

连续运转 Yb:YAG 板条激光器的双波长放大特性

马艺芳¹, 申艺杰², 徐浏^{1*}, 李密¹, 周唐建¹, 林伟平¹, 高清松¹

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

²清华大学精密仪器系光子与电子学研究中心, 北京 100084

摘要 报道了一种室温条件下工作的高功率激光二极管(LD)端面抽运 Yb:YAG 板条双波长激光放大器, 稳定的双波长运转在 1029.6, 1031.5 nm。基于 Yb:YAG 宽带荧光特性, 建立了双波长放大模型, 通过数值模拟研究了不同抽运条件下激光光谱放大输出特性。通过 940 nm 激光二极管双端抽运 Yb:YAG 晶体, 拥有双波长光谱的种子光从晶体一端注入并进行放大。实验结果表明, 在 1.18 kW 注入时获得了 6.56 kW 的双波长连续激光输出, 与数值模拟结果相吻合。双波长激光放大理论和实验研究为进一步实现高功率光谱合成等应用奠定了基础。

关键词 激光器; Yb:YAG 晶体; 二极管抽运; 双波长

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101006

Dual-Wavelength Amplification Properties of Continuous-Operation Yb:YAG Slab Laser

Ma Yifang¹, Shen Yijie², Xu Liu¹, Li Mi¹, Zhou Tangjian¹, Lin Weiping¹, Gao Qingsong¹

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

²Center for Photonic and Electronic, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract This paper reports a laser diode (LD) end-pumped Yb:YAG slab dual-wavelength laser amplifier with high power working at room temperature. The dual-wavelength stably operates at 1029.6, 1031.5 nm. Based on the broadband fluorescence characteristic of Yb:YAG, the dual-wavelength amplification model is built and corresponding numerical simulation is taken to study the laser spectrum amplification output properties under different pump conditions. 940 nm laser diodes is used to pump the Yb:YAG crystal at two ends. The seed laser with the dual-wavelength spectrum is injected from one end of the crystal and amplified. Experimental results show that continuous-wave (CW) dual-wavelength laser output power of 6.56 kW is acquired when the seed injection is 1.18 kW, which matches the simulation results. These theoretical and experimental researches of dual-wavelength laser amplification can lay the foundation for the applications such as high-power spectral combination, etc.

Key words lasers; Yb:YAG crystal; diode pumping; dual-wavelength

OCIS codes 140.3280; 140.3615; 140.3480; 140.3580

1 引言

近年来, 双光谱运转激光器逐渐成为固体激光技术的一个重要发展方向。双光谱激光运转有着广泛的应用, 如差分吸收激光雷达^[1-2]、可调谐激光^[3-4]、精细激光光谱^[5]、光学传感^[6-7]等, 尤其是在

产生太赫兹成像及其光谱学研究^[8-9]方面有着广阔的应用前景。二极管抽运的全固态激光器(DPSSL)是目前获得高功率双波长激光的主要途径。2015年, Zhang等^[10]采用Nd:YLF晶体实现了室温下1047 nm和1053 nm激光的双波长输出。2009年, Sangla等^[11]使用Nd:YLF激光器获得了

收稿日期: 2017-07-31; 收到修改稿日期: 2017-09-08

作者简介: 马艺芳(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光二极管泵浦固体激光技术方面的研究。

E-mail: mayf0302@foxmail.com

导师简介: 高清松(1972—), 男, 研究员, 硕士, 主要从事激光二极管泵浦固体激光技术方面的研究。

E-mail: 15883798199@163.com

* 通信联系人。E-mail: xuliu33@126.com

分别垂直极化的1047 nm 和 1053 nm,1321 nm 和 1313 nm 两种连续双波长激光输出。2017 年,Zhou 等^[12] 采用 Nd:YVO₄ 晶体实现了 1064 nm 和 1066 nm 激光的双波长连续输出。然而以上激光器输出功率均为瓦特量级,为了实现更高功率双波长激光输出,可以采用激光二极管(LD)抽运的 Yb:YAG 板条放大器。Yb:YAG 晶体是全固态激光器常用增益介质之一,拥有较宽的吸收带宽(940 nm 吸收峰处 18 nm 带宽)和发射带宽(1030 nm 增益峰处 12 nm 带宽),因此易实现增益带宽内光谱的可调可控。另外,Yb:YAG 晶体具有较高的量子效率(91.4%),较长的上能级寿命(951 μs)等特点,因而常用在高功率储能激光放大器中^[13]。2009 年,Brasseur 等^[14] 采用基于 Yb:YAG 的主振荡功率放大(MOPA)系统获得了 2.3 kW 的连续激光输出,光光转换效率为 30%。2010 年,Fu 等^[15] 设计了一个 LD 抽运的板条激光放大链,输出 9.7 kW 的激光,提取效率高达 46.1%。2016 年,Chen 等^[16] 在室温条件下,采用基于 Yb:YAG 的 zigzag 板条 MOPA 放大器,实现了 3.54 kW 的连续激光输出,光光转换效率 41%,斜率效率最高为 59%。

本文基于 Yb:YAG 宽带荧光特性,建立了光谱分辨的速率方程模型,通过数值模拟研究激光光谱放大输出特性。实验采用双端抽运的 Yb:YAG 板条 MOPA 放大器结构,实现了 1029.5 nm 和 1031.4 nm 双波长激光输出,输出功率达 6.56 kW,为采用 Yb:YAG 板条放大器所获得的最高功率连续双波长激光输出,且实测的输出光谱与理论分析基本一致。

2 理论分析

对于 Yb:YAG 晶体,在强晶场作用下,Yb³⁺ 的基态与激发态产生 Stark 能级分裂,基态²F_{7/2} 能级分裂为 4 个子能级,激发态²F_{5/2} 能级分裂为三个子能级,在常温下形成准三能级激光运转机制。Yb:YAG 晶体中 Yb³⁺ 离子能级示意图以及 Stark 子能级的分布如图 1 所示。Yb:YAG 晶体的主吸收峰为 940 nm,主发射峰为 1030 nm^[12]。

对于宽光谱的激光放大,因不同波长的激光强度各不相同,各波长对应的增益也有所差异,所以不同的波长有着不同的激光放大特性^[17]。为了分析双波长激光的放大输出光谱,实验建立了适用于双端抽运 Yb:YAG 晶体的宽光谱单程放大理论模型。用 $I_k(\lambda_i)$ 表示抽运光($k=p$)或激光($k=l$)对应于各个波长 λ_i ($i=1,2,\dots,M$) 处的光强,则激光和抽

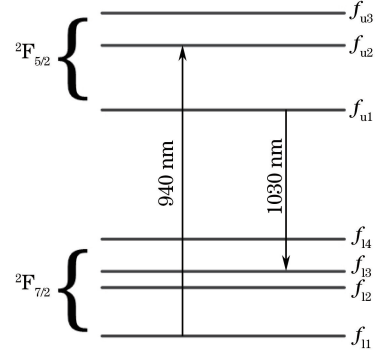


图 1 Yb³⁺ 离子能级示意图和 Stark 子能级的分布
Fig. 1 Level diagram of Yb³⁺ ion and distribution of Stark energy sub-levels

运光的总光强 $I_{k,\text{tot}}$ 为所有波长光强之和:

$$I_{l,\text{tot}} = \sum_{i=1}^M I_l(\lambda_i), \quad (1)$$

$$I_{p,\text{tot}} = \sum_{i=1}^M I_p(\lambda_i). \quad (2)$$

在宽光谱放大过程中,激光的传输速率方程组为:

$$\begin{cases} \frac{dI_l(\lambda_1)}{dz} = \sigma_e(\lambda_1) N_{\text{Yb}}(f_{l3} + f_{u1}) \times \\ \left(\frac{N_u}{N_{\text{Yb}}} - \frac{f_{l3}}{f_{l3} + f_{u1}} \right) I_l(\lambda_1) \\ \frac{dI_l(\lambda_2)}{dz} = \sigma_e(\lambda_2) N_{\text{Yb}}(f_{l3} + f_{u1}) \times \\ \left(\frac{N_u}{N_{\text{Yb}}} - \frac{f_{l3}}{f_{l3} + f_{u1}} \right) I_l(\lambda_2), \quad (3) \\ \dots \\ \frac{dI_l(\lambda_M)}{dz} = \sigma_e(\lambda_M) N_{\text{Yb}}(f_{l3} + f_{u1}) \times \\ \left(\frac{N_u}{N_{\text{Yb}}} - \frac{f_{l3}}{f_{l3} + f_{u1}} \right) I_l(\lambda_M) \end{cases}$$

抽运光吸收过程的速率方程组为:

$$\begin{cases} \frac{dI_p^\pm(\lambda_1)}{dz} = \mp \sigma_a(\lambda_1) N_{\text{Yb}}(f_{l1} + f_{u2}) \times \\ \left(\frac{f_{l1}}{f_{l1} + f_{u2}} - \frac{N_u}{N_{\text{Yb}}} \right) I_p(\lambda_1) \\ \frac{dI_p^\pm(\lambda_2)}{dz} = \mp \sigma_a(\lambda_2) N_{\text{Yb}}(f_{l1} + f_{u2}) \times \\ \left(\frac{f_{l1}}{f_{l1} + f_{u2}} - \frac{N_u}{N_{\text{Yb}}} \right) I_p(\lambda_2), \quad (4) \\ \dots \\ \frac{dI_p^\pm(\lambda_M)}{dz} = \mp \sigma_a(\lambda_M) N_{\text{Yb}}(f_{l1} + f_{u2}) \times \\ \left(\frac{f_{l1}}{f_{l1} + f_{u2}} - \frac{N_u}{N_{\text{Yb}}} \right) I_p(\lambda_M) \end{cases}$$

式中,方程左边的±分别代表正向传输和反向传输, $I_p = I_p^+ + I_p^-$, $\sigma_a(\lambda_i)$ 和 $\sigma_e(\lambda_i)$ 是对应各个波长 λ_i ($i = 1, 2, \dots, M$)处的吸收和发射截面, N_{Yb} 为总的粒子数密度, N_u 为激光上能级粒子数密度, f_{1m} , f_{3n} ($m = 1, 3; n = 1, 2$)分别表示参与激光发射和抽运光吸收跃迁的 Stark 子能级对应的波尔兹曼热分布因子,下标 u 和 l 分别表示 Yb^{3+} 离子的上下两个能态。

不同波长对应的吸收与发射截面如图 2 所示^[15]。

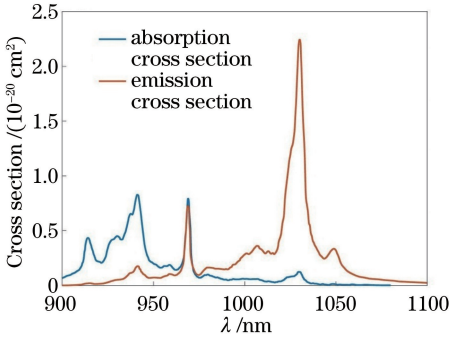


图 2 Yb:YAG 波长相关的吸收与发射截面
Fig. 2 Wavelength-dependent absorption and emission cross sections of Yb:YAG

波尔兹曼因子的计算公式为^[13]:

$$f_{u,i}(T) = \frac{g_i \exp[-E_{u,i}/(k_B T)]}{\sum_{m=1}^3 g_m \exp[-E_{u,m}/(k_B T)]}, \quad (5)$$

$$f_{l,j}(T) = \frac{g_j \exp[-E_{l,j}/(k_B T)]}{\sum_{n=1}^4 g_n \exp[-E_{l,n}/(k_B T)]}, \quad (6)$$

式中, $E_{u,i}$, $i = 1, 2, 3$ ($E_{l,j}$, $j = 1, 2, 3, 4$) 为 Yb^{3+} 上能态(下能态)各个子能级的能量, g_i (g_j) 对应子能级的简并度, k_B 为波尔兹曼常量, T 为晶体的绝对温度。

稳态情况下,激光、抽运光与上能级粒子数相互作用的过程满足的关系可以表示为^[18]:

$$\frac{N_u(z)}{N_{Yb}} = \frac{\frac{f_{11}}{f_{11} + f_{u2}} \frac{I_p(z)}{I_{p,sat}} + \frac{f_{13}}{f_{13} + f_{u1}} \frac{I_1(z)}{I_{1,sat}}}{1 + \frac{I_1(z)}{I_{1,sat}} + \frac{I_p(z)}{I_{p,sat}}}, \quad (7)$$

式中,激光与抽运光的饱和光强 $I_{k,sat}$ 的表达式为:

$$I_{1,sat} = \frac{h\nu_l}{(f_{13} + f_{u1})\tau_u\sigma_e}, \quad (8)$$

$$I_{p,sat} = \frac{h\nu_p}{(f_{11} + f_{u2})\tau_u\sigma_a}, \quad (9)$$

式中 h 为普朗克常量, ν_k 为激光 ($k = 1$) 或抽运光

($k = p$) 的频率, τ_u 是上能级寿命。

在 Yb:YAG 晶体的宽光谱传输理论模型中,由于考虑了吸收(发射)截面、抽运光(激光)光强与波长的相关关系,从而可以更准确地反映出光谱形状在放大过程中的演化规律。

3 实验装置

实验装置如图 3 所示,放大器采用两端键合的 Yb:YAG 晶体板条作为增益介质,板条尺寸为 100 mm(z) \times 15 mm(y) \times 2 mm(x) (长 \times 宽 \times 厚),中间 80 mm 区域为 Yb^{3+} 掺杂部分,掺杂浓度为 0.49% (原子数分数),板条两个端面切割成 45° 的楔角,镀有 1030 nm 的增透膜。板条两个大面经过磨毛处理,从而抑制放大自发辐射(ASE)和寄生振荡。另外,整个激光器采用大面微通道水冷冷却,可减小热负载。两路波长为 940 nm 的抽运光经过慢轴柱透镜 ($f_{py1} = 100$ mm, $f_{py2} = 50$ mm) 和快轴柱透镜 ($f_{px} = 140$ mm) 整形后分别进入板条两个端面,耦合光斑大小与入射端面尺寸基本一致,总抽运光功率最高可达 23 kW。45° 偏振片和一个二分之一波片配合,用来隔离抽运光路上的回光,从而防止回光损坏 LD。种子光为 1029.6 nm 和 1031.5 nm 的双波长激光,经过整形系统后注入板条,以“之”字形回路在板条内传播,注入功率 1.18 kW。信号光光斑大小经过整形与入射端面尺寸基本一致,并保证放大过程中在激光的瑞利长度范围内传输。

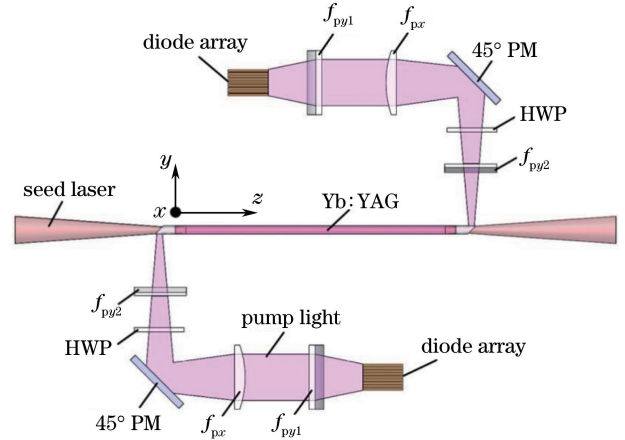


图 3 Yb:YAG 板条放大器实验装置
Fig. 3 Experimental setup of Yb:YAG slab amplifier

4 结果与讨论

实验测得的种子光光谱归一化处理后的如图 4 (a) 所示,双波长种子光的左峰值(1029.6 nm)低于

右峰值(1031.5 nm),且左峰值大概是右峰值的 0.8 倍。经多次测量,种子光光谱稳定,测量系统衰减和探测器响应一致。为了方便数值仿真,对抽运光的

光谱采用洛伦兹线型拟合,并得到归一化光谱,光谱带宽为 4 nm,与 LD 的参数相符合,如图 4(b)所示。另外,LD 通过控温,使波长始终稳定在 940 nm 处。

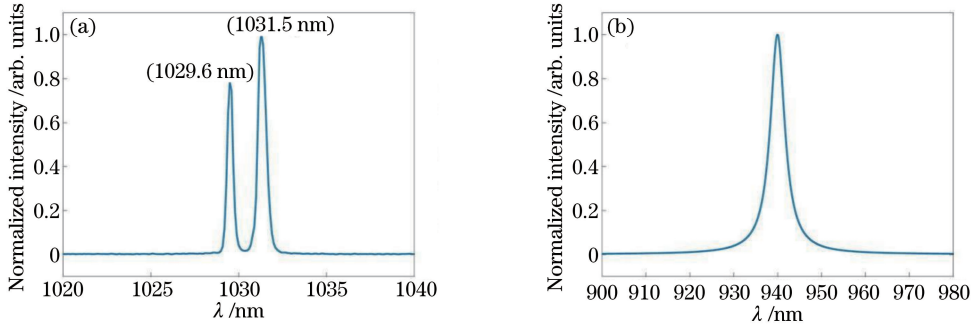


图 4 (a)种子光和(b)抽运光归一化光谱

Fig. 4 Normalized spectra of (a) seed and (b) pump light

将以上种子光和抽运光光谱代入 Yb:YAG 晶体的宽光谱放大理论模型中,可以得到不同抽运功率下的双波长放大输出激光光谱,如图 5 虚线所示。测定抽运电流为 80,100,120,140 A,分别对应抽运功率 9981,13401,16789,20001 W 情况下的输出光谱,如图 5 实线所示。为了清晰比较两峰值的增长规律,以右峰峰值为单位进行归一化。通过与理论计算输出光谱进行比较,不同抽运功率下实验测得

的光谱与理论计算的结果显示很高的吻合度。可以看到,在 80 A 抽运电流时,输出光谱左峰值与右峰值基本保持齐平,随着抽运电流的增加,左峰值逐渐高于右峰值,即左峰值的增长速率要快于右峰值,这主要是二者的吸收与发射截面不同所致,Yb:YAG 晶体在两输出光谱峰值 1029.6 nm 和 1031.5 nm 波长处的发射截面分别是 $3.28 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和 $3.03 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

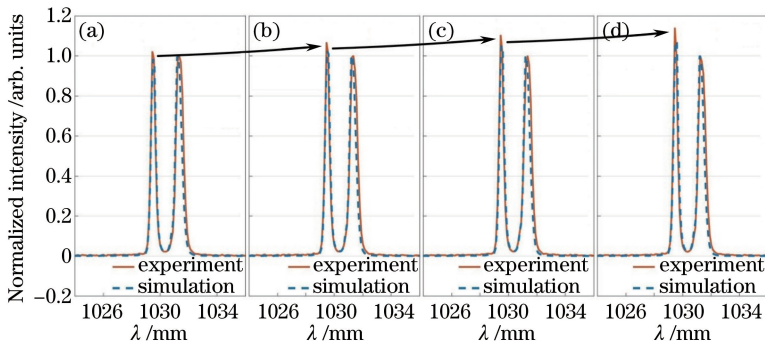


图 5 不同抽运功率下的激光输出光谱的数值仿真结果与实验结果对比图。(a)抽运功率为 9981 W; (b)抽运功率为 13401 W;(c)抽运功率为 16789 W;(d)抽运功率为 20001 W

Fig. 5 Comparison of numerical simulation and experimental results of laser output spectrum under different pump powers. (a) Pump power is 9981 W; (b) pump power is 13401 W; (c) pump power is 16789 W; (d) pump power is 20001 W

图 6 为实验测得的放大器的输出功率和光光转换效率随注入抽运功率的变化曲线。可以看到,当抽运功率为 23 kW 时,可以得到最大 6.56 kW 的激光输出。实验中测得的最大光光转换效率为 24.0%,出现在 20 kW 抽运功率附近。随着抽运功率的增加,输出功率与抽运功率的关系成一定的非线性关系,在较高的抽运功率下,激光工作物质引起的热效应和模式失配,将导致输出效率降低。

5 结 论

本文探究了一种室温条件下工作的高功率二极管端面抽运 Yb:YAG 板条激光放大器的双波长激光放大特性。实验采用 940 nm 二极管双端抽运 Yb:YAG 晶体,在注入种子光功率为 1.18 kW、抽运激光功率为 23 kW 时,获得了最大 6.56 kW 的激光输出,为目前所获得的最高功率连续双波长激光输出,双波长稳定工作在 1029.6 nm 和 1031.5 nm。建立

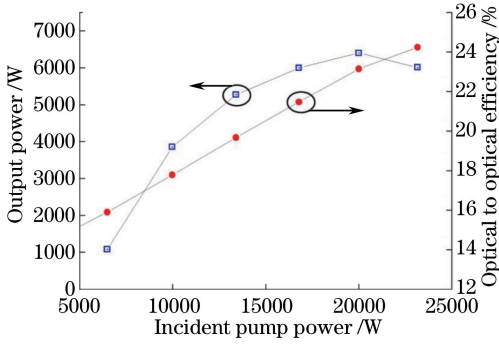


图 6 输出功率与光光转换效率实验结果

Fig. 6 Experimental results of output power and optical to optical efficiency

了基于 Yb:YAG 晶体的宽光谱放大理论模型,通过数值仿真,研究了不同抽运条件下的激光光谱放大输出特性,并与实验结果进行比较,发现二者基本吻合。双波长激光放大理论和其实验研究为开展高功率光谱合成以实现更高功率的激光输出确定了基础。

参 考 文 献

[1] Morvan L, Lai N D, Dolfi D, *et al.* Building blocks for a two-frequency laser lidar-radar: a preliminary study [J]. *Applied Optics*, 2002, 41 (27): 5702-5712.

[2] Hu S X, Hu H L, Zhang Y C, *et al.* Differential absorption lidar for environmental SO₂ measurements [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(9): 1121-1126.
胡顺星, 胡欢陵, 张寅超, 等. 差分吸收激光雷达测量环境 SO₂ [J]. *中国激光*, 2004, 31(9): 1121-1126.

[3] Wang Z K, Du S J, Wang J H, *et al.* All fiber tunable- or dual-wavelength Yb-doped fiber laser covering from dissipative soliton to dissipative soliton resonance[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(4): 041401.

[4] Bai Y B, Xiang W H, Zu P, *et al.* Tunable two wavelengths linear-cavity Yb-doped fiber laser based on volume grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11): 1102004.
白扬博, 向望华, 祖鹏, 等. 基于体光栅的可调谐线性腔双波长掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1102004.

[5] Suzuki T, Yazawa T, Sasaki O. Two-wavelength laser diode interferometer with time-sharing sinusoidal phase modulation [J]. *Applied optics*, 2002, 41(10): 1972-1976.

[6] Pinto A M R, Frazao O, Santos J L, *et al.*

Interrogation of a suspended-core Fabry-Perot temperature sensor through a dual wavelength Raman fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(21): 3149-3155.

[7] Kong F Q, Romeira B, Zhang J J, *et al.* A dual-wavelength fiber ring laser incorporating an injection-coupled optoelectronic oscillator and its application to transverse load sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(9): 1784-1793.

[8] Baxter J B, Guglietta G W. Terahertz spectroscopy [J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83 (12): 4342-4368.

[9] Reid C B, Pickwell-MacPherson E, Laufer J G, *et al.* Accuracy and resolution of THz reflection spectroscopy for medical imaging [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2010, 55(16): 4825-4838.

[10] Zhang J, Liu H L, Xia J, *et al.* Orthogonally polarized dual-wavelength Nd:YLiF₄ laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(3): 031402.

[11] Sangla D, Martial I, Aubry N, *et al.* High power laser operation with crystal fibers [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 263-273.

[12] Zhou S J, Gu P, Li X L, *et al.* Continuous wave dual-wavelength Nd:YVO₄ laser working at 1064 and 1066 nm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(7): 071401.

[13] Yu H W, Xu M J, Duan W T, *et al.* Investigation on pumping dynamics and pulsed energy storage performance of Yb ions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 66(7): 4158-4168.
於海武, 徐美健, 段文涛, 等. Yb 离子抽运动力学及脉冲储能特性研究 [J]. *物理学报*, 2007, 56(7): 4158-4168.

[14] Brasseur J K, Abeeluck A K, Awtry A R, *et al.* 2.3 kW cryogenically cooled Yb:YAG laser [C]. *International Quantum Electronics Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2009: CThR1.

[15] Fu X, Gong M. Single-side-pumped slab laser amplifier chain: design and numerical modeling [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(8): 1197-1205.

[16] Chen X, Xu L, Hu H, *et al.* High-efficiency, high-average-power, CW Yb:YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature [J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24517-24523.

[17] Casagrande O, Deguil-Robin N, Garrec B L, *et al.* Time and spectrum resolved model for quasi-three-level gain-switched lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2007, 43(2): 206-212.

[18] Bourdet G L. Theoretical investigation of quasi-three-level longitudinally pumped continuous wave lasers [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 966-971.