

# Nd:YAG 透明陶瓷尺寸对激光性能的影响

雷卉, 庞振华, 任豪

广州市光机电技术研究院, 广东 广州 510663

**摘要** 以 Nd:YAG 透明陶瓷为增益介质, 搭建了一套激光性能评估系统, 研究了 Nd:YAG 透明陶瓷的尺寸对激光性能的影响。实验结果表明, 当 Nd:YAG 透明陶瓷的尺寸较小时, 在相同抽运功率下, 激光输出功率随着尺寸的增加而增大, 但增幅有所下降; 当 Nd:YAG 透明陶瓷的尺寸为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 9\text{ mm}$  时, 获得了功率为 4.94 W 的连续激光输出, 相应的斜率效率为 37.7%; 当抽运功率为 17 W 时, 激光输出功率随 Nd:YAG 透明陶瓷尺寸变化的数值模拟结果与实验结果相吻合; 与 Nd:YAG 单晶相比, Nd:YAG 透明陶瓷可通过提高掺杂浓度来提升激光性能。

**关键词** 激光技术; 激光性能; Nd:YAG; 透明陶瓷; 尺寸

中图分类号 TQ174 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.121407

## Laser Properties of Nd:YAG Transparent Ceramics with Different Sizes

Lei Hui, Pang Zhenhua, Ren Hao

Guangzhou Research Institute of O-M-E Technology, Guangzhou, Guangdong 510663, China

**Abstract** With the Nd:YAG transparent ceramics as the gain media, a laser property evaluation system is built. The effect of the Nd:YAG transparent ceramic size on the laser property is studied. The experimental results show that, when the Nd:YAG transparent ceramic size is relatively small, the laser output power increases with the increase of the size under the same pump power, but the increase amplitude declines. When the Nd:YAG transparent ceramic size is  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ , the continuous laser output with a power of 4.94 W and a corresponding slope efficiency of 37.7% is obtained. When the pump power is 17 W, the numerical simulation results on the variation of the laser output power with the Nd:YAG transparent ceramic size is consistent with the experimental results. Compared with the Nd:YAG monocrystal, the Nd:YAG transparent ceramics can be used to improve laser properties if its doping concentration is enhanced.

**Key words** laser technique; laser properties; Nd:YAG; transparent ceramics; size

**OCIS codes** 140.3530; 140.3380; 160.5690

## 1 引言

Nd:YAG 材料是一种优良的固体激光器工作物质, 具有熔点高、导热性好、可在室温下连续工作等特点, 并适合高重复频率的工作方式, 已得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。采用传统提拉法制备的 Nd:YAG 单晶质量高、性能好, 但在实际应用中仍有不足。首先, 由于  $\text{Nd}^{3+}$  在 YAG 晶体中的分凝系数仅为 0.18, 难以实现摩尔分数高于 1.3% 的掺杂, 因此激光效率的提高被限制<sup>[6]</sup>; 其次, 采用提拉法生长的 Nd:YAG 单晶在径向上容易产生浓度梯度<sup>[6]</sup>, 造成晶体材料掺杂不均匀, 且所需用到的坩埚会不可避免地带来污染<sup>[7]</sup>, 影响激光性能; 此外, 提拉法生长 Nd:YAG 单晶的周期长、成本高, 晶体容易开裂, 难以生长大尺寸的晶体材料<sup>[8]</sup>。与单晶相比, Nd:YAG 透明陶瓷的制备工艺不同, 可实现高浓度且均匀的掺杂, 不仅可以制备大尺寸、形状复杂的陶瓷材料, 还可以实现复杂结构及多功能的透明陶瓷材料<sup>[1,9-10]</sup>; 此外, Nd:YAG 透明陶瓷的制备周期短、成本低, 容易实现大批量生产。这些都是 Nd:YAG 单晶所不能比拟的优势。1995 年, 研究者采用固相反应法, 以高纯度的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Nd}_2\text{O}_3$  粉体为原料, 首次制备出了高透明度、高质量的 Nd:YAG 透明陶瓷, 并获得

收稿日期: 2017-07-21; 收到修改稿日期: 2017-08-03

基金项目: 广东省科技计划(2016B090917002)、广州市科技计划(201508030018)

作者简介: 雷卉(1989—), 女, 硕士, 主要从事材料、激光、3D 打印等方面的研究。E-mail: bingzhenhui1132@163.com

了斜率效率为 28% 的激光输出<sup>[7]</sup>。此后,出现了大量有关透明陶瓷材料的研究,透明陶瓷材料显现出巨大的应用前景<sup>[11-18]</sup>。

本文以 Nd:YAG 透明陶瓷材料为激光增益介质,搭建了一套激光性能评估系统。研究了不同尺寸的 Nd:YAG 透明陶瓷的激光性能,分析了增益介质长度对激光性能的影响,并与 Nd:YAG 单晶的激光性能进行了对比。

## 2 基本原理

实验以波长为 808 nm 的半导体激光器作为抽运源,以 Nd:YAG 透明陶瓷作为增益介质。抽运光经过透镜准直聚焦到 Nd:YAG 透明陶瓷上,产生受激辐射和自发辐射,沿轴向传播的光在谐振腔内振荡,增益介质中的光能密度不断增大,使增益介质产生受激辐射的几率远大于自发辐射的,受激辐射占绝对优势。与此同时,激光在到达耦合输出镜时,虽然大部分光能量被反射回谐振腔以维持激光的产生,但仍有小部分激光被导出,形成激光输出,实验利用光功率计对其进行探测。

激光性能评估系统的结构示意图如图 1 所示,系统主要由波长为 808 nm 的半导体激光器、准直聚焦系统、谐振腔、光功率计、循环冷却系统构成。谐振腔由全反镜和耦合输出镜构成,其中全反镜对波长为 1064 nm 的光具有高的反射率,对波长为 808 nm 的光具有高的透射率;耦合输出镜对波长为 1064 nm 的光的反射率为 90%。

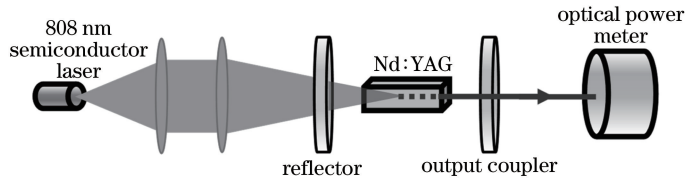


图 1 激光性能评估系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of laser property evaluation system

## 3 实验结果

实验采用掺杂原子数分数为 1.5% 的 Nd:YAG 透明陶瓷作为增益介质,其尺寸分别为 3 mm×3 mm×1.9 mm, 3 mm×3 mm×3.05 mm, 3 mm×3 mm×5.08 mm 和 3 mm×3 mm×9.0 mm,对其分别进行激光性能测试,并将测试结果与掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YAG 单晶(尺寸为 4 mm×4 mm×4 mm)的进行对比。

不同尺寸 Nd:YAG 透明陶瓷及单晶的激光输出功率与抽运功率的关系如图 2 所示。当抽运源的工作电流从 0 A 逐渐升至 6 A 时(4 A 以下时采样步长为 0.1 A,4 A 以上时采样步长为 0.2 A),抽运功率从 0 W 逐渐升至 17.2 W。光功率计置于谐振腔输出端外,对出射的 1064 nm 激光进行探测,光功率计的探测中心波长设置为 1064 nm。从图 2 可以看出,输出功率与抽运功率展现出良好的线性关系,且在相同的抽运功率下,输出功率随着 Nd:YAG 透明陶瓷尺寸的增大而不断增大;反观 Nd:YAG 单晶,其物理尺寸为

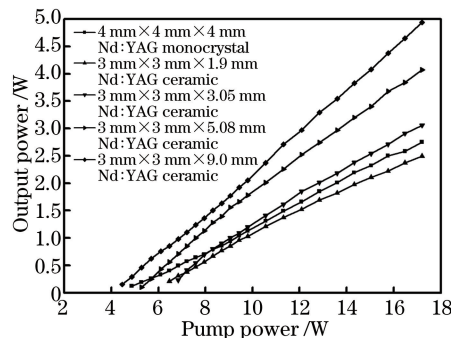


图 2 不同尺寸 Nd:YAG 透明陶瓷及单晶的激光输出功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Laser output power versus pump power of Nd:YAG transparent ceramics and monocrystals with different sizes

4 mm×4 mm×4 mm,输出功率却不及尺寸为 3 mm×3 mm×3.05 mm 的 Nd:YAG 透明陶瓷的,仅比尺寸为 3 mm×3 mm×1.9 mm 的 Nd:YAG 透明陶瓷的略好一些。

不同尺寸 Nd:YAG 透明陶瓷及单晶的部分测试数据及拟合结果见表1。可以看出,所有样品的激光输出功率与抽运功率均展现出良好的线性关系,拟合相关系数均大于 0.995,最高达到 0.999 以上。Nd:YAG 透明陶瓷的斜率效率随着晶体尺寸的增大而变大,而尺寸为 4 mm×4 mm×4 mm 的 Nd:YAG 单晶的斜率效率仅介于尺寸为 3 mm×3 mm×1.9 mm 和 3 mm×3 mm×3.05 mm 的 Nd:YAG 透明陶瓷的斜率效率之间,这与图 2 所示各条曲线的相对位置相吻合。均匀介质对抽运光的吸收系数是一定的,当增益介质长度较小时,其对抽运光的吸收较少,大部分能量都到了腔外,这造成了较大的抽运光损耗。在抽运未饱和的状态下,增益介质的长度越大,抽运光的吸收越充分;而在实验中,激光未出现衰减,故整体的增益系数更大,在相同的抽运功率下,激光功率更高,抽运光转化为输出光的效率更高。当抽运功率为 17.2 W 时,光-光转换效率的变化趋势也与斜率效率一致。结合图 2 和表 1 可以看出, Nd:YAG 单晶在抽运功率为 17.2 W 时的输出功率可达 2.75 W,光-光转换效率为 16.0%,斜率效率达到 22.1%;Nd:YAG 透明陶瓷的激光性能也非常好,尺寸最大的 Nd:YAG 透明陶瓷(3 mm×3 mm×9.0 mm)在抽运功率为 17.2 W 时,激光输出功率达到了 4.94 W,光-光转换效率为 28.7%,斜率效率达到了 37.7%,转换效率较高,且有优化空间。

表 1 抽运功率 17.2 W 下 Nd:YAG 透明陶瓷及单晶的部分测试数据及拟合结果

Table 1 Partial test data and fitting results of Nd:YAG transparent ceramics and monocrystals with pump power of 17.2 W

Gain medium	4 mm× 4 mm×4 mm Nd:YAG crystal	3 mm× 3 mm×1.9 mm Nd:YAG ceramic	3 mm× 3 mm×3.05 mm Nd:YAG ceramic	3 mm× 3 mm×5.08 mm Nd:YAG ceramic	3 mm× 3 mm×9.0 mm Nd:YAG ceramic
Laser threshold value /W	4.87	6.47	6.84	5.28	4.46
Output power /W	2.75	2.49	3.06	4.07	4.94
Slope of fitting line	0.221	0.214	0.266	0.330	0.377
Correlation coefficient	0.99859	0.99586	0.99617	0.99743	0.99919
Fitting laser threshold value /W	4.61	5.19	5.42	4.62	4.21
Optical-optical conversion efficiency /%	16.0	14.5	17.8	23.7	28.7
Slope efficiency /%	22.1	21.4	26.6	33.0	37.7

Nd:YAG 透明陶瓷及单晶的斜率效率、光-光转换效率与增益介质长度之间的关系如图 3 所示。可以看出,斜率效率与光-光转换效率的变化趋势是一致的,说明激光系统的性能与增益介质的性质有关。对比不同长度的 Nd:YAG 透明陶瓷增益介质的激光性能可以发现,当 Nd:YAG 透明陶瓷的长度增加时,抽运光的吸收增加,激光输出功率也增大,且当增益介质长度较小时,激光输出功率的增长尤为明显。当 Nd:YAG 透明陶瓷的长度继续增大时,激光输出功率继续增大,但增幅略有减弱。

## 4 分析与讨论

由前述分析可知,增益介质长度的增加可以增强激光的增益效果,但若晶体过长,激光在增益介质中传输时发生散射和吸收的几率也大大增加,从而导致激光输出增幅的减弱。与 Nd:YAG 单晶对比,Nd:YAG 透明陶瓷的激光输出功率更大。虽然实验所用的 Nd:YAG 单晶的掺杂浓度要低于 Nd:YAG 透明陶瓷的,但这也从侧面证明了 Nd:YAG 透明陶瓷的性能的确非常优良,Nd:YAG 透明陶瓷可实现高浓度掺杂,这是

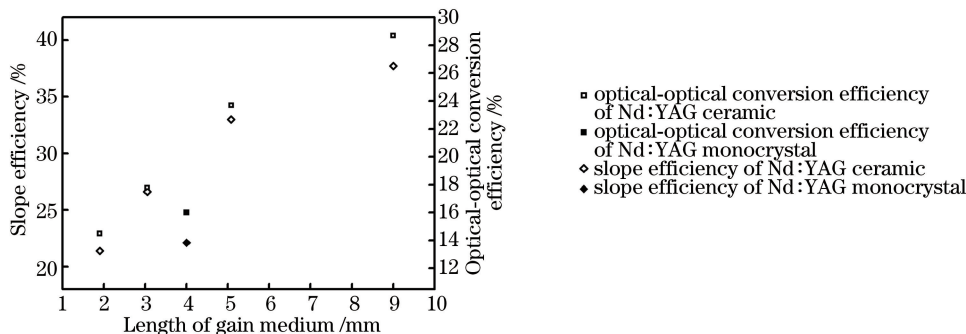


图 3 Nd:YAG 透明陶瓷及单晶的斜率效率、光-光转换效率与增益介质长度之间的关系

Fig. 3 Relationship among slope efficiency, optical-optical conversion efficiency and gain medium length of Nd:YAG transparent ceramics and monocrystals

Nd:YAG 单晶所不能比拟的优势。

Nd:YAG 材料是典型的四能级结构,在强抽运的作用下,振荡器输出功率<sup>[19-21]</sup>可表示为

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

式中  $P_{\text{out}}$  为输出功率,  $\eta_p$  为量子效率,  $C, C_1, C_2$  和  $b$  为实验常数,  $l$  为增益介质的物理尺寸,  $T$  为振荡器的输出损耗,  $\delta_f$  为振荡器的固有损耗,  $P_{\text{in}}$  为抽运功率,  $\rho$  为增益介质长度方向上吸收的抽运功率密度分布,  $\lambda_p$  为抽运光波长,  $\lambda$  为振荡光波长。斜率效率<sup>[21-22]</sup>可表示为

$$\eta_s = \eta_p \cdot \frac{h\nu_l}{h\nu_p} \cdot \frac{T}{T + \delta_i + C \cdot \rho \cdot l + C_1 \cdot \sqrt{P_{\text{in}}}}, \quad (2)$$

式中  $\eta_s$  为斜率效率,  $h$  为普朗克常数,  $\nu_l$  为出射光子频率,  $\nu_p$  为抽运光子频率。为了能够直观地判断增益介质长度对输出功率的影响,令  $C=0.04 \text{ cm}^{-1}$ ,  $C_1=0.001 \text{ W}^{-1/2}$ ,  $C_2=25$ ,  $b=1.5$ ,  $P_{\text{in}}=17 \text{ W}$ ,  $\rho=1.05$ ,  $T=0.1$ ,  $\delta_f=0.15$ , 使用 Matlab 软件进行数值模拟。激光输出功率随增益介质长度的变化如图 4 所示,其中插图为介质长度为 0~1 mm 部分的放大图,可以看出,模拟结果与前文所述的实验结果相吻合。当抽运功率一定、增益介质的长度较小时,随着增益介质长度的增加,输出功率也增加,但增幅有所减小,存在一个增益介质长度的最优值使得输出功率最高;当增益介质的长度大于最优值时,随着增益介质长度的增加,输出功率减小。这是因为当增益介质较短时,抽运光并没有被增益介质充分吸收,得不到有效的利用,光-光转换效率较低;随着增益介质长度的增加,抽运光的吸收增加,激光输出功率增大;而当增益介质的长度大于最优值时,振荡器中产生的激光会被增益介质重新吸收,激光输出功率减小。

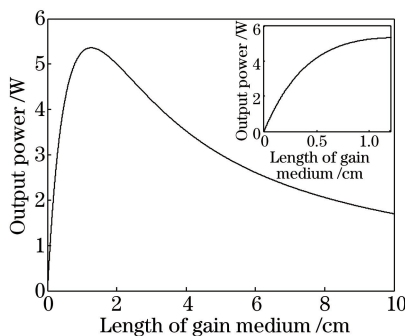


图 4 激光输出功率随增益介质长度的变化,内插图为介质长度为 0~1 mm 部分的放大

Fig. 4 Laser output power versus gain medium length, where inset shows partial enlargement when gain medium length is 0-1 mm

## 5 结 论

搭建了一套激光性能评估系统,对不同尺寸的 Nd:YAG 透明陶瓷及单晶增益介质进行了激光输出特性

测试。Nd:YAG 透明陶瓷与 Nd:YAG 单晶均表现出了良好的激光特性,不仅斜率效率与光-光转换效率较高,激光输出功率随抽运功率的变化也呈现出良好的线性特征。在测试采用的 Nd:YAG 透明陶瓷的尺寸范围内,相同抽运功率下,激光输出功率随增益介质长度的增加而增大,这与模拟结果相吻合。当抽运功率为 17.2 W 时,尺寸为 3 mm×3 mm×9 mm 的 Nd:YAG 透明陶瓷的激光输出功率达到了 4.94 W,同时,斜率效率达到了 37.7%。

提高掺杂浓度可提高增益介质对抽运光的吸收效率,这有利于在减小 Nd:YAG 增益介质尺寸的情况下,获得优良的激光输出性能。而高掺杂浓度的 Nd:YAG 透明陶瓷较容易实现。该研究证明了利用 Nd:YAG 透明陶瓷作为增益介质,可获得与 Nd:YAG 单晶相媲美的激光性能;同时,通过提高 Nd:YAG 透明陶瓷的掺杂浓度、改变 Nd:YAG 透明陶瓷的尺寸等手段,可实现较高功率的激光输出,为大功率激光器的搭建奠定了良好的基础。

### 参 考 文 献

- [1] Huang Wei, Zhu Jianguo. Research progress on preparing methods of yttrium aluminum garnet laser ceramics[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2005, 42(s2): 138-141.  
黄伟, 朱建国. 钇铝石榴石激光陶瓷制备的研究进展[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2005, 42(s2): 138-141.
- [2] 陈家璧, 彭润玲. 激光原理及应用[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 8-14.
- [3] Duan Y M, Zhu H Y, Zhang G, *et al.* Efficient 559.6 nm light produced by sum-frequency generation of diode-end-pumped Nd:YAG/SrWO<sub>4</sub> Raman laser[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(7): 491-494.
- [4] Yamamoto K Y, Cremers D A, Foster L E, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopy analysis of solids using a long-pulse (150 ns) Q-switched Nd:YAG laser[J]. Applied Spectroscopy, 2005, 59(9): 1082-1097.
- [5] Li L F, Zheng X L, Chen X M, *et al.* High-power diode-side-pumped Nd:YAG solid laser mode-locked by CVD graphene[J]. Optics Communications, 2014, 315: 204-207.
- [6] Li Jiang, Wu Yusong, Pan Yubai, *et al.* Solid-state-reaction fabrication and properties of high-doping Nd:YAG transparent laser ceramic[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(12): 1600-1604.  
李江, 吴玉松, 潘裕柏, 等. 固相反应法制备高浓度掺杂 Nd:YAG 激光透明陶瓷及其性能[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(12): 1600-1604.
- [7] Lu J, Prabhu M, Song J, *et al.* Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2000, 71(4): 469-473.
- [8] Quan Jiliang, Xie Zhiwei, Yang Yuanzheng, *et al.* Study on the cracking and defects of Nd:YAG laser crystal[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(3): 270-275.  
权纪亮, 谢致薇, 杨元政, 等. Nd:YAG 激光晶体开裂与缺陷研究[J]. 量子电子学报, 2010, 27(3): 270-275.
- [9] Li Mi, Hu Hao, Gao Qingsong, *et al.* Dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab laser with high power[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514003.  
李密, 胡浩, 高清松, 等. 高功率双浓度掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条激光器[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514003.
- [10] Qu Pengfei, Wang Shiyu, Shao Xinzheng, *et al.* Temperature stability of Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> combination crystals laser[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0614001.  
屈鹏飞, 王石语, 邵新征, 等. Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> 组合晶体激光器温度稳定性研究[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0614001.
- [11] Ikesue A. Polycrystalline Nd:YAG ceramics lasers[J]. Optical Materials, 2002, 19(1): 183-187.
- [12] Lee S H, Kochawattana S, Messing G L, *et al.* Solid-state reactive sintering of transparent polycrystalline Nd:YAG ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(6): 1945-1950.
- [13] Ikesue A, Kamata K, Yoshida K. Effects of neodymium concentration on optical characteristics of polycrystalline Nd:YAG laser materials[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(7): 1921-1926.
- [14] Ikesue A, Yoshida K, Yamamoto T, *et al.* Optical scattering centers in polycrystalline Nd:YAG laser[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(6): 1517-1522.
- [15] Pan Yubai, Xu Jun, Wu Yusong, *et al.* Fabrication and laser output of Nd:YAG transparent ceramic[J]. Journal of Inorganic Materials, 2006, 21(5): 1278-1280.



- 潘裕柏, 徐军, 吴玉松, 等. Nd:YAG 透明陶瓷的制备与激光输出[J]. 无机材料学报, 2006, 21(5): 1278-1280.
- [16] Ding X, Chen N, Sheng Q, *et al.* All-solid-state Nd:YAG laser operating at 1064 nm and 1319 nm under 885 nm thermally boosted pumping[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(9): 094207.
- [17] Zhang Jian, Zhang Qingmao, Chen Guo, *et al.* Nd:YAG pulsed laser double-pass time-sharing multiplexing system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011402.  
张健, 张庆茂, 陈国, 等. Nd:YAG 脉冲激光器双光路时分复用系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 011402.
- [18] Li Mi, Hu Hao, Tang Chun, *et al.* Edge distortion suppressing in Nd:YAG slab laser[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1214003.  
李密, 胡浩, 唐淳, 等. Nd:YAG 板条激光器边缘畸变抑制[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1214003.
- [19] Li Jian, He Jingliang, Hou Wei, *et al.* Influence of the Nd<sup>3+</sup>-doped concentration on the output performance of a high-power all-solid-state Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(4): 298-302.  
李健, 何京良, 侯玮, 等. 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[J]. 中国激光, 2000, 27(4): 298-302.
- [20] Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 895-912.
- [21] Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng Yi, *et al.* Performance of Nd:YVO<sub>4</sub> laser with lower Nd<sup>3+</sup> doped concentration[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(2): 115-117.  
张红瑞, 高明义, 郑义, 等. 低掺杂浓度 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的输出特性研究[J]. 激光与红外, 2003, 33(2): 115-117.
- [22] 戴特力. 半导体二极管泵浦固体激光器[M]. 成都: 四川大学出版社, 1993: 81-93.