的种子注入掺 Yb 双包层脉冲光纤放大器,输出中心波长为  $1064\text{nm}$ ,重复频率为  $20\sim 100 \text{kHz}$  连续可调,谱线宽度约为  $6 \text{nm}$ ,输出功率为  $0\sim 10 \text{W}$  可调,光束直径约为  $10 \text{mm}$ 。采用的倍频晶体是上海交通大

学提供的光栅周期  $6.5 \mu\text{m}$ ,长  $20 \text{mm}$ ,宽  $5 \text{mm}$ ,厚  $0.5 \text{mm}$  的 PPLN 晶体。由于铌酸锂晶体的折射率随温度的变化而变化,PPLN 晶体对  $1064 \text{nm}$  的倍频温度响应带宽只有  $0.31^\circ\text{C}$ ,为了获得高的转换效率,把 PPLN 晶体放置在一个精密温度控制盒里,温度控制范围为  $30\sim 230^\circ\text{C}$ ,控制精度为  $0.1^\circ\text{C}$ 。实验装置如图 1 所示。抽运源输出的激光通过  $f=750 \text{mm}$  的透镜  $L_1$  和  $f=10 \text{mm}$  的透镜  $L_2$ ,组成缩束系统,将输出光束直径缩小到  $1 \text{mm}$  左右。由于输出激光的偏振态是随机的,而实验中所采用的 PPLN 晶体要求水平偏振,因此用偏振棱镜 PBS 进行起偏,使输出激光成为水平偏振。光束直径为  $1 \text{mm}$  的水平偏振的激光通过透镜  $L_3$  聚焦后,入射到 PPLN 晶体中,焦点在晶体中心位置,然后倍频光和剩余抽运光再通过透镜  $L_4$  准直后,由棱镜分开,最后得到绿光输出。实验中所用的透镜都为消色差双合透镜。

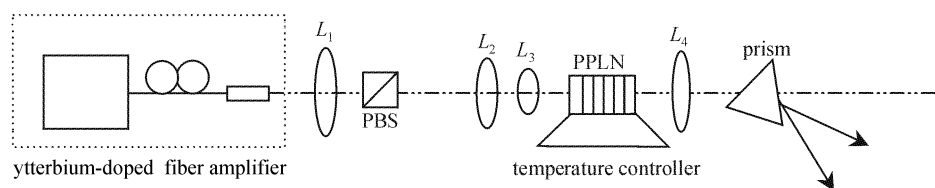


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental configuration

## 3 实验结果

为了获得最高的转换效率,首先必须确定 PPLN 晶体的温度。在抽运光强度不变的情况下,连续改变 PPLN 晶体的温度,并用功率计观察绿光的能量,发现当温度为  $193.1^\circ\text{C}$  时,出现了功率最大值,因此最佳匹配温度为  $193.1^\circ\text{C}$ 。

和普通非线性晶体倍频一样,倍频光的输出功率是输入基频光功率的函数,图 2 是二次谐波输出功率随基波输入功率的变化曲线。实验中采用棱镜分光,测得所用的棱镜组对绿光的损耗为  $17\%$ ,因此图 2 中的数据是修正以后的结果。当抽运功率为  $970 \text{mW}$  时,谐波功率达到  $59 \text{mW}$ ,重复频率为  $21.7 \text{kHz}$ 。考虑到 PPLN 晶体的损伤阈值比较低,为了保护晶体,实验中没有继续升高抽运功率。估计如果进一步增加抽运功率,输出谐波的能量还能提高,但是潜力已经不大了。图 3 给出了谐波转换效率和抽运功率的曲线,当谐波功率最高达  $59 \text{mW}$  时,转换效率只有  $6.1\%$ ,并不是最高的。最高的转

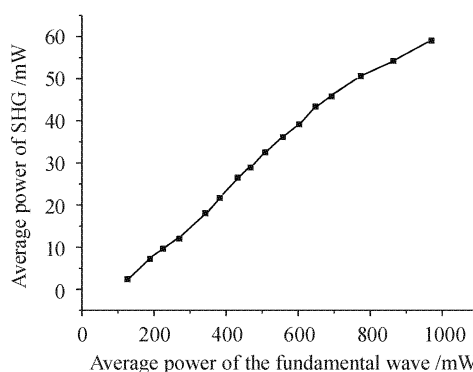


图 2 二次谐波输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Variation of the second harmonic power with average pump power

换效率是  $6.7\%$ ,出现在中等功率的时候,此时抽运功率为  $650 \text{mW}$ ,输出的谐波功率为  $43.5 \text{mW}$ 。最高的转换效率并没有出现在抽运功率最高的地方,这可能有两方面的原因:1) 实验中所采用的 PPLN 晶体两端都没有镀膜,后端面反射回来的二次谐波

光子将在晶体中会形成参量振荡,从而产生参量频率下转换,出现新波长的激光,波长在基波波长附近,这样就导致了二次谐波的输出功率减少,从而使二次谐波的转换效率降低。2) 出现的增益饱和现象。此外,实验中并没有考虑晶体的两端面对输出谐波的影响,因此晶体内部的谐波功率和转换效率都要比图 2 和图 3 高。

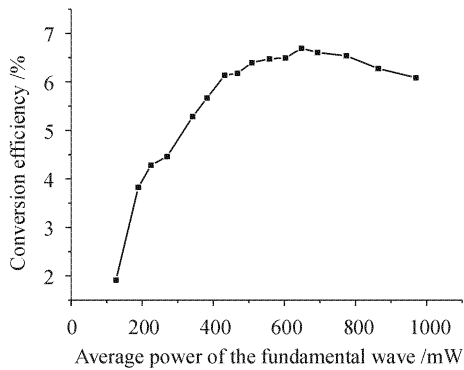


图 3 转换效率随抽运波长的变换曲线

Fig. 3 Dependence of second harmonic conversion efficiency on pump power

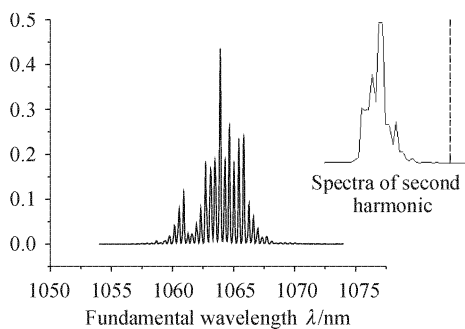


图 4 基波和谐波频谱

Fig. 4 Spectra of fundamental and second harmonic laser

实验中所得到的转换效率相对比较低,主要是因为实验中所用的抽运源是宽带多纵模的光纤激光器。输出频谱如图 4,抽运源的旁瓣具有很大一部分能量,参照图 4 中谐波的频谱可知,这些能量在三波耦合过程中是没有贡献的,也就是说只有中心波长附近三个纵模的能量参与了频率变换,而测量的是整个谱线的能量,所以实验中得到的转换效率相对比较低。图 4 的纵坐标为线性坐标。

## 4 结 论

利用 PPLN 晶体对光纤激光进行倍频得到了 59 mW 的绿光输出,最高转换效率为 6.7%。宽带多纵模的光纤激光将会影响谐波的转换效率,要获得高的转换效率需要单模窄带宽频率稳定性好的光纤激光<sup>[6]</sup>。此外,没有镀膜晶体端面不仅影响谐波能量的透过率,而且会形成参数振荡,导致谐波频率下转换,影响谐波的输出功率,所以在实验中要避免这种现象的出现。最好采用镀有增透膜的周期性极化晶体。

## 参 考 文 献

- 1 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. 20 W double-cladding fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):328  
楼祺洪,周 军,朱健强 等. 双包层光纤激光实现 20 W 激光输出[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4):328
- 2 Chen Yuping, Chen Xianfeng, Zeng Xianglong *et al.*. 18 mW CW green light generation by first order quasi-phase-matched frequency doubling in bluk periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4):399~401  
陈玉萍,陈险峰,曾祥龙 等. 一阶准相位匹配周期性极化铌酸锂倍频产生 18 mW 绿光连续输出[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4):399~401
- 3 Liang Xiaoyan, Hou Wei, Lü Junhua *et al.*. Low-threshold and wide tunable PPLN optical parametrical oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):10~12  
梁晓燕,侯 玮,吕军华 等. 低阈值宽调谐 PPLN 光参量振荡[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):10~12
- 4 M. A. Arbore, M. M. Fejer, M. E. Fermann *et al.*. Frequency doubling of femtosecond erbium-fiber soliton lasers in periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1):13~15
- 5 S. A. Guskov, S. Popov, S. V. Chernikov *et al.*. Second harmonic generation around 0.53 μm of seeded Yb fibre system in periodically-poled lithium niobate [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(14):1419~1420
- 6 P. A. Champert, S. V. Popov, J. R. Taylor. Highly efficient, variable pulse format, 770 nm source based on powerful seeded fibre amplifier and second-harmonic generation in periodically poled KTP [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(7):648~649
- 7 D. Taverner, P. Britton, P. G. R. Smith *et al.*. Highly efficient second-harmonic and sum-frequency generation of nanosecond pulse in a cascaded erbium-doped fiber; periodically poled lithium niobate source [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(3):162~164