

激光二极管抽运低温 Yb:YAG 再生放大器

李响 王江峰 李学春 卢兴华 潘雪 黄大杰

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 通过对 Yb:YAG 晶体荧光谱线的分析, 讨论了其低温条件下的增益特性。利用激光二极管作为抽运源, 采用背向端面抽运方式, 使用掺杂原子数分数为 8% 的片状 Yb:YAG 晶体, 搭建了一台低温条件下工作的再生放大器。通过小能量信号光注入, 在 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温下, 可以得到重复频率 10 Hz, 脉宽 10 ns, 能量 10.3 mJ 的激光脉冲输出, 放大倍数达 10^7 倍。

关键词 激光器; Yb:YAG 晶体; 再生放大器; 激光二极管

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102010

Laser Diode Pumped Cryogenic Cooled Yb:YAG Regenerative Amplifier

Li Xiang Wang Jiangfeng Li Xuechun Lu Xinghua Pan Xue Huang Dajie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The fluorescence spectrum of Yb:YAG crystal is analyzed and its gain characteristics are discussed. A regenerative amplifier is built, which works under a low temperature. The gain material is Yb:YAG crystal with the doping concentration of 8% back-end pumped by a laser diode. Through a signal pulse injection, we can get a 10.3 mJ laser pulse output with the repetition rate of 10 Hz and the pulse width of 10 ns at $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the magnification exceeds 10^7 .

Key words lasers; Yb:YAG crystal; regenerative amplifier; laser diode

OCIS codes 140.3280; 140.3615; 140.3480; 140.3580

1 引言

近年来, 由于高功率半导体激光器技术的飞速发展, 特别是 InGaAs 激光二极管(LD)性能的发展以及成本的降低^[1~3], 使得 LD 抽运固体激光器(DPSSL)的研究取得了重大突破^[4~7]。由于半导体激光器具有效率高、光束质量好、结构紧凑等特点, 所以自从半导体激光器发明以来, 使用其作为固体激光器的抽运源一直是研究的热点。DPSSL 技术因其可以实现高重复频率的高能量、高效率稳定输出, 成为惯性聚变能源(IFE)驱动器研究的重要技术途径。单发能量百焦耳、平均功率千瓦级的 DPSSL 装置及相关技术相继在美、日、法、德等国家得到广泛研究^[8]。

Yb:YAG 晶体具有量子效率高、热传导率高、

可生长尺寸大以及掺杂浓度高等优点, 更适合向高重复频率、大能量器件方向发展^[9]。在早期, 由于闪光灯抽运以及 LED 抽运均不能满足 Yb:YAG 晶体对高抽运阈值的要求, 使它的应用和发展受到了限制^[10]。LD 可以输出大的功率密度, 用作抽运源能够很好地解决这个问题。法国 LULI 实验室从 2001 年开始, 便采用 Yb:YAG 晶体着手 10 Hz, 100 J 的纳秒级 DPSSL 研究(Lucia 激光装置), 并且已经取得了进展。目前美国 Mercury 和日本 Halna 研究小组也都在考虑在适当的低温条件下使用 Yb:YAG 作为增益介质的可行性。

本文选择 Yb:YAG 晶体作为增益介质, 利用真空低温制冷装置对其进行温度控制, 通过 LD 背向端面抽运方式, 实现了一台 1030 nm 波段的纳秒级

收稿日期: 2011-05-10; **收到修改稿日期**: 2011-08-02

作者简介: 李响(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光二极管抽运固体激光器及再生放大器等方面的研究。

E-mail: jfslxh@126.com

导师简介: 李学春(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光技术与光纤应用等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn

激光脉冲再生放大器,通过注入 10 Hz,120 pJ,10 ns的信号脉冲光,可以获得高于 10 mJ 的放大脉冲能量输出,增益超过 10^7 。

2 Yb:YAG 的特性

Yb^{3+} 是最简单的激活离子,其构型为 $4f_{13}$, 仅有两个电子态,即基态 $^2F_{7/2}$ 和激发态 $^2F_{5/2}$, 不存在激发态吸收和上转换^[11], 并且抽运能级靠近激光上能级,量子亏损很低,仅有 9%,可极大地降低掺杂材料中的热负荷,获得高的光转换效率。

图 1 为 Yb^{3+} 离子的能级结构图。在配位场作用下,基态与激发态产生 Stark 分裂,形成准三能级或四能级的激光运行机构。激光过程发生在激发态 $^2F_{5/2}$ 最低的子能级和基态 $^2F_{7/2}$ 的第三个子能级间,上能级荧光寿命较长,有利于能量的存储,激光波长为 1030 nm。如图 2 所示, Yb^{3+} 离子的主吸收峰有 3 个,分别位于 913,938,968 nm。在 938 nm 附近,吸收带的强度和宽度是最大的,通常作为激光抽运带。

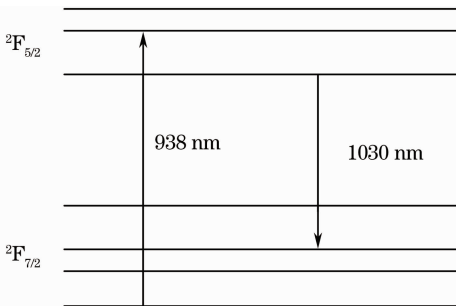


图 1 Yb^{3+} 的能级分布

Fig. 1 Energy level of Yb^{3+}

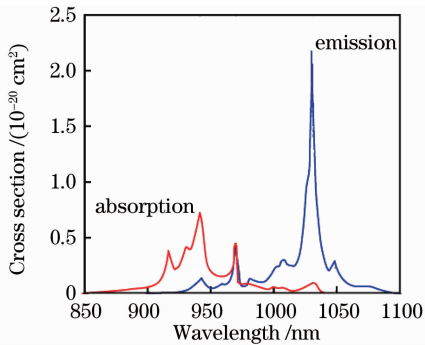


图 2 Yb^{3+} 的吸收谱线与发射谱线

Fig. 2 Absorption and emission spectra of Yb^{3+}

在常温下, Yb:YAG 晶体是一个准三能级系统,当温度降低时,转变为四能级系统,抽运阈值降低,可以获得更高的斜率效率。图 3 为实验中测得的不同温度下 Yb:YAG 晶体的荧光发射谱线,在

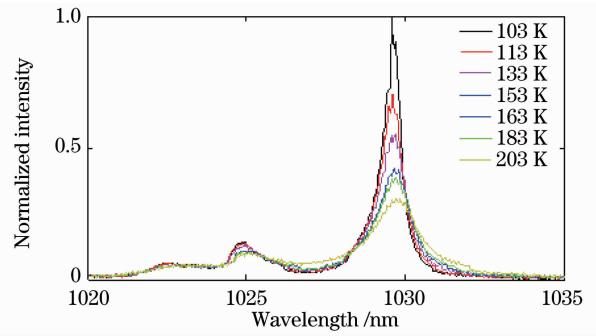


图 3 不同温度下 Yb:YAG 的荧光发射谱线

Fig. 3 Fluorescence spectra of Yb:YAG at different temperatures

1030 nm 波段处,发射峰受温度变化影响比较明显,随着温度的降低,发射峰的幅度逐渐升高,谱带变窄。利用荧光谱线,可以对 Yb:YAG 晶体的受激发射截面进行计算:

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{1}{8\pi} \frac{\lambda^5}{n^2 c \tau} \frac{I(\lambda)}{\int I(\lambda) \lambda d\lambda}, \quad (1)$$

式中 $I(\lambda)$ 为 Yb^{3+} 的发射谱线强度, n 为折射率, τ 为上能级寿命, c 为真空中的光速。而小信号增益系数与受激发射截面成正比:

$$g_o(\lambda) = \Delta N \sigma_{em}(\lambda), \quad (2)$$

式中 ΔN 为粒子反转数。通过分析可以得出,温度越低, Yb:YAG 晶体的增益特性越好,越有利于信号光的放大。但研究表明,随着温度降低、小信号增益系数增大, Yb:YAG 晶体的放大自发辐射(ASE)也会变得更加强烈,对激光器以及放大器产生影响。许多学者对 ASE 的产生与控制进行了分析,本文不再开展这方面的研究。

3 低温再生放大器装置结构

3.1 低温控制系统

Yb:YAG 晶体在低温条件下会表现出比其在常温条件下更加优异的光学增益性质,因此实验中对 Yb:YAG 晶体采用了温度可控的制冷方式,以获得更好的放大效果。

图 4 为 Yb:YAG 晶体的冷却系统。通过控制箱调节液氮容器内的气压,使液氮流入管道,进入到真空盒内的液氮经过管道循环将热沉铜块上的热量带走,使其降温。热沉铜块上的温度传感器可以将测试的温度反馈回控制箱,控制箱控制低温电磁阀的开关,调节液氮的流量。冷却系统能够将热沉铜块温度稳定在 $-170 \text{ }^\circ\text{C} \sim -30 \text{ }^\circ\text{C}$,精度为 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 Yb:YAG 晶体被紧密固定在热沉上,为了使晶体与

热沉有更好的接触,热量能够更快地传导到热沉上,晶体与热沉之间加了一层钢膜。图 5 为真空盒内部结构示意图,两个光学窗口分别用于信号光与抽运光的通过,前窗口镀双面 1030 nm 增透膜层,后窗口镀双面 940 nm 增透膜层。其照片如图 6 所示。

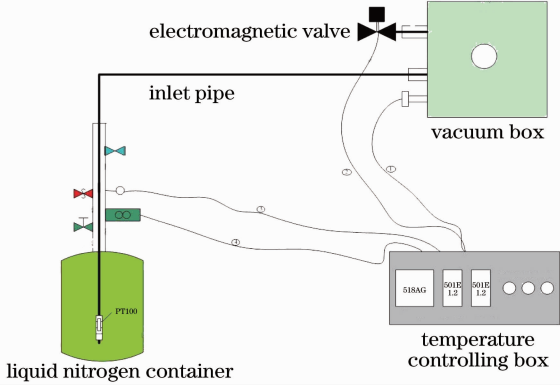


图 4 冷却系统结构示意图

Fig. 4 Schematic of the cooling system

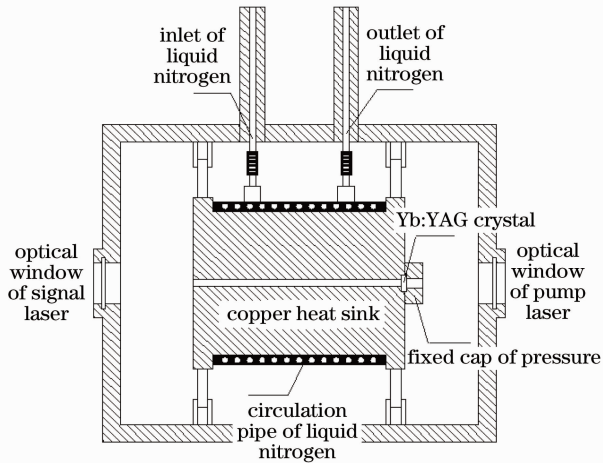


图 5 真空盒结构示意图

Fig. 5 Schematic of the vacuum box structure

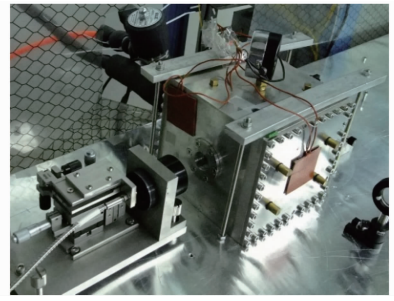


图 6 实验中的真空盒结构

Fig. 6 Experimental setup of vacuum box structure

3.2 再生放大器的结构

图 7 为低温再生放大器的结构示意图。10 Hz, 120 pJ, 10 ns 窄带种子激光信号脉冲经由光纤注入再生放大器。通过调节偏振控制器,使注入光路中的信号光 P 方向偏振分量最大。S1 为隔离器,避免光路中的反射光反馈回信号源,干扰系统。S2 为 9:1 分束器,将信号光分为两部分,10% 端口用于实时监测信号光的注入状态。法拉第旋光器与 $\lambda/2$ 波片组成的隔离器能够控制光束偏振态,防止残余的放大光返回耦合到光纤,将光纤破坏。光路中透镜 L1 与 L2 的作用是使信号光与谐振腔内本征模式在模式上达到匹配,从而以最高效率耦合进入腔内。信号脉冲经由薄膜偏振片 TFP₃ 以 S 方向偏振进入再生放大腔后,通过同步机控制,在脉冲第二次通过电光开关之后开启电光开关,使脉冲光以 P 方向偏振锁闭在腔内振荡,并通过调节电光开关的高压开启门宽,控制脉冲光在腔内的往返程数,得到最高的能量放大后再次通过 TFP₃ 反射导出腔外。腔镜 M₂ 是一块掺杂原子数分数为 8%, 尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的片状 Yb:YAG 晶体,其后端面镀有 940 nm 增透和 1030 nm 全反的双色膜层。

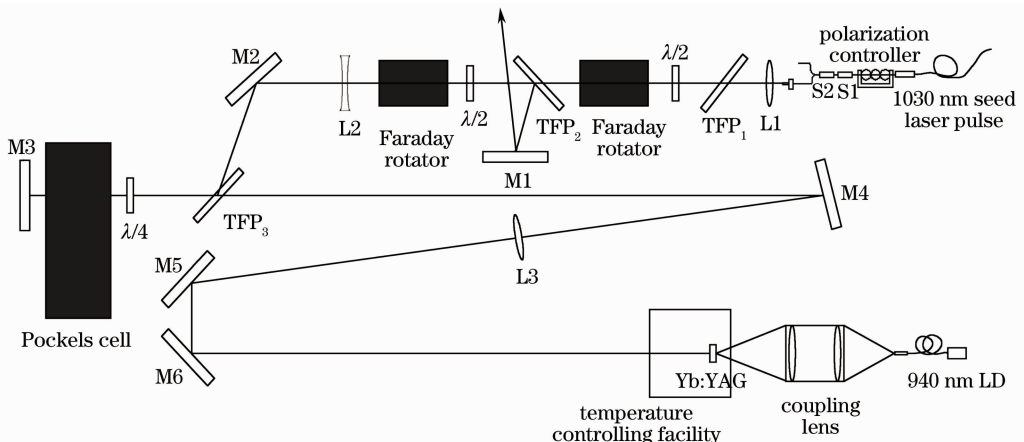


图 7 Yb:YAG 再生放大器的光路示意图

Fig. 7 Schematic of Yb:YAG regenerative amplifier

实验中采用美国 Nlight 公司生产的 LD 模块对 Yb:YAG 晶体进行背向端面抽运, 波长 940 nm 的脉冲光通过孔径为 400 μm 的光纤输出, 经过耦合透镜组聚焦到 Yb:YAG 晶体上对增益介质进行抽运, 图 8(a) 是晶体上的抽运光斑能量分布图,

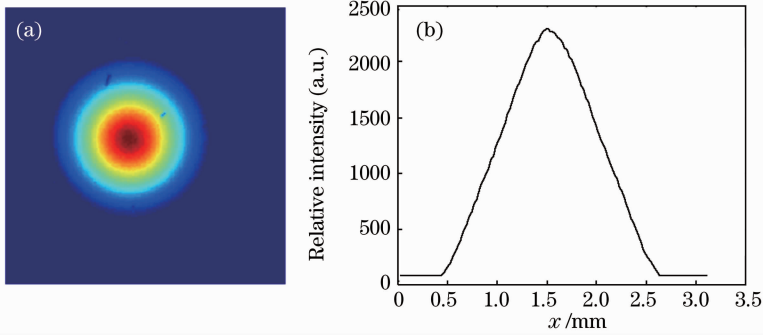


图 8 (a) 抽运光的空间能量分布; (b) 抽运光空间能量的一维分布

Fig. 8 (a) Spatial intensity distribution of pump laser; (b) one-dimensional intensity distribution of pump laser

4 实验与分析

4.1 模拟计算

实验前期, 对放大后的脉冲能量进行了理论模拟, 在假设能级弛豫时间远小于脉冲宽度的情况下, 可以通过速率方程得到迭代关系:

$$E_k = TE_s \ln \{ G_{k-1} [\exp(E_{k-1}/E_s) - 1] + 1 \}, \quad (3)$$

式中

$$G_{k-1} = \exp\left(\sigma \int_0^L N_{k-1} dx\right), \quad (4)$$

E_k 为脉冲在腔内放大 k 程的能量密度, T 为腔内单程透射率, E_s 为饱和能量密度, N_k 为第 k 程前介质内粒子反转数密度, σ 为受激发射截面. 引入增益参量 $g_k = \ln G_k$, G_k 代表第 k 程前介质的单程增益, 则有

$$g_k = \sigma \left(\int_0^L N_{k-1} dx - \frac{\Delta E_k}{h\nu} \right), \quad (5)$$

式中 $\Delta E_k = \frac{E_k}{T} - E_{k-1}$, ΔE_k 即第 k 程放大过程中激光脉冲从介质中提取的能量. 进一步简化可以得到

$$g_k = g_{k-1} - \frac{\Delta E_k}{E_s}. \quad (6)$$

临界条件为 $g_0 = \sigma \int_0^L N_0(x) dx$, $N_0(x)$ 为初始上能级粒子数分布^[12]. 图 9 是模拟计算得到的被放大脉冲能量密度与放大程数的关系. 可以看出, 开始阶段脉冲能量很小, 被放大后的能量密度随放大程数的增加而呈指数关系增大; 随着脉冲能量的增大, 出现增益饱和现象, Yb:YAG 晶体的单程增益

图 8(b) 为抽运光斑的能量一维分布. 为了实现再生放大器的高效率基模输出, 需要保证抽运光的分布与谐振腔模式体积匹配, 使抽运体积与腔内基模之间达到最大的交叠. 实验中晶体中心的抽运光斑半径为 1 mm, 抽运光与腔内基模光半径之比为 1.18.

逐渐降低; 当单程增益降低到与单程损耗相等时, 可以得到最大的能量输出. 如图 9 所示, 在抽运功率 110 W, 抽运时间 1.8 ms 的情况下, 脉冲信号光在腔内往返 32 程, 得到最大的光放大, 其能量密度可达到 605 mJ/cm².

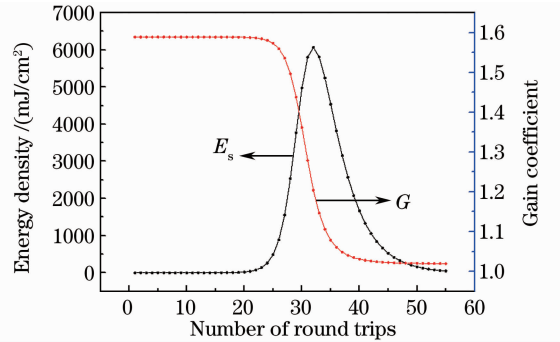


图 9 能量密度及增益系数随往返程数增加的变化曲线
Fig. 9 Energy density and gain coefficient versus number of round trips

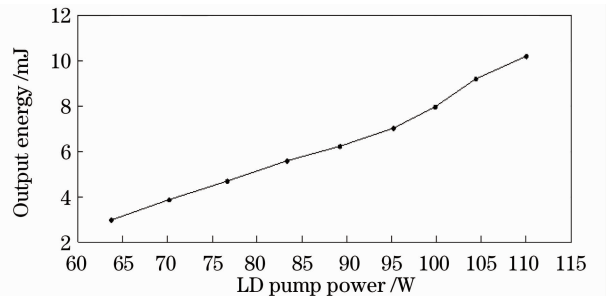


图 10 再生放大器输出能量随 LD 抽运功率增加的变化曲线

Fig. 10 Output energy versus LD pump power

4.2 实验结果

实验中在晶体温度为 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 脉冲抽运时间为 1.8 ms , 重复频率为 10 Hz 的工作状态下, 注入 120 pJ , 10 ns 的脉冲信号光进行放大。图 10 是在不同抽运功率时测试的再生放大器输出能量曲线。LD 平均功率 110 W 抽运时, 再生放大器最高输出能量为 10.3 mJ , 总增益超过 10^7 。输出能量分布如图 11 所示, 光束质量因子 $M_x^2 = 1.24$, $M_y^2 = 1.18$ 。从图中可以看出, 输出能量与抽运功率近似呈线性

增长关系, 所以如果继续提高抽运功率, 将会得到更大的输出能量。

由于增益饱和效应的存在, 经过再生放大器多程放大后, 输出脉冲的时域波形出现前沿高后沿低的方波扭曲现象, 这是由于脉冲前沿经过 Yb:YAG 增益介质时迅速消耗上能级粒子数目, 脉冲后沿得不到足够的上能级粒子数, 从而使增益减小。图 12 为脉冲信号光放大前后的时域波形对比图, 测得输出光方波扭曲度 (SPD) 为 1.5 。

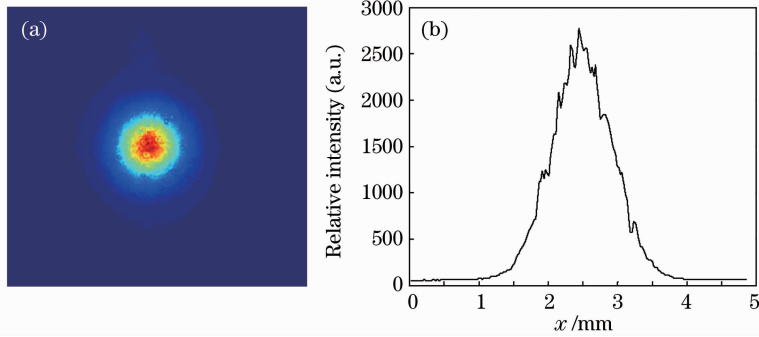


图 11 (a) 输出脉冲的空间能量分布; (b) 输出脉冲空间能量的一维分布

Fig. 11 (a) Spatial intensity distribution of output laser; (b) one-dimensional intensity distribution of output laser

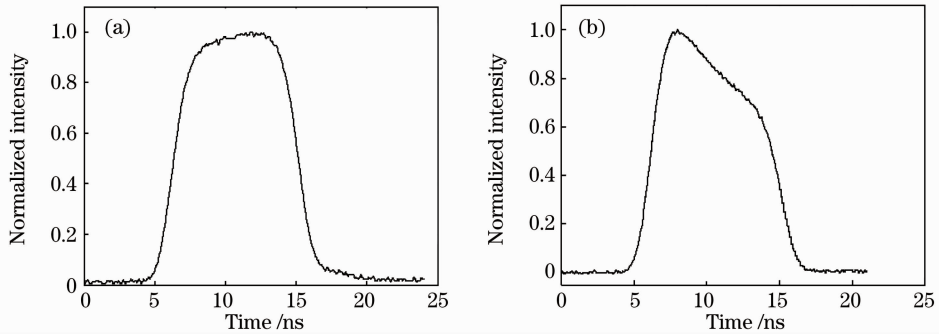


图 12 (a) 信号脉冲的时间波形; (b) 输出脉冲的时间波形

Fig. 12 (a) Time waveform of signal laser pulse; (b) time waveform of output laser pulse

5 结 论

通过不同温度下 Yb:YAG 晶体的荧光谱线, 对其增益特性进行了分析。在实验中, 利用液氮制冷装置, 将 Yb:YAG 晶体控制在 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 采用 LD 背向端面抽运的方式对其进行抽运, 将 10 Hz , 120 pJ , 10 ns 的窄带脉冲信号光注入再生放大器, 随着抽运能量的增大, 输出的放大脉冲能量近似线性增大。当 LD 功率为 110 W , 抽运时间为 1.8 ms 时, 得到 10.3 mJ 的放大能量输出, 放大倍数为 10^7 倍。通过对低温 Yb:YAG 再生放大器的研究, 为高重复频率高功率激光器驱动源的实现提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- Lin Hongyi, Tan Huiming, Tian Yubing *et al.*. LDA end-pumped acousto-optics Q-switched Yb:YAG $1.03\text{ }\mu\text{m}$ laser[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(1): 25~27
- 林洪沂, 檀慧明, 田玉冰等. LDA 端面泵浦声光调 Q Yb:YAG $1.03\text{ }\mu\text{m}$ 激光器[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(1): 25~27
- Zhang Yongdong, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo *et al.*. Laser diode pumped efficient continuous wave and picoseconds Yb:YGG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202005
- 张永东, 魏志义, 张治国等. 激光二极管抽运的高效率 Yb:YGG 激光器的连续及锁模运转[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202005
- Nie Jianping, Li Long, Shi Peng *et al.*. Thermal effect of Yb:YAG rod end-pumped by diode laser[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(3): 354~362
- 聂建萍, 李隆, 史彭等. 激光二极管端面泵浦 Yb:YAG 圆棒热效应研究[J]. *光学技术*, 2009, **35**(3): 354~362
- Chen Yihong, Su Yong. Study of high-power laser diode-pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 319~321

- 陈义红, 苏 勇. 大功率激光二极管抽运固体激光器的研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(s1): 319~321
- 5 Wang Sha, Chen Jun, Liu Chong *et al.*. Theoretical and experimental research of end pumped quasi-three-level Yb:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 23~27
- 汪 莎, 陈 军, 刘 崇等. 纵向抽运准三能级 Yb:YAG 激光器的理论模型及实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 23~27
- 6 Ma Huijun, Li Xiaoli, Ji Jianghua *et al.*. Investigation on the performance of high repetition laser diode pumped Nd:YAG laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1309~1312
- 马惠军, 李小莉, 纪江华等. 高重复率半导体激光抽运 Nd:YAG 放大器激光特性的实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(10): 1309~1312
- 7 J. D. Kmetec, T. S. Kubo, T. J. Kane *et al.*. Laser performance of diode-pumped thulium-doped $Y_3Al_5O_{12}$, $(Y, Lu)_3Al_5O_{12}$, and $Lu_3Al_5O_{12}$ crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 186~188
- 8 Wang Mingzhe, Ding Lei, Luo Yiming *et al.*. Recent progress of laser diode-pumped solid-state laser drivers for inertial fusion energy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(10): 56~63
- 王明哲, 丁 磊, 罗亦鸣等. 惯性聚变能领域的激光二极管抽运固体激光装置[J]. 激光与光电子学发展, 2008, **45**(10): 56~63
- 9 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Research progress of laser drivers for inertial fusion energy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 55~62
- 於海武, 徐美健, 段文涛等. 惯性聚变能源激光驱动器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(9): 55~62
- 10 T. Y. Fan, D. J. Ripin, R. L. Aggarwal *et al.*. Cryogenic Yb³⁺-doped solid-state lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 448~459
- 11 Qiu Hongwei, Mao Yanli, Dong Jun. Progress of the research on Yb:YAG[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2002, **19**(1): 1~5
- 邱宏伟, 毛艳丽, 董 俊. 激光晶体材料 Yb:YAG 的研究进展[J]. 量子电子学报, 2002, **19**(1): 1~5
- 12 Wang Jiangfeng. Research on Highly Stable Nd : Glass Regenerative Amplifier [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 19~22
- 王江峰. 高稳定钕玻璃再生放大技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008. 19~22

栏目编辑: 宋梅梅