

文章编号: 0258-7025(2002)12-11057-04

# 准相位匹配的 KTP 晶体获得高效外腔 谐振倍频绿光

张 靖, 马红亮, 罗 玉, 陶 桦, 张宽收, 彭堃堃

(山西大学光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**提要** 采用准相位匹配的 KTP 晶体对全固化 Nd:YVO<sub>4</sub>连续输出的 1064 nm 单频激光进行外腔谐振倍频,当倍频腔的红外输入功率为 150 mW 时,获得 76 mW 的单频绿光输出,最大倍频转换效率为 50.6%。

**关键词** LD 抽运单频激光器,外腔谐振倍频,准相位匹配 KTP 晶体

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Efficient External Resonant Frequency Doubling Green Laser in Bulk Periodically Poled KTiOPO<sub>4</sub>

ZHANG Jing, MA Hong-liang, LUO Yu, TAO Hua, ZHANG Kuan-shou, PENG Kun-chi

(Institute of Opto-Electronic Research, Shanxi University, State Key Laboratory  
of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Taiyuan, Shanxi 030006)

**Abstract** An efficient green laser has been realized by external frequency doubling of a LD-pumped single-frequency ring cw Nd:YVO<sub>4</sub> laser in PPKTP resonator. The maximum green power is 76 mW at IR input power of 150 mW, resulting in the conversion efficiency of 50.6%.

**Key words** LD-pumped single frequency laser, external resonant frequency doubling, quasi-phase-matched KTiOPO<sub>4</sub>

### 1 引 言

用 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的 1.064 μm 红外输出,通过二次谐波产生 532 nm 绿光,是获得可见光波段全固化激光光源的有效途径<sup>[1]</sup>。要得到高效倍频必须通过某种途径来增加倍频晶体中的基频光功率密度,通常可采用内腔倍频技术,将倍频晶体置于激光谐振腔内,利用激光谐振腔中高的腔内密度,获得高效倍频光,但激光谐振腔内同时存在激光产生和非线性二次谐波产生过程<sup>[2,3]</sup>,整个系统的稳定性相对较差。另一种方法是外腔谐振倍频技术<sup>[4]</sup>,它是把非线性晶体置于外部谐振腔中,使基频光在腔内共振或基频光和倍频光在腔内同时共振,这样可对激光腔和倍频腔分别进行优化,并且通过外腔倍频可获得强度压缩光<sup>[5,6]</sup>。对 1.064 μm 激光进行

外腔谐振倍频可采用一类非临界相位匹配的 MgO:LiNbO<sub>3</sub><sup>[7,8]</sup>或 LBO<sup>[9]</sup>非线性晶体,KTiOPO<sub>4</sub>(KTP)作为优良的非线性晶体已广泛应用于 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的内腔倍频,但是采用二类临界相位匹配来实现对 1.064 μm 倍频,很难应用于外腔谐振倍频。

近年来发展起来一种新型非线性材料——准相位匹配频率转换晶体,例如准相位匹配 LiNbO<sub>3</sub>(PPLN),LiTaO<sub>3</sub>(PPLT),KTP(PPKTP),这种晶体是非线性光学系数受到人工调制的非线性光学材料,用于补偿晶体中相互作用光波场由于色散引起的相位失配,于是可以利用晶体的最大非线性系数在特定温度下通过非临界相位匹配获得高效变频输出,它与常规的双折射相位匹配技术相比,具有更大的非线性系数、相互作用长度和宽的调谐范围。PPKTP

收稿日期 2001-09-24;收到修改稿日期 2001-11-26

基金项目 国家自然科学基金(No.69938010,60178012),山西省留学归国人员基金和山西省自然及青年科学基金资助项目。

作者简介 张靖(1974—),男,山西大学光电所副教授,博士,主要从事全固化激光器件及量子光学等方面的研究。

相对于 PPLN 晶体具有以下优点:所需的极化电场相对较小,因此可制出较厚的 PPKTP 晶体,并且 PPKTP 晶体可以在室温下运转而不产生光折变现象。

本文采用 PPKTP 晶体对  $1.064 \mu\text{m}$  进行外腔谐振倍频,通过频率边带调制技术把倍频腔腔长锁定到  $1.064 \mu\text{m}$  的激光频率上,当红外输入功率为  $150 \text{ mW}$  时,最大绿光输出  $76 \text{ mW}$ ,且整个系统可连续稳定运转  $1 \text{ h}$  以上。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。激光源采用自行研制生产的  $2 \text{ W}$  LD 抽运的全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器<sup>[10]</sup> 单频  $1.064 \mu\text{m}$  红外激光输出  $280 \text{ mW}$ 。红外激光经过一隔离比大于  $40 \text{ dB}$  的 OFR IO-5-YAG 法拉第光隔离器 F-I,用于隔离由倍频腔反射的基频抽运光,以防止反射的基频光反馈至激光器,影响激光器的单频运转。倍频腔采用对称驻波腔结构,如图 1 所示,输入耦合镜  $M_1$  曲率半径为  $30 \text{ mm}$ ,对基频光的透射率为  $4\%$ ,对倍频光的反射率大于  $99\%$ , $M_1$  装在压电陶瓷上用于光电反馈控制倍频腔的腔长,使之与红外激光器频率共振;输出耦合镜  $M_2$  的曲率半径也为  $30 \text{ mm}$ ,对基频光的反射率大于  $99.5\%$ ,对倍频光的透射率大于  $98\%$ 。基频光在腔内起振,倍频光在腔内两次穿过晶体从  $M_2$  输出腔外。使用的准相位晶体是由 Raicol Crystals 公司生产的 PPKTP,尺寸为  $10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ,沿晶体  $c$  轴方向电场极化周期为  $9.00 \mu\text{m}$ ,因此可利用 KTP 晶体最大非线性系数  $d_{33}$  方向进行非临界相位匹配,PPKTP 晶体的有效非线性系数为  $(2/\pi)d_{33} \approx 9.5 \text{ pm/V}$ <sup>[11]</sup>,它是通常 KTP 双折射相位匹配非线性转换效率的  $6$  倍,晶体两端面都镀有对  $1.064 \mu\text{m}$  和

$532 \text{ nm}$  的双色减反膜。

PPKTP 晶体放置在装有半导体制冷块的金属支架上,在靠近晶体附近的金属内接有  $10 \text{ K}$  的热敏电阻,将半导体制冷块和热敏电阻的引出线接入自制的控温仪中,通过反馈比较电路来精确控制 PPKTP 晶体的匹配温度,控温精度可达  $0.01^\circ\text{C}$ ,装有半导体制冷块的金属支架固定在三维调节架上,用以精确调节 PPKTP 晶体的空间位置。由  $M_2$  输出的光大部分为倍频光,一小部分为泄漏出的红外光,通过一双色镜  $M_3$  ( $1.064 \mu\text{m}$   $45^\circ$  增透和  $532 \text{ nm}$   $45^\circ$  高反)滤除  $1.064 \mu\text{m}$  红外光,反射出的倍频光由 LP-2B 型激光功率计监视其功率。漏出的红外光由探测器  $D_2$  探测后送入示波器作为倍频腔的监视信号。为防止空气和外界震动的干扰,把倍频腔封闭在有机玻璃罩中。

为了增加倍频转换效率,需要将基频光紧紧地聚焦在 PPKTP 晶体中,因此存在一聚焦参量  $h = l/w_0^2 k_1 = l/2z_f$ <sup>[12]</sup>,其中  $l$  为倍频晶体长度, $w_0$  为倍频腔内基频光高斯光束腰斑半径, $z_f$  为倍频腔内基频光高斯光束共焦参量, $k_1$  为基频光的波矢。最佳聚焦参量  $h$  通常取为  $\sim 1$ ,因此倍频腔内基频光高斯光束腰斑半径约为  $40 \mu\text{m}$ ,倍频腔腔长  $\sim 58 \text{ mm}$ 。焦距为  $80 \text{ mm}$  的匹配透镜用于激光器和倍频腔之间的模式匹配,通过调节透镜的位置使模式匹配率达  $95\%$ 。倍频腔基波输入耦合镜  $M_1$  的透射率是另一个实现高效倍频的重要参数,它要求使基频光全部耦合到倍频腔内,实现倍频腔的阻抗匹配,腔内具有最大基频光功率密度,因此输入耦合镜  $M_1$  对基频的透射率需等于倍频腔内总损耗<sup>[7]</sup>。倍频腔内总损耗包括内腔线性损耗和倍频转换的非线性损耗,内腔线性损耗主要是由倍频晶体的吸收、散射、晶体端面减反膜的剩余反射率、镜面散射及腔镜高反膜达不到完全反射等引起的对基频光的损耗,它可以通过测倍频腔的精细度来推算。在给定基波抽运功率下,由内腔线性损耗和倍频非线性系数可唯一确定最佳输入耦合镜的透射率。实验中由于对输入耦合镜透射率选择的有限性,选用输入耦合镜透射率为  $4\%$ 。

实验中采用频率边带调制技术将倍频腔的共振频率锁定到基波频率上<sup>[13]</sup>。一自制的  $18 \text{ MHz}$  共振型电光调制器 EOM 放置在法拉第隔离之前, $18 \text{ MHz}$  正弦射频信号源驱动电光调制器对基频红外光进行相位调制,在激光中心频率两侧产生  $18 \text{ MHz}$  的调制信号。倍频腔反射的基频光经法拉第隔离之前的偏

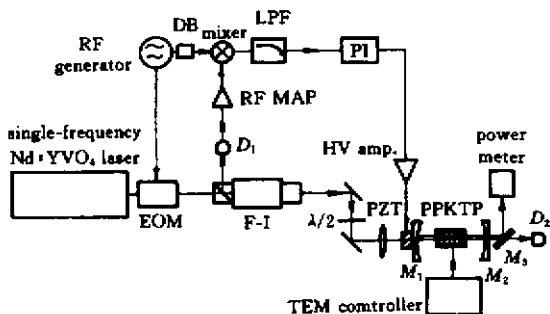


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

振棱镜输出,由  $D_1$  探测器探测, $D_1$  采用 Epitax 300 InGaAs 快速光电二极管,型号为 Analog Modules 713A 光电探测器,该探测器接有两级放大,具有宽的增益带宽 10 kHz ~ 100 MHz 和高的增益。探测器输出的光电流信号经射频放大器 RF AMP Mini-Circuits ZFL-500 放大,然后送入混频器 Mixer Mini-Circuits ZAD-1,由同一 18MHz 射频信号源输出经过一相位延迟盒 DB EG&G ORTEC DB463 送入混频器本振输入端,相位延迟盒用于调节混频器本振输入端 18MHz 正弦信

号与混频器基频光反射输入信号的相对相位,获得锁腔的鉴频信号。混频器输出的鉴频信号通过低通滤波 LPF Mini-Circuits BLP-1.9 送入自行设计的比例积分电路 PI,调节鉴频信号的增益和相位达到最佳的锁腔状态。比例积分电路输出的鉴频信号经过高压放大器 HV AMP Burleigh PZ-70 来控制倍频腔镜上的压电陶瓷,使倍频腔的共振频率锁定到基波频率上。

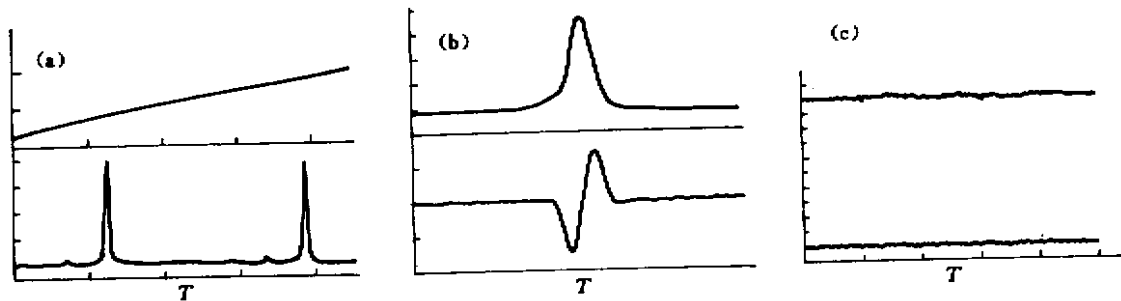


图 2 (a) 倍频腔扫描电压和红外透射曲线 (b) 红外透射曲线及对应的鉴频信号 (c) 锁定倍频腔后的红外透射曲线

Fig.2 (a) The scanning voltage and the transmission of fundametal wave of frequency-doubling cavity ;(b) The transmission curve of fundamental wave and it' s locking signal ; (c) The transmission curve of fundamental wave when the frequency-doubling cavity is locked

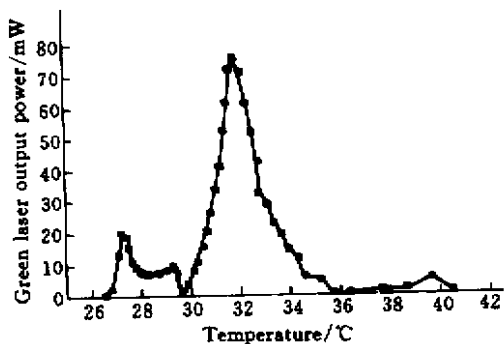


图 3 倍频光输出功率随 PPKTP 晶体温度变化的实验曲线

Fig.3 Green laser output power as a function of PPKTP temperature

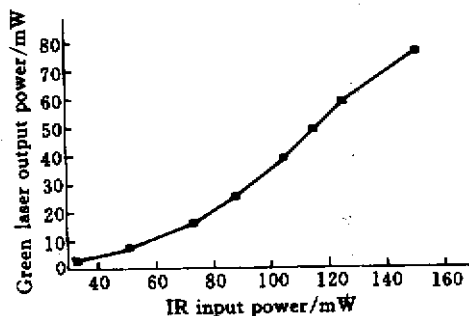


图 4 倍频光输出功率随基频光抽运功率的变化曲线

Fig.4 Green laser output power as a function of the IR input power

### 3 实验结果

首先在压电陶瓷上加一锯齿波信号使倍频腔处在扫描状态,比例积分电路输出的鉴频信号不接入高压放大器,通过示波器监视漏出的红外光信号来仔细调节匹配透镜、倍频腔镜和 PPKTP 晶体的空间位置,使输入红外光和倍频腔的模式匹配达到最佳,如图 2(a)所示。然后通过示波器监视比例积分电路输出的鉴频信号来调节混频器本振输入端 18 MHz 正弦信号的相位和比例积分电路的参数,获得最佳的鉴频信号,如图 2(b)所示。最后把比例积分

电路输出的鉴频信号接入高压放大器,通过高压放大器输出的偏置电压和逐渐减小扫描锯齿波信号的幅度直至为零,使倍频腔的共振频率锁定到基波频率上,示波器监视漏出的红外光信号如图 2(c)所示。整个系统在没有外界剧烈的震动下,可以锁定在 1 h 以上而不失锁。通过改变 PPKTP 晶体的温度来测量倍频绿光的输出功率,如图 3 所示,实验数据近似为  $\text{sinc}^2$  函数曲线,但又不完全吻合,这可能由于改变 PPKTP 晶体的温度使腔内模式匹配以及基频与倍频光相对相位的发生改变引起。图 4 给出倍频光输出功率随基频光抽运功率的变化曲线,当基

频光抽运功率为 150 mW 时,获得 76 mW 的单频绿光输出,最大倍频转换效率为 50.6%。

### 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**( 6 ): 895 ~ 912
- 2 Jing Zhang, Yanli Cheng, Tiancai Zhang *et al.*. Investigation of the characteristics of the intensity noise of singly resonant active second-harmonic generation [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**( 10 ): 1695 ~ 1703
- 3 Jing Zhang, Hong Chang, Xiaojun Jia *et al.*. Suppression of the intensity noise of a laser-diode-pumped single-frequency ring Nd:YVO<sub>4</sub>-KTP green laser by optoelectronic feedback [ J ]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**( 10 ): 695 ~ 697
- 4 A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic. Resonant optical second harmonic generation and mixing [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1966, **QE-2**( 6 ): 109 ~ 124
- 5 R. Paschotta, M. Collett, P. Kurz *et al.*. Bright squeezed light from a singly resonant frequency doubler [ J ]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**( 24 ): 3807 ~ 3810
- 6 Zhang Kuanshou, Zhang Jing, Xie Changde *et al.*. Experimental research on generation of intensity squeezed light at 532 nm by SHG [ J ]. *Acta Physica Sinica* ( 物理学报 ), 2000, **49**( 1 ): 30 ~ 34 ( in Chinese )
- 7 W. J. Kozlovsky, C. D. Nabors, R. L. Byer. Efficient second harmonic generation of a diode-laser-pumped CW Nd:YAG laser using monolithic MgO:LiNbO<sub>3</sub> external resonant cavities [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**( 6 ): 913 ~ 919
- 8 Zhang Kuanshou, Zhang Jing, Xie Changde *et al.*. Efficient second harmonic generation of 1.06 μm using an external resonator [ J ]. *Acta Optica Sinica* ( 光学学报 ), 1998, **18**( 8 ): 1015 ~ 1019 ( in Chinese )
- 9 S. T. Yang, C. C. Pohalski, E. K. Gustafson *et al.*. 6.5-W, 532-nm radiation by cw resonant external-cavity second-harmonic generation of an 18-W Nd:YAG laser in LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> [ J ]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**( 19 ): 1493 ~ 1495
- 10 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Wang Runlin *et al.*. All-solid-state Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser of single-frequency operation [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 2000, **A27**( 8 ): 694 ~ 696 ( in Chinese )
- 11 A. Arie, G. Rosenman, V. Mahal *et al.*. Green and ultraviolet quasi-phase-matched second harmonic generation in bulk periodically-poled KTiOPO<sub>4</sub> [ J ]. *Opt. Comm.*, 1997, **142**: 265 ~ 268
- 12 G. D. Boyd, D. A. Kleinman. Parametric interaction of focused Gaussian light beams [ J ]. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**( 8 ): 3597 ~ 3639
- 13 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [ J ]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**( 2 ): 97 ~ 105