文章编号：0258-7025(2007)06-0739-04

全固态高输出功率单频 Nd:YVO_4/KTP 激光器

郑耀辉，卢华东，李凤琴，张宽收，彭堃墀

（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）

摘要 利用光纤耦合输出的半导体激光器(LD)端面抽运 Nd:YVO_4 晶体，激光谐振腔采用四镜环形腔结构，通过 KTP 晶体内腔倍频，获得了高功率全固态连续单频绿光激光输出。根据临界相位匹配下椭圆高斯光束的倍频理论，通过旋转 Nd:YVO_4 晶体的方向选取合适的基频光偏振方向，使 KTP 晶体的走离角所在平面与谐振腔弧矢面平行，可提高内腔倍频转换效率。当抽运功率为20 W时，激光器最大单频绿光输出功率达4.8 W。作为对比，控制基频光偏振方向使 KTP 晶体的走离角所在平面与谐振腔子午面平行时，激光器最大单频绿光输出功率为4.1 W。对比两种情形下的实验结果，激光器的光-光转换效率从21.8%提高到25.5%。

关键词 激光技术；高效单频激光器；Nd:YVO_4/KTP；内腔倍频；椭圆高斯光束

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

All-Solid-State High-Efficiency High-Power Nd:YVO_4/KTP Laser of Single-Frequency Operation

ZHENG Yao-hui, LU Hua-dong, LI Feng-qin, ZHANG Kuan-shou, PENG Kun-chi

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Optoelectronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi* 030006, *China*)

Abstract An all-solid-state single frequency Nd:YVO_4/KTP laser with high efficiency and high power is reported, with fiber-coupled laser diode (LD) end-pumping Nd:YVO_4 crystal, ring resonator consisting of four mirrors, and KTP crystal intracavity frequency doubling. Based on the frequency-doubling theory of elliptical Gaussian beam under conditions of critical phase mathcing, an improved intracavity frequency-doubling conversion efficiency is obtained by tuning the orientation of Nd:YVO_4 crystal and choosing appropriate polarizing direction for fundermental frequency light to make the walk-off plane of KTP crystal paralle to the sagittal plane of cavity. The peak output power of single frequency green laser reaches to 4.8 W and the optical-optical conversion efficiency equals to 25.5%, when the pumping power is 20 W. In comparison, when the walk-off plane is perpendicular to the sagittal plane, the conversion efficiency is 21.8%, and the maximal single frequency green laser output power is 4.1 W.

Key words laser technique; high-efficiency single-frequency laser; Nd:YVO_4/KTP; intracavity frequency doubling; elliptical Gaussian beam

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的全固态绿光激光器有广泛的应用领域，该方面的研究也有了很大进展[1~3]。随着技术的发展，由于其在光谱、相干通信、参量振荡及量子光学实验研究[4]等领域的广泛应用，实现单频运转的全固态绿光激光器越来越受到大家的关注。现已有多种方法能使该器件达到单纵模运转，例如用扭转模腔[5]、短腔谐振[6]、标准具选模[7]及双折射滤光片选模[8]等。但在设计高功率输出内腔倍频激光器时，大多仍是利用环形谐振腔，

收稿日期：2006-11-01；收到修改稿日期：2006-12-27

基金项目：国家自然科学基金(60478007，60527003)和教育部新世纪优秀人才计划(NCET-05-0265)资助项目。

作者简介：郑耀辉(1979—)，男，山西人，讲师，博士研究生，主要从事全固态激光技术方面的研究工作。E-mail：yhzheng@sxu.edu.cn

导师简介：张宽收(1965—)，男，山西人，教授，博士生导师，主要从事量子光不和激光技术方面的研究工作。E-mail：kuanshou@sxu.edu.cn (通信作者)

万方数据

消除空间烧孔效应，进行选模[4,9]。由于环形谐振腔通常包括离轴放置的球面反射镜，一般情况下在子午面和弧矢面内光束的模参数不同，合成后为一椭圆高斯光束。在非临界相位匹配的情况下，非线性晶体没有走离效应，像散椭圆光束将不利于倍频效率的提高；而在临界相位匹配的情况下，选择合适的基频光偏振方向，像散椭圆光束不仅有利于倍频效率的提高，同时也能减小晶体发生损伤的危险[10,11]。然而，与外腔倍频激光器相比，内腔倍频激光器中基频光的偏振方向选取较难。

本文设计的全固态单频 Nd:YVO_4/KTP 绿光激光器，考虑到通过选取合适的基频光偏振方向，使椭圆高斯光束横截面椭圆的长轴位于 KTP 晶体的走离平面内。当抽运功率为20 W时，单频绿光最大输出功率达 4.8 W，相应的光-光转换效率为 25.5%，长时间工作没有观察到晶体损伤。

2 设计原理及实验装置

全固态单频 Nd:YVO_4/KTP 绿光激光器如图 1 所示，谐振腔由两个平面镜和两个凹面镜组成，采用“8”字环形谐振腔结构。在实验中选用由法拉第旋转器和半波片组成的光学单向器迫使激光器单向运转，为了便于插入法拉第旋转器等内腔元件，需要增大腔内光线在腔镜上的入射角度。但是，离轴放置的球面反射镜会带来像散，入射角越大，像散越大，这样由环形腔决定的本征模就是椭圆高斯光束。一般情况下，椭圆高斯光束将不利于倍频效率的提高。然而，根据 Steinbach 等[10]的分析，在基波为椭圆高斯光束时，选取合适的临界相位匹配的非线性晶体的方向将能有效提高倍频效率。在 Steinbach 等工作的基础上，Freegarde 等[11]对 I 类临界相位匹配下椭圆高斯光束的倍频进行了理论研究，并得出合适的晶体和谐振腔参数可以使倍频效率提高

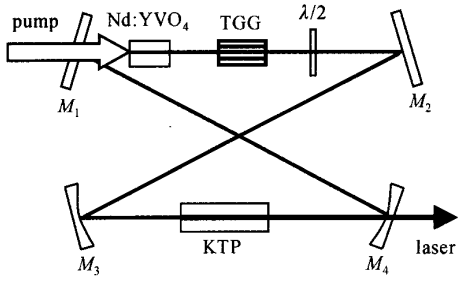

图 1 单频内腔倍频激光器实验装置

Fig. 1 Schematic of intracavity frequency-doubling laser of single frequency

30%，同时能减小晶体被损伤的危险以及减小晶体内的热效应。

在环形谐振腔中，光线在两个凹面镜表面的入射角均为 15°，两个凹面腔镜的曲率半径均为 100 mm。腔镜 M_3 和输出镜 M_4 之间的长度为 115 mm，谐振腔其余部分的长度为390 mm。离轴放置的环形腔球面反射镜在子午面和弧矢面内的焦距不同，子午面和弧矢面内的焦距分别表示为

$$f_t = \frac{R\cos\alpha}{2}, \quad f_s = \frac{R}{2\cos\alpha}, \tag{1}$$

式中 R 为反射镜的曲率半径，α 为光线在曲面镜表面的入射角，下标 t 和 s 分别表示子午面和弧矢面，f 为焦距。球面反射镜对沿子午面和弧矢面传输光束的反射矩阵分别为

$$\boldsymbol{M}_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R}\sec\alpha & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{M}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R}\cos\alpha & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

这样，基于光束传输的 $ABCD$ 矩阵理论和谐振腔参数，将端面抽运的 Nd:YVO_4 晶体近似为一个薄透镜，由此得出腔内光线在子午面和弧矢面的环绕矩阵

$$\boldsymbol{M}_t = \begin{bmatrix} 1 & l_{3t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_t} & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & l_{t4} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R}\sec\alpha & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & l_{34} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R}\sec\alpha & 1 \end{bmatrix}, \tag{3a}$$

$$\boldsymbol{M}_s = \begin{bmatrix} 1 & l_{3t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_t} & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & l_{t4} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R}\cos\alpha & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & l_{34} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R}\cos\alpha & 1 \end{bmatrix}, \tag{3b}$$

式中 l_{3t} 为腔镜 M_3 与 Nd:YVO_4 晶体之间的距离，l_{t4} 为 Nd:YVO_4 晶体与腔镜 M_4 之间的距离，l_{34} 为腔镜 M_3 与腔镜 M_4 之间的距离，f_t 为 Nd:YVO_4 晶体的热焦距。

根据环绕矩阵(3a)和(3b)计算得到了子午面光斑大小和弧矢面光斑大小随光斑在腔内位置的关系曲线，如图 2 所示。从图 2 可知，在两个凹面镜之间，子午面(与纸面垂直)和弧矢面(与纸面平行)内腰斑的位置接近重合；子午面内的腰斑为59 μm；弧矢面内的腰斑为69 μm，弧矢面内光束的腰斑半径大于子午面内光束的腰斑半径。对于给定波长和非线性材料的倍频转换过程，当忽略相位匹配时倍频

万方数据

转换效率取决于非线性转换的有效作用长度和功率密度。根据 Freegarde 等的分析[11]，使临界相位匹配的非线性晶体的走离平面在弧矢面内可以增大走离平面上非线性相互作用的区域，从而增加了基波和谐波在非线性晶体内相互作用的长度，同时，非走离平面和子午面共面有利于在非走离平面内获得较高功率密度，从而获得较高的倍频转换效率。

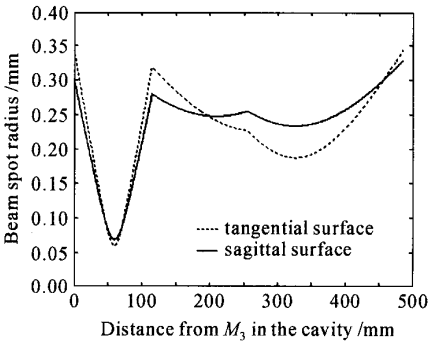

图 2　在谐振腔内各点子午面和弧矢面内的光斑尺寸

Fig. 2　Variations of beam spot in tangential and sagittal surface versus the distance from M_3 in the cavity

KTP 晶体是一种非常优良的非线性光学晶体，它有大的非线性系数、大的接收角和温度接收范围，并且能够在临界相位匹配下实现1064 nm倍频到532 nm的非线性光学过程。在1064 nm倍频到532 nm的过程中，KTP 晶体采用Ⅱ类临界相位匹配方式切割。在Ⅱ类(eoe)临界相位匹配条件下对1064 nm波长的光倍频时，寻常光线和非常光线的走离角在晶体的 a-b 平面，寻常光线的偏振方向与晶体的 a-b 平面平行，非常光线的偏振方向垂直于晶体的 a-b 平面。Ⅱ类(eoe)相互作用相位匹配条件下的相位匹配角为 $\phi = 23.5°$，$\theta = 90°$。

激光晶体 Nd:YVO_4 的受激发射输出光沿着特殊的 π 方向(平行于光轴方向)呈线性偏振。偏振方向与 a-b 平面成一定角度的线偏振光在 KTP 晶体内分解为两种偏振态(o 光和 e 光)，两种偏振态的基频光经倍频过程转化为单一偏振态(e 光)的倍频光，倍频光的偏振方向与 a-b 平面垂直。只有当基频光的偏振方向与走离平面成 45°角时，它在 KTP 晶体内分成两束强度相等的光，从而获得最高倍频转换效率。首先放置 KTP 晶体，使晶体的 a-b 平面与弧矢面平行。然后放置各向异性的 Nd:YVO_4 晶体，使晶体的 π 方向与弧矢面成 45°角。具体如图 3 所示，Nd:YVO_4 晶体的 π 方向(即基频光的偏振方向)与纸面的夹角 θ 为 45°角，弧矢面及 KTP 晶体的 a-b 平面均与纸面平行，子午面与纸面垂直。这样，o 光和 e 光的走离角在弧矢面，由于椭圆高斯光束在弧矢面有较大的腰斑，与腰斑大小等于子午面腰斑的圆形高斯光束相比，能获得较长的相互作用距离；非走离平面与子午面平行，而子午面的腰斑较小，与腰斑大小等于弧矢面腰斑的圆形高斯光束相比，能获得较高的功率密度，从而获得较高倍频转换效率，同时降低了晶体被损伤的危险。

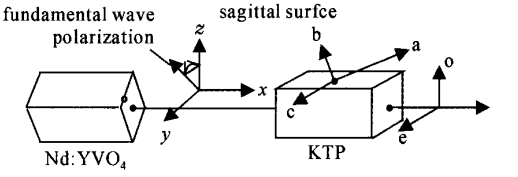

图 3　晶体取向示意图

Fig. 3　Sketch of crystals orientation

实验中选用的抽运源是光纤耦合输出的激光二极管，中心波长在808 nm，最大输出功率为20 W；光纤输出的光经两个透镜组成的整形聚焦系统后入射到激光晶体上，激光晶体采用 α-切割的 Nd:YVO_4 晶体，尺寸为3 mm×3 mm×8 mm，掺杂原子数分数为0.3%，两个端面分别镀1064 nm和808 nm减反膜，晶体的侧面用铟箔包住装在温度恒定的紫铜夹内，紫铜夹用热电制冷器进行温度控制，热电制冷器的热沉由通有循环水的紫铜块充当；输入镜 M_1 是镀有对1064 nm高反，对808 nm增透膜层的平面镜；腔镜 M_2 是镀有对1064 nm高反膜层的平面镜；腔镜 M_3 是镀有对1064 nm高反膜层的凹面镜，曲率半径为100 mm；输出镜 M_4 是镀有对1064 nm高反，对532 nm增透膜层的凹面镜，曲率半径为100 mm；腔内光线在腔镜 M_3 和 M_4 上的入射角均为 15°；Nd:YVO_4 是单轴晶体，输出是平行于光轴的线偏振光(相当于起偏器)，结合法拉第旋转器和半波片构成的光学单向器就能维持腔内单向运转。由于倍频所用的 KTP 晶体较短，光谱接受带宽较宽，因此，无需内腔标准具就能获得单频绿光输出。腔镜 M_3 和输出镜 M_4 之间的长度为115 mm，谐振腔其余部分的长度为390 mm；这种设计能够使谐振腔满足腔的热不灵敏条件 $|A+D| \leqslant 2$，同时更有利于倍频效率的提高。

3　实验结果及分析

当抽运功率为 20 W 时，最大单频绿光输出功

万方数据

率为4.8 W，长时间运转没有晶体损伤发生。考虑整形聚焦系统的传输效率为94%，相应的光-光转换效率为25.5%。当激光器的输出功率为4.8 W时，用自由光谱范围(FSR)为750 MHz的扫描共焦法布里-珀罗(F-P)干涉仪监视激光器的纵模模式，如图4所示，激光器单频运转。从图5可以看出，输出绿光在1 h的功率稳定性小于±1.5%。在固定Nd:YVO_4晶体即保持基频光的偏振方向不变的前提下，以光的传播方向为轴旋转KTP晶体90°，使KTP晶体的走离平面与子午面共面，非走离平面与弧矢面共面。在子午面内较小的光束半径限制了光束在非线性晶体内的相互作用长度，在弧矢面内较大的光束半径降低了基频光的功率密度。同样条件下最大单频绿光输出功率为4.1 W，相应的光-光转换效率为21.8%。通过以上实验设计，获得光-光转换效率为25.5%的高效、高功率内腔倍频单频绿光激光器，也进一步证明了临界相位匹配下椭圆高斯光束的倍频理论。

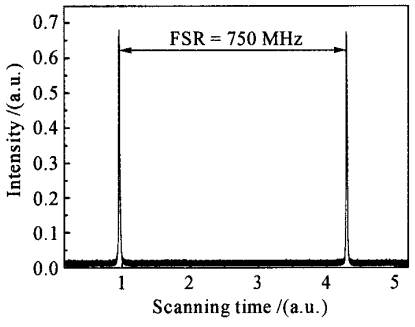

图4 扫描共焦腔的透射峰曲线
(激光输出功率为4.8 W)

Fig. 4 Transmitting intensity of scanning Fabry-Perot cavity
(output power is 4.8 W)

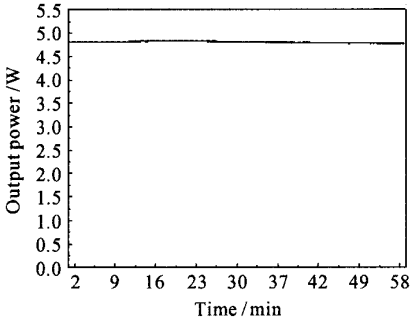

图5 激光器输出功率稳定性曲线(1 h)

Fig. 5 Stability of laser output power (1 h)

4 结 论

利用临界相位匹配下椭圆高斯光束的倍频理论，通过选取合适的基频光偏振方向，使转换效率最高时，非线性晶体的走离角所在平面与弧矢面平行，从而获得输出功率为4.8 W的高功率单频绿光激光器，相应的光-光转换效率为25.5%。通过进一步改善谐振腔及内腔元件的参数，可望获得更高的光-光转换效率。

参 考 文 献

1 Degang Xu, Jianquan Yao, Baigang Zhang *et al.*. Influence of the KTP crystal boundary temperature on conversion efficiency in high power green laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2): 85～88

2 Chen Yunlin, Luo Yongfeng, Yuan Jianwei *et al.*. The research of quasi-continuous-wave output quasi-phase-matching second harmonic generation at 532 nm in periodically poled heavily-doped MgO:$LiNbO_3$ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 63～66
陈云琳，罗永锋，袁建伟 等. 准相位匹配周期极化高掺镁铌酸锂532 nm倍频准连续输出研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(1): 63～66

3 Wang Nuanrang, Wang Canzhao, Yuan Ligang *et al.*. 138 W narrow pulse-width solid-state green laser operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1017～1020
王暖让，王灿召，苑利钢 等. 138 W窄脉宽全固态绿光激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1017～1020

4 Xiaoying Li, Qiang Pan, Jietai Jing *et al.*. LD pumped intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YAP/KTP laser with 1.1 W output at 540 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**(1): 165～171

5 K. Wallmeroth, P. Peuser. High power, cw single-frequency TEM_{00}, diode-laser-pumped Nd:YAG laser [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(17): 1086～1088

6 J. J. Zayhowski, A. Mooradian. Frequency-modulated Nd:YAG microchip lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(12): 618～620

7 Paul Nachman, Jesper Munch, Richard Yee. Diode-pumped frequency-stable, tunable, continuous-wave Nd:glass laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(2): 317～322

8 Hideo Nagai, Masahiro Kume, Issey Ohta *et al.*. Low-noise operation of a diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG laser using a Brewster plate [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1164～1167

9 Wang Haibo, Ma Yan, Zhai Zehui *et al.*. 1.5 W cw frequency-stabilized and intracavity frequency-doubled ring laser end-pumped by diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2): 119～122
王海波，马 艳，翟泽辉 等. LD端面抽运1.5 W单频稳频绿光激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(2): 119～122

10 A. Steinbach, M. Rauner, F. C. Cruz *et al.*. CW second harmonic generation with elliptical Gaussian beams [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **123**(2): 207～214

11 Tim Freegarde, Julian Coutts, Jochen Walz *et al.*. General analysis of type Ⅰ second-harmonic generation with elliptical Gaussian beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(8): 2010～2016

万方数据