

# LD 端面抽运 $c$ 切 $\text{Nd:YVO}_4$ 自拉曼倍频 589 nm 黄光激光研究\*

朱海永<sup>1)2)†</sup> 张戈<sup>2)</sup> 张耀举<sup>1)</sup> 黄呈辉<sup>2)</sup>  
段延敏<sup>2)</sup> 魏勇<sup>2)</sup> 尉鹏飞<sup>1)</sup> 于永丽<sup>1)</sup>

1) (温州大学物理与电子信息工程学院, 温州 325035)

2) (中国科学院福建物质结构研究所光电材料化学与物理重点实验室, 福州 350002)

(2010年11月3日收到; 2010年11月15日收到修改稿)

报道了 LD 端面抽运  $c$  切  $\text{Nd:YVO}_4$  自拉曼倍频黄光激光器的研究. 采用 10 mm 长, 二类临界相位匹配角 ( $\theta = 69^\circ, \phi = 0^\circ$ ) 切割的 KTP 晶体作为倍频晶体. 考虑到  $c$  切  $\text{Nd:YVO}_4$  跃迁截面较小, 所以通过对谐振腔及晶体膜系的严格设计, 减少腔内插入损耗和衍射损耗. 最终在脉冲重复率为 10 kHz, 抽运功率为 11.2 W 下, 获得了最高 570 mW 的倍频黄光激光输出, 对应抽运光到倍频黄光的转化效率约为 5.1%, 拟合得到输出功率对应抽运功率的斜效率为 6.6%. 激光中心波长在 589.17 nm, 谱线宽度 0.2 nm, 与钠 D2 共振谱线符合较好.

**关键词:** 拉曼激光,  $c$  切  $\text{Nd:YVO}_4$ , 589 nm, 黄光激光

**PACS:** 42.55.Ye, 42.65.Ky, 42.60.Gd, 42.55.Xi

## 1. 引言

黄光波长在 550—600 nm 之间, 包含了人眼最敏感的波段, 适用于激光显示和照明等领域. 黄光激光在医学上可用于治疗眼底黄斑水肿及美容上去除多余的毛细血管等, 军事上可用于激光雷达及空间目标的探测, 特别是 589 nm 激光可替代传统的钠导信号光源<sup>[1,2]</sup>. 此外黄光波段相干光源还在信息存储、食品药品检测、光谱学、化学等领域有着广泛需求. 目前主要通过以下三种固体激光器获得: 双波长和频黄光激光器<sup>[1-3]</sup>, 直接倍频红外波长的黄光激光器<sup>[4,5]</sup>, 全固态拉曼倍频或和频黄光激光器<sup>[6]</sup>. 鉴于拉曼倍频的高转化效率和结构紧凑性, 成为目前获得黄光激光的重要方法之一, 而得到广泛关注.

固体拉曼激光器一般采用激光晶体与拉曼晶体分离或具有拉曼效应激光晶体的自拉曼两种结构获得. 其中采用自拉曼晶体设计的激光器不但减少了激光腔内的光学元件, 而且减少了腔内损耗,

提高了激光器的效率, 使激光器的结构简单紧凑, 性能更稳定. 2001 年, Kaminskii 等人发现  $\text{YVO}_4$  晶体还是优良的拉曼晶体, 提出  $\text{Nd:YVO}_4$  可以作为自拉曼晶体并可应用于可见和近红外区域激光的产生<sup>[7]</sup>. 2004 年, Chen 首次实现了通光方向沿晶轴  $c$  轴切割 ( $c$  切) 和通光方向沿晶轴  $a$  轴切割 ( $a$  切)  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体的自拉曼激光运转, 其中采用  $c$  切的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体自拉曼获得了 125 mW 的 1178 nm 激光<sup>[8]</sup>.  $c$  切  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体的跃迁截面较小, 只有  $a$  切晶体的 1/4, 但它们激光发射波长不一样, 特别值得一提的是倍频  $c$  切的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体的一阶斯托克斯光可获得 589 nm 波长激光, 对应钠原子的 D2 共振谱线, 可用作钠信标光源, 所以具有重要的研究价值. 目前对于  $a$  切的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体有较多的研究<sup>[9-11]</sup>, 并获得了很好的结果, 但  $c$  切的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体的自拉曼及倍频激光研究相对较少. 2006 年, Wang 等采用 1.8 W 的半导体激光抽运  $c$  切的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体获得了 182 mW 的 1178 nm 激光输出<sup>[12]</sup>. 2009 年, Chen 课题组将  $c$  切的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体自拉曼输出功率提高到了 910 mW<sup>[13]</sup>.

\* 国家自然科学基金(批准号:10904143)和中国科学院光电材料化学与物理重点实验室开发课题(批准号:2008DP173016)资助的课题.

† E-mail: hyzhu\_opt@gmail.com

本文对紧凑型 *c* 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 自拉曼倍频黄光激光进行了研究. 从晶体选择, 谐振腔及晶体膜系方面对激光系统进行设计. 最终在 11.2 W 的半导体激光抽运下获得了最高 570 mW 的倍频黄光激光输出, 激光中心波长在 589.17 nm, 谱线宽度 0.2 nm, 与钠 D2 共振谱线符合较好.

## 2. 晶体性能分析及实验系统的设计

Nd:YVO<sub>4</sub> 属于四方晶系 *I*<sub>4</sub>/*amd* 空间群, 存在较大的自然双折射. 其四次轴平行于晶轴 *c* 轴方向, 所以 *a* 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 其出射光为平行于 *c* 轴的偏振激光, 跃迁截面较大 ( $\sigma_{\parallel} = 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ) [8], 所以较多的采用 *a* 切的 Nd:YVO<sub>4</sub> 来实现连续激光输出. 而对于 *c* 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 由于垂直于晶轴 *c* 轴是光学各向同性的, 所以输出为无偏光, 跃迁截面  $\sigma_{\perp} = 6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  约为 *a* 切的晶体的 1/4, 但其对应的激光发射波长为 1066 nm, 与 *a* 切的不同. 考虑到 YVO<sub>4</sub> 对应的一个较强的拉曼平移量为  $890 \text{ cm}^{-1}$ , 如图 1 所示 [14], 对应 *c* 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 发射 1066 nm 激光平移后的一阶斯托克斯波长刚好为 1178 nm. 其拉曼线宽  $2.6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1 \mu\text{m}$  波段的拉曼增益大于  $4.5 \text{ cm/GW}$ , 而且具有较大的拉曼散射截面. 所以我们选择了 *c* 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 来实现 589 nm 的拉曼倍频黄光激光.

本拉曼倍频激光器采用 LD 端面抽运, 直线腔结构, 实验装置如图 2 所示. 抽运源为通过光纤束耦合输出, 中心波长 808 nm 的半导体激光器, 光纤芯径  $200 \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22. 光纤输出光束经一对

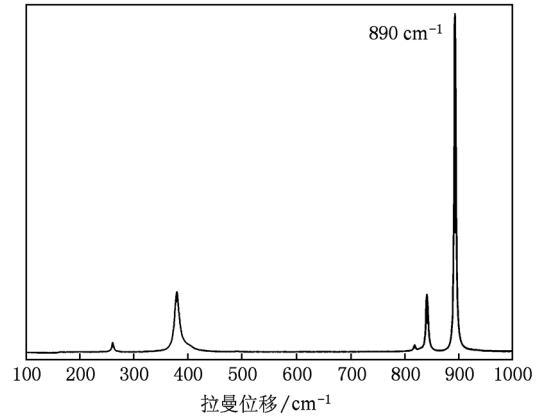


图1 YVO<sub>4</sub> 的拉曼频移特性图

放大比例为 1:2 的平凸透镜组成的耦合系统准直聚焦成束腰直径  $400 \mu\text{m}$  的光斑入射到自拉曼激光晶体内. 自拉曼激光晶体为尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 掺 Nd<sup>3+</sup> 浓度 0.3 at. % 的 *c* 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体. 晶体的侧面用铝箔包于紫铜块内, 并用半导体制冷控温系统控温在  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . 为了减少腔内插入损耗, 并使结构紧凑, 自拉曼激光晶体的抽运输入端镀制对抽运光 808 nm 增透 ( $T > 95\%$ )、同时对基频光 1066 nm 和一阶斯托克斯光 1178 nm 高反的膜系 ( $R > 99.95\%$ ), 作为谐振腔的高反腔镜; 另一端面镀 1066 nm 和 1178 nm 的增透膜, 同时对倍频黄光 589 nm 高反膜 ( $R > 95\%$ ), 起到反射反方向黄光使激光输出最大化, 同时消除了激光晶体对黄光吸收产生的附加热效应. 声光调 Q 开关 (Gooch & Housego 公司生产) 长度为 20 mm, 两通光面同时对 1066 nm 和 1178 nm 增透, 驱动中心频率为 40 MHz, 射频功率 10 W.

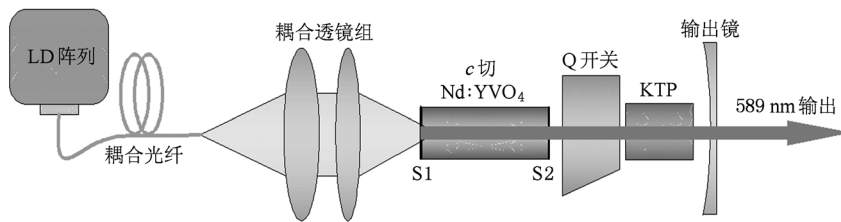


图2 LD 端面抽运 *c* 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 自拉曼倍频激光器示意图

为实现倍频输出, 我们选择按二类临界相位匹配角 ( $\theta = 69^{\circ}, \phi = 0^{\circ}$ ) 切割的 KTP 晶体, 对应的有效非线性光学系数为  $3.5 \text{ pm/V}$ . 晶体的尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 其侧面用铝箔包裹放置于紫铜块内, 通过半导体制冷控温系统将晶体温度控制在

$25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  左右. KTP 晶体两端面镀同时对 1066 nm, 1178 nm 和 589 nm 的增透膜系, 其中对 1066 nm 和 1178 nm 增透的要求较为严格 ( $R < 0.2\%$ ). 激光输出镜对 1066 nm 和 1178 nm 高反 ( $R > 99.95\%$ ), 对 589 nm 高透 ( $T = 95\%$ ) 的膜系, 选择的曲率半径为

100 mm 的平凹输出镜片. 实验设计中,各光学元件紧凑排列,总腔长约为 75 mm.

### 3. 倍频黄光实验结果及分析

我们在不同调 Q 重复频率下对系统进行了优化,图 3 给出了倍频黄光脉冲重复频率分别设置在 10,20,30 kHz 下的激光输出情况. 从输出功率曲线可以看出,受激拉曼散射作为一种非线性光学效应,其转换效率随着基频光强度增加而增加,随脉冲重复频率的减小,激光峰值功率升高,更利于降低拉曼阈值,提高拉曼变频效率. 在 10 kHz 的重复频率下,拉曼倍频黄光阈值最低只有 1.3 W,并且实现了最高的黄光输出功率. 在 11.2 W 的输入抽运光功率下,在 30 kHz 重复频率下,黄光输出功率约为 430 mW;当脉冲重复频率降为 10 kHz,最高输出功率达 570 mW,对应抽运光到倍频黄光的转化效率约为 5.1%,拟合得到输出功率对应抽运功率的斜效率为 6.6%. 通过功率计(型号 LPE-1A)来记录功率波动情况,在最高输出功率 570 mW 下,功率波动小于 3%. 随着抽运功率的进一步升高,输出功率受自拉曼激光严重的热效应限制出现较大波动,并开始下降.

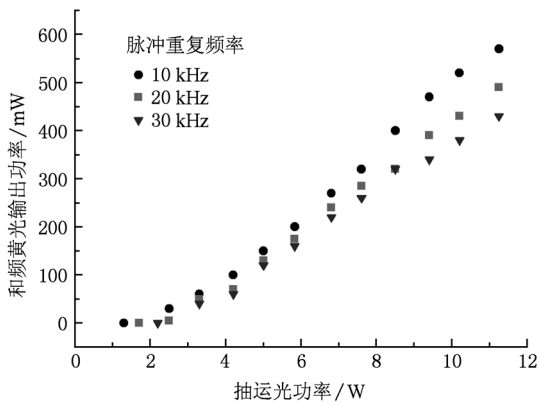


图 3 在脉冲重复频率 10,20,30 kHz 下,倍频黄光激光输出功率曲线

自拉曼激光相对普通的固体激光有更严重的热效应. 由于受激拉曼散射过程是非弹性散射,量子亏损导致的热量被储存在拉曼介质中,所以拉曼介质中储存的热功率由下式给出:

$$P_{\text{heat}} = P_{\text{S1}} \left( \frac{\lambda_{\text{S1}}}{\lambda_{\text{L}}} - 1 \right), \quad (1)$$

$\lambda_{\text{S1}}$  为一阶斯托克斯光波长,  $\lambda_{\text{L}}$  基频光波长,  $P_{\text{S1}}$  为产

生的一阶斯托克斯光功率.

假设拉曼光以基模高斯光束传播,通过类似侧面抽运晶体棒的热焦距公式推导<sup>[15]</sup>,可获得拉曼过程导致的附加热透镜焦距公式

$$f_{\text{R}} = \frac{k_{\text{c}} \pi \omega_{\text{S1}}^2}{P_{\text{S1}} \left( \frac{dn}{dT} \right) \left( \frac{\lambda_{\text{S1}}}{\lambda_{\text{L}}} - 1 \right)}, \quad (2)$$

式中  $k_{\text{c}}$  为晶体热导率,  $dn/dT$  是折射率温度系数. 由于拉曼晶体中的热量是伴随着拉曼光产生而导致的量子亏损引起的,所以一阶斯托克斯光输出功率越高,其量子亏损导致的热效应越严重.

根据激光谐振腔  $g$  因子稳定性判据

$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1, \quad (3)$$

对于腔内包含薄透镜的谐振腔等效的谐振腔的相关参量为

$$g_1 = 1 - \frac{L_2}{f} - \frac{L_0}{R_1}, \quad (4)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L_1}{f} - \frac{L_0}{R_2}, \quad (5)$$

式中,  $L_0 = L_1 + L_2 - (L_1 \cdot L_2 / f)$ ,  $f$  为薄透镜的焦距,  $R_1, R_2$  分别为两腔镜的曲率半径,  $L_1, L_2$  分别为薄透镜到对应两腔镜的距离按图 2 所示的腔型,取等效薄透镜位置在晶体内抽运光束要位置,抽运光输入端面约为 3 mm 处,忽略 Q 开关的石英晶体和 KTP 晶体的热透镜效应,并取 Nd:YVO<sub>4</sub>, 石英晶体和 KTP 的折射率<sup>[16]</sup>分别为 1.96, 1.46, 1.86. 可计算得随着热焦距缩短,第一稳定区为  $f > 52.7$  mm,当晶体热透镜焦距缩短到 52.7 mm 时,谐振腔开始失稳,所以本激光系统在抽运功率 11.2 W 左右时的晶体热透镜焦距约为 52.7 mm.

文献[17]分析了产生基频激光、产生一阶斯托克斯光及吸收反向产生的倍频黄光对自拉曼晶体的热效应的影响. 本系统通过在自拉曼晶体的输出端镀制了对倍频光的高反膜系,可防止晶体对反向产生的倍频光的吸收,同时增加了黄光从输出镜输出功率. 但激光输出功率还是受到了严重的热效应限制. 为了实现更高的输出功率,可对  $a$  切的晶体进行复合结构设计,鉴于我们先前对  $a$  切复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的研究表明复合结构可改善热效应<sup>[8,9]</sup>;另外也可采用 880 nm 直接抽运方式减少激光产生过程的量子亏损,从而降低热效应. 所以如果采用 880 nm 直接抽运复合的  $c$  切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,可望获得更高的 589 nm 黄光输出.

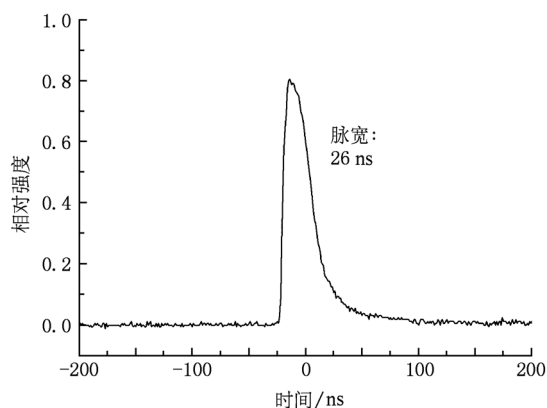


图4 最高输出功率下测量得到的单脉冲波形

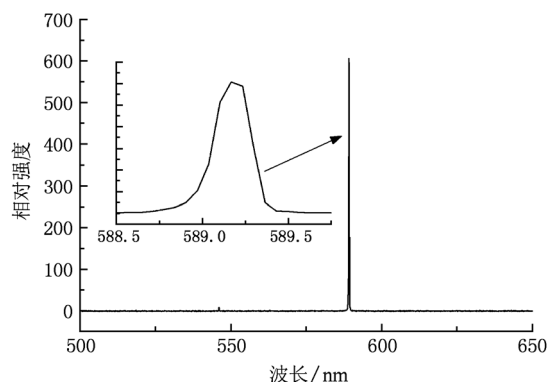


图5 倍频黄光谱线

通过用 PIN 光电二极管和 500 MHz 泰克数字示波器(型号 TDS3052B)记录 589 nm 的脉冲. 图 4 中给出了在最高输出功率下测量得到的单脉冲波形,脉冲宽度约为 26 ns. 采用型号为 AvaSpec-3648 的光纤光谱仪(分辨率为 0.07nm)对输出的黄光波长进行检测,结果如图 5 所示,在波长 500 nm 到 650 nm 之间只测量到 589 nm 波长的黄光,中心波长为 589.17 nm,线宽约为 0.2 nm. 所以  $c$  切 Nd:YVO<sub>4</sub> 自拉曼倍频的中心波长跟钠 D2 共振谱线 589.159 nm 符合得较好<sup>[18]</sup>,是潜在的钠信号光源. 此方法获得的 589 nm 光源具有结构简单紧凑,激光性能稳定的优点.

实验中在  $c$  切 Nd:YVO<sub>4</sub> 自拉曼晶体内也发现有蓝光,但没有方向性. 对蓝光的谱线进行测量,发现其中心波长刚好在 473 nm 附近,谱线如文献[9]中所示. 此前我们已经在  $a$  切 Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, SrWO<sub>4</sub> 的拉曼实验中观察到. 如文献[19]中,由于是在 Nd:YVO<sub>4</sub> 的自拉曼实验中,则猜测为

Nd<sup>3+</sup> 的上转换. 但在我们实验中发现纯 YVO<sub>4</sub>, SrWO<sub>4</sub> 里面产生的蓝光强度不亚于 Nd:YVO<sub>4</sub>. 其具体物理机理尚不清楚,有待深入研究.

## 4. 结 论

本文研究了采用  $c$  切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为自拉曼晶体的倍频黄光激光器. 采用尺寸为 4 mm × 4 mm × 10 mm, 二类临界相位匹配角 ( $\theta = 69^\circ, \phi = 0^\circ$ ) 切割的 KTP 晶体作为倍频晶体. 由于  $c$  切 Nd:YVO<sub>4</sub> 跃迁截面较小,所以系统设计中严格控制谐振腔及晶体膜系的参数,使得结构尽量紧凑,减少腔内插入损耗和衍射损耗. 最终在脉冲重复率 10 kHz, 11.2 W 的半导体激光抽运下获得了最高 570 mW 的倍频黄光激光输出,对应抽运光到倍频黄光的转化效率约为 5.1%,斜效率为 6.6%. 激光中心波长在 589.17 nm,谱线宽度 0.2 nm,与钠 D2 共振谱线符合较好,所以是潜在的钠信号光源.

- [1] Yue J, She C Y, Williams B P, Vance J D, Acott P E, Kawahara T D 2009 *Opt. Lett.* **34** 1093
- [2] Lu Y F, Xie S Y, Bo Y, Cui Q J, Zong N, Gao H W, Peng Q J, Cui D F, Xu Z Y 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 970 (in Chinese) [鲁远甫、谢仕永、薄 勇、催前进、宗 楠、高宏伟、彭钦军、催大复、许祖彦 2009 物理学报 **58** 970]
- [3] Geng A C, Bo Y, Bi Y, Sun Z P, Yang X D, Lu Y F, Chen Y H, Guo L, Wang G L, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 5227 (in Chinese) [耿爱丛、薄 勇、毕 勇、孙志培、杨晓冬、鲁远甫、陈亚辉、郭 林、王桂玲、崔大复、许祖彦 2006 物理学报 **55** 5227]

- [4] Wang Z C, Peng Q J, Bo Y, Xu J L, Xie S Y, Li C Y, Xu Y T, Yang F, Wang Y B, Cui D F, Xu Z Y 2010 *Appl. Opt.* **49** 3465
- [5] Zheng Q, Yao Y, Qu D P, Zhou K, Liu Y, Zhao L 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 1939
- [6] Pask H M, Dekker P, Mildren R P, Spence D J, Piper J A 2008 *Prog. Quantum Electron.* **32** 121
- [7] Kaminskii A A, Ueda K, Eichler H J, Kuwano Y, Kouta H, Bagaev S N, Chyba T H, Barnes J C, Gad G M A, Murai T, Lu J 2001 *Opt. Commun.* **194** 201
- [8] Chen Y F 2004 *Opt. Lett.* **29** 1251

- [9] Zhu H Y, Duan Y M, Zhang G, Huang C H, Wei Y, Chen W D, Huang Y D, Ye N 2009 *Opt. Lett.* **34** 2763
- [10] Zhu H Y, Duan Y M, Zhang G, Huang C H, Wei Y, Shen H Y, Zheng Y Q, Huang L X, Chen Z Q 2009 *Opt. Express* **17** 21544
- [11] Chang Y T, Chang H L, Su K W, Chen Y F 2009 *Opt. Express* **17** 11892
- [12] Wang B S, Tan H M, Gao L L, Peng J Y, Miao J G 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2095
- [13] Chen X H, Zhang X Y, Wang Q P, Li P, Cong Z H 2009 *Laser Phys. Lett.* **6** 26
- [14] Su K W, Chang Y T, Chen Y F 2007 *Appl. Phys. B* **88** 47
- [15] Pask H M 2003 *Progress in Quantum Electronics* **27** 3
- [16] Wang Z J, Chen X P, Lu H M, Gu P S 1987 *Handbook of Optical Technology* (Beijing: China Machine Press) p770—776 (in Chinese) [王之江、陈杏蒲、陆汉民、顾培森 1987 光学技术手册 (北京: 机械工业出版社) 第 770—776 页]
- [17] Dekker P, Pask H M, Spence D J, Piper J A 2007 *Opt. Express* **15** 7038
- [18] Bienfang J C, Denman C A, Grime B W, Hillman P D, Moore G T, Telle J M 2003 *Opt. Lett.* **28** 2219
- [19] Wang B S, Tan H M, Peng J Y, Miao J G, Gao L L 2007 *Opt. Mater.* **29** 1817

## LD end-pumped *c*-cut Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 589 nm generated by sef-Raman conversion and frequency doubling \*

Zhu Hai-Yong<sup>1)2)†</sup> Zhang Ge<sup>2)</sup> Zhang Yao-Ju<sup>1)</sup> Huang Cheng-Hui<sup>2)</sup>  
Duan Yan-Min<sup>2)</sup> Wei Yong<sup>2)</sup> Wei Peng-Fei<sup>1)</sup> Yu Yong-Li<sup>1)</sup>

1) (College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

2) (Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

(Received 3 November 2010; revised manuscript received 15 November 2010)

### Abstract

In this paper we report a LD end-pumped *c*-cut Nd:YVO<sub>4</sub> yellow laser generated by sef-Raman conversion and frequency doubling. A 10-mm-length KTP with critical phase matching ( $\theta = 69^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ) cut is adopted as a second-harmonic generation. For the lower stimulated-emission cross section of *c*-cut Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, the resonator cavity and the coating of crystals are carefully designed to reduce the insert loss and diffraction loss. Finally, at a repetition rate of 10 kHz and an incident pump power of 11.2 W, the average power of yellow light up to 570 mW is achieved, corresponding to an overall diode – yellow conversion efficiency of 5.1% and a slope efficiency of 6.6%. The central wavelength is at 589.17 nm with a width of 0.2 nm, which is well fitted to the sodium D2 resonance radiation.

**Keywords:** Raman laser, *c*-cut Nd:YVO<sub>4</sub>, 589 nm, yellow laser

**PACS:** 42.55.Ye, 42.65.Ky, 42.60.Gd, 42.55.Xi

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10904143), and Fund of Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2008DP173016).

† E-mail: hzyzhu\_opt@gmail.com