

# 激光二极管直接耦合泵浦的 高效率 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器\*

王军民 李瑞宁 郭蕊香 谢常德 彭堃堦

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

**摘 要** 使激光二极管的发光面紧贴 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体, “面对面”直接耦合泵浦, 采用 KTP 晶体腔内倍频, 在 503 mW 的泵浦功率下, 获得 532 nm 基横模绿光输出约 73 mW, 光光总体转换效率为 14.5%。

**关键词** 激光二极管, 直接耦合泵浦(DCP), Nd:YVO<sub>4</sub>, KTP。

## 1 引 言

采用激光二极管作为泵浦源研制小型化、高效率的固体激光器件是近年来激光器件领域内的一个非常活跃的方向<sup>[1]</sup>。将 Nd:YVO<sub>4</sub> 加工成薄片, 选用 GaAlAs 激光二极管作为泵浦源, 可制作小型甚至微型固体激光器。进一步采用腔内倍频技术获得绿光输出, 可以在彩色显示、激光分色、医疗及娱乐等许多领域中获得应用<sup>[2]</sup>, 从而受到了极大的关注。在国内, 我所以于 1993 年先期研制成功激光二极管“面对面”直接耦合泵浦的小型 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 绿光激光器<sup>[3]</sup>。直接耦合泵浦技术<sup>[3~5]</sup>的应用大大提高了激光二极管输出功率利用率, 而且还省去了准直、整形、聚焦系统, 使得整个激光器的体积大幅度减小, 结构更加紧凑, 稳定性有了极大的改善。MacKinnon 等人<sup>[5]</sup>采用直接耦合泵浦技术, 用 500 mW 级的激光二极管阵列泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP, 获得了 50 mW 基横模绿光输出。本文介绍作者在近期对  $\alpha$  切割的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体偏振透射光谱的测量结果, 以及采用 500 mW 级激光二极管“面对面”直接耦合泵浦的、基横模绿光输出达 73 mW 的高效率 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器的实验结果。

## 2 $\alpha$ 切割 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的透射光谱

Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体属正方晶系, D<sub>4h</sub> 空间群, 正单轴晶体。实验中所使用的 Nd:YVO<sub>4</sub> 样品为  $\alpha$  切割, 截面为 3 mm × 3 mm, 厚度 1 mm, Nd 浓度 1 at. % (福州科风激光有限公司提供), 在 790~830 nm 波长范围内, 测得其偏振透射光谱如图 1 所示。810 nm 处的吸收带对应于 Nd<sup>3+</sup> 离子 <sup>4</sup>I<sub>3/2</sub> 至 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 和 <sup>2</sup>H<sub>3/2</sub> 能级间的跃迁。图 1 显示: 对于偏振方向平行于晶体 *c* 轴的  $\pi$  偏振光而言, 晶体的主吸收峰处在 808.8 nm (吸收系数约为 30 cm<sup>-1</sup>), 吸收峰的半高宽度约为 16 nm,

\* 国家自然科学基金资助项目(69378017)和山西省科委科技攻关项目(951029)。

收稿日期:1995年9月15日;收到修改稿日期:1995年11月30日

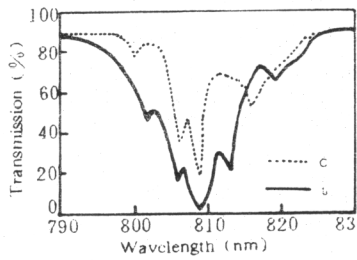


Fig. 1 Transmission spectra of  $\alpha$ -cut Nd:YVO<sub>4</sub> crystal sample. Thickness of the sample is 1 mm, the Nd concentration is 1 at. %

此外还有四个次吸收峰, 分别在 801.6 nm、805.8 nm、813.1 nm 及 819.3 nm; 对于偏振方向垂直于晶体  $c$  轴的  $\sigma$  偏振, 晶体主吸收峰值也处在 808.8 nm (吸收系数约为  $20 \text{ cm}^{-1}$ ), 吸收峰半高宽度约 5 nm, 此外还有 800.4 nm、806.5 nm 和 816.4 nm 三个次吸收峰。从总体上看,  $\pi$  偏振的吸收要比  $\sigma$  偏振强得多,  $\pi$  偏振主吸收峰的吸收系数约为  $\sigma$  偏振的一倍半,  $\pi$  偏振主吸收峰的半高宽度则约为  $\sigma$  偏振的三倍多。

根据上述测量的结果, 为了使泵浦更为有效, 显然应采用偏振方向平行于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的  $c$  轴, 即相对于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体呈  $\pi$  偏振的泵浦光。

### 3 实验及结果

#### 3.1 激光二极管

实验中所使用的激光二极管, 其发光面尺寸约为  $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ , 输出光束呈扇面状, 测得其半角发散角约为  $50^\circ \times 10^\circ$ ; 输出激光为线偏振光, 测得其偏振方向平行于发散角较小的方向。即使在恒定的驱动电流之下, 激光二极管输出激光的中心波长及其功率也随着环境温度的不同而变化: 环境温度升高, 输出激光的中心波长向长波方向漂移, 输出激光功率则略有下降<sup>[6]</sup>。为增强激光二极管的散热性能, 可将其固定在适当的散热器上; 在室内温度为  $20^\circ\text{C}$  时, 实验中测量了激光二极管的输出功率与驱动电流的关系; 当驱动电流为 1033 mA 时, 测得输出激光的中心波长约为 809.6 nm (未加控温措施), 测得输出激光的功率约为 503 mW。由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的  $\pi$  偏振吸收带的半高宽度达 16 nm, 即使环境温度变化导致激光二极管输出激光中心波长漂移, Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的输出激光功率的变化也仍然比较平坦<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 直接耦合泵浦技术

利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的偏振吸收特性, 在实验中标定了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的  $c$  轴方向。仔细地调整激光二极管的方位, 使得其输出激光偏振方向平行于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的  $c$  轴, 即泵浦光相对 Nd:YVO<sub>4</sub> 呈  $\pi$  偏振。由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体对  $\pi$  偏振 809 nm 的吸收系数高达  $30 \text{ cm}^{-1}$ , 吸收程约为 1 mm, 实验中采用“面对面”直接耦合泵浦技术<sup>[3~5]</sup>, 将激光二极管的发光面贴近 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 (其间距约为  $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ), 使得激光二极管的输出光束在尚未发散开便被 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体所吸收, 使有限的泵浦功率得到充分的利用, 而且省去了激光二极管的准直、整形及聚焦系统, 使整个装置结构紧凑、稳定性增强, 体积也大幅度减小。

#### 3.3 实验装置

实验的装置示意图如图 2 所示。激光晶体 Nd:YVO<sub>4</sub> 的截面为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 厚度为 1 mm,  $\alpha$  切割, Nd 浓度为 1 at. %。在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体对着激光二极管的一面, 镀有 809 nm 高透、1064 nm 高反的介质膜, 与前端的凹面反射镜组成长度约为 7.5 mm 的平凹腔; 在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的另一面, 镀有 1064 nm、532 nm 的双增透介质膜。1064 nm~532 nm 倍频过程采用 KTP 晶体腔内倍频, KTP 晶体的尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 以 II 类室温角度匹配方式切割, 两个通光端面镀有 1064 nm、532 nm 的双增透介质膜, 以降低腔内损耗。输出耦合镜为曲率半径约 20.6 mm 的凹面镜, 内侧镀有 532 nm 高透、1064 nm 高反的介质膜, 外侧镀有 532 nm 的增透介质膜 (见图 2 图注)。由此可估算得腔内 1064 nm 基频光基横模的腰斑半径

约为 30  $\mu\text{m}$ 。

### 3.4 实验结果及初步分析

输出激光束经过两个介质膜片(膜层参数见图 2 图注)分别滤掉残余的泵浦光和漏出腔外的 1064 nm 基频光后,使用 LP-3B 型激光功率计(北京物科光电公司生产)测定 532 nm 倍频绿光的输出功率。在室内温度为 20 $^{\circ}\text{C}$  时,在不同的驱动电流下,测量了绿光输出功率;将驱动电流对应为激光二极管的输出功率(即泵浦功率),则得到绿光输出与泵浦功率的关系,结果如图 3 所示。图 3 中的实线是用最小二乘法以抛物线型拟合得到的。绿光的泵浦阈值功率为 13 mW;当泵浦功率为 503 mW 时,532 nm 倍频绿光输出功率为 73.1 mW,指标明显高于 MacKinnon 等人<sup>[5]</sup>所获得的结果(50 mW),光光总体转换效率约 14.5%。

将输出绿光经中性衰减片衰减后,再采用针孔一维扫描的方法分别测量了光斑在相互垂直的两个方向上的远场强度分布,结果如图 4 所示;显然其模式结构为基横模,光斑略扁。

在实验中考虑到 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体热导率低的问题,可

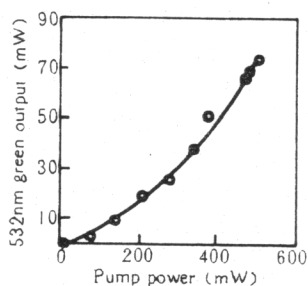


Fig. 3 Output of TEM<sub>00</sub> mode green laser versus the pump power from laser diode. 73 mW green laser of TEM<sub>00</sub> mode was obtained when pump power was 503 mW, the optical to optical conversion efficiency reached 14.5%

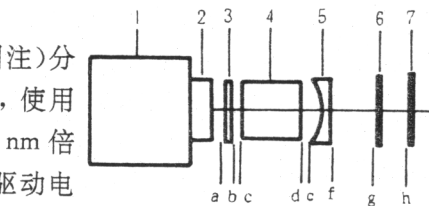


Fig. 2 Experimental arrangement

1: Heat sink of laser diode; 2: 500 mW laser diode; 3:  $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$  Nd:YVO<sub>4</sub>; 4:  $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$  KTP; 5: R20.6 mm Output coupler; 6/7: Optical filters. a:  $T = 93\%$  for 809 nm,  $R = 99.8\%$  for 1064 nm; b/c/d: AR for 1064 nm and 532 nm; e:  $R = 99.8\%$  for 1064 nm,  $T = 89\%$  for 532 nm; f: AR for 532 nm; g:  $R = 99.8\%$  for 809 nm,  $T = 99\%$  for 532 nm; h:  $R = 99.8\%$  for 1064 nm,  $T = 96\%$  for 532 nm

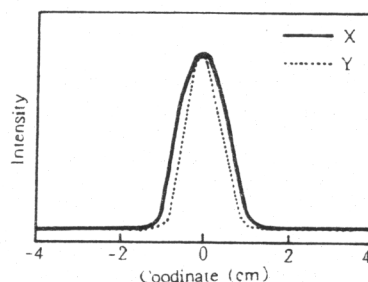


Fig. 4 Intensity profile of green beam as observed in the far-field. Diameter of the pinhole is 0.8 mm, the scanning speed is 0.4 cm/sec

以将 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体薄片嵌入铜块中,增大散热面积;并将 KTP 晶体紧贴 Nd:YVO<sub>4</sub>,一方面可充分利用腔内 1064 nm 基频光腰斑(基频光功率密度大),另一方面由于 KTP 晶体的热导率优于 Nd:YVO<sub>4</sub>,从而起到辅助散热的作用。这些措施在一定程度上弥补了 Nd:YVO<sub>4</sub> 散热性能差的不足;但当泵浦功率变化时,仍然可以观察到光斑的强度分布在缓慢变化,然后逐渐趋于稳定;这是泵浦产生的热效应导致激光晶体温度场的变化,从而引起了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体局部折射率的变化(扰动了腔参数)所致。当整个系统达到热平衡后,绿光输出功率可长时间稳定。

由于输出耦合镜对于 1064 nm 的基频光并不是理想的全反镜,仍有部分基频光漏出腔外。当泵浦功率为 503 mW 时,漏出腔外的 1064 nm 基频光功率为 34 mW,由腔镜对基频光

的透射率(约 0.2%)可估算出腔内 1064 nm 基频光循环功率约为 17 W。

输出绿光经衰减后, 实验中使用上升沿约为 1 ns 的光电二极管测量了输出绿光的强度起伏, 结果约为  $\pm 8\%$  如图 5 所示。绿光强度起伏较大的原因是, 腔内 1064 nm 基频光为多纵模振荡, 在 KTP 晶体内除各纵模的倍频过程外, 还有纵模间的和频过程; 基频光纵模间的和频造成了绿光输出较大的强度起伏<sup>[7]</sup>。进一步稳定绿光输出的工作正在进行之中。

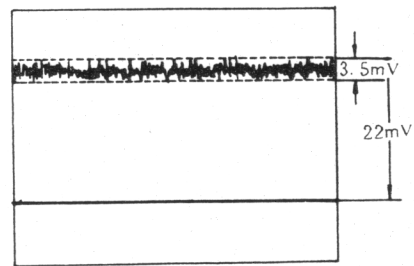


Fig. 5 Intensity fluctuation of green output ( $\pm 8\%$ )

**结 论** 本文测量了  $\alpha$  切割的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的偏振透射光谱, 为实验提供了直接依据。实验中使用功率约 500 mW 的激光二极管, 采用“面对面”直接耦合泵浦技术, 实现了 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器的高效连续运转。获得约 73 mW 的基横模绿光输出, 其光光总体转换效率为 14.5%。若能提高腔镜对 1064 nm 基频光的反射率以及对 532 nm 倍频绿光的透射率, 则器件的光光转换效率可望进一步得到提高。

### 参 考 文 献

- [1] R. L. Byer, Diode laser pumped solide-state laser. *Science*, 1988, **239**(3): 742~747
- [2] George C. Valley, David A. Ansley, Applications of compact blue-green lasers for displays. Topical Meeting of Compact Blue-Green Lasers (Salt Lake City, Utah, USA, Feb. 10~11, 1994), Paper CThA3
- [3] 张宽收, 李瑞宁, 谢常德等, 全固化 Nd:YVO<sub>4</sub> 单频绿光激光器. *中国激光*, 1994, **A21**(8): 617~620
- [4] V. Kushawaha, Y. Chen, Diode end-pumped high-efficiency Nd:YAG laser. *Appl. Phys. (B)*, 1994, **59**(4): 659~661
- [5] N. MacKinnon, B. D. Sinclair, A laser diode array pumped, Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP, composite material microchip laser. *Opt. Commun.*, 1994, **105**(3/4): 183~187
- [6] 黄奕川, 邱闽旺, 赵挺洁等, 激光二极管泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的激光特性. *中国激光*, 1994, **A21**(7): 549~552
- [7] T. Baer, Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, **3**(9): 1175~1179

## Laser Diode Direct-Coupling Pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP High-Efficiency Intracavity Frequency-Doubling Laser

Wang Junmin    Li Ruining    Guo Ruixiang

Xie Changde    Peng Kunchi

(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006)

(Received 15 September 1995; revised 30 November 1995)

**Abstract** Laser diode direct-coupling pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP intracavity frequency-doubling laser was demonstrated by closing the Nd:YVO<sub>4</sub> crystal to the emitting area of laser diode. Green laser of TEM<sub>00</sub> mode at 532 nm with a maximum output of 73 mW and a optical to optical efficiency of 14.5% were obtained, when pump power was 503 mW.

**Key words** laser diode, direct-coupled pump(DCP), Nd:YVO<sub>4</sub>, KTP.