

# 激光二极管泵浦的 $1.34 \mu\text{m}$ 及其腔内倍频 红光 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 激光器\*

王长青 沈德元 卢建仁 邵宗书 蒋民华

(山东大学晶体材料研究所 济南 250100)

**提要** 报道了激光二极管泵浦的  $1.34 \mu\text{m}$   $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  激光器, 利用 KTP 晶体腔内倍频, 实现了  $670 \text{ nm}$  红光输出。计算了 KTP 在  $1.34 \mu\text{m}$  的倍频参数, 分析并提出了提高腔内倍频效率的有效途径。

**关键词** 激光二极管泵浦,  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  激光器, 腔内倍频

众所周知,  $\text{Nd}^{3+}$  除了从  ${}^4F_{3/2}$  到  ${}^4I_{11/2}$  能级的受激跃迁可产生  $1.06 \mu\text{m}$  激光外, 还具有从  ${}^4F_{3/2}$  到  ${}^4I_{13/2}$  能级的弱辐射跃迁, 产生  $1.3 \mu\text{m}$  波段的激光辐射。近年来,  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  晶体由于比  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  具有掺杂浓度高、吸收系数大等许多独特的优点, 已经成为一种倍受青睐的适合激光二极管(LD)泵浦的主要固体激光材料。目前, LD 泵浦  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  晶体的  $1.06 \mu\text{m}$  及其腔内倍频绿光激光器的研究已经比较深入<sup>[1, 2]</sup>, 但  $1.34 \mu\text{m}$  及其腔内倍频红光  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  激光器的研究<sup>[3]</sup>还很少。在  $1.3 \mu\text{m}$  波段,  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  的受激发射截面远高于  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ ,  $\sigma\tau$  乘积也比  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  大得多, 其  $1.34 \mu\text{m}$  谱线与  $1.06 \mu\text{m}$  谱线的分支比为 0.24, 而  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  的分支比仅为 0.18<sup>[4]</sup>。利用非线性晶体对  $1.34 \mu\text{m}$  进行腔内倍频, 可获得  $670 \text{ nm}$  的红光输出, 这种红光光源能够用于泵浦可调谐  $\text{Cr}^{3+} \cdot \text{LiSAF}$  激光器, 还可用于彩色显示、医学等领域。尽管目前红光 LD 已经商品化, 但与固体激光器相比, 由于 LD 存在光束质量差、线宽宽、输出波长随温度漂移、难以进行腔内调制(调  $Q$ 、锁模等)和获得高峰值功率超短脉冲等缺点, 在许多场合还不能取代红光固体激光器。因此, LD 泵浦的  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  腔内倍频红光激光器仍不失为一种具有实用价值的新型固体红光光源。

本文研究了 LD 泵浦  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  激光器的  $1.34 \mu\text{m}$  输出特性, 利用一类匹配的 KTP 晶体腔内倍频, 实现了  $670 \text{ nm}$  红光输出, 对 KTP 晶体在  $1.34 \mu\text{m}$  的倍频特性进行了计算、分析并指出了影响倍频效率的几个关键因素。

## 1 实验与分析

### 1.1 实验装置

实验采用中心波长为  $809 \text{ nm}$  的国产 LD 进行端面泵浦, LD 输出为线偏振光, 最大输出功

\* 中国博士后科学基金资助项目。

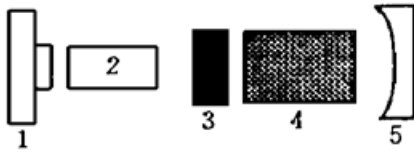


图 1 LD 泵浦 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器实验装置图

1: LD; 2: 梯度折射率透镜;

3: Nd·YVO<sub>4</sub>; 4: KTP; 5: 输出镜

Fig. 1 Experimental setup of the LD-pumped Nd·YVO<sub>4</sub> laser

1: LD; 2: gradient index lens;

3: Nd·YVO<sub>4</sub>; 4: KTP; 5: output mirror

率 1 W。用直径 2 mm, 对 830 nm 波长的节距为 0.25 的梯度折射率透镜进行端面泵浦耦合。Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体的掺钕浓度为 2 at-%, 横截面为 3.0×3.0 (mm), *a* 轴通光, 通光方向长度为 1.2 mm。在 809 nm 处, 晶体对  $\pi$  偏振泵浦光的吸收系数为 21.0 cm<sup>-1</sup>, 对  $\sigma$  偏振泵浦光的吸收系数为 10.4 cm<sup>-1</sup>。为抑制 Nd·YVO<sub>4</sub> 中增益最强的 1.06  $\mu$ m 谱线起振, 作为腔镜之一的 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体的泵浦光输入面的镀膜层除满足对 1.34  $\mu$ m 全反(反射率大于 99.8%)和 809 nm 高透(透过率大于 90%)外, 还要同时对 1.06  $\mu$ m 高透(透过率大于 90%), 晶体的另一面镀 1.34  $\mu$ m 增透膜, 以减小腔内反射损耗。为使晶体有效地吸收泵浦光功率, 采用  $\pi$  偏振方式泵浦。实验装置如图 1 所示。

### 1.2 1.34 $\mu$ m 输出特性的研究

在研究 1.34  $\mu$ m 激光输出特性时, 腔内先不放入倍频晶体 KTP。输出镜有两种, 曲率半径 (*R*) 均为 20 mm, 对 1.34  $\mu$ m 的透过率分别为  $T = 0.2\%$  和  $T = 2.5\%$ , 为抑制 1.06  $\mu$ m 起振, 输出镜对 1.06  $\mu$ m 的透过率也要大于 90%。

在腔长为 17 mm 的情况下, 分别使用上述两种透过率的输出镜, 测量了 1.34  $\mu$ m 激光输出功率随输入泵浦功率的关系, 如图 2 所示。在两种输出镜下激光器均为基横模运转。当  $T = 0.2\%$  时, 阈值泵浦功率为 3.5 mW, 斜效率为 6.9%; 当  $T = 2.5\%$  时, 阈值泵浦功率为 16.8 mW, 斜效率为 31.5%, 而我们在近似相同的条件下对 LD 泵浦 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器的 1.06  $\mu$ m 输出所进行的实验<sup>[5]</sup>, 获得了 11.8 mW 的阈值泵浦功率和 47% 的斜效率。通过实验数据的对比可以发现, 1.34  $\mu$ m 的斜效率大约是 1.06  $\mu$ m 的 70% 左右, 而 1.06  $\mu$ m 的阈值泵浦功率是 1.34  $\mu$ m 的 70% 左右。

### 1.3 腔内倍频红光输出特性的研究

首先计算了一类匹配的 KTP 晶体对 1.34  $\mu$ m 倍频的相位匹配条件和容限参数, 所得数据列于表 1 中。作为对比, 表中同时列出了对 1.06  $\mu$ m 倍频的数据。表 1 中,  $\lambda$  是基频光波长,  $\theta$  和  $\varphi$  是相位匹配角度,  $\Delta\theta$  和  $\Delta\varphi$  分别是它们的容许角,  $d_{\text{eff}}$  是有效非线性系数,  $\rho_{11}$ ,  $\rho_{12}$  和  $\rho_{21}$  分别是基频快光、基频慢光和倍频光的走离角,  $\Delta\lambda$  是容许波长。表 1 中容许参数  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\varphi$  和  $\Delta\lambda$  均是在 KTP 长度为 5 mm 的情况下计算的, 其它参数与 KTP 长度无关。由表 1 可见, 与 1.06  $\mu$ m 的倍频参数相比, 在 1.34  $\mu$ m 处有两项参数应引起注意: 一是最大走离角为 2.54°, 是 1.06  $\mu$ m 处(0.26°)的十倍; 二是最小容限角只有 0.09° ( $\theta$  方向), 仅为 1.06  $\mu$ m 处(0.59°,  $\varphi$  方向)的百分之十五。在一类相位匹配的倍频晶体中, 如果光束半径为  $w$ , 则由于走离效应所决定的倍频晶体的最大作用长度(孔径效应长度)为<sup>[6]</sup>

$$l_a = 1.16w / \rho \quad (1)$$

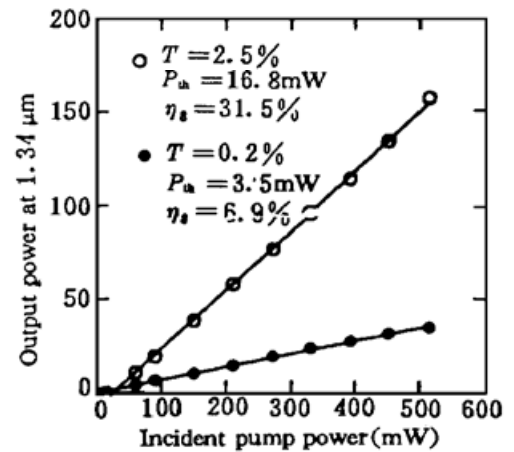


图 2 1.34  $\mu$ m 输出功率随输入泵浦功率的变化关系

Fig. 2 1.34  $\mu$ m output power as a function of the incident pump power

其中  $\rho$  为走离角。

表 1 Ⅲ类匹配 KTP 晶体在 1.06  $\mu\text{m}$  和 1.34  $\mu\text{m}$  处的倍频参数

Table 1 Parameters of KTP for type-Ⅲ frequency-doubling at 1.06  $\mu\text{m}$  and 1.34  $\mu\text{m}$

$\lambda$ (nm)	$\theta$ ( $^\circ$ )	$\varphi$ ( $^\circ$ )	$d_{\text{eff}}$ ( $\times 10^{-12}\text{V/m}$ )	$\Delta\theta$ ( $^\circ$ )	$\Delta\varphi$ ( $^\circ$ )	$\rho_{11}$ ( $^\circ$ )	$\rho_{12}$ ( $^\circ$ )	$\rho_{21}$ ( $^\circ$ )	$\Delta\lambda$ (nm)
1064	90	23.28	7.36	1.92	0.59	0.19	0	0.257	0.69
1340	59.33	0	6.36	0.09	5.61	0	2.54	0	2.30

我们知道, 倍频效率与基波功率密度成正比。在图 1 所示的平凹腔结构中, 为了提高倍频晶体中的基波功率密度, 应使倍频晶体尽量贴近激光晶体(即靠近谐振腔的束腰)。由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体很薄, 可以认为倍频晶体 KTP 中的光束半径  $w$  近似等于位于谐振腔平面镜上的束腰半径  $w_0$ 。当输出镜的曲率半径为  $R$ , 谐振腔的有效腔长为  $L$  时, 束腰半径  $w_0$  为

$$w_0 = \left[ \left[ \frac{\lambda}{2} \right]^2 L(R-L) \right]^{1/4} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式, 取  $R = 50 \text{ mm}$ ,  $\rho = 2.54^\circ (0.044 \text{ rad})$ , 得到 KTP 对 1.34  $\mu\text{m}$  倍频的最大作用长度  $l_a$  与腔长  $L$  的关系, 如图 3 所示。当  $L = R/2$  时,  $l_a$  最大, 为 2.7 mm; 当腔长  $L$  很短或  $L$  接近  $R$  时,  $w_0$  很小, 基波功率密度很高, 但最大作用长度  $l_a$  非常小, 由于倍频光功率与有效倍频晶体长度的平方成正比,  $l_a$  太小不利于获得较高的倍频光功率。为了在高基波功率密度下有效地增加倍频晶体的作用长度, 应尽量补偿或避免走离角的产生, 如采用准相位匹配技术或非临界相位匹配的晶体, 采用两块切割角度相同且  $b$  轴互成  $180^\circ$  角放置的 KTP 晶体也可实现走离补偿<sup>[6]</sup>。

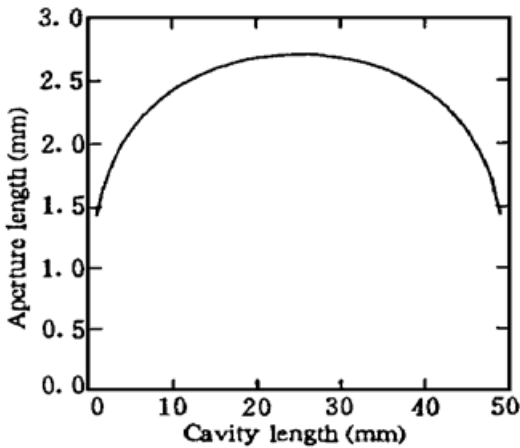


图 3 最大作用长度与腔长的关系

Fig. 3 Aperture length as a function of the cavity length

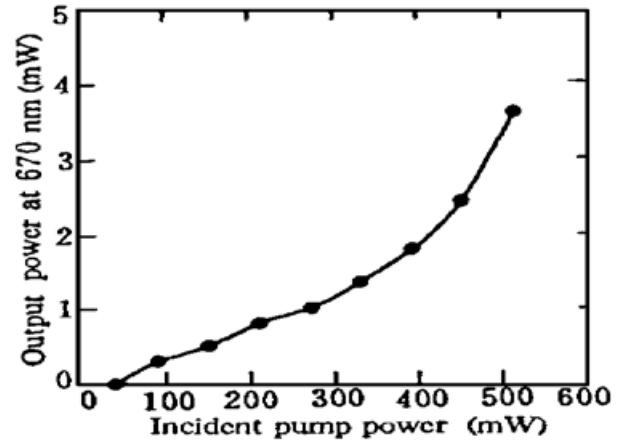


图 4 670 nm 输出功率随输入泵浦功率的变化关系

Fig. 4 670 nm output power as a function of the incident pump power

我们利用一块原有的 KTP 晶体实现了 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器 1.34  $\mu\text{m}$  的腔内倍频红光输出。所用 KTP 晶体的切割角度为  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\theta = 59.1^\circ$ , 截面为  $3 \times 3$  (mm), 通光长度为 5 mm, 两面均镀有 1.34  $\mu\text{m}$  和 0.67  $\mu\text{m}$  的双色增透膜。输出镜的曲率半径为  $R = 50 \text{ mm}$ , 对 1.34  $\mu\text{m}$  全反, 对 1.06  $\mu\text{m}$  和 0.67  $\mu\text{m}$  高透。采用短腔结构, 使 Nd:YVO<sub>4</sub>, KTP 和输出镜三者紧贴。经单色仪测量, 输出红光波长为 670 nm。用滤色片滤掉基频光和泵浦光功率, 测量了激光器的红光输出功率随泵浦功率的关系曲线, 如图 4 所示。阈值泵浦功率为 40 mW, 当泵浦功率为

515 mW时,红光输出功率为 3.6 mW,光-光转换效率为 0.7%,输出红光为基横模,发散度为 2.5 mrad,经 60 min 监测,输出功率的不稳定性小于 2%。根据前面的分析,我们认为造成红光输出效率较低的因素主要有以下几个方面:一是未进行走离补偿,KTP 的有效作用长度实际很小;二是多余的 KTP 长度引入了腔内损耗;三是晶体的切割角度略微偏离了相位匹配角,由于方向的容许角只有  $0.09^\circ$ , $\theta$  切割角与相位匹配角的微小偏离会导致倍频效率的急剧下降,当调整 KTP 的方位使光轴与相位匹配方向重合时,将会造成 KTP 的端面与光轴不垂直而在腔内引入反射损耗。我们在实验中发现,当调整 KTP 和谐振腔使红光功率最高时,输出光斑为稍稍分开且强度不等的两个斑点,这显然是 KTP 端面的二次反射造成的。我们相信,如果 KTP 晶体严格按照相位匹配角度切割,并且使用两块通光长度较短且  $b$  轴互成  $180^\circ$  的 KTP 进行走离补偿,可以获得更高的光-光转换效率。

### 3 结 论

利用 LD 纵向泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,并通过晶体和腔镜的镀膜抑制增益较强的  $1.06 \mu\text{m}$  谱线起振,实现了  $1.34 \mu\text{m}$  激光运转。利用一类匹配的 KTP 晶体腔内倍频,实现了 670 nm 红光输出,对 KTP 晶体在  $1.34 \mu\text{m}$  的倍频特性进行了计算、分析并指出了提高腔内倍频效率的有效途径。

### 参 考 文 献

- 1 Y. Kitaoka, S. Ohmori. Stable and efficient green light generation by intracavity frequency doubling of Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(3): 299
- 2 N. Mackinnon, B. D. Sinclair. A laser diode array pumped, Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP, composite material microchip laser. *Opt. Commun.*, 1994, **105**: 183
- 3 G. C. Bowkett, G. W. Baxter, D. J. Booth. Single-mode  $1.34 \mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser with cw Ti:sapphire and diode-laser pumping. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(13): 957
- 4 B. H. T. Chai, G. Loutts, J. Lefaucheur *et al.*. Comparison of laser performance of Nd-doped YVO<sub>4</sub>, GdVO<sub>4</sub>, Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>F, Sr<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F and Sr<sub>5</sub>(VO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F. *Proceedings on Advanced Solid-state Lasers*, 1994, **20**: 41
- 5 沈德元,王长青,邵宗书等. 激光二极管泵浦高效 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器特性研究. *中国激光*, 1996, **A23**: 19
- 6 J. J. Zondy, M. Abed, S. Khodja. Twin-crystal walk-off-compensated type-II second-harmonic generation: single-pass and cavity-enhanced experiments in KTiOPO<sub>4</sub>. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(12): 2368

## 1.34 $\mu\text{m}$ Intracavity Frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> Laser Pumped by a Laser-diode

Wang Changqing Shen Deyuan Lu Jianren Shao Zongshu Jiang Minhua  
(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

**Abstract** A laser-diode-pumped  $1.34 \mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> laser was reported. With KTP crystal for intracavity frequency-doubling, a 670nm red laser was obtained. Parameters of KTP for second-harmonic-generation at  $1.34 \mu\text{m}$  were calculated. Some methods of raising the conversion efficiency of intracavity frequency-doubling were presented and analyzed.

**Key words** laser-diode-pumped, Nd:YVO<sub>4</sub> laser, intracavity-doubling