

文章编号: 0253-2239(2004)10-1330-5

## 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\*

朱晓峥<sup>1,2</sup> 周 军<sup>1,2\*\*</sup> 楼祺洪<sup>1</sup> 董景星<sup>1</sup> 魏运荣<sup>1</sup> 陈险峰<sup>3</sup> 夏宇兴<sup>3</sup> 陈理军<sup>3</sup>

1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800  
2 中国科学院研究生院, 北京 100039  
3 上海交通大学应用物理系, 上海 200030

**摘要:** 双包层光纤激光器和非线性光学材料(如周期性极化的铌酸锂晶体, PPLN)相结合, 开辟了实用性非线性光学器件的一个新领域。研究了准相位匹配周期性极化反转铌酸锂晶体对宽带准连续光纤激光倍频的温度特性和频谱特性。在理论上, 从准相位匹配相位失配关系出发, 推导了晶体温度与抽运源中心波长的关系以及温度响应带宽, 并和已报道实验结果进行了比较, 二者符合得很好。此外, 还推导了倍频周期极化铌酸锂晶体对抽运基频光源的响应谱线带宽。在实验上, 采用长度 20 mm, 极化周期 6.5  $\mu\text{m}$ , 厚度 0.5 mm 的周期极化铌酸锂晶体光纤激光器准连续宽带输出进行了倍频, 获得了在不同控制温度下的倍频光光谱, 并对此进行了详细分析。

**关键词:** 激光技术; 周期极化铌酸锂; 光纤激光器; 倍频

中图分类号: TN722 文献标识码: A

## Experimental Investigation of Quasi-CW Frequency-Doubling of Broad Band Fiber Laser in Periodically Poled Lithium Niobate

Zhu Xiaozheng<sup>1,2</sup> Zhou Jun<sup>1,2</sup> Lou Qihong<sup>1</sup> Dong Jingxing<sup>1</sup>  
Wei Yunrong<sup>1</sup> Chen Xianfeng<sup>3</sup> Xia Yuxing<sup>3</sup> Chen Lijun<sup>3</sup>

1 Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800  
2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039  
3 Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

(Received 18 April 2003; received 6 February 2004)

**Abstract:** Developments in double clad fiber lasers, coupled with engineered nonlinear optical materials such as periodically poled lithium niobate (PPLN), are opening a way for a whole new class of practical nonlinear optical devices. Temperature characteristic and spectra characteristic of second harmonic generation (SHG) in PPLN using quasi-CW broad band fiber laser have been investigated. The central fundamental wavelength dependence of PPLN temperature and the temperature FWHM phase-matching bandwidth were theoretically studied. The fundamental wavelength FWHM phase-matching of PPLN was calculated too. The 20 mm long PPLN with 6.5  $\mu\text{m}$  poling period and 0.5 mm thick was used for doubling frequency of the quasi-CW broad fiber laser. The spectra of second harmonic at different temperature are achieved and discussed in detail.

**Key words:** laser techniques; periodically poled lithium niobate; fiber laser; doubling frequency

\* 国家自然科学基金重点基金(103341101)、上海市光科技专项(036105034)和中国科学院知识创新工程资助课题。

\*\* 通信联系人。E-mail: lzlx@263.net

收稿日期: 2003-04-18; 收到修改稿日期: 2004-02-06

## 1 引言

由于包层抽运技术的发明与光纤设计与制造特殊工艺的融合使得高功率光纤激光器得到了长足的发展,对它的研究与应用推广亦日趋活跃。随着高功率光纤激光器的出现,其应用不再局限于光纤通信网络,而向其他更为广阔的激光应用领域扩展<sup>[1,2]</sup>,诸如金属和非金属材料的加工与处理、激光雕刻、激光产品打标、激光焊接、焊缝清理、精密打孔、激光检测和测量、激光图形艺术成像、激光雷达系统、污染控制、传感技术和空间技术以及激光医学等等。

近年来,准相位匹配(QPM)倍频技术发展非常迅速。所谓的准相位匹配倍频技术,就是通过周期性的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,而且可以避免走离效应,最后获得较高的倍频转换效率<sup>[3]</sup>。在准相位匹配倍频技术中比较成熟的晶体有周期性极化的 LiNbO<sub>3</sub> (PPLN)、周期性极化的 KTP(PPKTP)和周期性极化的 LiTaO<sub>3</sub> (PPLT),这三种晶体各有优势:周期极化铌酸锂具有高的非线性系数,但是其破坏阈值比较低,难实现高功率输出;周期极化 LiTaO<sub>3</sub> (PPLT)具有较高的破坏阈值,但是其非线性系数比较低,因此可以实现高功率输出,但是转换效率比较差。

利用准相位匹配倍频技术对光纤激光进行倍频,实现倍频光输出的研究已经广泛展开<sup>[4]</sup>,但大部分研究限于高光束质量单模光纤激光。本文对多纵模的宽带准连续光纤激光在周期极化铌酸锂中的倍频特性进行了研究,主要研究了其温度特性和频谱特性,得出了与理论分析相一致的实验结果。

## 2 理论

普通非线性晶体倍频,由于存在折射率色散,使得基波和谐波在三波耦合过程中出现波矢失配,降低了倍频晶体的有效非线性系数,限制了倍频转换效率。准相位匹配则通过周期性调制非线性极化率的符号,使其在一个周期内正非线性极化率引起的波矢失配,和负非线性极化率引起的波矢失配相抵消,从而使谐波保持高效的非线性频率转换。调制的周期长度应为相干长度的偶数倍,因此周期由下式决定:

$$\Lambda_m = m\Lambda = 2ml_c = \frac{m\lambda}{2(n_{2\omega} - n_\omega)}, \quad (1)$$

$\Lambda$  为光栅周期, $m$  是准相位匹配的阶数, $n_\omega$  和  $n_{2\omega}$  分别为基频光和倍频光的折射率。铌酸锂晶体的折射率随温度变化明显,为了避免晶体低温时候的光折变损伤<sup>[5]</sup>,一般在较高的温度下设计光栅周期。铌酸锂晶体的折射率是晶体温度和光波波长的函数<sup>[6,7]</sup>:

$$n_c^2 = 5.35583 + 4.629 \times 10^{-7} F + \frac{0.1004 + 3.862 \times 10^{-8} F}{\lambda^2 - (0.20692 - 0.9 \times 10^{-8} F)^2} + \frac{100 + 2.657 \times 10^{-5} F}{\lambda^2 - 11.34927^2} - 1.5334 \times 10^{-2} \lambda^2, \quad (2)$$

$$n_o^2 = 4.9048 + \frac{0.11775 + 2.2314 \times 10^{-8} f}{\lambda^2 - (0.21802 - 2.9671 \times 10^{-8} F)^2} + 2.1429 \times 10^{-8} f - 0.027153 \lambda^2, \quad (3)$$

(2)式中  $F = (T - 24.5 \text{ }^\circ\text{C})(T + 570.82 \text{ }^\circ\text{C})$ , (3)式中,  $f = (T - 20 \text{ }^\circ\text{C})(T + 20 \text{ }^\circ\text{C} + 546 \text{ }^\circ\text{C})$ ,  $F$  和  $f$  是绝对温度的平方,单位是开尔文的平方。 $T$  是晶体的温度,单位是  $^\circ\text{C}$ 。 $\lambda$  是光波波长,单位是  $\mu\text{m}$ 。因此可以通过对周期极化铌酸锂晶体的温度控制,来调节晶体的折射率。

由三波耦合方程,可得出倍频光的输出功率为

$$I = \frac{32L^2 d_{33}^2}{n_\omega^2 n_{2\omega} \lambda_{2\omega} c \epsilon_0} |I_\omega|^2 \text{sinc}^2 \left( \frac{\Delta K L}{2} \right), \quad (4)$$

式中  $L$  为晶体长度, $d_{33}$  非线性系数, $\lambda_{2\omega}$  为倍频光波长, $c$  为光速, $\epsilon_0$  为真空中的介电常量, $I_\omega$  为基频光功率, $\Delta K$  是波矢失配量:

$$\Delta K = K_{2\omega} - 2K_\omega - \frac{2\pi}{\Lambda} = 2\pi \left( \frac{n_{2\omega}}{\lambda_{2\omega}} - \frac{2n_\omega}{\lambda_\omega} - \frac{1}{\Lambda} \right). \quad (5)$$

由于  $n_\omega$  和  $n_{2\omega}$  是波长和温度的函数,所以对于光栅周期一定的周期极化铌酸锂晶体,可以通过改变晶体温度,来调节周期极化铌酸锂倍频的中心波长。图 1 为在理想情况下, $\Lambda = 6.5 \mu\text{m}$ ,长度为 20 mm 的周期极化铌酸锂晶体在不同温度下所对应的基波中心波长。由于光栅周期在倍频过程中是一个非常灵敏的量,因此必须考虑温度对光栅周期变化的影响,在计算中周期极化铌酸锂晶体的膨胀系数为  $16.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ <sup>[8]</sup>。由计算可知当基波波长为  $1.054 \sim 1.068 \mu\text{m}$ ,温度变化范围为  $86.9 \sim 235.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,和文献

[9]给出的结果 100~240 °C 基本一致。

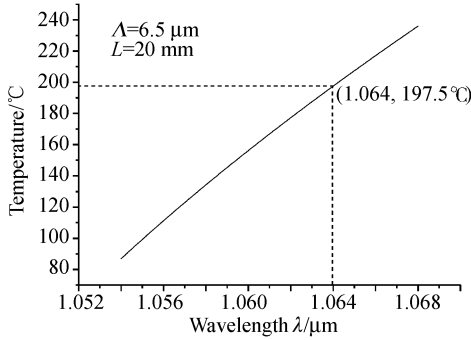


Fig. 1 Dependence of the temperature of PPLN on the fundamental wavelength

图 2 计算了  $\Lambda=6.5 \mu\text{m}$ , 长度为 20 mm 的周期极化铌酸锂晶体对基波波长  $1.064 \mu\text{m}$  的激光的温度响应曲线, 中心温度为  $197.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 温度半峰全宽为  $0.98 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 3 计算了该晶体在  $197.5 \text{ }^\circ\text{C}$  时的, 波长响应曲线, 响应频谱半宽度为  $0.15 \text{ nm}$ , 和文献[9]给的结果  $0.12 \text{ nm}$  相当。图 1、图 2 和图 3 的计算都限于理想条件下的 I 类匹配即  $(e-e \rightarrow e)$ 。

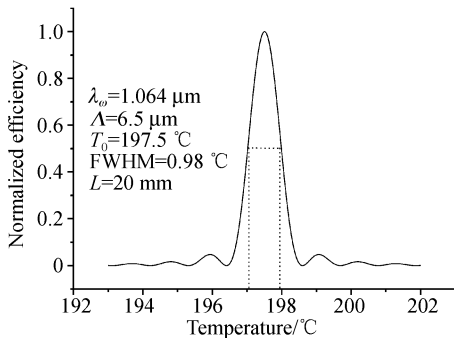


Fig. 2 Dependence of the second harmonic normalized efficiency on temperature of the PPLN

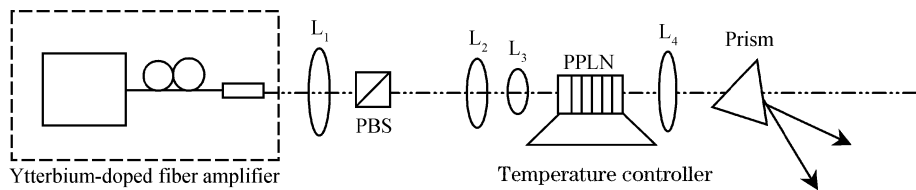


Fig. 4 Schematic diagram of experimental configuration

### 4 实验结果和分析

在以往的周期极化铌酸锂倍频实验中, 一般采用谱线宽度小于  $1 \text{ nm}$  的单模激光器作为抽运源, 研究其特性<sup>[9,10]</sup>, 本文中采用的抽运源为宽带多纵模输出的种子注入掺 Yb 双包层光纤脉冲放大器, 输出频谱如图 5。图 5 的右上角给出了  $197 \text{ }^\circ\text{C}$  是倍频光的频谱, 对比两频谱图可以发现实验中二次谐

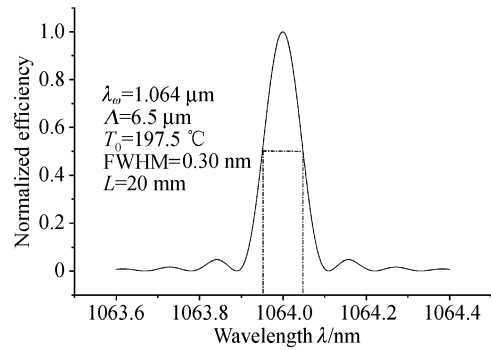


Fig. 3 Dependence of the second harmonic normalized efficiency on fundamental wavelength

### 3 实验装置

实验装置如图 4 所示: 抽运源是种子注入掺 Yb 双包层光纤脉冲放大器, 输出中心波长为  $1.064 \mu\text{m}$ , 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, 光斑约为  $10 \text{ mm}$ 。由于输出光光束直径比较大, 所以采用  $f=750 \text{ mm}$  的透镜  $L_1$  和  $f=10 \text{ mm}$  的透镜  $L_2$ , 组成缩束系统, 把输出光光束直径缩小至  $1 \text{ mm}$  左右, 因为输出激光的偏振态是随机的, 因此用偏振棱镜 (PBS) 进行起偏, 使其成为水平偏振。光束直径  $1 \text{ mm}$  的水平偏振激光输出通过透镜  $L_3$  聚焦后, 入射到周期极化铌酸锂晶体中, 焦点在晶体中心位置。周期极化铌酸锂晶体放置在一个精密温度控制盒里, 温度控制范围为  $30 \sim 230 \text{ }^\circ\text{C}$ , 控制精度为  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。周期极化铌酸锂长  $20 \text{ mm}$ , 厚  $0.5 \text{ mm}$ , 光栅周期为  $6.5 \mu\text{m}$ 。然后倍频光再通过透镜  $L_4$  准直后, 由棱镜分开剩余抽运光和倍频光。实验中所用的透镜都为消色差双合透镜。

波的响应谱线有  $2 \sim 3$  个峰值, 因此二次谐波的响应谱宽应该是  $2 \sim 3$  个纵模宽度, 这远远大于理论计算的结果  $0.15 \text{ nm}$ , 也远大于文献[9]中的结果  $0.12 \text{ nm}$ 。由于实验中倍频光的频谱是采用光栅摄谱仪观测, 然后用 CCD 进行记录, 因此不能给出精确的数字结果, 但是并不影响分析。由倍频光的频谱图可以看出, 二次谐波的响应谱线宽度大约为  $3$

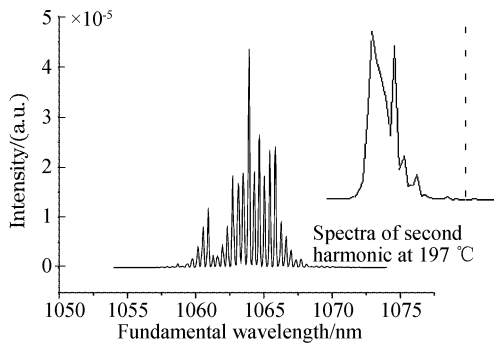


Fig. 5 Spectra of fundamental-wave laser

个基频光的纵模宽度,每个纵模的全宽大约为 0.4 nm,所以响应谱宽大约为 1.2 nm。由于实验中使用的是宽带光源,因此温度在相当大的范围调节都能有绿光输出,只是输出谱线有所不同。图 6 给出了不同温度时,二次谐波的频谱图。图 6 中右侧的虚线是为了便于比较,设定的基准线纵坐标表示强度。由图 6 可以看出:每一个频谱图都包含 2~3 个峰,而且随着温度的升高,左边的峰值开始下降,而右边的峰值开始上升。而且整个谱线的包络也向右移动,由此可见随着温度的升高,二次谐波的谱线向长波方向移动,这和图 1 的计算结果相一致。当温度升高到一定的时候,输出绿光的功率开始下降,这是因为该温度所对应的中心波长已经远离输入的基波中心波长,其相对应的纵模能量比较小,所以倍频的能量就比较小。继续升高温度,倍频光就几乎探测不到。

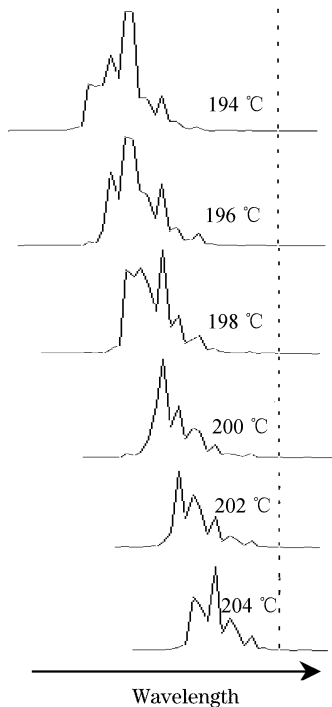


Fig. 6 Spectra of second harmonic at different temperature

实验中测量的谱线响应宽度比理论计算的要多,这说明所采用的理论还需要修正。我们所采用的计算都是在理想状态下进行的和实际实验情况有一定的差异,因此分析可能扩宽谱线响应宽度的因素有:晶体温度分布的不均匀性;光栅周期的加工误差等。作者曾经计算过如果光栅周期从 6.5  $\mu\text{m}$  变为 6.51  $\mu\text{m}$  会导致对应的中心波长 0.521 nm 的频移。如果所采用的光栅周期加工精度为 0.01  $\mu\text{m}$ ,那么就会导致二次谐波的响应谱线加宽,而温度分布不均匀性的影响远小于光栅周期加工精度对谱线扩宽的影响。基于上述分析作者提出了一种修正理论的方法:忽略晶体温度分布不均匀的影响,假设该晶体的光栅周期是一个以 6.5  $\mu\text{m}$  为中心的正态分布,那么对其进行加权积分,然后得到其相应的响应曲线,最后就可以分析实际晶体的谱线响应带宽。

在基频光功率为 225 mW 的条件下,研究了倍频光功率和晶体温度的关系,当温度为 193.1  $^{\circ}\text{C}$  时,得到了 8.2 mW 的绿光输出。图 7 给出了倍频光功率随温度的变化情况:随着温度的变化,分别在 193.1  $^{\circ}\text{C}$ 、197.2  $^{\circ}\text{C}$  和 200.8  $^{\circ}\text{C}$  出现三个峰值。图 2 中我们计算了中心波长 1064 nm 所对应的温度为 197.5  $^{\circ}\text{C}$  和实验中的 197.2  $^{\circ}\text{C}$  基本一致。比理论值有点偏低,可能是抽运源的中心波长并不是非常精确,从抽运源的频谱图 5 上可以知道,该中心波长稍微有点偏低。在 193.1  $^{\circ}\text{C}$  和 200.8  $^{\circ}\text{C}$  分别出现峰值,是因为实验中所用的抽运源是多纵模宽带激光的缘故。在上面的实验中,二次谐波的响应谱宽大约是两个纵模宽度。对照图 5,193.1  $^{\circ}\text{C}$  对应的峰是由抽运中心波长及其左侧相邻的两个纵模共同作用的结果,200.8  $^{\circ}\text{C}$  则是由抽运中心波长及其右侧相邻的两个纵模共同作用的结果,而 197.2  $^{\circ}\text{C}$  所对应的峰值,则是由抽运中心波长及其两侧纵模共同作用的结果。

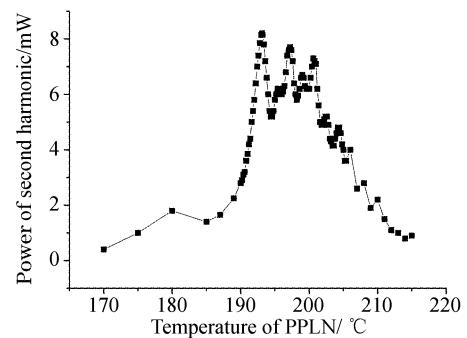


Fig. 7 The dependence of the energy of second harmonic on PPLN temperature

**结论** 通过理论分析和实际实验,宽带准连续光纤激光在周期极化铌酸锂倍频过程中,晶体温度、抽运源的模式和带宽是影响倍频过程的重要因素。本文在晶体温度对倍频过程影响的研究中,理论计算和实验结果一致。但是在周期极化铌酸锂倍频过程中对抽运源的响应带宽的研究中,理论计算的带宽和实验结果相差比较大,可能是因为我们的计算是在理想状态下进行的,而实际上晶体的参量和理想状态有一定差距的,因此需要进一步完善计算模型,这一步工作正在进行中。

### 参 考 文 献

- 1 Zhou Jun, Lou Qihong, Li Tiejun *et al.*. A 4.9 W CW ytterbium-doped double-cladding fiber laser and its output characteristics. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(4): 476~479 (in Chinese)
- 2 Qihong Lou, Jun Zhou, Jianqiang Zhu *et al.*. 50-watt ytterbium-doped double-clad fiber laser. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 559~560
- 3 Liang Xiaoyan, Hou Wei, Lu Junhua *et al.*. Lowthreshold wide tunable PPLN optical parametrical oscillator. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(1): 10~12 (in Chinese)
- 4 Taverner D, Britton P, Smith P G R *et al.*. Highly efficient second-harmonic and sum-frequency generation of nanosecond pulse in a cascaded erbium-doped fiber; periodically poled lithium niobate source. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(3): 162~164
- 5 Wang Zhijian, Yang Jiexiang. The study of photorefractive effect in LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>. *J. Anhui University (Natural Science Edition)* (安徽大学学报·自然科学版), 1997, **21**(4): 27~33 (in Chinese)
- 6 Jundt D N. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction,  $n_e$ , in congruent Lithium niobate. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1553~1555
- 7 Edwards G J, Lawrence M. A temperature-dependent dispersion equation for congruently grown Lithium niobate. *Opt. Quant. Electron.*, 1984, **16**(4): 373~374
- 8 Sang Mei, Xue Ting, Yu Jian *et al.*. Temperature dependence of the second harmonic generation in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> crystal. *J. Optoelectronics & Laser* (光电子·激光), 2002, **14**(4): 343~348 (in Chinese)
- 9 Guskov S A, Popov S, Chernikov S V *et al.*. Second harmonic generation around 0.53  $\mu\text{m}$  of seeded Yb fibre system in periodically poled lithium niobate. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(34): 1419~1420
- 10 Champert P A, Popov S V, Taylor J R. Highly, variable pulse format 770 nm source based on powerful seeded generation in periodically poled KTP. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(7): 648~649