

885 nm 直接抽运 946 nm Nd:YAG 低温激光特性研究

杨尚^{1,2}, 宋艳洁², 李隆普², 宗楠^{2*}, 薄勇², 沈建平¹, 韦玮¹, 彭钦军², 许祖彦²

¹南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023;

²中国科学院理化技术研究所中国科学院固体激光重点实验室, 北京 100190

摘要 对低温下 885 nm 抽运 Nd:YAG 晶体 946 nm 准三能级激光性能进行了研究。将激光上、下能级的玻尔兹曼分布分数 f_1 、 f_2 作为温度的函数引入到激光速率方程中, 定性分析了低温下小信号增益和激光阈值的变化规律。利用搭建的低温冷却系统研究了不同晶体温度下 946 nm 激光的输出性能, 在 210 K 时获得了最大 165 mW 的激光输出, 斜效率为 36%, 相比于常温下斜效率提高了 71%。观察并分析了低温下 1061 nm 增益增强的现象, 当温度低于 190 K 时, 1061 nm 激光增益显著提高, 与 946 nm 激光形成竞争, 导致 946 nm 激光输出降低。

关键词 激光器; 946 nm 激光; 低温冷却; 直接抽运; 准三能级

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801005

Characteristics of Cryogenically Cooled 946 nm Nd:YAG Laser Under 885 nm Direct Pumping

Yang Shang^{1,2}, Song Yanjie², Li Longpu², Zong Nan^{2*}, Bo Yong²,
Shen Jianping¹, Wei Wei¹, Peng Qinjun², Xu Zuyan²

¹College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing, Jiangsu 210023, China;

²Key Lab of Solid State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China

Abstract The characteristics of cryogenically cooled 946 nm Nd:YAG laser under 885 nm low quantum defect pumping are studied. The Boltzmann distribution fraction of the upper and lower laser levels as a function of temperature is introduced into the laser rate equation, and the change rule of small signal gain and laser threshold at low temperature is analyzed qualitatively. A cryogenic system is developed to study the output characteristics of the 946 nm laser at low temperature. A maximum 165 mW laser output with the slope efficiency 36% is achieved at 210 K. The slope efficiency is increased by 71% compared with the room temperature operation. The gain of 1061 nm laser enhanced at low temperature is observed and analyzed. When the temperature is lower than 190 K, the gain of 1061 nm laser significantly increases and 1061 nm laser competes with 946 nm laser, resulting in a decrease of 946 nm laser output.

Key words lasers; 946 nm laser; cryogenically cooling; direct pumping; quasi-three level

OCIS codes 140.3320; 140.3580; 140.3480

1 引 言

946 nm Nd:YAG 激光器在许多方面具有重要应用, 例如: 可通过倍频获得 473 nm 蓝光激光, 用

于激光显示; 作为掺镱材料的抽运源; 进行水蒸气的吸收测量等^[1-2]。然而, 与传统 1064 nm Nd:YAG 激光器相比, 在 946 nm 处实现激光运转相对比较难, 主要原因是 946 nm Nd:YAG 激光是准三能级

收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-04-02; 录用日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61505226)

* E-mail: zongnan@mail.ipc.ac.cn

系统,激光下能级处于基态 $^4F_{9/2}$ Stark 精细能级 857 cm^{-1} 的分裂能级上,在常温下会有一些的粒子数集居,会导致激光运转过程中相对较严重的再吸收损耗。此外,其受激发射截面 σ 约为 $4 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$,比 1064 nm Nd:YAG 激光器低将近一个数量级^[3-4]。随着高功率半导体激光器的广泛应用,采用激光二极管(LD)纵向抽运时,光斑半径很小,有利于提高抽运光的功率密度,从而可以克服准三能级系统阈值高的缺点,使 946 nm 准三能级系统激光器得以实现^[5]。然而,激光运转过程中比较严重的热效应成为限制其输出的重要因素,且温度对准三能级系统激光运转的影响很大。由玻尔兹曼分布定律可知,在 Nd^{3+} 准三能级运转的跃迁下,能级的热粒子数随温度降低而减少,因此降低温度有利于实现粒子数反转,降低激光阈值。

目前,改善晶体热效应的方法主要有两种:一是在散热端采取相应措施,如采用水冷的方式来改善晶体的热积累,或通过键合晶体的方式^[6]来改善由热效应带来的热透镜问题等;二是在产热端采取相应措施,即降低激光运转过程中的量子亏损,如采用 885 nm 低量子亏损直接抽运方式抽运 Nd 离子激光器,以有效解决激光器的热效应问题^[7-9],尤其是在高功率时其效果更加明显。对于准三能级系统,以水冷的方式来改善晶体温度的效果有限,无法达到更低的冷却温度。采用更低温度的液氮或液氦的低温冷却系统已被证明可以有效提高准三能级的输出性能和改善激光光束的质量。在以 Yb 离子为代表的准三能级系统中,研究人员对其低温下的输出性能进行了大量报道^[10-12],而对 Nd 离子准三能级低温运转方面的研究较少^[13-14]。另外,直接抽运技术在激光器热效应方面的优势已经得到普遍认可,采用量子亏损较小的直接抽运方式能从根本上降低激光运转过程中多余的热量,提高激光效率。在本文中,本课题组结合两种方法的优势,首次采用 885 nm 直接抽运的方式,在液氮低温冷却系统下对 Nd:YAG 准三能级的激光运转进行了实验,研究了不同低温下 946 nm 激光的输出性能。

2 低温激光运转分析

图1给出了 Nd:YAG 能级结构图。由图 1 可以看出, 946 nm 谱线是 $^4F_{3/2}$ 的 R_1 子能级向 $^4I_{9/2}$ 的 Z_5 子能级跃迁的结果。激光的下能级 Z_5 (857 cm^{-1})处于基态的分裂能级的最高精细能级,因此激光下能级会有一些的粒子数占据。根据玻尔兹曼分布,

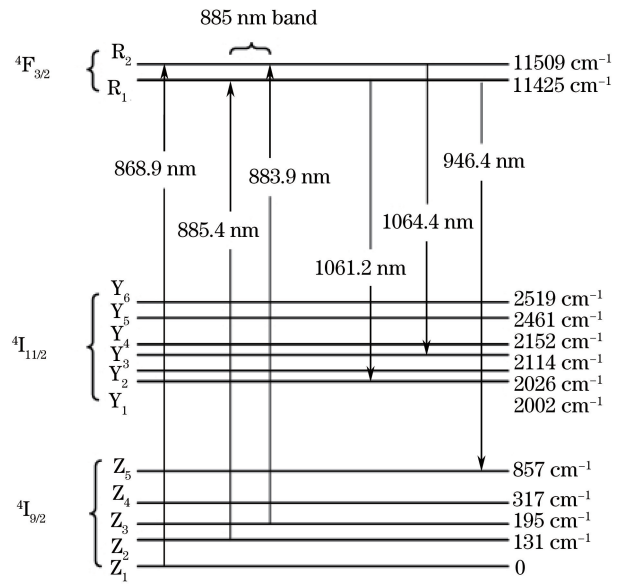


图 1 Nd:YAG 能级结构图

Fig. 1 Nd:YAG level structure

该能级的粒子数满足:

$$N_1 = \frac{\exp[-E_5/(kT)]}{\sum_{i=1}^5 \exp[-E_i/(kT)]} N_L = f_1 N_L, \quad (1)$$

式中: E_i 为 $^4I_{9/2}$ 能级 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 精细能级的能量; N_L 为 $^4I_{9/2}$ 基态总粒子数; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; f_1 为 Z_1 能级上的粒子数占基态能级粒子总数的比例; N_L 为基态 $^4I_{9/2}$ 能级总粒子数。同样,在激光的上能级结构中有 R_1, R_2 两个能级, R_1 能级上的粒子数占上能级粒子数总数的比例为 f_2 ;同理, R_1 激光上能级粒子数 $N_2 = f_2 N_R, N_R$ 为 $^4F_{3/2}$ 能级总粒子数,其中

$$f_2 = \frac{1}{1 + \exp[-\Delta E/(kT)]}, \quad (2)$$

式中: ΔE 为 $^4F_{3/2}$ 能级上 R_1 与 R_2 两能级的能量差。由(1)式和(2)式可知, f_1, f_2 分别为上下激光能级粒子数占其所在能级总粒子数的百分比,是温度的函数。准三能级速率方程中激光上下能级粒子数的分布对其激光运转有很大影响,因此将 f_1, f_2 作为温度的函数引入速率方程中,根据稳态时的速率方程可求得激光阈值的表达式^[15]:

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_L^2 + \omega_p^2) (L + \alpha_T + 2N_1^0 \sigma l)}{4\sigma_t f [1 - \exp(-\alpha l)]}, \quad (3)$$

式中: ω_L 和 ω_p 分别为激光和抽运光光斑的大小,分别取 $600\text{ }\mu\text{m}$ 和 $800\text{ }\mu\text{m}$; L 为腔内除透射损耗以外完成一次循环的总损耗,取 0.5% ; α_T 为透射损耗, $\alpha_T = -\ln(1 - T_{946\text{ nm}})$,其中 $T_{946\text{ nm}}$ 为输出腔镜在

946 nm 处的透射率; N_1^0 为抽运光为零时激光下能级的粒子数密度, $N_1^0 = f_1 N_1$; l 为激光晶体的长度, 取 3 mm; σ 为 946 nm 受激发射截面, 取 $4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$; τ_f 为增益介质上能级荧光寿命, 取 $230 \mu\text{s}$; $f = f_1 + f_2$; α 为激光晶体的吸收系数, 取 0.8 cm^{-1} . 由增益 $G = N\sigma = (N_2 - N_1)\sigma$ 可得小信号增益为^[16]

$$G_0 = \sigma\tau_f f W_p - N_1^0\sigma. \quad (4)$$

阈值 P_{th} 和小信号增益 G_0 表达式中的 f 、 N_1^0 都是与温度有关的量, 符合玻尔兹曼分布, 是关于温度 T 的函数. 因此, 本课题组研究了小信号增益和阈值功率随温度的变化规律, 结果如图 2 所示. 由图 2 可知, 随着温度降低, 小信号增益明显上升, 激光阈值显著降低, 降低温度对准三能级激光效率有很大提升. 因此, 使用液氮或液氦的冷却方式对激光晶体进行冷却, 可以有效提高激光的效率.

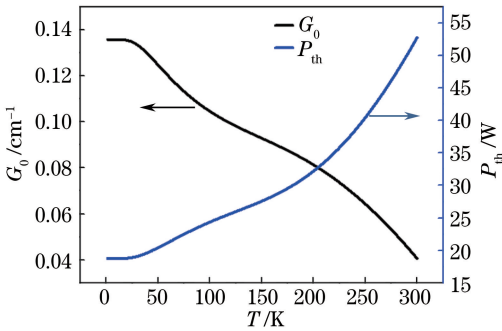


图 2 低温下激光阈值和增益随温度的变化
Fig. 2 Variation of laser threshold or gain with temperature at low temperature

3 实验装置

低温 946 nm Nd:YAG 激光实验装置如图 3 所示, 由抽运源、抽运光耦合系统、激光晶体、低温系统装置和谐振腔组成. 抽运源是光纤耦合输出的准连续 885 nm LD 抽运, 输出光纤芯径为 $400 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22; 抽运光经 1:2 透镜耦合系统准直会聚进 Nd:YAG 激光晶体内. 激光晶体是一个总长为 9 mm 的键合 Nd:YAG 棒, 中间是长为 3 mm、掺杂浓度为 1% (原子数分数) 的 Nd:YAG, 两端是长为 3 mm、未掺杂的 YAG 晶体. 晶体的两端面镀有 885 nm 和 946 nm 的高透膜. 晶体用钢箔包裹后安装在导热性能良好的铜热沉上, 铜热沉处于低温装置的真空室中, 真空室两端各有一个对抽运光和激光高透 ($T_{946 \text{ nm}} = 99.5\%$) 的通光窗口, 真空室通过气泵抽空气, 防止晶体表面在低温下起雾, 铜热沉通过液氮和电热丝共同调节和稳定温度. 谐振腔为平行平面腔, 腔长约为 100 mm; 两平平腔镜 M_1 和 M_2 位于真空室的外侧, 相比于将腔镜以镀膜形式直接镀在晶体端面上, 此方式可以很方便地调节腔镜, 并且可以防止低温下有可能造成的腔失调. 输入镜 M_1 镀有 885 nm 和 1064 nm 的增透膜和 946 nm 的高反膜, 增透膜的透射率均大于 98%, 对抽运光和 1064 nm 光均高透, 同时可以起到抑制 1064 nm 光起振的作用; M_2 为耦合输出镜, 透过率 $T_{946 \text{ nm}} = 3\%$. 激光输出后, 用镀有 885 nm 高透膜和 946 nm 高反膜的双色镜 M_3 分离残余的 885 nm 抽运光, 反射 946 nm 激光, 使用功率计测量 946 nm 激光的输出功率.

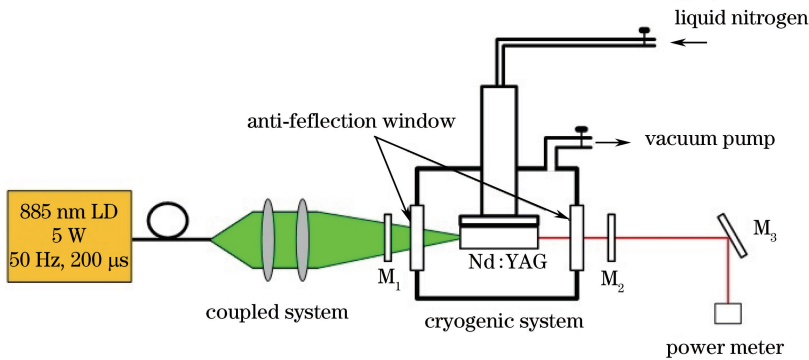


图 3 低温下 Nd:YAG 晶体 946 nm 激光输出装置图
Fig. 3 Experimental setup for cryogenic Nd:YAG 946 nm laser system

4 结果与讨论

泵源 885 nm LD 抽运参数如下: 重复频率为

50 Hz, 脉冲宽度为 $200 \mu\text{s}$. 首先, 本课题组测量了吸收抽运功率为 750 mW 时, 不同晶体温度下激光的平均输出功率, 如图 4(a) 所示. 由图 4(a) 可知: 随着温

度降低,激光输出功率先逐渐升高,在 220~210 K 时达到最大;之后随着温度降低,输出功率开始降低,当温度小于 180 K 时,946 nm 激光不再谐振输出。由图 4(b)可知:当温度为 280 K 时,晶体对抽运光的吸收效率 $\eta_s = 19.27\%$;当温度为 250 K 时,吸收效率为 19.15%;当温度为 210 K 时,吸收效率为 18.79%;随

着温度降低,最大平均输出功率由 280 K 时的 55 mW 增大到 210 K 时的 165 mW,增加了将近三倍;斜率由 280 K 时的 21% 增加到 210 K 时的 36%,增加了 70% 以上,而且未出现饱和现象。可见,降低温度可以显著提升准三能级激光系统的运转效果。增加抽运功率,还可进一步提高激光的输出功率。

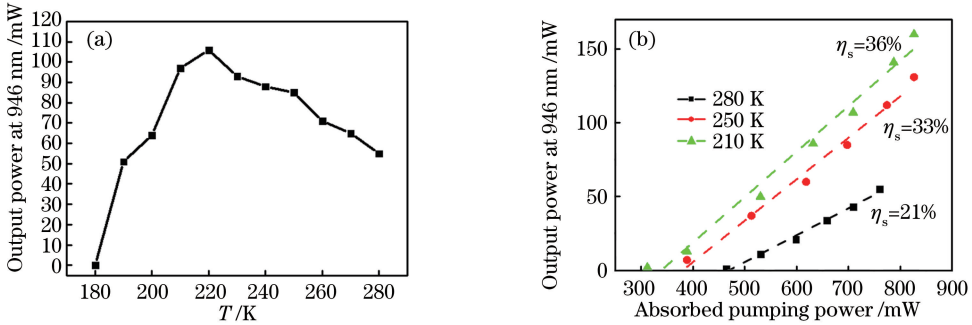


图 4 (a) 吸收功率为 750 mW 时,不同晶体温度下 946 nm 激光的输出功率;
(b) 不同晶体温度下,946 nm 激光输出功率随吸收抽运功率的变化

Fig. 4 (a) Output power of 946 nm laser at different crystal temperatures when absorbed pumping power is 750 mW;
(b) variations of output power of 946 nm laser with absorbed pumping power at different crystal temperatures

图 5(a) 给出了抽运光和激光的脉冲列,图 5(b)、(c) 分别是 280 K 和 210 K 下抽运光和激光的单脉冲波形。可以看出:在 280 K 下,激光弛豫振荡起振时间约为 140 μs ,在 210 K 下,起振时间约为

80 μs ;随着温度逐渐降低,激光脉冲的起振时间明显提前,晶体内小信号增益变强,更容易实现激光振荡积累,与前期理论计算相吻合,说明低温下更容易实现激光运转。

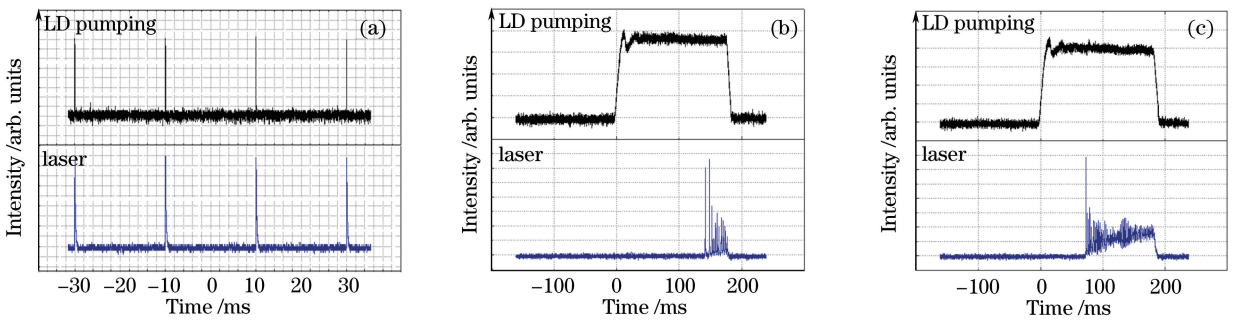


图 5 (a) 抽运光和激光的脉冲列;(b) 280 K 下抽运光和激光的单脉冲波形;(c) 210 K 下抽运光和激光的单脉冲波形
Fig. 5 (a) Pulse trains of LD pumping and laser; (b) single pulse profile of LD pumping and laser at 280 K;
(c) single pulse profile of LD pumping and laser at 210 K

实验中使用激光光束分析仪 (Spiricon, M2-200s) 测量了 210 K 下平均输出功率为 165 mW 时的 946 nm 激光光束的质量,结果如图 6 所示。通过测量可知,在 x 方向上的光束质量 $M_x^2 = 1.5$,在 y 方向上的光束质量 $M_y^2 = 1.6$ 。激光光斑形状和激光光强三维分布如图 6 中的插图所示。可见,946 nm 激光在低温下具有非常高的光束质量。

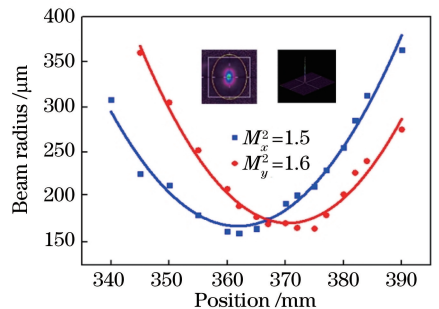


图 6 低温下 946 nm 激光光束质量

Fig. 6 946 nm laser beam quality at low temperature

由图 7 可以看出:当温度高于 190 K 时,只有 946 nm 波长的激光输出,如图 7(a) 所示;当温度在 180~190 K 之间时,激光中存在 946 nm 和

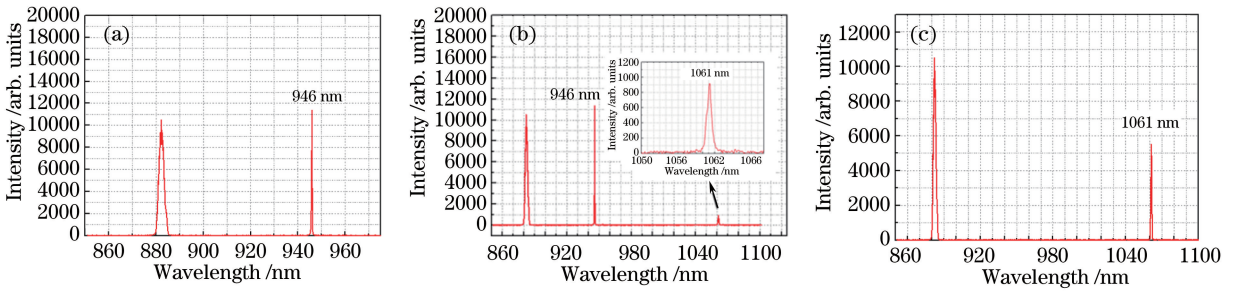


图 7 不同晶体温度下的激光光谱。(a)高于 190 K;(b) 190~180 K;(c)低于 180 K

Fig. 7 Spectra of laser at different crystal temperatures. (a) Higher than 190 K;
(b) in the range of 190-180 K; (c) below 180 K

1061 nm双波长输出,如图 7(b)所示;当温度低于 180 K 时,946 nm 激光消失,只有 1061 nm 激光输出。

与 280 K 相比,在 180 K 下晶体对抽运光的吸收效率仅有略微减小,且激光中存在 1061 nm 激光,原因如下:根据图 1 所示的 Nd:YAG 能级结构图,1060 nm 波段激光为四能级激光系统,发射截面大,且 1061 nm 激光的上能级处在 $^4F_{3/2}$ 能级精细分裂能级的 R_1 能级上,所以当温度降低时,激光上能级 R_1 上会有更多的粒子数集居,使得 1061 nm 激光跃迁增益变强。由于对 1060 nm 波段激光的抑制不够,只有输入镜 M_1 镀有 1060 nm 波段的增透膜,输出耦合镜未对 1060 nm 波段进行抑制,从而造成当温度下降到 210 K 时,腔内 1061 nm 激光起振,并与 946 nm 激光形成竞争,使 946 nm 激光的功率逐渐下降,当温度低于 180 K 时 946 nm 激光消失。

5 结 论

本课题组首次在不同晶体温度下研究了采用 885 nm LD 直接抽运 Nd:YAG 准三能级激光的输出特性。结果显示,在 210 K 的低温和 820 mW 的吸收功率下,Nd:YAG 晶体 946 nm 激光输出可达 165 mW,斜效率为 36%,相比于常温下其斜效率提高了 71%。通过增加 LD 抽运功率可以获得更高的激光输出功率。观察并分析了低温下 1061 nm 增益增强的现象,当温度低于 190 K 时,1061 nm 激光增益显著提高,与 946 nm 激光形成竞争,导致 946 nm 激光输出降低,这些结果为今后进一步研究低温晶体条件下直接抽运的高效率 946 nm 激光的性能提供了参考。

参 考 文 献

[1] Zhou R, Li E B, Li H F, *et al.* 15.2 W LD end

pumped 946 nm CW Nd:YAG laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(2): 11.

周睿,李恩邦,李海峰,等. 15.2 W LD 端面抽运 946 nm 连续波 Nd:YAG 激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(2): 11

[2] Huang J, Hu X H, Chen W B. LD-pumped electro-optically Q-switched 946 nm Nd:YAG laser with pulse repetition rates of 1 kHz[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602008.

黄晶,胡秀寒,陈卫标. LD 抽运 1 kHz 电光调 Q 946 nm Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602008.

[3] Koechner W. *Solid-state laser engineering* [M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X, transl. Beijing: Science Press, 2002: 41.

克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥,译. 北京: 科学出版社, 2002: 41.

[4] Lin Q, Wang X T, Zhu J Q. Mode matching of LD end-pumped 946-nm Nd:YAG laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(s1): 73-75.

[5] Fan T, Byer R. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE Journal Quantum Electronics*, 1987, 23(5): 605-612.

[6] Zhou R, Li E, Li H, *et al.* Continuous-wave, 15.2 W diode-end-pumped Nd:YAG laser operating at 946 nm [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1869-1871.

[7] Shi Y X, Lu T L, Feng B H, *et al.* Thermal effects analysis of Nd:CNGG 935 nm laser pumped by 885 nm and 808 nm diode lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1102004.

施玉显,卢铁林,冯宝华,等. 885 nm 和 808 nm LD 抽运 Nd:CNGG 935 nm 激光器热效应研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1102004.

[8] Zong N, Zhang X F, Ma Q L, *et al.* Comparison of Nd:YAG ceramic laser pumped at 885 nm and 808 nm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(5): 054211.

- [9] Li F Q, Zong N, Wang Z C, *et al.* Passively mode-locked grown-together composite $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4$ crystal laser with a semiconductor saturable absorber mirror under 880-nm direct pumping [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(4): 041405.
- [10] Jiang X Y, Wang Z G, Zheng J G, *et al.* Experimental research of gain and thermal aberration properties of cryogenic Yb:YAG laser amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(11): 111007.
蒋新颖, 王振国, 郑建刚, 等. 低温 Yb:YAG 放大器增益与热畸变特性实验研究 [J] 强激光与粒子束, 2014, 26(11): 111007.
- [11] Li X, Wang J F, Li X C, *et al.* Laser diode pumped cryogenic cooled Yb:YAG regenerative amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1102010.
李响, 王江峰, 李学春, 等. 激光二极管抽运低温 Yb:YAG再生放大器 [J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102010.
- [12] Wang J L, Zhang Z H, Cheng X J, *et al.* Study of diode-pumped Yb : YAG disk lasers at low temperature [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(11): 111403.
- [13] Yoon S J, Mackenzie J I. Cryogenically cooled 946 nm Nd:YAG laser [J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8069-8075.
- [14] Cho C Y, Lee C Y, Chang C C, *et al.* 24-W cryogenically cooled Nd:YAG monolithic 946-nm laser with a slope efficiency $> 70\%$ [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10136-10131.
- [15] Du J X, Zhang F C, He J L. Theoretical analysis of the operation at 946 nm of Nd:YAG longitudinally pumped with diode laser [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, 20(4): 415-418.
杜建新, 张风传, 何京良. 二极管端面泵浦 Nd:YAG 946 nm 激光器理论分析 [J]. 量子电子学报, 2003, 20(4): 415-418.
- [16] Risk W P. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses [J]. Optical Society of America B, 1988, 5(7): 1412-1423.