

# 抽运波长及 $\text{Nd}^{3+}$ 掺杂浓度对内腔倍频单频激光器性能的影响

王雅君 杨文海 郑耀辉\* 彭堃墀

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要** 实验上比较了 808 nm 和 888 nm 波长半导体激光器抽运时,  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  内腔倍频单频激光器的最高输出功率和光-光转换效率, 以及  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体热效应的差异。结果表明, 888 nm 直接抽运是提升高功率激光器性能的有效途径。鉴于 888 nm 激光抽运时吸收效率和无辐射跃迁过程之间的矛盾, 从理论和实验上分析了掺杂浓度对单频激光器性能的影响。理论和实验结果均表明, 采用掺杂浓度为 0.8% (原子数分数) 的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体是实现高功率单频  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  激光器的最佳选择。最终, 通过采用 888 nm 波长半导体激光器抽运掺杂浓度为 0.8% 的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  增益介质, 实现了最大功率为 21.5 W 的 532 nm 单频激光输出, 光-光转换效率为 31.6%。

**关键词** 激光器; 单频激光器; 抽运光波长; 掺杂浓度; 热效应

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0602005

## Influence of Pump Wavelength and $\text{Nd}^{3+}$ Doped Concentration on the Performance of Intracavity Doubling Single-Frequency Lasers

Wang Yajun Yang Wenhai Zheng Yaohui Peng Kunchi

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** The differences of the maximum output powers and optical-to-optical conversion efficiencies of the intracavity doubling single-frequency  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  lasers pumped by 808 nm and 888 nm laser diodes are compared. The results prove that direct pumping is an efficient method to improve the intracavity doubling laser performance. However, due to the contradiction between the absorbed efficiency and nonradiative transition under 888 nm pumping, the doped concentration of  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  crystal is an important factor for the laser design. By analyzing the influence of  $\text{Nd}^{3+}$  doped concentration on the lasing performance in experiment and theory, a  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  crystal with doped concentration of 0.8% (atomic fraction) is chosen as gain medium. At last, a high-power single-frequency 532 nm laser of 21.5 W is obtained from  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  crystal with  $\text{Nd}^{3+}$  doped concentration of 0.8% pumped by 888 nm semiconductor laser, and the corresponding optical-to-optical conversion efficiency is 31.6%.

**Key words** lasers; single-frequency laser; pump wavelength; doped concentration; thermal effect

**OCIS codes** 140.3480; 140.3560; 140.6810; 190.7220

## 1 引言

伴随着新型激光材料和激光技术的不断发展, 尤其是多种波段高功率激光二极管制造工艺的逐渐

成熟, 给全固态激光器的发展带来了新的研究方向。目前, 全固态激光技术的研究已经比较成熟, 激光器的输出功率也愈来愈高<sup>[1]</sup>。但是随着输出功率的增

收稿日期: 2013-03-01; 收到修改稿日期: 2013-04-01

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030203)、国家 973 计划(2010CB923101)、国家自然科学基金(61008001)和山西省自然科学基金(2011021003-2)资助课题。

作者简介: 王雅君(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: wangyajun\_166@163.com

导师简介: 彭堃墀(1936-), 男, 院士, 主要从事量子信息、光量子器件与全固态激光技术等方面的研究。

E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: yzhzheng@sxu.edu.cn

加,需要注入更高的抽运功率,这就会使得增益介质中的热效应加剧,从而带来严重的热透镜效应、热透镜像差和热致衍射损耗,这必将限制激光器输出功率的进一步提高,以及影响输出光束的光束质量<sup>[1~3]</sup>。尤其是在高功率单频激光器系统中,由于采用环形腔结构,腔内插入了更多的选模元件,与驻波腔相比,会引入更多的内腔损耗以及像散,更加不利于高功率激光输出。减轻激光晶体的热效应也是研究高功率单频激光器的重要课题。一般情况下,可以采用复合晶体<sup>[4,5]</sup>、薄片式增益介质<sup>[6]</sup>、侧翼抽运<sup>[7]</sup>或者直接抽运<sup>[8~12]</sup>等方法来减轻激光晶体的热效应。

采用 888 nm 波长激光直接抽运的方式不仅兼顾了四能级系统的优点,而且具有较小的量子亏损和吸收系数,便于减轻和均匀化激光晶体中的热效应。因此,近年来受到研究工作者的广泛关注。另外,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体对波长为 888 nm 的抽运光具有无偏振吸收的特征,更适用于采用光纤耦合半导体激光器抽运<sup>[8, 10, 12]</sup>。在前期的工作中,许多研究工作者已经采用 880、888、914 nm 等波长的激光二极管作为抽运源,抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,实现了单横模高功率激光输出<sup>[10~12]</sup>。但是与 808 nm 波长光相比,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体对 888 nm 波长光的吸收系数较小。因此为了获得较高的吸收效率,需要较高掺杂浓度的晶体来提高它对抽运光的吸收效率。然而,晶体掺杂浓度的增加意味着晶体本身的寄生效应(荧光淬灭和上转换效应)会随之加剧<sup>[13~15]</sup>,从而增加了晶体的热负载,影响激光器的输出功率和转换效率。因此,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体掺杂浓度的选择也是 888 nm 波长抽运时重要的研究课题。最近,本课题组通过采用 888 nm 直接抽运的方式、像散自补偿和降低激光晶体边界温度的办法,实现了最高输出功率为 25.4 W 的单频 532 nm 激光输出<sup>[16,17]</sup>。但是,关于抽运光波长与增益介质掺杂浓度对高功率单频 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器性能的影响,并没有详细的研究。

本文在文献[16]工作的基础上,采用内腔倍频单频激光器的实验装置,实验比较了在 808 nm 和 888 nm 两种波长光抽运下,高功率 Nd:YVO<sub>4</sub>内腔倍频单频激光器的输出特性。理论与实验分析结果均表明,与 808 nm 波长光抽运相比,888 nm 直接抽运有效提高了激光器的输出功率和光-光转换效率。在此基础上,综合考虑掺杂浓度对增益介质热效应的影响,分别采用掺杂浓度(原子数分数,下同)为 0.7%、0.8%和 1.0%的晶体进行实验,通过对比不

同掺杂浓度晶体倍频光的输出特性,发现掺杂浓度为 0.8%的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体是实现高功率 Nd:YVO<sub>4</sub>内腔倍频单频激光器的最佳选择。最终,通过采用掺杂浓度为 0.8%的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,实现了最高功率为 21.5 W 的 532 nm 单频激光输出,光-光转换效率为 31.6%。实验结果与理论分析基本一致。

## 2 晶体热效应分析

### 2.1 888 nm 抽运与 808 nm 抽运方式热效应对比

Nd:YVO<sub>4</sub>晶体对 808 nm 波长激光为偏振吸收,晶体 *a* 轴与 *c* 轴方向的吸收系数关系为  $\alpha_c = 3.7\alpha_a$ <sup>[10]</sup>,对 888 nm 波长激光为无偏振吸收,晶体 *a* 轴和 *c* 轴吸收系数关系为  $\alpha_c = \alpha_a = \alpha$ <sup>[10]</sup>。在不控制抽运光偏振方向的情况下,对 808 nm 和 888 nm 抽运光的吸收特性可以表示为<sup>[10]</sup>

$$P_1 = \frac{1}{2}P_0[\exp(-\alpha_c l) + \exp(-\alpha_a l)], \quad (1)$$

$$P_2 = P_0 \exp(-\alpha l), \quad (2)$$

式中  $P_0$  是入射到晶体中的初始抽运功率, $P_1$ 、 $P_2$  分别为偏振吸收和无偏振吸收后剩余的抽运功率, $\alpha_c$ 、 $\alpha_a$  分别为晶体 *c* 轴和 *a* 轴的吸收系数, $l$  为晶体的长度。

由(1)式和(2)式可计算不同掺杂浓度、不同抽运波长下单位长度晶体吸收的抽运功率[对应于(1)式和(2)式的一阶导数],如图 1 所示。其中,不同抽运波长下,晶体各种掺杂浓度对应的吸收系数均根据文献[10]中掺杂浓度为 0.5%和 1.0%的吸收系数计算所得,在 808 nm 抽运条件下,掺杂浓度为 0.2%的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,吸收系数为  $\alpha_c = 3.7$ , $\alpha_a = 3.7$ ;在 888 nm 抽运条件下,掺杂浓度为 0.7%、

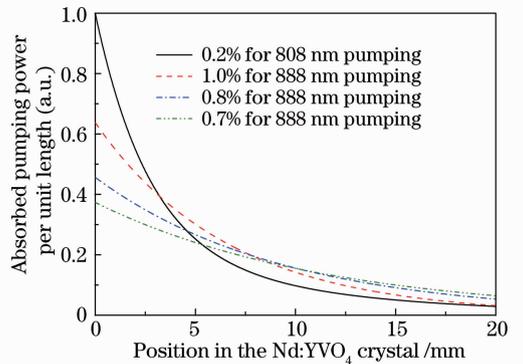


图 1 808 nm 与 888 nm 抽运方式下,不同掺杂浓度下单位长度晶体归一化吸收的抽运功率曲线图

Fig. 1 Normalized absorbed pump power per unit length of the laser crystal for different Nd<sup>3+</sup> doped concentrations with 808 nm and 888 nm pumping

0.8%和1.0%的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,吸收系数分别为 0.88、1.07 和 1.5。以掺杂浓度为 0.2%(808 nm)和 0.8%(888 nm)为例,从图中可以看出采用 888 nm 抽运时,晶体对抽运光的吸收比 808 nm 抽运时(Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.2%)纵向吸收梯度小,这不仅有利于晶体散热,而且均匀化了晶体轴向的热分布。对于 0.8%的掺杂晶体来说其端面吸收率仅为 808 nm 抽运时的 45%,对应的端面热效应降低了 55%;而掺杂浓度为 1.0%(对长度为 20 mm 的晶体,吸收效率基本相等)时,端面热效应降低了 38%,掺杂浓度为 0.7%时,则降低了 62%。在理论分析的基础上,实验采用探针光的办法<sup>[18]</sup>测量了掺杂浓度为 0.2%(808 nm 抽运光)和 0.8%(888 nm 抽运光)的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热透镜焦距  $f_{th}$ 。表 1 所示为不同抽运功率下,808 nm 与 888 nm 波长激光抽运时,激光晶体热焦距的对比,其中  $N_d$  为掺杂浓度, $\lambda_p$  为抽运波长, $P_{ab}$  为吸收的抽运功率, $f_{th}$  为热焦距。由测量结果可知,与 808 nm 光抽运相比,采用 888 nm 抽运大大减轻了激光晶体的热效应。

表 1 808 nm 与 888 nm 抽运方式下,不同抽运功率下热焦距对比

$N_d/\%$	$\lambda_p/\text{nm}$	$P_{ab}/\text{W}$	$f_{th}/\text{mm}$
0.2	808	12.6	324
		24.6	180
		37.4	142
0.8	888	37.4	216
		57.0	141
		71.6	123

## 2.2 掺杂浓度对晶体热效应的影响

由 2.1 节的分析可知,与 808 nm 波长光抽运相比,888 nm 波长光直接抽运能有效减轻激光晶体的热效应,有利于提高单频激光器的功率,改善激光器的性能。但是,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体对 888 nm 波长光的吸收系数较低,例如掺杂浓度为 1.0%的晶体对 888 nm 抽运光的吸收系数仅为  $1.5 \text{ cm}^{-1}$ (对 808 nm 抽运光的吸收系数则为  $\alpha_a = 10 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\alpha_c = 37 \text{ cm}^{-1}$ )。在实际工作中,为了提高激光晶体对抽运光的吸收效率,需要提高晶体的掺杂浓度  $N_d$  来弥补激光晶体对 888 nm 波长光吸收效率低的问题。

但是晶体掺杂浓度过高会带来新的热效应,为了研究掺杂浓度对晶体热效应的影响,考虑荧光淬灭和上转换效应等无辐射跃迁引起的热效应,则晶

体热负载  $\eta_H$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$\eta_H = \eta_Q + \frac{\nu_l}{R\nu_p} \left( \frac{\Delta n}{\tau_{nr}} + \gamma \Delta n^2 \right), \quad (3)$$

式中  $\eta_Q$  为量子亏损, $\nu_l$ 、 $\nu_p$  分别为基频光和抽运光的频率, $\Delta n$  为集居数反转密度, $R$  为抽运速率(定义为单位体积单位时间内基态原子激发到上能级的原子数), $\gamma$  为上转换速率, $\tau_{nr}$  为无辐射衰减寿命。

(3)式中  $\gamma$  与掺杂浓度的二次方有关<sup>[13]</sup>, $\tau_{nr}$  伴随着掺杂浓度的增加而减小,可以表示为<sup>[13,19]</sup>

$$\frac{1}{\tau_{nr}} = \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_{sp}} = \frac{1 + (N_d/N_{d0})^2}{100 \mu\text{s}} - \frac{1}{\tau_{sp}}, \quad (4)$$

式中  $\tau$  为晶体的荧光寿命, $\tau_{sp}$  为自发辐射寿命, $N_d$  为晶体的掺杂浓度, $N_{d0} = 2.2\%$ 。由文献[13]可知,在实验条件下, $\Delta n$  处于文献中  $\Delta n_2$  附近,所以在计算中可认为  $\Delta n$  为常数(这里仅考虑直接抽运方式下晶体掺杂浓度对热效应的影响,实验中 888 nm 抽运条件下,晶体掺杂浓度范围为 0.7%~1.0%)。结合(3)式和(4)式可知,在抽运速率  $R$  相同的条件下,晶体热负载  $\eta_H$  随着掺杂浓度的增加呈如图 2 所示的抛物线型变化趋势。在波长为 808 nm 抽运光的激光抽运时,选用掺杂浓度为 0.2%的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为增益介质,这种情况下,无辐射跃迁过程对热效应影响很小,因此在图 2 中选取 808 nm 抽运光的量子亏损作为参考标准,比较 888 nm 激光抽运时,热效应随掺杂浓度的变化趋势。由图 2 可知,随着掺杂浓度的增加,无辐射跃迁过程产生的热效应呈递增趋势,掺杂浓度过高会导致无辐射跃迁过程取代量子亏损热效应,成为热效应的主要来源,从而大大增加晶体的热效应,不利于激光器光-光转换效率和输出功率的提高。当激光晶体的掺杂浓度大于 0.9%时,888 nm 波长光抽运产生的热效应超过 808 nm 波长光抽运时的热效应,此时选用 888 nm

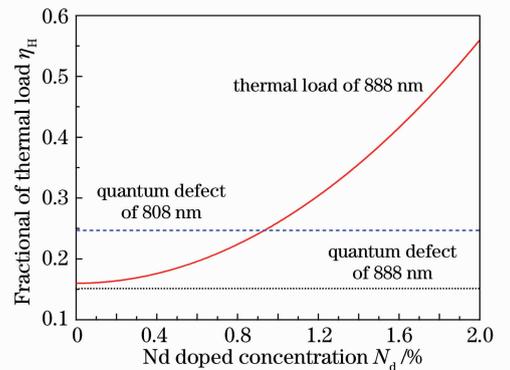


图 2 考虑无辐射热效应条件下,热负载随掺杂浓度的变化  
Fig. 2 Fractional thermal load versus Nd doped concentration with the nonradiative transition

波长激光器作为抽运源的优势减弱。根据上述理论分析,在保证晶体对抽运光吸收效率的前提下,选用掺杂浓度为 0.8% 的激光晶体既不会增大激光晶体的热负载,又能保证有效的抽运光吸收效率。

### 3 实验装置与结果分析

基于理论分析,采用如图 3 所示的由 2 个凸面镜和 2 个凹面镜组成的四镜环形腔作为激光谐振腔。其中凸面镜曲率半径为 1500 mm,凹面镜曲率半径为 100 mm。腔内插入光学单向器(由装入永磁铁中的钽铯石榴石 TGG 旋光晶体和半波片组成)确保腔内振荡的基频光单向、单频运转,LBO 倍频晶体放置到 2 凹面镜腰斑处以获得较高的倍频转换效率,其尺寸为 3 mm×3 mm×18 mm,采用 I 类非临界温度匹配方式实现二次谐波输出,匹配温度为 149 ℃。抽运源采用德国 LIMO 公司生产的光纤耦合输出的激光二极管 LD(LIMO40-F400-DL808/888),光纤芯径为 400 μm,数值孔径 NA 为 0.22,LD 的中心波长分别为 808 nm 和 888 nm,最高输出功率为 81 W。光纤耦合输出的抽运光经过两个平凸透镜整形后,注入到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中,其中

两个整形透镜焦距分别为 30 mm 和 80 mm,整形后的抽运光在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体处直径约为 1.07 mm。两凹面镜间插入光学标准具来压窄增益带宽<sup>[20]</sup>,保证激光器稳定单频运转。激光晶体分别采用掺杂浓度为 0.2%、0.7%、0.8% 和 1.0% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,掺杂浓度为 0.2% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体用波长为 808 nm 的激光器抽运,其余掺杂浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体用波长为 888 nm 的激光器抽运。为了保证抽运光和基频光在激光晶体内实现较好模式匹配,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体长度均选为 20 mm。激光晶体的横截面积为 3 mm×3 mm(如表 2 所示)。晶体的一个端面与光轴平行,另一个端面与光轴成 1.5° 夹角,呈楔子状,保证激光器运转时基频光的偏振方向稳定<sup>[21]</sup>。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体通过钢焊接技术与紫铜控温炉焊接在一起,保证良好的散热。在本实验中由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体受激发射产生 1064 nm 激光输出是四能级结构,激光晶体的工作温度不会影响激光器性能,因此在不牺牲激光器性能的前提下,为了使激光晶体温度更容易控制,将其工作温度控制在略高于常温的 36 ℃。

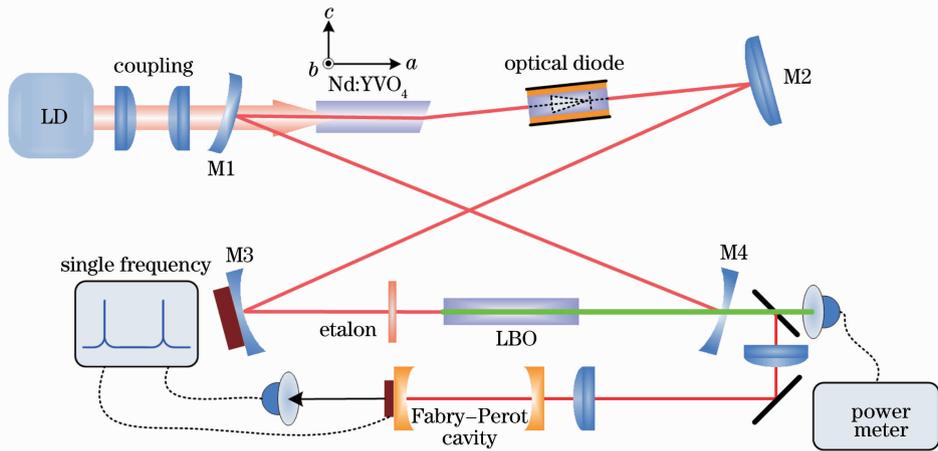


图 3 实验装置图

Fig. 3 Configuration of laser system

表 2 不同掺杂浓度和不同抽运波长下, Nd:YVO<sub>4</sub> 单频激光器实验结果

Table 2 Experimental results of the single frequency Nd:YVO<sub>4</sub> lasers with different pump wavelengths and doped concentrations

$N_d/\%$	$\lambda_p/\text{nm}$	$l/\text{mm}$	$\eta_Q = (1 - \lambda_p/\lambda_w)$	$P_{2\omega}/\text{W}$	$\eta_a/\%$	$P_{ab}/\text{W}$	$\eta_o = P_{2\omega}/P_{ab}$
0.2	808	20	24.0%	11.14	96	37.4	29.9%
0.7	888	20	16.5%	17	83	64.6	26.3%
0.8	888	20	16.5%	21.5	89	68.1	31.6%
1.0	888	20	16.5%	19.6	95	73.7	26.6%

以第 2 节理论分析为依据,分别选取表 2 所示的不同规格的晶体,其中,  $\eta_c$  为晶体对抽运光的吸

收效率,  $\eta_o$  为光光转换效率。采用如图 3 所示的四镜环形腔进行实验,环形腔中各元件和腔长参数均

固定不变(4个臂的总长度为490 mm,其中两凹面镜间距保持为97 mm)。首先,选取波长为808 nm 光纤耦合输出的激光二极管作为抽运源进行实验, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体掺杂浓度为0.2%(如表2第1行所示),当吸收的抽运功率  $P_{ab}$  为37.4 W 时,获得了最高输出功率  $P_{2\omega}$  为11.14 W 的单频532 nm 激光输出,继续增加抽运功率,输出功率下降且输出光的光束质量变差,输入-输出曲线如图4中插图所示。随后,在相同的实验条件下,采用波长为888 nm 光纤耦合输出的激光二极管作为抽运源进行实验,分别选取掺杂浓度为0.7%、0.8%和1.0%的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为增益介质,实验结果如表2所示(结果均在激光器单频运转时采集),采用掺杂浓度为0.8%的晶体时,激光器的输出功率和光-光转换效率最高。其输入-输出曲线如图4所示,输出功率为21.5 W 时,用扫描共焦腔监视输出光的纵模模式,结果如图5所示,表明激光器单频运转。

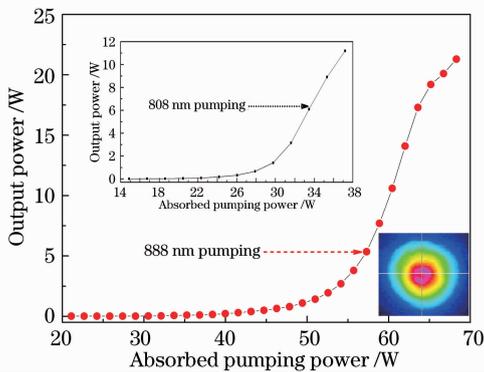


图4 输出功率与吸收的抽运功率关系图

Fig. 4 Output power versus absorbed pumping power

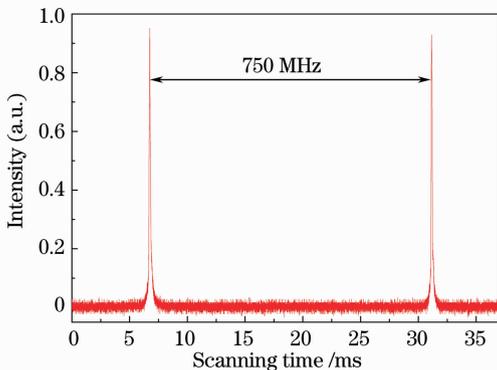


图5 单频扫描曲线

Fig. 5 Scanning of the single frequency

通过以上实验可以看出,采用808 nm 抽运光时,在吸收的抽运功率为37.4 W 时,获得了最高输出功率为11.14 W 的单频绿光输出。改变抽运功率的过程中,激光器的光-光转换效率最高为29.9%,在最

高功率处,继续增加抽运功率,激光器的输出功率降低,并且光束质量变差。而采用888 nm 抽运光时,由于激光晶体的热负载减轻,在提高抽运功率的同时不会增加激光晶体的热效应。在吸收的抽运功率为68.1 W 时,激光器的输出功率为21.5 W。改变抽运功率的过程中,激光器的光-光转换效率最高为31.6%。由此可见,与808 nm 波长光抽运相比,888 nm 直接抽运时激光晶体的热效应得到显著减弱。同样的实验装置,可以提高抽运功率,从而使得单频绿光激光器的最大输出功率和最佳光-光转换效率得到了提升,实验结果与理论分析结果基本一致。另外,在888 nm 波长激光抽运条件下,通过选取不同掺杂浓度的晶体进行实验,结果表明, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的掺杂浓度为0.8%时,激光器的输出功率和光-光转换效率均为最高。采用掺杂浓度为1.0%的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体时,晶体对抽运光的吸收效率为96%(较掺杂浓度为0.8%晶体的吸收效率89%有所提高),但其输出功率仅为19.6 W,光-光转换效率仅为26.6%,并且低于808 nm 激光抽运情况下的转换效率。由理论分析结果可知(如图2),当激光晶体的掺杂浓度为0.9%时,无辐射跃迁过程产生的热负载将达到总热量的1/3,继续增加掺杂浓度,晶体产生的热负载将超过808 nm 波长抽运下的热负载,从而激光器转换效率将低于808 nm 抽运的激光器,与实验结果一致。因此,采用888 nm 抽运光时,为了减轻晶体热效应,获得光-光转换效率较高的激光输出,需选用掺杂浓度低于0.9%的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体。此外,采用掺杂浓度为0.7%的晶体,由于其吸收效率较低,无法充分吸收注入的抽运光,因而光-光转换效率较低,受抽运源最高输出功率的限制,最高输出功率仅为17 W,对应的光-光转换效率为26.3%。

## 4 结 论

实验比较了在808 nm 和888 nm 两种波长光抽运下,高功率单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的最高输出功率和最高光-光转换效率,以及激光晶体的热效应。结果表明,与808 nm 波长光抽运相比,888 nm 直接抽运时激光晶体的热效应得到了显著减轻,可以吸收更多的抽运功率(从37.4 W 增加到68.1 W),单频绿光激光器的最高输出功率(21.5 W)和最高光-光转换效率(31.6%)得到了显著提升;而波长为808 nm 抽运光的单频绿光激光器,吸收的最高抽运功率为37.4 W,对应的输出功率为11.14 W,继续增大抽运

功率,激光器的光束质量则变差,无法获得更高功率的单频绿光输出。另外,为了优化 888 nm 波长光抽运时激光器的性能,减小因掺杂浓度增大带来的无辐射跃迁对激光器输出特性的影响,从理论上分析了考虑无辐射跃迁时激光晶体的热负载随掺杂浓度的变化关系,计算结果表明晶体的掺杂浓度应低于 0.9%。随后,分别采用掺杂浓度为 0.7%、0.8% 和 1.0% 的晶体进行实验。在晶体的掺杂浓度为 0.8% 时,实现了最大功率为 21.5 W 的 532 nm 单频激光输出,对应的光-光转换效率为 31.6%,而当晶体的掺杂浓度分别为 0.7% 和 1.0% 时,激光器的输出功率和光-光转换效率均低于上述结果。以上结果均证明,实验结果与理论分析基本一致。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Bo, A. C. Geng, Y. Bi *et al.*. High-power and high-quality, green-beam generation by employing a thermally near-unstable resonator design[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(11): 2499~2503
- 2 S. Konno, T. Kojima, S. Fujikawa *et al.*. High-brightness 138 W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2): 105~107
- 3 R. Lavi, S. Jackel, Y. Tzuk *et al.*. Efficient pumping scheme for neodymium-doped materials by direct excitation of the upper lasing level [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(36): 7382~7385
- 4 Z. Zhuo, T. Li, X. M. Li *et al.*. Investigation of Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> composite crystal and its laser performance pumped by a fiber coupled diode laser[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **274**(1): 176~181
- 5 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang *et al.*. Investigation on LD double-end-pumped high power Q-switched YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub> fundamental mode solid state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2409~2414  
赵智刚,董延涛,潘孙强等. LD 双端抽运 YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub> 复合晶体的高功率调 Q 基模固体激光器研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2409~2414
- 6 T. Sudmeyer, C. Krankel, C. R. E. Baer *et al.*. High-power ultrafast thin disk laser oscillators and their potential for sub-100-femtosecond pulse generation[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **97**(2): 281~295
- 7 R. J. Beach. High Efficiency 2 Micrometer Laser Utilizing Wing-Pumped TM<sup>3+</sup> and a Laser Diode Array End-Pumping Architecture[P]. US Patent: 5689522, 1997
- 8 Ai Qingkang, Chang Liang, Chen Meng *et al.*. Thermal analysis of Nd:YVO<sub>4</sub> pumped by 808 nm and 888 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402001  
艾庆康,常亮,陈檬等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 热效应分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402001
- 9 Shi Yuxian, Lu Tielin, Feng Baohua *et al.*. Thermal effects analysis of Nd:CNGG 935 nm laser pumped by 885 nm and 808 nm diode lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1102004  
施玉显,卢铁林,冯宝华等. 885 nm 和 808 nm LD 抽运 Nd:CNGG 935 nm 激光器热效应研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(11): 1102004
- 10 L. McDonagh, R. Wallenstein, R. Knappe *et al.*. High-efficiency 60 W TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator pumped at 888 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3297~3299
- 11 P. Zhu, D. J. Li, P. X. Hu *et al.*. High efficiency 165 W near-diffraction-limited Nd:YVO<sub>4</sub> slab oscillator pumped at 880 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(17): 1930~1932
- 12 D. Sangla, M. Castaing, F. Balembois *et al.*. Highly efficient Nd:YVO<sub>4</sub> laser by direct in-band diode pumping at 914 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(14): 2159~2160
- 13 X. Delen, F. Balembois, O. Mussel *et al.*. Characteristics of laser operation at 1064 nm in Nd:YVO<sub>4</sub> under diode pumping at 808 nm and 914 nm[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(1): 52~54
- 14 Y. F. Chen, Y. P. Lan, S. C. Wang. Modelling of diode-end-pumped Q-switched solid-state lasers: influence of energy-transfer upconversion[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(7): 1558~1563
- 15 V. Ostroumov, T. Jensen, J. P. Meyn *et al.*. Study of luminescence concentration quenching and energy transfer upconversion in LaSc<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> and GdVO<sub>4</sub> laser crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(3): 1052~1060
- 16 Y. J. Wang, Y. H. Zheng, S. Zhu *et al.*. High-power single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> green laser by self-compensation of astigmatism[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, **9**(7): 506~510
- 17 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Single-end pumping, single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO, laser with output power of 21.5 W[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **39**(6): 0602011  
郑耀辉,王雅君,彭堃堃. 输出功率为 21.5 W 的单端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 单频激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602011
- 18 P. J. Hardman, W. A. Clarkson, G. J. Friel *et al.*. Energy-transfer upconversion and thermal lensing in high-power end-pumped Nd:YLF laser crystals [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4): 647~655
- 19 A. Sennaroglu. Influence of neodymium concentration on the strength of thermal effects in continuous-wave diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> lasers at 1064 nm[J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 2000, **32**(12): 1307~1317
- 20 K. I. Martin, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Self-suppression of axial mode hopping by intracavity second-harmonic generation [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(6): 375~377
- 21 Y. H. Zheng, F. Q. Li, Y. J. Wang *et al.*. High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd:YVO<sub>4</sub> as a polarizing beam splitter[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(2): 309~312

栏目编辑: 宋梅梅