

# Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对大功率全固态 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器输出特性影响的研究\*

李 健\*\* 何京良\*\* 侯 玮 陈毓川 许祖彦

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

**提要** 通过对 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体吸收特性的研究,对全固态 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器中晶体的 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度在强光抽运条件下对激光输出特性的影响进行了分析,得出了激光器的输出功率和斜效率与晶体掺杂浓度的对应关系。对晶体长度为 5 mm,掺杂浓度分别为 0.5%,0.7%和 1.0 at-% 的大功率全固态 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器的输出进行了比较,实验与分析结果符合得较好。利用掺杂为 0.5% 的 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体,在抽运光功率为 5.1 W 时获得 3.1 W 的 TEM<sub>00</sub> 模激光输出,斜效率达到 71%。

**关键词** Nd·YVO<sub>4</sub>, 掺杂浓度,斜效率

## 1 引 言

Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体最早是由 MIT 林肯实验室的 J. R. Oconnor 于 1966 年发明的<sup>[1]</sup>,它具有较宽的吸收带宽和较大的受激发射截面,特别适用于激光二极管(LD)抽运的全固态激光器。由于 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体的导热性和机械性能比 Nd:YAG 晶体差,Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体早期主要应用于小功率器件,一般设计成高掺杂(1.5~2.5%)、短长度的晶体薄片(约 0.5~1.5 mm)<sup>[2~4]</sup>。近年来通过有效的制冷,Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体已被经常用于大功率全固态激光器中<sup>[5~9]</sup>。减少 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体热效应的有效途径之一是适当减小 Nd<sup>3+</sup> 的掺杂浓度,晶体长度则要相应增加。从目前国际上对 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体产品的需求来看,在大功率全固态激光器应用中,Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体朝着低掺杂、大尺寸的方向发展,瓦级 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器需要的晶体长度一般都在 5 mm 以上,掺杂浓度一般为 0.3~1.0 at-%。目前尚未见有文献对掺杂浓度与晶体长度对激光输出特性的影响进行研究。本文根据不同文献<sup>[3,9]</sup>确定了 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体对抽运光的吸收系数经验公式,分析了 Nd<sup>3+</sup> 的掺杂浓度在强光抽运条件下对 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器输出功率及斜效率的影响。实验与分析结果符合得较好。

## 2 理论分析

Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体对 1.064 μm 的能级跃迁是典型的四能级结构,在纵向抽运的情况下,大多数激光器能够输出 TEM<sub>00</sub> 模,在谐振腔内基模振荡光所满足的稳态方程为<sup>[10,11]</sup>

\* 国家高技术研究发展计划重大项目资助。

\*\* 山东师范大学现代光学实验室,济南 250014。

收稿日期: 1998-10-30; 收到修改稿日期: 1998-12-29

$$\iiint_{\text{cavity}} \frac{r_p(x, y, z) \cdot s_0(x, y, z)}{1 + \frac{c_0}{n} \sigma \cdot \tau_f S \cdot s_0(x, y, z)} dV = \frac{n \cdot \delta}{2L \sigma \cdot \tau_f R} \quad (1)$$

式中  $s_0(x, y, z)$  为归一化的腔内光子数密度,  $S$  为腔内光子总数,  $\tau_f$  为增益介质上能级的荧光寿命,  $\sigma$  为受激发射截面,  $\delta$  为腔内往返损耗,  $L$  为谐振腔长度,  $n$  为增益介质的折射率,  $c_0$  为真空中的光速,  $r_p(x, y, z)$  为归一化的抽运速率密度函数,  $R$  为抽运速率, 与抽运光功率存在如下关系

$$R = \frac{\eta_p \cdot \eta_\alpha \cdot P_{\text{in}}}{h\nu_p} \quad (2)$$

$$\eta_\alpha = 1 - \exp(-\alpha_p \cdot l) \quad (3)$$

其中  $\eta_p$  为量子效率,  $P_{\text{in}}$  为入射到增益介质表面的抽运功率,  $\eta_\alpha$  为增益介质对抽运光的吸收效率,  $\alpha_p$  为增益介质对抽运光的吸收系数,  $l$  为增益介质的长度,  $h\nu_p$  为抽运光子能量。

Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体属单轴晶系, 具有很强的双折射性, 有很大的吸收截面和宽的吸收带宽, 吸收系数与 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度密切相关, 由于不同晶体的生长条件和环境不同, 加上不同测试方法的误差, 很难给出它们之间确切的理论关系式, 也无文献报道。我们根据不同文献<sup>[3,9]</sup>中对一确定掺杂浓度给出的吸收系数, 对 808 nm 的  $\pi$  偏振吸收总结出以下经验公式

$$\alpha_p = C \cdot \rho^b \quad (4)$$

式中  $\alpha_p$  为晶体对抽运光的吸收系数,  $\rho$  为掺杂百分比浓度,  $b, C$  为实验常数, 由实验结果拟合得出  $b = 1.5, C = 25$ ,  $\alpha_p$  的单位为  $\text{cm}^{-1}$ 。从上述指数关系可看出, 不同浓度的掺杂对晶体的吸收系数影响是很大的。我们对常见的几种掺杂进行了计算, 结果如表 1 所示。

表 1 不同掺杂浓度对应的吸收系数的理论值与实验值的比较

Table 1 Compare between the theoretical and experimental results of absorption coefficient with different doped concentrations

$\rho$ /at-%	$\alpha_p$ / $\text{cm}^{-1}$ (theory value)	$\alpha_p$ / $\text{cm}^{-1}$ (experimental value) <sup>[3,9]</sup>
2.02	71.8	72.4
1.1	28.8	28.8
1.0	25.0	23
0.7	14.6	
0.5	8.80	

由激光器的阈值条件, 可得激光器的阈值功率  $P_{\text{th}}$  为<sup>[12]</sup>

$$P_{\text{th}} = \frac{h\nu_p}{\eta_\alpha} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \tau_f} \cdot \frac{\delta \cdot n}{2L} \cdot \frac{1}{J_1} \quad (5)$$

式中  $J_1 = \iiint_{\text{cavity}} r_p(x, y, z) \cdot s_0(x, y, z) dV$ , 为抽运光与振荡光的空间重叠因子。由上式可看出, 晶体的掺杂浓度越高, 其吸收效率越大, 激光器的阈值越低。同样, 抽运光与振荡光在谐振腔内的空间模式匹配程度越好, 激光器的阈值也就越低。

在强光抽运条件下, 谐振腔内光强远远高于饱和光强, 满足

$$S \cdot s_0(x, y, z) \gg \frac{n}{c\sigma \cdot \tau_f} \quad (6)$$

代入(1)式, 可解出

$$S = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot R \quad (7)$$

设输出耦合镜透过率为  $T$ , 由激光输出功率和斜效率的表达式<sup>[11,13]</sup> 即可得出激光器的输出功

率和斜效率为

$$P_{\text{out}} = \eta_p \cdot \eta_\alpha \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{T}{\delta} \cdot P_{\text{in}} \quad (8)$$

$$\eta_s = \eta_p \cdot \eta_\alpha \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{T}{\delta} \cdot \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in}} - P_{\text{th}}} \quad (9)$$

式中,  $\lambda_p$  为抽运光波长,  $\lambda$  为振荡光波长。由(8), (9) 式可以看出, 在强光抽运条件下, 激光输出功率  $P_{\text{out}}$  与抽运功率  $P_{\text{in}}$  成正比, 与谐振腔的损耗  $\delta$  成反比; 激光斜效率与谐振腔的损耗  $\delta$  成反比, 而抽运功率则对其影响不大, 随抽运功率的增加,  $\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in}} - P_{\text{th}}}$  的值逐渐减小, 尤其在抽运功率远远大于抽运阈值时,  $\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in}} - P_{\text{th}}}$  的值趋近于 1。谐振腔内的损耗  $\delta$  一般由三部分组成<sup>[14]</sup>: 输出透过率  $T$ , 腔内衍射和腔镜反射不完全等损耗  $\delta_0$  以及吸收损耗  $\delta_a$ 。谐振腔确定后  $\delta_0$  与  $T$  为常数, 而  $\delta_a$  则与晶体的掺杂浓度、通光长度及抽运光功率有关。高掺杂浓度和大晶体尺寸均会引起  $\delta_a$  的增加。对高浓度掺杂的晶体, 由关系式(4) 可知其吸收系数很大, 在强光抽运情况下, 由于抽运光在晶体内的功率密度增加, 会引起越来越大的热吸收, 甚至会出现过饱和吸收, 在抽运光聚焦处会产生强烈的热效应。经过反复实验, 确定了腔内吸收损耗  $\delta_a(\rho, l, P_{\text{in}})$  的经验公式

$$\delta_a(\rho, l, P_{\text{in}}) = C_1 \cdot \rho \cdot l + C_2 \cdot \sqrt{P_{\text{in}}} \quad (10)$$

其中  $C_1, C_2$  为实验常数, 由实验结果拟合得出  $C_1 = 0.04 \text{ cm}^{-1}$ ,  $C_2 = 0.001 \text{ W}^{-1/2}$ 。该关系式表明激光器腔内损耗随晶体掺杂浓度  $\rho$ , 通光长度  $l$ , 抽运功率  $P_{\text{in}}$  的增加而增加。将(4), (10) 代入(8), (9) 两式, 即可得到在大功率抽运情况下激光器的输出功率和斜效率的表达式

$$P_{\text{out}} = \eta_p \cdot [1 - \exp(-C \cdot \rho^b \cdot l)] \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{T}{C_1 \cdot \rho \cdot l + C_2 \cdot \sqrt{P_{\text{in}} + \delta_0 + T}} \cdot P_{\text{in}} \quad (11)$$

$$\eta_s = \eta_p \cdot [1 - \exp(-C \cdot \rho^b \cdot l)] \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{T}{C_1 \cdot \rho \cdot l + C_2 \cdot \sqrt{P_{\text{in}} + \delta_0 + T}} \cdot \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in}} - P_{\text{th}}} \quad (12)$$

由(11), (12) 式可看出, 在强光抽运条件下, 低掺杂浓度的晶体更能实现高功率和高效率激光输出, 而为了更好地减少热效应对激光输出的影响, 适当地加长晶体长度是必要的。

### 3 实验与结果

我们采用大功率 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器对分析结果进行验证。Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的谐振腔结构如图 1 所示。图中的抽运光源 LD 是美国 OPC 公司生产的 OPC-B015 型带光纤耦合的半导体激光器, 最大输出功率为 15 W, 光纤输出面直径为 1.15 mm, 数值孔径为 0.12; LD 与谐振腔之间的耦合匹配采用准直聚焦系统(GL), 焦距为 30 mm, 传输效率为 89.1%; Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体由中国科学院物理研究所晶体组提供, 靠近抽运光的通光面兼作腔镜, 表面镀 1064 nm 高反和 808 nm 高透介质膜, 另一通

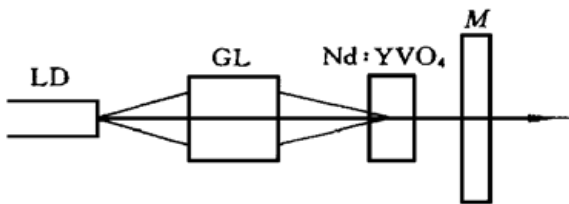


图 1 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of a Nd:YVO<sub>4</sub> laser

光面镀 1064 nm 高透介质膜; 输出腔镜  $M$  为平面反射镜, 对 1064 nm 波长的透过率为 8%; 整个谐振腔长约为 10 mm。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体的侧面用铝箔包住装在带有水冷却的紫铜块内, 以保持良好的热接触。实验中调节准直聚焦系统 GL 与 LD 及  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体之间的距离, 使整个系统处于最佳匹配状态。

表 2 实验数据与分析结果的比较

Table 2 Compare between the theoretical data and the experimental results

$\rho / \text{at}\%$	$l / \text{mm}$	$P_{\text{in}} / \text{W}$	$P_{\text{out}} / \text{W}$		$\eta_s / \%$	
			experimental value	theory value	experimental value	theory value
0.5	5	5.10	3.09	3.15	71.0	71.5
0.7	5	5.10	2.98	3.06	68.5	69.5
1.0	5	5.10	2.77	2.89	63.7	65.7
0.5	5	10.94	6.67	6.68	65.1	65.2
0.7	5	10.94	6.35	6.37	62.0	62.2
1.0	5	10.94	6.01	6.14	58.7	59.9

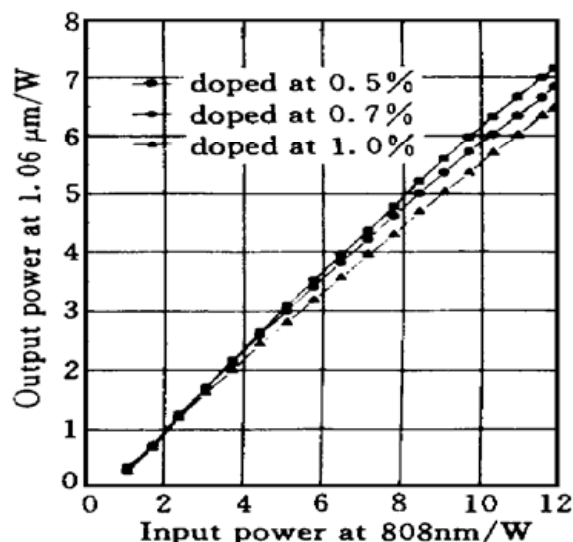
保持激光腔参数不变, 注入激光功率  $P_{\text{in}} = 5.1$  W, 分别换上大小为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  的掺杂浓度为 0.5%, 0.7% 和 1.0% at-% 的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体, 对 1064 nm 激光的输出功率进行测量, 并计算出激光斜效率, 激光器的输入-输出曲线如图 2 所示, 实验数据与分析结果的具体对比见表 2, 可以看出实验数据与分析结果符合得较好。

## 4 讨 论

在大功率 LD 抽运情况下, 由于要减小大功率抽运带来的热效应, 应该选用低掺杂浓度的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体, 相应增加晶体通光长度以利于制冷,  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体的通光长度、掺杂浓度及抽运功率之间存在一个最佳匹配问题。从激光器的输入-输出曲线来看, 随着抽运光功率的增加, 掺杂浓度低的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体的输出特性明显好于掺杂浓度高的晶体。由表 2 可以看出, 抽运光功率越大, 理论值与实验值符合得越好。

激光器的谐振腔型为两镜短腔, 由于  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体等效于一个薄透镜, 实际的激光腔等效为三镜腔, 由  $ABCD$  矩阵可知, 腔的稳定性相当好, 与实验结果一致。

在进行理论计算时, 各参数的取值为: 衍射等损耗  $\delta_0 = 0.5\%$ , 输出耦合透过率  $T = 8\%$ , 阈值功率  $P_{\text{th}} = 0.7$  W, 量子效率  $\eta_p = 1$ 。对不同掺杂浓度的晶体来说, 激光器的阈值功率不同, 掺杂浓度相差 0.2~0.3 at-%, 阈值一般相差 0.1 W, 为计算方便, 我们取掺杂较高的晶体的阈值进行计算, 理论值会比实验值稍微偏小;  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体的量子效率比较高, 一般为 95% 以上, 为了方便比较, 将其取为 1, 由此会使理论值比实验值稍稍偏大。

图 2 不同掺杂浓度的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体对激光输出的影响Fig. 2 Laser output versus input for  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  crystals with different doped concentration

本文是针对大功率抽运的情况进行分析的,目前对大功率的取值范围并没有一个确定的定义,一般认为抽运功率为阈值功率的 5 倍以上时,即在大功率的范围内。从激光器的输入-输出曲线可以看出,在抽运功率大于 4 W 时,其斜效率逐渐减小,理论与实验符合得较好。

### 参 考 文 献

- 1 J. R. Oconnor. Unusual crystal-field energy levels and efficient laser properties of  $\text{YVO}_4 \cdot \text{Nd}$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **9**(11): 407~ 409
- 2 Y. Kuwano, S. Saito. Nd  $\cdot \text{YVO}_4$  single crystal for LD pumped solid state laser. *Laser Tes.*, 1990, **16**(5): 616~ 621
- 3 T. Sasaki, T. Kojima, A. Yokotani *et al.*. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd  $\cdot \text{YVO}_4$  microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(21): 1665~ 1667
- 4 L. Deshazer. Vanadate crystals exploit diode-pump technology. *Laser Focus World*, 1994, **30**(2): 88~ 93
- 5 C. Yelland, W. Sibbett. Stable 4 W CW solid-state green source pumped by fibre-coupled diode-laser arrays. *Jour. of Mod. Opt.*, 1996, **43**(5): 893~ 901
- 6 A. Agnesi, G. C. Reali, P. G. Gobbi. 430-mW single-transverse-mode diode-pumped Nd  $\cdot \text{YVO}_4$  laser at 671 nm. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7): 1297~ 1300
- 7 J. L. He, W. Hou, H. L. Zhang *et al.*. Continuous-wave output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of an Nd  $\cdot \text{YVO}_4$  laser. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(6): 418~ 419
- 8 W. L. Wu, S. L. Huang, F. J. Kao. Probing of thermal effects in diode-laser-pumped solid-state laser by precision optical reflectometer. CLEO '98, 1998, CTu12, 101~ 102
- 9 A. Brignon, G. Feugnet, J. P. huignard *et al.*. Compact Nd  $\cdot \text{YAG}$  and Nd  $\cdot \text{YVO}_4$  amplifiers end-pumped by a high-brightness stacked array, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(3): 577~ 585
- 10 P. Laporta, M. Brussard. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(10): 2319~ 2326
- 11 T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(6): 895~ 912
- 12 M. J. F. Digonnet, C. J. Gaeta. Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(3): 333~ 342
- 13 K. Kubodera, K. Otsuka. Single-transverse-mode  $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$  slab waveguide laser. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(2): 653~ 658
- 14 Y. F. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~ 1429

## Influence of the $\text{Nd}^{3+}$ -doped Concentration on the Output Performance of a High-power All-solid-state Nd $\cdot \text{YVO}_4$ Laser

Li Jian He Jingliang Hou Wei Chen Yuchuan Xu Zuyan

(Optical Physics Laboratory, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** The characteristics of the laser output for an all-solid-state LD pumped Nd  $\cdot \text{YVO}_4$  laser is studied. By taking account of the loss of cavity as a function of the  $\text{Nd}^{3+}$  doped concentration, a new expressions of the laser output power and the slope-efficiency as a function of the doped concentration are obtained, which are coincident with the experimental results quite well. With a Nd  $\cdot \text{YVO}_4$  crystal of 0.5%, doped concentration and pumped by 5.1 W, the output power of the laser with TEM<sub>00</sub> mode is 3.1 W, and the slope-efficiency is 71%.

**Key words** Nd  $\cdot \text{YVO}_4$ , doped concentration, slope-efficiency