

# 激光二极管泵浦高效 Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器\*

王长青 沈德元 邵宗书 陈 军 蒋民华

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

**摘 要** 报道了激光二极管泵浦的高转换效率 Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器。研究了泵浦光斑尺寸、谐振腔长、KTP 及 Nd: YVO<sub>4</sub> 的温度对输出绿光效率的影响。在输入泵浦功率为 669 mW 时, 获得绿光输出功率 154 mW, 光-光转换效率达 23%。

**关键词** 激光二极管, 泵浦, Nd: YVO<sub>4</sub>, 腔内倍频, 转换效率

## 1 引 言

在适合激光二极管泵浦的众多激光晶体中, Nd: YVO<sub>4</sub> 因其一系列优良的性质而倍受人们青睐, 它具有大的受激发射截面和宽的吸收带宽, 是激光二极管泵浦中小功率激光器的理想工作材料。近年来, 以 Nd: YVO<sub>4</sub> 为增益介质的激光二极管泵浦腔内倍频绿光激光器是一个研究热点<sup>[1-3]</sup>, 目前文献报道的该类器件的最高光-光转换效率是 1993 年日本大坂大学 Ki-laoka 等人发表的<sup>[3]</sup>, 他们用腔外波长锁定的激光二极管泵浦, 获得高达 22% 的光-光转换效率。

本文用国产激光二极管泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体, 并用 KTP 晶体腔内倍频, 依据模式匹配原则和倍频理论设计了谐振腔腔型。对泵浦光斑尺寸、谐振腔长、倍频晶体和激光晶体的温度对输出绿光功率和效率的影响进行了仔细的实验研究。在输入泵浦功率为 669 mW 的情况下, 获得 154 mW 绿光输出, 光-光转换效率为 23%, 高于文献报道的最好水平。

## 2 实验装置及腔型设计

Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器采用激光二极管\*\* 纵向泵浦方式, 实验装置如图 1 所示。激光二极管发光元面积为  $1 \times 100 \mu\text{m}^2$ , 最大输出功率为 1 W, 输出光为线偏振光, 中心波长为 809 nm, 外加温控仪对其发射波长进行控制。实验所用 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体掺 Nd<sup>3+</sup> 浓度为 2 at. %, 截面为  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ , a 轴通光, 通光长度 1.3 mm;  $\pi$  偏振泵浦, 吸收系数为  $33.6 \text{ cm}^{-1}$ ; 其输入端面镀有 1064 nm 全反 ( $R \geq 99.5\%$ ) 和 809 nm 高透 ( $T \geq 90\%$ ) 的双色介质

\* 国家 863 计划资助项目。\* \* 中国科学半导体研究所生产。

收稿日期: 1995 年 7 月 6 日; 收到修改稿日期: 1995 年 11 月 10 日

膜,它与输出镜构成激光谐振腔;另一端镀 1064 nm 增透膜。倍频晶体 KTP 按 II 类相位匹配方向切割,尺寸为  $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ ,两端均镀 1064 nm 和 532 nm 的双色增透膜,以减小腔内反射损耗,KTP 快轴与 Nd:YVO<sub>4</sub> 的 c 轴成 45° 夹角。输出镜的曲率半径  $R$  等于 100 mm,镀膜层对 1064 nm 的反射率大于 99.5%,对 532 nm 的透过率约为 90%。用直径 2 mm、长 5.3 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。

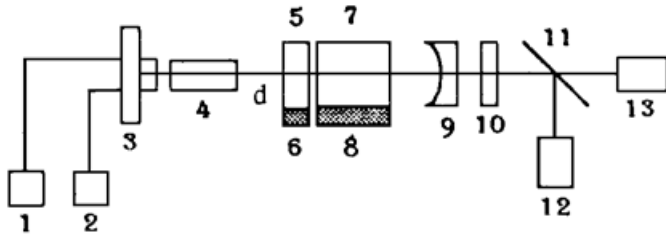


Fig. 1 Experimental setup for LD-pumped Nd:

YVO<sub>4</sub>/KTP intracavity-doubled laser

1: driving power; 2, 6, 8: temperature controller; 3: LD; 4: gradient index lens; 5: Nd: YVO<sub>4</sub>; 7: KTP; 9: output mirror; 10: filter; 11: beam splitter; 12: monochromator; 13: power meter

从腔型设计的角度考虑,要想提高绿光输出的光-光转换效率,一是实现激光晶体中泵浦体积与腔模体积的最佳模式匹配,即提高泵浦效率;二是增加倍频晶体中的基波功率密度,提高基频光向倍频光转换的倍频效率。泵浦体积的大小取决于激光晶体离耦合透镜的距离,在透镜焦点处泵浦光斑尺寸最小,泵浦功率密度最高。对于图 1 所示的平凹腔型,由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体较薄,激光晶体中的腔模体积取决于谐振腔的束腰半径,在输出镜曲率半径  $R$  给定的情况下,束腰半径的大小由腔长  $L$  决定。平凹腔束腰半径的计算公式为<sup>[4]</sup>

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

式中  $\lambda$  为基频光波长。 $R = 100 \text{ mm}$  时,  $w_0$  随  $L$  的变化关系如图 2 所示,短腔和长腔对应的  $w_0$  较小。对于不同的泵浦光斑尺寸,通过改变腔长可以实现最佳模式匹配,获得最高泵浦效率。众所周知,倍频效率与基波功率密度的平方成正比,为了提高倍频晶体中的基波功率密度,应尽量减小倍频晶体中的腔模半径,除了使倍频晶体尽量贴近激光晶体外,还应选择短腔或长腔以减小腔模束腰半径,获得高的倍频效率。从模式匹配角度考虑,小的腔模束腰要求小的泵浦光斑尺寸。

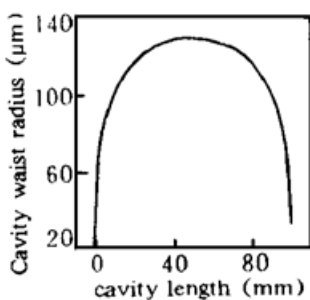


Fig. 2 Cavity waist radius versus cavity length

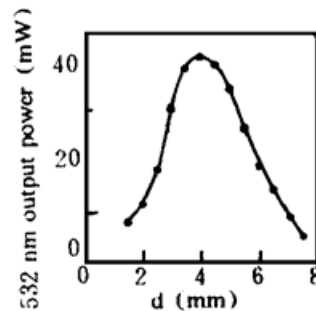


Fig. 3 Output power at 532 nm versus distance between Nd: YVO<sub>4</sub> and gradient index lens

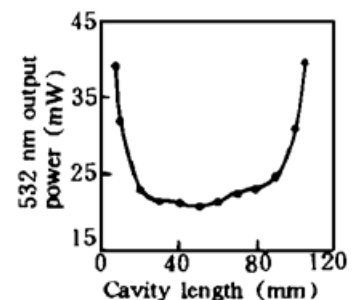


Fig. 4 Output power at 532 nm versus cavity length

### 3 实验结果及分析

在保持泵浦光功率及腔长不变的情况下,整体轴向平移激光二极管和梯度折射率透镜,通过改变 Nd:YVO<sub>4</sub> 到透镜的距离  $d$  来改变泵浦光斑的尺寸。测量了输出绿光功率随  $d$  的变化关系,如图 3 所示。 $d = 4.0 \text{ mm}$  时输出绿光功率最大。此时泵浦焦点落在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内部。经测量,焦斑为椭圆,最长和最短两个方向的尺寸分别约为  $110 \mu\text{m}$  和  $90 \mu\text{m}$ ,平均焦斑半径约为  $50 \mu\text{m}$ 。

保持泵浦功率及  $d$  不变, 测量了输出绿光功率随腔长  $L$  的变化关系, 如图 4 所示。在短腔和长腔的情况下, 输出绿光功率较高。这一结果证实了前面的分析, 即要想获得高的绿光输出功率及高的光-光转换效率, 应尽量减小泵浦光斑半径, 并采用超短腔或长腔 ( $L \rightarrow R$ ) 来减小腔模束腰半径。这样既能满足模式匹配要求获得高的泵浦效率, 又能同时提高倍频晶体中的基波功率密度获得高的倍频效率。而通常文献所采用的半共焦腔 ( $L = R/2$ ) 恰恰是最不理想的。

由于 KTP 晶体是一种双折射材料, 它在进行 II 类倍频时还会起到波片作用, 所以尽管腔内没有 KTP 时, Nd: YVO<sub>4</sub> 的基频辐射平行于  $c$  轴偏振, 但 KTP 放入腔内后, 垂直  $c$  轴偏振的基频光也能起振。随着 KTP 温度的变化, KTP 的波片作用及基频光的偏振态将会改变, 这将导致倍频效率的变化。为了得到最大二次谐波功率, 只能使 KTP 晶体起二分之一波片的作用, 以维持基频光的线偏振。通过给 KTP 晶体附加特殊的致冷和控温装置, 实验测量并发现了输出绿光功率随 KTP 温度的周期性变化规律, 如图 5 所示。从图 5 可看出, 若想获得最高绿光输出功率, 必须将 KTP 控制在某个适当的温度。

激光晶体的热效应较倍频晶体的热效应要复杂一些, 1) 在腔内有 KTP 的情况下, Nd: YVO<sub>4</sub> 也有双折射引起的波片作用, 与温度具有周期性关系; 2) 激光晶体的荧光寿命、发射截面以及吸收特性均与温度有关; 3) Nd: YVO<sub>4</sub> 的热透镜效应对谐振腔有影响。实验给 Nd: YVO<sub>4</sub> 也安装了特殊的致冷和控温装置, 在保持 KTP 恒温的情况下, 对绿光输出功率随 Nd: YVO<sub>4</sub> 温度的变化关系进行了测量, 如图 6 所示。显然, 若要获得最高绿光输出功率, Nd: YVO<sub>4</sub> 也要控制在某一适当的温度。

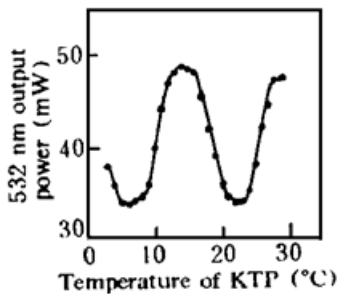


Fig. 5 Output power at 532 nm versus temperature of KTP

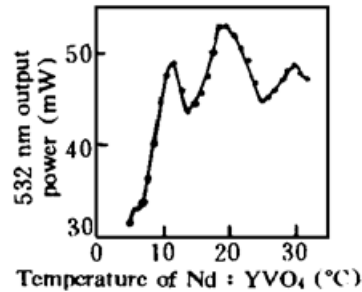


Fig. 6 Output power at 532 nm versus temperature of Nd: YVO<sub>4</sub>

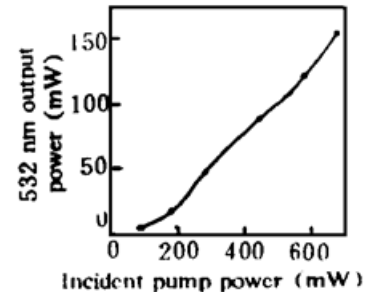


Fig. 7 Output power at 532 nm versus incident pump power

控制激光二极管的温度使其发射谱的中心波长恰好等于 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体的峰值吸收波长, 使  $d = 4$  mm, 采用长腔 ( $L = 98$  mm), 并将 KTP 和 Nd: YVO<sub>4</sub> 的温度分别控制在 14 °C 和 19 °C, 仔细调整泵浦光束及谐振腔, 使激光器处于最佳工作状态, 测量了单端绿光输出功率随输入泵浦功率的关系曲线, 如图 7 所示。当泵浦功率为 669 mW 时, 最大绿光输出功率为 154 mW, 光-光转换效率为 23%, 高于文献[3]报道的用波长锁定激光二极管泵浦的最好结果。用激光功率计进行 30 min 定时监测, 输出功率的不稳定性小于 2%。输出光束的远场图样为 TEM<sub>00</sub> 模, 用光栅单色仪测得输出绿光波长为 532 nm。

**结 论** 通过腔型及腔长的设计和选择, 并通过对激光晶体和倍频晶体采取精确的控温措施, 实现了激光二极管泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器的高效运转。在输入泵浦功率为 669 mW 时, 获得绿光输出功率 154 mW, 光-光转换效率达 23%, 高于目前文献报道的最好水平。

## 参 考 文 献

- [1] N. Mackinnon, B. D. Sinclair, W. Sibbett *et al.*. Ultra-compact, laser-diode-array-pumped, Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP, frequency-doubled, composite-material microchip laser. *CLEO'94*, Anaheim, California 1994, Paper CTuP2: 156
- [2] 何慧娟, 廖 严. 高转换效率连续内腔倍频绿光激光器. *中国激光*, 1995, **A22**(2): 107
- [3] Y. Kitaoka, S. Ohmori, K. Yamamoto *et al.*. Stable and efficient green light generation by intracavity frequency doubling of Nd: YVO<sub>4</sub> laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(3): 299~ 301
- [4] 周炳琨, 高以智, 陈家骅 等. *激光原理*. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1980: 337 页

## High Efficient Intracavity-Doubled Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP Laser Pumped by a Laser-Diode

Wang Changqing Shen Deyuan Shao Zongshu Chen Jun Jiang Minhua  
(*Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100*)

(Received 6 July 1995; revised 10 November 1995)

**Abstract** High efficient intracavity frequency-doubled Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP laser pumped by a laser-diode was reported. The dependence of output power and efficiency on the size of pump spot, cavity length, temperature of KTP and Nd: YVO<sub>4</sub> was investigated. The output power of 154 mW at 532 nm and optical-to-optical conversion efficiency of 23% were obtained at the incident pump power of 669 mW.

**Key words** laser-diode, pump, Nd: YVO<sub>4</sub>, intracavity-doubled, conversion efficiency