

高功率双浓度掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条激光器

李 密^{1,2,3}, 胡 浩^{1,2}, 高清松^{1,2}, 王君涛^{1,2}, 章 健⁴, 邬映臣^{1,2}, 陈小明^{1,2},
周唐建^{1,2}, 徐 浏^{1,2}, 唐 淳^{1,2}, 赵 娜^{1,2}, 刘 鹏⁵, 许晓小^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

³中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088;

⁴中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050;

⁵江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116

摘要 理论设计了二极管端面抽运 Nd:YAG 复合陶瓷板条, 制作了双浓度掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条。当二极管总抽运功率为 18.06 kW 时, 通过双程放大提取了 7.08 kW 的激光功率, 光光转换效率高达 39.2%, 单程传输的退偏振约为 3.2%。实验结果表明, Nd:YAG 复合陶瓷板条对提高板条激光器的输出功率和减小退偏振具有显著的效果。

关键词 激光器; 激光陶瓷; 板条激光器; 分段掺杂; 储能密度; 退偏振

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0514003

Dual Concentration Doped Nd:YAG Composite Ceramic Slab Laser with High Power

Li Mi^{1,2,3}, Hu Hao^{1,2}, Gao Qingsong^{1,2}, Wang Juntao^{1,2}, Zhang Jian⁴, Wu Yingcheng^{1,2},
Chen Xiaoming^{1,2}, Zhou Tangjian^{1,2}, Xu Liu^{1,2}, Tang Chun^{1,2}, Zhao Na^{1,2},
Liu Peng⁵, Xu Xiaoxiao^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;

⁴Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

⁵School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract A Nd:YAG composite ceramic slab end-pumped with diode is designed theoretically, and a dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab is fabricated. The extracted power after double-pass amplification is 7.08 kW when the total pumping power of diode is 18.06 kW, the optical-optical conversion efficiency is up to 39.2%, and the depolarization of single-pass transmission is about 3.2%. The experimental results show that the Nd:YAG composite ceramic slab has significant effect on enhancing the output power and reducing the depolarization of the slab laser.

Key words lasers; laser ceramic; slab lasers; segmented doping; energy storage density; depolarization

OCIS codes 140.3280; 140.3380; 140.3480; 140.3530

收稿日期: 2017-01-09; 收到修改稿日期: 2017-02-26

作者简介: 李 密(1981—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事固体激光方面的研究。E-mail: limi@tsinghua.org.cn

导师简介: 唐 淳(1967—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光方面的研究。

E-mail: tangchun21@gmail.com

1 引 言

固体激光器在通信、军事和工业上有广阔的应用前景,使得新型固体激光材料成为研究热点。固体激光材料主要包括激光晶体、激光玻璃和激光陶瓷等。Nd:YAG 晶体是一种性能较好、应用较广泛的固体激光材料^[1-2]。激光晶体的生长主要采用提拉法,该方法存在生长周期长、价格昂贵、掺杂浓度低、所生长的激光晶体尺寸小等缺点,使得激光晶体的应用受到限制。激光玻璃的制备成本低,容易实现大尺寸和较好的光学均匀性,但由于玻璃的热导率远低于绝大多数的激光晶体,因此激光玻璃在高平均功率工作时容易产生热畸变。而激光陶瓷具有激光晶体和激光玻璃不具备的很多优点:与激光晶体相比,激光陶瓷具有掺杂浓度高、掺杂均匀性好、制作周期短、成本低、尺寸大、复合多功能等优点;与激光玻璃相比,激光陶瓷具有高热导率和高损伤阈值等优点。

为制备高质量激光陶瓷,研究人员进行了大量的研究工作。随着纳米粉体和激光陶瓷制备工艺的不断改进,激光陶瓷的散射损耗降到了极低的程度,激光陶瓷的输出性能已经可以与激光晶体相媲美^[3-6]。2010年2月,达信防务公司在由6个相同的Nd:YAG陶瓷板条增益模块构成的单口径激光谐振腔中实现了平均功率超过100 kW的激光输出^[7-8]。目前,端面抽运的Nd:YAG晶体板条通常是将非掺杂的YAG晶体作为端帽与掺Nd³⁺的YAG晶体键合在一起制成的,因此存在若干个明显的界面,界面的键合质量对板条激光器的退偏振有很大的影响。在高功率激光放大器中,多个键合界面会导致传输效率下降,甚至可能产生很强的反向传输激光,从而带来安全隐患。激光陶瓷板条是由真空烧结工艺制作的,不存在明显的界面,且由于激光陶瓷是由许多微小的晶粒组成,因此在反向传输激光的隔离和退偏振控制方面具有特殊的优势。

本文设计了一种双浓度掺杂的Nd:YAG复合陶瓷板条激光器,可以明显提高激光的输出功率和光光转化效率,而且激光传输的退偏振也较小。

2 双浓度掺杂激光陶瓷板条设计

对于端面对称抽运的激光陶瓷板条,其在长度方向上吸收的抽运功率密度分布为

$$\rho(z) = I_0 \alpha(z) \left\{ \exp \left[- \int_0^z \alpha(u) du \right] + \exp \left[- \int_z^L \alpha(v) dv \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 I_0 为单端注入的抽运光强度, $\alpha(z)$ 、 $\alpha(u)$ 和 $\alpha(v)$ 分别为激光陶瓷板条长度方向上坐标 z 、 u 和 v 处对抽运光的吸收系数, L 为激光陶瓷板条掺杂区的总长度。

激光板条对抽运光的吸收效率为

$$\eta = 1 - \exp \left[- \int_0^L \alpha(u) du \right]. \quad (2)$$

由(1)、(2)式可知,均匀掺杂的Nd:YAG复合陶瓷板条吸收的抽运功率密度由掺杂区两端向掺杂区中心逐渐下降。经推算可知,如果吸收效率刚好为95%,则板条掺杂区中心位置吸收的抽运功率密度仅为最大值的43%,因此板条长度方向的中心未能实现充分抽运,导致总储能受到限制。

通过分段掺杂精确地设计各个掺杂段的掺杂浓度与长度,可以有效提高板条长度中心的储能密度和板条内的总储能。相比单浓度掺杂,双浓度掺杂可以明显地提高总储能,且制备难度不会增加太多,也不会导致过多的浓度突变界面。

双浓度掺杂板条的结构示意图如图1所示, L_1 和 α_1 分别为Nd:YAG复合陶瓷板条低掺杂浓度区域的长度和吸收系数, L_2 和 α_2 分别为Nd:YAG复合陶瓷板条高掺杂浓度区域的长度和吸收系数。基于此前的双浓度掺杂Nd:YAG晶体板条设计方法^[9],当 $\alpha_1 = 0.18 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha_2 = 0.34 \text{ cm}^{-1}$ 、 $L_1 = 43.3 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 43.4 \text{ mm}$ 时,

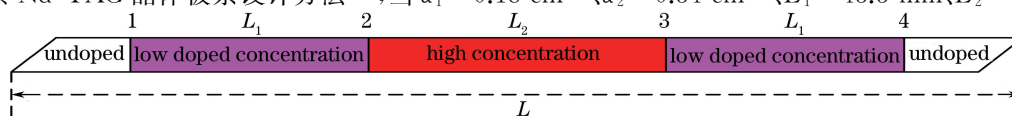


图1 双浓度掺杂板条示意图

Fig. 1 Schematic of dual concentration doped slab

可以保证 Nd:YAG 复合陶瓷板条对抽运光的吸收效率达到95%以上,且4个界面的热沉积功率密度相等。

图2为单浓度掺杂和双浓度掺杂的激光陶瓷板条长度方向的归一化储能密度分布曲线。图中双浓度掺杂设计显著提高了激光陶瓷板条长度中间区域的储能密度,双浓度掺杂激光陶瓷板条的平均储能密度达到其最大值的77.1%,而单浓度掺杂激光陶瓷板条的平均储能密度仅为其最大值的60.5%,由此可见,相比单浓度掺杂设计,双浓度掺杂设计明显提高了平均储能密度。

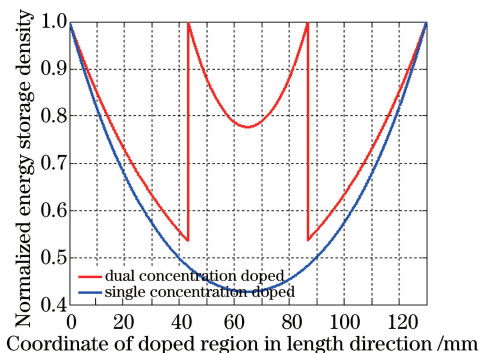


图2 单浓度掺杂和双浓度掺杂的激光陶瓷板条长度方向的归一化储能密度

Fig. 2 Normalized energy storage density in length direction of single concentration doped and dual concentration doped slabs

3 实验结果与理论分析

根据理论设计的掺杂浓度与长度,采用真空烧结法制作了一个宽度为30 mm、厚度为2.5 mm的Nd:YAG复合陶瓷板条。测量了该Nd:YAG复合陶瓷板条的吸收和散射损耗,即将一束口径约为2 mm、功率为2841 mW的1064 nm探测光正入射单次通过Nd:YAG复合陶瓷板条(传输路径约为208 mm,表面未镀增透膜)。表1为实验测得的板条宽度方向上不同位置的透过率,根据表1可得,平均透过率为81.5%。

表1 Nd:YAG复合陶瓷板条宽度方向上不同位置的透过率

Table 1 Transmissivity at different positions in width direction of Nd:YAG composite ceramic slab

Coordinate in width direction /mm	-10	-5	0	5	10
Transmission power /mW	2327	2315	2323	2308	2310
Transmissivity /%	81.9	81.5	81.8	81.2	81.3

已知0.1% (原子数分数)的Nd:YAG陶瓷在波长为1064 nm处的折射率约为1.817,根据菲涅耳公式,正入射时板条与空气界面的传输透过率为91.6%。实验中测得的平均透过率为81.5%,利用精确计算光学材料传输损耗的方法^[10],可以计算出陶瓷内部的传输损耗为3.54%,对应的传输损耗系数为 0.0017 cm^{-1} ,可见该Nd:YAG陶瓷与Nd:YAG晶体的传输损耗系数相当。

二极管发出的抽运光经抽运耦合系统从板条端面注入,实验测得抽运耦合系统的总传输效率(注入到板条端面内的抽运功率与二极管发射的抽运功率的比值)约为90%。

实验中测量了不同工作电流下二极管的总抽运功率和Nd:YAG复合陶瓷板条对抽运光的吸收效率,如图3所示。图3中二极管的工作电流为150 A时Nd:YAG复合陶瓷板条对抽运光的吸收效率达到了96%。随着工作电流的增加,二极管的结温升高,二极管的输出波长逐渐向Nd:YAG复合陶瓷板条的吸收峰方向漂移但未超过吸收峰,因此在高电流下抽运光的吸收效率会随着电流的增加而增大。

为了测量Nd:YAG复合陶瓷板条的可提取功率,将一束功率为3685 W、口径约为 $27 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的1064 nm种子激光按两个合适的入射角依次通过Nd:YAG复合陶瓷板条,再计算经过双程放大之后激光束输出功率的增加量,即可得到从Nd:YAG复合陶瓷板条中实际提取的激光功率。

图4为双程激光放大器示意图,其中 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 均为平面反射镜, F_1 和 F_2 均为焦距 $F = 340 \text{ mm}$ 的球透镜,种子激光在板条端面的入射角分别为 45° 和 31.2° 。

图5为实验中测得的二极管在不同工作电流下经双程放大后从Nd:YAG复合陶瓷板条中提取的激光功率,根据总抽运功率计算了该Nd:YAG复合陶瓷板条的光光转换效率。图5中,种子激光注入功率为

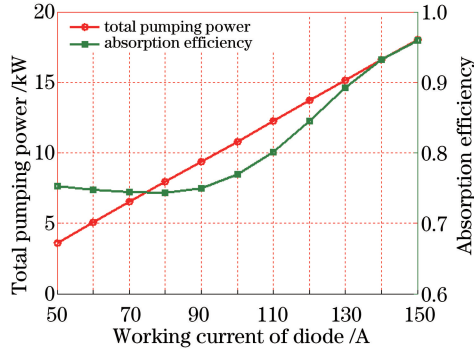


图 3 不同工作电流下的总抽运功率和吸收效率

Fig. 3 Total pumping power and absorption efficiency at different currents

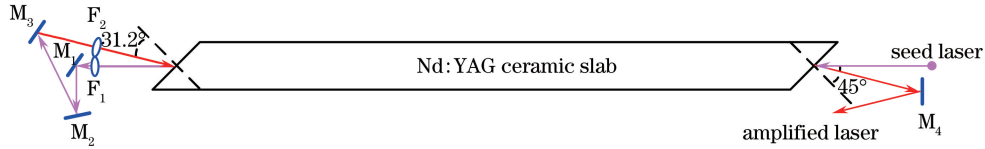


图 4 双程激光放大器示意图

Fig. 4 Schematic of double-pass laser amplifier

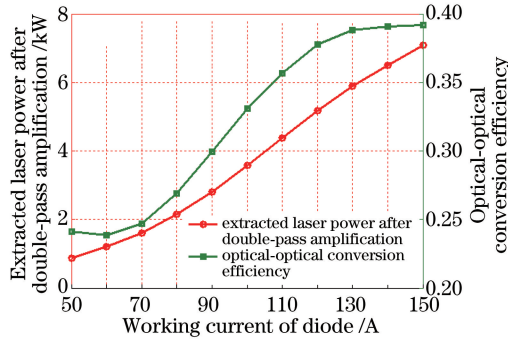


图 5 不同工作电流下双程放大后提取的激光功率和光光转换效率

Fig. 5 Extracted laser power after double-pass amplification and optical-optical conversion efficiency at different working currents

3685 W、二极管工作电流为 150 A 时,通过双程放大从 Nd:YAG 复合陶瓷板条中提取的激光功率为 7.08 kW,相应的光光转换效率高达 39.2%。

实验中测得种子激光的双程传输效率约为 92.8%,由此可以计算出种子激光的单程传输损耗 $\epsilon = 3.7\%$,种子激光的注入光强为 5460 W/cm^2 。Nd:YAG 激光陶瓷为四能级系统,在不考虑放大自发辐射(ASE)效应时,根据理想的四能级激光系统的速率方程可以推导出 Nd:YAG 陶瓷板条内的小信号增益系数 g 与吸收的抽运功率密度 ρ 之间的关系为

$$g = \frac{\sigma \eta \tau}{h \nu} \rho, \quad (3)$$

式中 $\sigma = 2.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 为 Nd:YAG 复合陶瓷板条的受激发射截面, $\eta = 0.915$ 为 Nd:YAG 复合陶瓷板条的量子效率, $\tau = 240 \mu\text{s}$ 为 Nd:YAG 复合陶瓷板条上能级的荧光寿命^[11], h 为普朗克常数, ν 为抽运光的中心频率。Nd:YAG 复合陶瓷板条掺杂区吸收的抽运功率密度的平均值 ρ_0 为

$$\rho_0 = \frac{\eta_{\text{abs}} \eta_{\text{oc}}}{\omega t L} P_0, \quad (4)$$

式中 η_{abs} 为 Nd:YAG 复合陶瓷板条对抽运光的吸收效率; η_{oc} 为抽运耦合效率, $\eta_{\text{oc}} = 90\%$; P_0 为二极管的总抽运功率; $\omega = 30 \text{ mm}$, $t = 2.5 \text{ mm}$, $L = 130 \text{ mm}$ 分别为 Nd:YAG 复合陶瓷板条掺杂区的宽度、厚度与长度。二极管工作电流为 150 A 时,实验测得 $\eta_{\text{abs}} = 96\%$, $P_0 = 18.06 \text{ kW}$,根据(4)式,可以计算出板条掺杂区的平

均小信号增益系数 $g_0 = 0.3695 \text{ cm}^{-1}$ 。

设 $I_1(z)$ 为沿板条长度正向传输的激光强度, $I_2(z)$ 为沿板条长度反向传输的激光强度, δ 为放大器的等效传输损耗系数, 对于双程放大, 有^[12]

$$\begin{cases} \frac{dI_1(z)}{I_1(z)dz} = \frac{g_0}{1 + [I_1(z) + I_2(z)]/I_s} - \delta \\ \frac{dI_2(z)}{I_2(z)dz} = \frac{-g_0}{1 + [I_1(z) + I_2(z)]/I_s} + \delta \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $I_s = 2980 \text{ W/cm}^2$ 为 Nd:YAG 复合陶瓷板条的饱和光强。边界条件为 $I_1(L) = I_2(L)$, 约束条件为 $I_1(L)I_2(L) = C$ (C 为常数)。定义等效传输损耗系数 $\delta = \epsilon/L$, 实验中测得单程传输损耗 $\epsilon = 3.7\%$, 由此可以计算出等效传输损耗系数 $\delta = 0.0025 \text{ cm}^{-1}$ 。

通过数值迭代法计算出的板条内第一程与第二程激光光强分布如图 6 所示, 计算可得第二程放大出口的激光光强 $I_2(0) = 17.2 \text{ kW/cm}^2$ 。

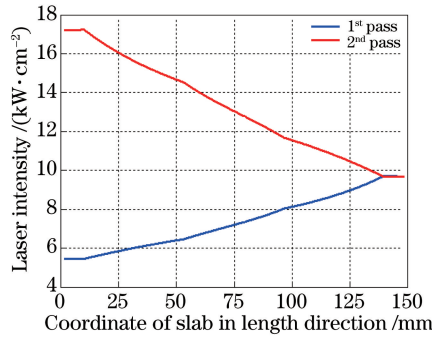


图 6 板条内第一程和第二程的激光光强分布

Fig. 6 Laser intensity distribution of 1st pass and 2nd pass in slab

双程放大器出口的总功率 P 可表示为

$$P = \eta_B \times I_2(0) \times b \times t, \quad (6)$$

式中交迭效率 $\eta_B = 97\%$, 激光束宽度 $b = 2.7 \text{ cm}$, 厚度 $t = 0.25 \text{ cm}$ 。根据(6)式可计算出双程放大后激光的总功率 $P = 11.26 \text{ kW}$, 激光总功率减去此处的种子激光功率, 理论上从陶瓷板条可提取的功率为 7.84 kW 。实验测得双程放大提取的激光功率为 7.08 kW , 相比理论计算值仅相差 9.7% , 主要是由于注入的种子光的光强很强, 实现了超过 5 倍饱和通量的充分提取, 板条内的 ASE 得到了有效抑制。

图 7 为 Nd:YAG 复合陶瓷板条在提取激光功率时不同抽运功率下的退偏振。当总抽运功率小于 11 kW (二极管工作电流为 100 A) 时, 单程传输的退偏振小于 1% 并随抽运功率缓慢增大; 当总抽运功率大于 11 kW 时, 退偏振随抽运功率快速增大; 当总抽运功率为 18.06 kW (二极管工作电流 150 A) 时, 单程传输的退偏振为 3.2% 。

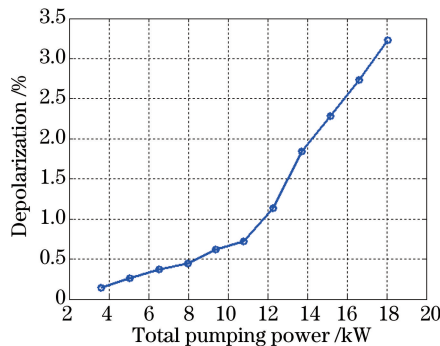


图 7 Nd:YAG 复合陶瓷板条在不同抽运功率下的退偏振

Fig. 7 Depolarization of Nd:YAG composite ceramic slab at different pumping powers

激光陶瓷是由许多微小的晶粒组成的,虽然每个晶粒的晶轴方向不同,但各个晶粒的晶轴方向是随机的,因此激光陶瓷宏观上无特定的晶轴方向。理论分析表明,激光晶体的退偏振与晶轴方向相关,因此激光陶瓷的退偏振相当于各个晶向不同的激光晶体退偏振的平均。同时,由于陶瓷板条不存在键合界面,因此激光陶瓷板条的退偏振更具有可控性。

4 结 论

开展了分段掺杂 Nd:YAG 复合陶瓷板条的理论设计和实验研究,当二极管总抽运功率为 18.06 kW 时,通过双程放大提取了 7.08 kW 的激光功率,光光转换效率高达 39.2%,单程传输的退偏振为 3.2%。实验结果表明,采用分段掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条可获得更高功率的激光输出,而且激光传输的退偏振较小,具有很大的发展潜力。

参 考 文 献

- [1] Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- [2] Chen Jinbao, Guo Shaofeng. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602006.
陈金宝, 郭少峰. 高能固态激光器技术路线分析[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602006.
- [3] Yang Qiuhong. The research history and recent progress of laser transparent ceramics[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(3): 476-484.
杨秋红. 激光透明陶瓷研究的历史与最新进展[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(3): 476-484.
- [4] Ying Jianxin, Zhang Bin, Cui Xin, *et al.* Influencing factors of transmittance of laser transparent ceramics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 581-585.
应建新, 张 彬, 崔 鑫, 等. 透明陶瓷透光性能的影响因素[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 581-585.
- [5] Li Xingwang, Zhang Yuejuan, Mo Xiaogang, *et al.* Preparation and laser properties of Nd:YAG transparent ceramic[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(10): 2546-2554.
李兴旺, 张月娟, 莫小刚, 等. Nd:YAG 透明陶瓷制备与激光性能[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(10): 2546-2554.
- [6] Wang Haili, Pu Ruiman, Huang Cunxin, *et al.* Fabrication and laser output of Nd:YAG transparent ceramic[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(9): 1506-1509.
王海丽, 蒲瑞满, 黄存新, 等. Nd:YAG 透明陶瓷的制备及激光输出[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(9): 1506-1509.
- [7] Lei Xiaoli, Sun Ling, Liu Yang, *et al.* Laser with 100 kW output power developed by the Textron company[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 948-952.
雷小丽, 孙 玲, 刘 洋, 等. 达信公司百千瓦陶瓷激光器技术综述[J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 948-952.
- [8] Injeycm H, Goodno G D. High power laser handbook[M]. New York: Mcgraw-Hill Companies, 2011: 207-222.
- [9] Li Mi, Hu Hao, Tang Chun, *et al.* Research on high power slab laser technology with dual-doped concentration[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0914004.
李 密, 胡 浩, 唐 淳, 等. 高功率双掺杂浓度板条激光技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0914004.
- [10] Huang Chenghui, Huang Jianhong, Zhang Ge, *et al.* A method for accurate calculation of the absorption coefficient of optical materials[J]. Laser Journal, 2001, 22(6): 45-46.
黄呈辉, 黄见洪, 张 戈, 等. 一种精确计算光学材料吸收系数的方法[J]. 激光杂志, 2001, 22(6): 45-46.
- [11] Lu J R. Characterization of transparent lanthanides doped $Y_3Al_5O_{12}$ and Y_2O_3 ceramics, and their laser oscillation[D]. Tokyo: Institute for Laser Science University of Electro-Communications, 2002: 38-47.
- [12] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002: 84-85.
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥, 译. 2 版. 北京: 科学出版社, 2002: 84-85.