

文章编号:1004-4213(2010)10-1747-5

# 不同泵浦光下 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体输出特性\*

尤建村<sup>1,2</sup>, 宋晏蓉<sup>1†</sup>, 张怀金<sup>3</sup>

(1 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124)

(2 安庆师范学院 物理系, 安徽 安庆 246011)

(3 山东大学 晶体材料研究所, 济南 250023)

**摘 要:**为研究 808 nm 和 879 nm 两种泵浦光对 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体激光输出特性的影响, 并比较两种不同波长泵浦所得连续输出光的效率高, 分析了 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体的能级结构和两种泵浦光作用下的激光输出特性, 发现在 879 nm 也有较强的吸收峰. 用 808 nm 和 879 nm 两种不同波长泵浦 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体的过程是不同的, 808 nm 泵浦是一种间接方式能量转移的过程, 在此过程中有明显的热负载产生. 而 879 nm 泵浦是将粒子直接激励到激光辐射上能级, 降低无辐射弛豫过程产生的热量. 从理论上可知, 879 nm 的泵浦量子效率要高于 808 nm 的泵浦量子效率, 对减少晶体的热产生有很强的优势. 实验中采用激光二极管端面泵浦 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体直腔方案, 研究了两种不同泵浦光泵浦 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体以获得 1 063 nm 的连续光, 得到了两种光抽运时的斜效率, 发现在同样实验条件下, 879 nm 泵浦的输出光斜效率在小功率泵浦时略高于 808 nm; 而在大功率泵浦的情况下明显高于 808 nm, 最高达到 38%. 同时, 在 808 nm 抽运时, 实验上获得了 1 341 nm 波长的激光, 为光通讯的应用提供了一种光源.

**关键词:** Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体; 间接抽运; 直接抽运; 斜效率

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103910.1747

## 0 引言

Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体在近年来作为一种新型的热门激光晶体, 受到业内的普遍关注. 它与 Nd : YVO<sub>4</sub> 具有相似的晶体结构, 在 808 nm 和 879 nm 附近具有较宽的吸收带和高的吸收系数, 在 1 063 nm 和 1 341 nm 处有较大的发射截面, 且有较短的上能级寿命; 而且其最大的优点是热导率高, 沿〈110〉方向的热导率高达 0.117 W · cm<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>, 几乎比 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体热导率高两倍. 这些众多的优异特性使 Nd : GdVO<sub>4</sub> 成为 LD 泵浦激光器理想的工作物质, 因此使用该晶体作为工作物质获得连续输出光的研究就成为近几年的一个焦点. 对于激光晶体而言, 热效应问题是阻碍它得到更高输出功率、更高光束质量的关键, 为降低激光晶体的热效应影响, 通常可以使用各种不同的措施去改善晶体的受热情况, 例如改变晶体的参量, 改善散热系统等等. 除此之外, 改变泵浦光的波长也能起到减少晶体热效应的作用. 如果从 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体的能级结构进行分析可以发现, 808 nm 泵浦的过程与 879 nm 泵浦的过程有

着不同之处, 808 nm 泵浦近似于一个间接抽运的过程, 热负载损耗较多, 而 879 nm 泵浦的过程是直接抽运到激光上能级的过程, 热损耗相对较小, 因此从理论上来说, 879 nm 泵浦应该有更高的输出效率. 从近年的大量相关文献中也能看到许多实验结果都验证了该结论<sup>[1-2]</sup>. 本文从具体的实验过程进行了分析, 并且分别使用小功率泵浦源与大功率泵浦源实验研究了 808 nm 和 879 nm 两种不同波长泵浦时输出连续光的情况. 发现在小功率泵浦时 879 nm 的斜效率也能高于 808 nm 泵浦的情况, 但是这种差别不是预期的那么明显, 而当逐渐提高泵浦源的功率之后则顺利的出现了预期的结果, 879 nm 泵浦时的优势完全体现了出来, 无论是从输出功率, 还是从光-光转换效率以及斜效率都要高于 808 nm 泵浦时的结果. 与此同时, 本课题组也实验研究了在 808 nm 泵浦时, 1 341 nm 连续光的输出情况, 获得最高输出功率 800 mW, 得到其连续输出光的光-光转换效率为 23%, 斜效率为 24.2%.

## 1 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体的相关理论分析

### 1.1 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体能级结构及抽运机制

图 1 给出了 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体的能级结构图<sup>[3-4]</sup>, 和其他掺钕离子的 YVO<sub>4</sub>、YAG 等激光晶体

\* 国家自然科学基金(60678010)资助

† Tel: 010-67396673-801 Email: yrsong@bjut.edu.cn

收稿日期: 2010-04-07

修回日期: 2010-06-17

的能级结构大致相同. 四条主要发射谱线是 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{5/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  和 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ , 能级图的右边给出了主能级的 Stark 分裂的各个子能级及相应能级大小. 精确的辐射跃迁发生在各个不同的子能级之间. 当 LD 泵浦的谱线是 808 nm 时, 泵浦光把粒子从能量最低的基态泵浦到 ${}^4F_{5/2}$  能级, 但是粒子在此能级上的寿命非常短, 可以通过特别快的驰豫过程无辐射的跃迁到亚稳态 ${}^4F_{3/2}$  能级上. 亚稳态能级有相对较长的寿命(大约为 90  $\mu\text{s}$ ), 提供了可以实现粒子数反转的机理. 四条主要发射谱线 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{5/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  和 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ , 对应的辐射波长分别为 1.88  $\mu\text{m}$ 、1.34  $\mu\text{m}$ 、1.06  $\mu\text{m}$  和 0.91  $\mu\text{m}$ . 其中, 粒子从 ${}^4F_{3/2}$  亚稳态跃迁到 ${}^4I_{11/2}$  上, 完成对 1.06  $\mu\text{m}$  光的受激辐射, 再通过非辐射跃迁的方式回到基态 ${}^4I_{9/2}$ , 便形成了四能级的激光运行机制. 三价稀土离子能级结构多为四能级系统, 除  $\text{Nd}^{3+}$  外, 其余此类离子由于激光跃迁的终态与基态能级间距很小, 故需在低温下(约 77 K)才能产生激光振荡. 而  $\text{Nd}^{3+}$  由于在发射 1.06  $\mu\text{m}$  的激光时跃迁终态与基态相距较远, 在室温下就能实现 1.06  $\mu\text{m}$  的激光振荡, 因此室温下 1.06  $\mu\text{m}$  谱线是发射截面最大、增益最强的一条谱线, 占绝对优势<sup>[5-7]</sup>.

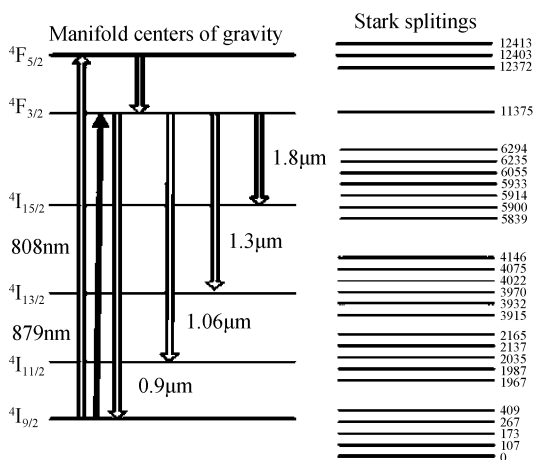


图 1 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的能级结构

Fig. 1 Energy level structure of a Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal

从以上 808 nm 泵浦的过程可以看出, 808 nm 泵浦光把  $\text{Nd}^{3+}$  从基态抽运到 ${}^4F_{5/2}$  能级,  $\text{Nd}^{3+}$  在此能级的寿命非常短, 可以通过快速的无辐射驰豫到亚稳态 ${}^4F_{3/2}$  能级上, 此过程将会有热负载放出. 而 ${}^4F_{3/2}$  能级有相对长的荧光寿命, 提供了有利实现粒子数反转的机制, 通过受激发射实现 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  的辐射跃迁产生 1 063 nm 激光输出, 这是一种间接方式能量转移的四能级系统. 在此过程中有明显的热负载产生, 只能通过其它的一些实验手段去降低热效应. 而采用 879 nm 泵浦时, 却是另外一种完全

不同于前者的能量转移的四能级系统. 它可将  $\text{Nd}^{3+}$  直接抽运至 ${}^4F_{3/2}$  激光上能级, 然后通过受激发射实现 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  的辐射跃迁产生 1 063 nm 激光输出, 这无疑消除了 ${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$  过程中产生的热负载, 提高了泵浦激光功率的利用率<sup>[8]</sup>. 从整个分析过程中可以看到, 879 nm 泵浦的过程可以使晶体产生更少的热量, 因此其泵浦的量子效率要强于 808 nm 泵浦的效率<sup>[9-10]</sup>.

## 1.2 晶体内部的热效应

激光晶体吸收抽运光能量, 在晶体内部形成了热源, 其温度场分布遵守热传导 Poisson 方程<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (1)$$

式中  $q_v$  为激光晶体内部单位体积的热功率密度,  $\lambda$  为晶体导热系数或称为热导率.

$$q_v = \frac{2\alpha p_{in} \eta}{\pi \omega_p^2} (1 - e^{-\alpha l})^{-1} e^{-\frac{2r^2}{\omega_p^2}} e^{-\alpha z} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为晶体吸收系数;  $p_{in}$  为输入功率;  $\omega_p$  为光斑大小;  $l$  为晶体长度;  $\eta$  为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数,  $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_e$ ,  $\lambda_p$  为泵浦光波长,  $\lambda_e$  为受激发射光波长.

晶体中产生的热量主要取决于  $q_v$  的大小, 而在实验条件相同的情况下使用两种不同波长的光泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体时,  $\eta$  的大小成为晶体中产生热量的最重要因素. 808 nm 泵浦时,  $\lambda_p = 808 \text{ nm}$ ,  $\lambda_e = 1 063 \text{ nm}$ ,  $\eta = 24\%$ , 879 nm 泵浦时,  $\lambda_p = 879 \text{ nm}$ ,  $\lambda_e = 1 063 \text{ nm}$ ,  $\eta = 17\%$ , 相比于 808 nm 抽运, 晶体的热负载减小了约 28%, 这对于在高功率抽运时降低晶体的热效应, 获得高性能激光输出非常有利.

针对热效应的问题, 也可以通过另外一种更为简单的方法来理解, 晶体内部产生的热量主要是由于工作物质吸收泵浦光再转化为激光的输出过程中, 粒子非辐射跃迁过程所产生的热量, 这种过程产生的热称为量子损耗. 显然每产生一个光子, 其相应产生的热为<sup>[12]</sup>

$$Q = h\nu_p - h\nu_e \quad (3)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $\nu_p$  和  $\nu_e$  分别为泵浦光频率, 激光频率. 根据  $\nu = c/\lambda$ , 可得

$$q = hc \left( \frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_e} \right) \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 用 879 nm 光泵浦时, 产生的热量要小于 808 nm. 因此, 使用 879 nm 泵浦更有优势.

## 2 实验过程及结果

实验中用波长为 808 nm 的高能 LD 激光器泵

浦 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体,实验中首先测量了晶体在室温下的荧光谱,如图 2.从图中可以看到,在 850~1 400 nm 的波长范围内,共有三组发射峰,发射峰波长分别为 912.6 nm ( $^4F_{3/2}-^4I_{9/2}$ ),1 063.1 nm ( $^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$ ),1 341.3 nm ( $^4F_{3/2}-^4I_{13/2}$ ).由于 Nd<sup>3+</sup> 离子的  $^4F_{3/2}-^4I_{9/2}$  跃迁的激光输出为准三能级系统,在准三能级系统中有重复吸收损耗,共振损耗等,并且由于晶体的 stark 能级分裂较小,因此 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的  $^4F_{3/2}-^4I_{9/2}$  的室温连续激光输出是十分困难的.Nd<sup>3+</sup> 离子的 1 063.1 nm,1 341.3 nm 跃迁的激光输出为四能级系统,泵浦阈值较三能级系统的低,容易形成激光振荡.从图中明显可以看到 1 063.1 nm 的发射峰是最强的.

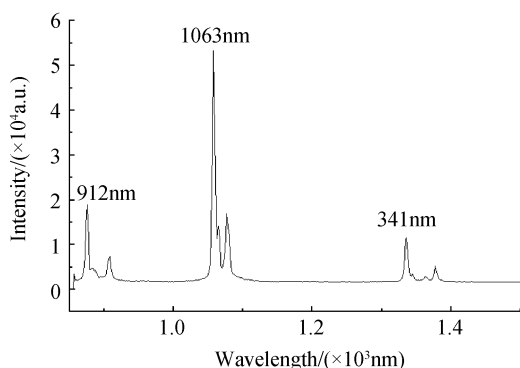


图 2 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的荧光谱

Fig. 2 The fluorescence spectrum of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal

本次实验所用装置如图 3,采用了平凹腔的结构,Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体尺寸为  $3 \times 3 \times 2$  mm<sup>3</sup>,Nd<sub>3+</sub> 掺杂度为 0.5%.晶体双端镀 1 064 nm 增透膜,放在铜质热沉内循环通水冷却,冷却水温保持在 18 ℃.输入平面镜 M<sub>1</sub> 分别为镀有 808 nm 与 879 nm 增透膜和 1 064 nm 高反膜的双色镜;输出镜 M<sub>2</sub> 对 1 064 nm 波长的激光部分透射.实验过程中分别用 808 nm 二极管激光器和 879 nm 二极管激光器泵浦同一块 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体,在各个参量及实验条件不变的情况下分别输出 1 063 nm 连续光,并对实验结果进行比较.图 4(a)为 808 nm 泵浦获得 1 063 nm 激光的连续输出功率与泵浦功率的关系图,在实验中分别使用两种不同透射率的输出镜,可以看到透射率为 1% 时的输出功率更高,泵浦源最大功率为 4 W 的情况下,最大输出功率为 1.12 W,斜效率为 29%.图 4(b)为各种实验条件不变的情况下换用 879 nm 泵浦光获得 1 063 nm 激光的连续输出功率与泵浦功率的关系图,同样可以看到在透射率为 T=1% 的条件下获得更高的输出功率,获得最大输出功率 174 mW,其斜效率为 32.6%,从实验的结果可以看到和理论上分析的情形是相同的,即使在小功率泵浦的情况下 879 nm 泵浦抽运的斜效率仍强

于 808 nm 抽运.但是优势只是略有体现而已.究其原因,主要是 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在 879 nm 处的吸收截面比 808 nm 处小,879 nm 抽运时的抽运阈值较 808 nm 抽运时的抽运阈值要高一些,而且在小功率泵浦时,热效应的产生比高功率泵浦要小一些.

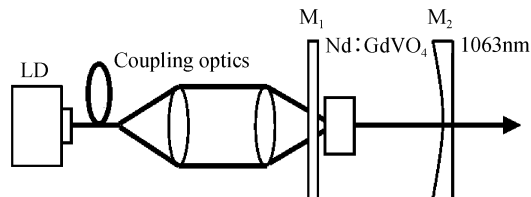
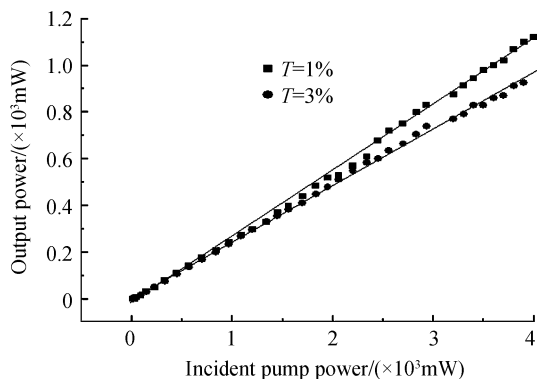
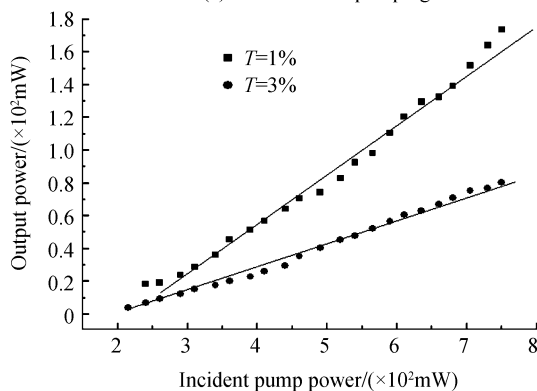


图 3 实验装置

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup



(a) Under 808 nm pumping



(b) Under 879 nm pumping

图 4 808 nm 和 879 nm 抽运下 1 063 nm 激光连续输出功率与吸收抽运功率关系

Fig. 4 CW output power at 1 063 nm versus absorbed pump power under 808 nm 879 nm pumping

在其它实验条件不变的情况下,换用更高功率的泵浦源对晶体进行泵浦,实验结果出现了明显的变化,如图 5.泵浦功率提高之后,879 nm 的泵浦光的抽运效率明显超过了 808 nm 的泵浦光,879 nm 泵浦的光-光转换效率达到了 34% 左右,斜效率达到 38%.而 808 nm 泵浦光的光-光转换效率不到 30%.斜效率只有 27.5%,这与本文分析的结果是相同的,说明 879 nm 的泵浦光抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的确能够提高激光器的输出性能.并且从图中能够看到 808 nm 的抽运阈值仍然比 879 nm 要低,在低功率部分的输出效率和前文分析的完全一致.

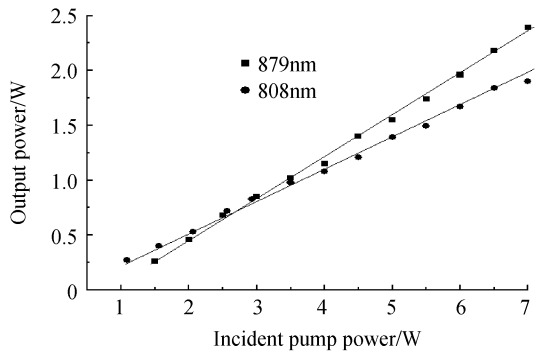


图5 808 nm 和 879 nm 抽运下的 1 063 nm 激光连续输出功率

Fig.5 CW output power at 1 063 nm versus absorbed pump power under 808 nm pumping and 879 nm pumping

与此同时,本文还使用两种不同波长的泵浦光对 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体进行泵浦使其输出 1 341 nm 的连续光,如图 6. 使用 808 nm 泵浦晶体时输出 1 341 nm 连续光的实验结果,输出功率以及光-光转换效率与前面 1 064 nm 的连续光输出结果相比较明显偏低,光-光转换效率为 23% 左右,不过从图 2 的荧光谱中两波长的发射峰强度相比较就可以看到,1 341 nm 的发射峰强度比 1 064 nm 的强度小许多,因此其输出连续光的效率低于 1 064 nm 是合理的.

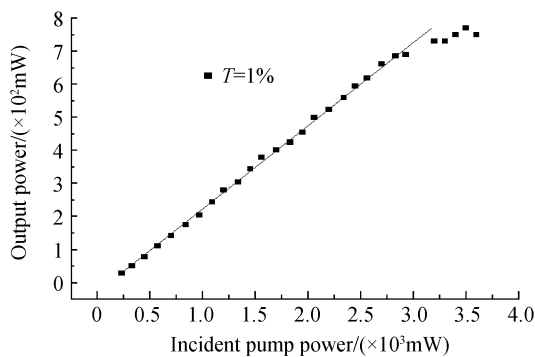


图6 808 nm 泵浦下 1 341 nm 激光连续输出功率与吸收功率关系

Fig.6 CW output power at 1 341 nm versus absorbed pump power under 808 nm pumping

### 3 结论

通过对 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体的能级结构以及 808 nm 和 879 nm 两种不同波长的泵浦光的抽运过程的分析,得出结论 879 nm 的激光泵浦晶体因为产生的热负载损耗更小,应该比 808 nm 有更高的泵浦效率.通过具体的实验研究了小功率泵浦光抽运的情况下,879 nm 泵浦的优势略有体现,而当使用高功率的泵浦光抽运时 879 nm 泵浦光的泵浦效率会明显高于 808 nm.其次,实验中还获得了 1 341 nm 连

续光的输出,最高输出功率达到 800 mW,而对于其输出效率的提高仍需不断的尝试和努力.随着在这些方面更深入的研究能有助于对 Nd : GdVO<sub>4</sub> 激光器的各方面性能进行不断的改进和完善.

#### 参考文献

- [1] ZHANG Huai-jin, WANG Ji-yang, DU Chen-lin, *et al.* Growth of 0.3 at% Nd : GdVO<sub>4</sub> crystal for high efficiency 1.34 μm laser output[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **275** (1-2): 687-690.
- [2] OGAWA T, URATA Y, WADA S. Efficient laser performance of Nd : GdVO<sub>4</sub> crystals grown by the floating zone method[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(23): 2333-2335.
- [3] LI Xu-dong, YU Xin, JIN Feng-wen, *et al.* Performance improvement of Nd : GdVO<sub>4</sub> laser under 879 nm direct pumping[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34** (12): 1629-1632.  
李旭东,于欣,金凤文,等. 879 nm 直接抽运提高 Nd : GdVO<sub>4</sub> 激光器性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1629-1632.
- [4] DU C, RUAN S, ZHANG H, *et al.* A 13.3 W laser diode array end pumped Nd : GdVO<sub>4</sub> continuous wave laser at 1.34 μm[J]. *Appl Phys*, 2005, **80**(1): 45-48.
- [5] ZHANG Huai-jin, DU Chen-lin, WANG Ji-yang, *et al.* Laser performance of Nd : GdVO<sub>4</sub> crystal at 1.34 mm and intracavity double red laser[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, **249**(3-4): 492 - 496.
- [6] ZHOU Cheng, ZHANG Zhong, ZHAO Peng, *et al.* LD pumped Nd : GdVO<sub>4</sub>/Cr : YAG solid state laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 801-803.  
周城,张仲,赵朋,等. LD 泵浦 Nd : GdVO<sub>4</sub>/Cr : YAG 固体激光器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 801-803.
- [7] ZHOU Cheng. LD pumped laser with high conversion efficiency Nd<sup>3+</sup> : GdVO<sub>4</sub> solid state by extra cavity double frequency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1774-1776.  
周城. LD 泵浦腔外倍频高转换效率 Nd<sup>3+</sup> : GdVO<sub>4</sub> 固体激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1774-1776.
- [8] HERAULT E, BALEMBOIS F, GEORGES P. Nd : GdVO<sub>4</sub> as a three level laser at 879 nm[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(18): 2731-2733.
- [9] HOU Xue-yuan, LI Yu-fei, SUN Yu-ming, *et al.* LD pumped Nd : GdVO<sub>4</sub>/KTP intracavity frequency doubling laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 11-14.
- [10] ZHANG Bing-yuan, LI Gang, CHEN Meng, *et al.* Comparative studies of semiconductor saturable absorber mirror mode-locking dynamics in pulsed diode-end-pumped picosecond Nd : GdVO<sub>4</sub> and Nd : YAG lasers[J]. *Opt Lett*, 2006, **4**(6): 336-338.
- [11] LI Long, SHI Peng, LIU Xiao-fang, *et al.* Thermal effect of quadrate laser crystal with diode laser end pumped[J]. *Opto Electronics Laser*, 2005, **32**(4): 35-38.  
李隆,史彭,刘小芳,等. LD 端面抽运长方形激光晶体的热效应[J]. *光电工程*, 2005, **32**(4): 35-38.
- [12] ZHAO Hai-xia, JIANG Dong-sheng, ZHAO Hong, *et al.* Study on thermal effect of high power laser side pumped by diode-arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(4): 210-211.  
赵海霞,姜东升,赵鸿,等. 二极管侧面泵浦固体激光器热效应研究[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(4): 210-211.

## Output Characteristics of Nd : GdVO<sub>4</sub> Crystal Under Different Pumping

YOU Jian-cun<sup>1,2</sup>, SONG Yan-rong<sup>1</sup>, ZHANG Huai-jin<sup>3</sup>

(1 College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2 Physics Department of Anqing Teachers College, Anqing, Anhui 246011, China)

(3 Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250023, China)

**Abstract:** In order to study the output characteristic of Nd : GdVO<sub>4</sub> influenced by 808 nm and 879 nm, coupled by comparison of the CW output laser efficiency pumped by the two different wavelengths, the structure of the energy levels of the Nd : GdVO<sub>4</sub> crystal is investigated, and it is found that another absorption wavelength of 879 nm is relatively strong. The output characteristics under 808 nm LD pumping and under 879 nm LD pumped are analyzed by experiments. The processes of pumping Nd : GdVO<sub>4</sub> crystal by laser beams of 808 nm and 879 nm wavelength are different. The pumping by 808 nm LD is a process of transferring energy by an indirect way. During the process, the obvious hot load will occur. But pumping by 879 nm LD will drive Nd<sup>3+</sup> ions into the laser emitting level, to avoid useless heat generation during no-radiation transition and reduce the thermal effects efficiently. Theoretically, the quantum efficiency of 879 nm is greater than that of 808 nm, so the heat produced from the crystal with pumping should be small. The way of pumping Nd : GdVO<sub>4</sub> crystal is used by laser diode from straight line cavity experimental program, and the process of producing 1 063 nm CW by pumping Nd : GdVO<sub>4</sub> crystal is studied using two different pumping wavelengths. Lasers under these two different pumping wavelengths are obtained. With the same experimental conditions, the output slope efficiency of pumping crystal by 879 nm LD is a bit higher than by 808 nm in low power. But the output slope efficiency of 879 nm is greater than that of 808 nm in high power, and the maximum reaches 38%. Meanwhile, a laser of 1 341 nm is achieved when the pumping at 808 nm, which could be a kind of light source for optical communication.

**Key words:** Nd : GdVO<sub>4</sub> crystal; Indirect pumping; Direct pumping; Slope efficiency



**YOU Jian-cun** was born in 1981. He is studying for his M. S. degree and his current research interests focus on ultrashort pulses and solid state laser.



**SONG Yan-rong** was born in 1964. Now she is a professor and her research interests focus on ultrafast processing, biology sensor with nano-material, vertical external cavity of surface emitting semiconductor lasers, fiber lasers and amplifiers.