

文章编号: 0253-2239(2006)04-0567-4

半导体激光直接倍频的 488nm 蓝光激光器*

董景星 楼祺洪 成序三 凌磊 魏运荣 叶震寰 周军

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 利用波导型准相位匹配周期极化反转铌酸锂(PPLN)晶体直接倍频波长为 976 nm 的连续半导体激光二极管,在最佳晶体工作温度(28 °C)下,获得了波长为 488 nm 的连续蓝光输出,最大输出功率大于 20 mW。所用的晶体尺寸为 8 mm×1.4 mm×1 mm,波导截面为 4.5 μm×3.5 μm,极化周期为 5.2 μm。研究了波导型周期极化反转铌酸锂晶体的倍频效率与温度的关系,与普通的周期极化反转铌酸锂相比,倍频效率与温度关系的敏感度较低。同时,由于晶体可以在室温下工作,简化了加温与温控部件,提高了整机的工作效率。在此实验的基础上,制成了一台小型的全固态 488 nm 连续蓝光激光器。

关键词: 激光器;波导;准相位匹配;周期极化反转铌酸锂;倍频

中图分类号: TN722 文献标识码: A

480 nm Blue Laser by Direct Frequency Doubling of Laser Diode

Dong Jingxing Luo Qihong Cheng Xusan Ling Lei Wei Yunrong

Ye Zhenhuan Zhou Jun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: A compact continuous-wave blue laser at 488 nm, with the maximum output exceeding 20 mW at the optimum work temperature of crystal 28 °C, is demonstrated by direct frequency doubling of a laser diode (LD) with a quasi-phase matched waveguide periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal. The size of the crystal is 8 mm×1.4 mm×1 mm, and the waveguide section is 4.5 μm×3.5 μm, with 5.2 μm poling period. The temperature characteristic of the second harmonic generation (SHG) in the waveguide PPLN is investigated. The results show that the dependence of the waveguide PPLN crystal on the temperature is less than that of normal PPLN. Because the crystal works near the room temperature, the temperature controlling devices are simplified and the work efficiency of the whole system is improved. Based on the experiments, a compact all-solid state 488 nm blue laser with continuous wave output is made.

Key words: lasers; waveguide; quasi-phase matching; periodically poled lithium niobate; frequency doubling

1 引 言

近年来,小型的全固态蓝光激光器由于其结构紧凑,稳定性高,寿命长等优点,在高密度储存、水下通信、光学信息处理、医学诊断等领域都有着广泛的应用前景。实现全固态蓝色激光光源的途径主要有三种:1)直接发射蓝光的激光二极管;2)激光二极管(LD)倍频的蓝色光源;3)激光二极管抽运通过非线性光学手段获得的蓝光激光器。目前,在非线性光学手段中,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,最后获得高的倍频转换效率^[1~3]。把波导技术与准相位匹配倍频技术结合在一起,是一种较新型的能进一步提高倍频效率的方法。由于波导中传播的激光功率密度高、与基频光耦合充分、阈值低、转换效率高、相位匹配范围宽,利用波导型周期极化反转铌酸锂

* 国家自然科学基金(10334110)和南京大学固体微结构物理实验室资助课题。

作者简介:董景星(1951~),男,上海人,高级实验师,主要从事准分子激光器研究。E-mail: jxdong@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期:2005-07-06;收到修改稿日期:2005-09-19

晶体倍频,可以获得高的倍频效率,并且可以制作成全固化超小型的倍频激光器^[4~6]。基频光的产生使用带尾纤的小型连续输出的激光二极管(Furukawa Electric, Tokyo),其尾纤使用保偏光纤,并带有布拉格光栅,能使激光二极管通过尾纤直接输出窄线宽的线偏振激光,光谱线宽约为 1.3 nm,接近了周期极化反转铌酸锂晶体 0.3~0.6 nm 的响应谱线宽度。本文在 8 mm 长,周期为 5.2 μm 的波导型周期极化反转铌酸锂晶体中实现了倍频蓝光输出,在 28 $^{\circ}\text{C}$ 时,从 250 mW 的 976 nm 连续基频光中获得大于 20 mW 的 488 nm 倍频蓝光输出,效率达到 8%。

2 实验装置

产生基频光的激光二极管放置在一个安装小型半导体制冷片的热汇上,温度控制在 25 ± 1 $^{\circ}\text{C}$,以便保证激光二极管输出稳定的 976 nm 波长的基频激光。制冷片的驱动及温度控制采用一高效电子制冷器(TEC)控制模块(Analog Technologies, Inc.),该模块可以直接提供最大 2.5 A 的直流电流驱动半导体制冷片,并可以 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的精度调节控制温度,该模块温度控制稳定,精度足以满足实验要求。激光二极管发出的激光通过一根带有布拉格光栅的保偏光纤输出,最大连续输出功率达到 250 mW。实验装置如图 1 所示,尾纤输出的激光用焦距为 $f=11$ mm 的透镜 L_1 准直,另一焦距为 $f=4.5$ mm 的透镜 L_2 将准直激光聚焦到晶体端面,耦合进入周期极化反转铌酸锂波导中。 L_1, L_2 两块透镜表面镀 976 nm 增透膜,透射率大于 99.9%。周期极化反转铌酸锂尺寸 8 mm \times 1.4 mm \times 1 mm,入射斜面研磨角度为 10 $^{\circ}$,波导的截面水平小于 4.5 μm ,垂直小于 3.5 μm ,数值孔径(NA)约为 0.2~0.3,中心波长对温度的漂移率为 0.07 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。晶体放置在一片面积为 4 mm \times 6 mm 热汇上,热汇的另一面紧贴着一片小型半导体制冷片,这片制冷片同样使用一片高效 TEC 控制

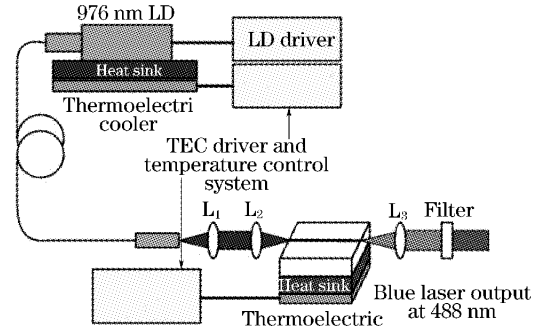


图 1 半导体激光直接倍频波导型周期极化反转铌酸锂实验装置

Fig. 1 Experimental scheme for direct frequency doubling of a LD with a PPLN waveguide

模块驱动和控制温度。温度控制范围在 16~32 $^{\circ}\text{C}$,控制精度 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。波导型周期极化反转铌酸锂输出的 488 nm 倍频光通过焦距为 $f=11$ mm 的透镜 L_3 准直输出,并用一片滤光片滤去剩余的抽运光,此滤光片对 488 nm 蓝光的透射率大于 80%。整套装置被安装在一个 20 cm \times 24 cm \times 10 cm 的机壳内,组成一台小型化的 488 nm 连续输出的蓝光激光器。

3 倍频效率与温度的关系

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,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与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移^[7]。调制的周期长度应为相干长度的偶数倍:

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

Λ 为光栅周期, m 是准相位匹配的阶数, $n_{2\omega}$ 和 n_{ω} 分别是晶体对倍频光和基频光的折射率。铌酸锂晶体的折射率随温度的变化很明显, Hobden 等^[8] 给出的铌酸锂晶体折射率与晶体温度、波长的关系为

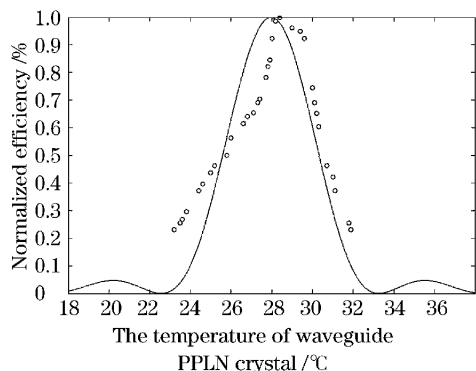
$$n_o^e(\lambda, T) = 4.9130 + \frac{1.173 \times 10^5 + 1.65 \times 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (2.12 \times 10^2 + 2.7 \times 10^{-5} T^2)^2} - 2.78 \times 10^{-8} \lambda^2, \quad (2)$$

$$n_e^e(\lambda, T) = 4.5567 + 2.605 \times 10^{-7} T^2 + \frac{0.970 \times 10^5 + 2.70 \times 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (2.01 \times 10^2 + 5.4 \times 10^{-5} T^2)^2} - 2.24 \times 10^{-8} \lambda^2, \quad (3)$$

式中 T 为晶体温度,单位为 K, λ 为光波波长,单位为 nm,上述关系对于波长在 400~4000 nm,温度在 0~400 $^{\circ}\text{C}$ 范围均成立。对于制作参量已定的光波导,归一化的倍频效率为

$$\eta(\lambda_{\omega}, T) \propto \frac{A_{\text{eff}}}{[n_{\text{eff}}^{\omega}(\lambda_{\omega}, T)]^2 n_{\text{eff}}^{2\omega}(\lambda_{2\omega}, T) \lambda_{\omega}^2} \text{sinc}^2 \left[\frac{\Delta k(\lambda_{\omega}, T) L(T)}{2} \right], \quad (4)$$

式中 A_{eff} 为光波导的截面有效面积, 单位 m^2 , $n_{\text{eff}}^{\omega}(\lambda_{\omega}, T)$ 与 $n_{\text{eff}}^{2\omega}(\lambda_{2\omega}, T)$ 分别为基频光和倍频光在光波导中的零阶模折射率。对于设定的调制周期长度, 由于加工精度及温度对晶体的影响, 必须调节晶体温度, 使相位匹配条件 $\Delta k(\lambda_{\omega}, T) = 0$ 满足时, 波导型周期极化反转铌酸锂晶体的倍频转换效率才能达到最大, 此时的晶体温度称为中心温度, 当温度偏离中心温度时, 倍频效率将下降, 温度带宽一般定义为倍频效率下降到峰值一半时的温度范围。利用上述公式计算的结果与实验结果比较如图 2 所示, 中心温度的偏差有可能是温度测试或波导加工精度的问题。



波导型周期极化反转铌酸锂的倍频效率与晶体温度的关系

Fig. 2 The normalized frequency-doubling efficiency versus the temperature of the waveguide PPLN

4 实验结果

设定产生基频光的激光二极管工作温度在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 调节波导型周期极化反转铌酸锂晶体温度, 改变激光二极管的驱动电流, 使其输出 $0\sim 250\text{ mW}$ 的 976 nm 连续激光, 通过透镜 L_1, L_2 对基频光准直聚焦, 仔细调节焦点的位置, 使基频光能注入波导, 一旦基频光在焦点位置注入波导, 周期极化反转铌酸锂晶体马上就会发出鲜艳的蓝色光芒, 在波导的另一端将输出包含有剩余 976 nm 基频光的 488 nm 蓝色激光, 滤波准直以后可以得到基本纯净的连续蓝色激光, 实验获得 488 nm 激光时的情景如图 3 所示。

在基频光功率达到 250 mW , 晶体温度为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 滤波后输出的 488 nm 激光功率为 20.1 mW , 此时的效率为 8.1% 。改变注入的基频光功率, 获得的 488 nm 蓝光输出功率与基频光功率的关系如图 4 所示。

使用 HR2000CG-UV-NIR 小型光谱仪测量了

基频光和倍频光的谱线, 结果如图 5 所示。



图 3 波导型周期极化反转铌酸锂晶体 488 nm 蓝光输出的照片

Fig. 3 The picture of 488 nm blue laser after the waveguide crystal

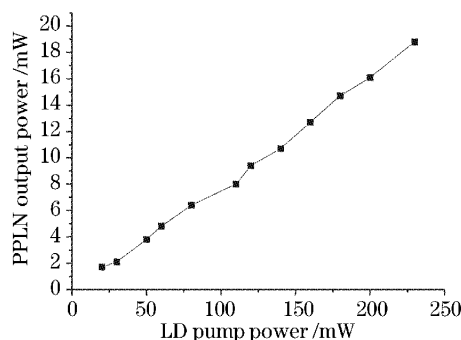


图 4 488 nm 倍频输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 488 nm output power versus LD pump power

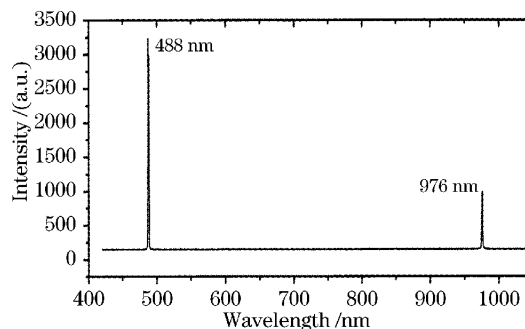


图 5 488 nm 的倍频激光与 976 nm 抽运激光的光谱

Fig. 5 Second harmonic at 488 nm and LD spectra pump laser at 976 nm after the waveguide crystal

图 5 中谱线是在没有滤光片的条件下获得的, 说明激光二极管输出的功率有效地耦合进了波导, 并转移到了倍频光上。除了非线性效率以外, 一些额外的损耗也应该考虑。 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 本身对这两个波长都没有什么吸收, 如果没有倍频效应, 耦合进波导的单模光应该是完全可以被传输出来的。实际上注入的基频光不可能是完美的单模光, 总有一些其他的光(高阶模)被散射到波导周围的晶体里面去了。另一个损耗是波导的端面没有镀增透膜, 这

块晶体的折射率 n 在 980 nm 时约为 2.1 左右, 所以有较大的表面反射。在最好的情况下, 单模光纤的输出也只能有 60% 的耦合效率。实验使用 $L_2 f = 4.5$ mm 的聚焦透镜, 所以 250 mW 基频光进入晶体应该有 150 mW 出来(倍频光+基波), 但是其中有相当一部分不是在周期极化反转铌酸锂波导内可以产生倍频的光, 这个波导允许的数值孔径是 0.2~0.3, 而实验使用的 L_2 数值孔径为 0.5, 即使注入波导, 还是有很大一部分是要透出波导的。还有一个因素就是基频光线宽与周期极化反转铌酸锂线宽的匹配, 激光二极管输出的激光线宽约 1.3 nm, 与周期极化反转铌酸锂的 0.3~0.6 nm 线宽相比, 还有相当一部分基频光不能获得利用。当然, 周期极化反转铌酸锂的线宽略小于激光二极管的线宽, 对于降低周期极化反转铌酸锂的温度控制精度有利, 这块周期极化反转铌酸锂晶体的波长漂移率在 0.06~0.07 nm/°C 之间, 一定范围内的温度漂移, 不会影响倍频光输出功率的稳定。

5 结 论

使用波导型周期极化反转铌酸锂晶体获得 488 nm 蓝色激光是一种实现高效全固化短波长激光器的有效手段, 与普通的周期极化反转铌酸锂晶体相比有可能获得更高的转换效率。同时因为晶体可以在室温条件下工作, 不需要使用加温部件, 降低了温度控制难度, 提高了整机的工作效率。

参 考 文 献

- 1 Liang Xiaoyan, Hou Wei, Lü Junhua *et al.*. Low threshold wide tunable PPLN optical parametrical oscillator[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(1):10~12 (in Chinese)
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
- 2 Zhu Xiaozheng, Zhou Jun, Lou Qihong *et al.*. 59 mW green light harmonic generation of quasi-CW double-cladding fiber laser in periodically poled lithium niobate [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 777~779 (in Chinese)
朱晓峥, 周 军, 楼祺洪等. 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[J]. 中国激光, 2004, **31**(7): 777~779
- 3 Xiaoping Guo, Meng Chen, Gang Li *et al.*. Diode-pumped 1123 nm Nd:YAG laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 402~404
- 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**(34):1419~1420
- 6 P. A. Champert, S. V. Popov, J. R. Taylor. Highly efficient, variable pulse format 770 nm source based on powerful seeded femtosecond amplifier and second-harmonic generation in periodically poled KTP[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(7): 648~649
- 7 Zhu Xiaozheng, Zhou Jun, Lou Qihong *et al.*. Experimental investigation of quasi-CW frequency-doubling of broad band fiber in periodically poled lithium niobate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1330~1334 (in Chinese)
朱晓峥, 周 军, 楼祺洪等. 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[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1330~1334
- 8 Xue Ting, Yu Jin, Yang Tianxin *et al.*. Numerical analysis and optimization of quasi phase-matched second-harmonic-generation in LiNbO₃ waveguide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **53**(3): 565~572 (in Chinese)
薛 挺, 于 建, 杨天新等. 准位相匹配铌酸锂波导倍频特性分析与优化设计[J]. 物理学报, 2002, **53**(3): 565~572