

文章编号: 0258-7025(2007)08-1051-04

激光二极管侧面抽运高功率 1338 nm Nd:YAG 激光器

陈 静^{1,2}, 张 戈¹, 朱海永¹, 黄呈辉¹, 魏 勇¹, 黄凌雄¹

(¹ 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 报道了一台激光二极管(LD)侧面抽运的高功率连续 1338 nm Nd:YAG 激光器。通过分析 Nd:YAG 的跃迁谱线和相应的受激发射截面的特点, 根据多跃迁谱线激光材料波长选择的耦合率条件, 合理设计激光棒和腔镜的耦合率参数。激光谱线测量表明, 成功抑制了 1064 nm 和 1319 nm 波长激光的振荡。以高功率 808 nm 激光二极管侧面抽运模块为抽运源, 采用平-平腔结构, 研究了耦合输出率分别为 5.3%, 7.4% 和 11% 的输出镜的输出情况, 比较分析了不同腔长对激光输出的影响。在抽运功率为 555 W 时, 采用 5.3% 的耦合输出镜和 20 cm 腔长, 获得大于 100 W 的 1338 nm 单一波长激光输出, 光-光转换效率大于 18%, 斜率效率为 35%, 输出光束的 M^2 因子为 36。

关键词 激光技术; 激光二极管侧面抽运; Nd:YAG 晶体; 1338 nm 单波长

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Laser Diode Side-Pumped High Power 1338 nm Nd:YAG Laser

CHEN Jing^{1,2}, ZHANG Ge¹, ZHU Hai-yong¹,

HUANG Cheng-hui¹, WEI Yong¹, HUANG Lin-xiong¹

(¹ Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, The Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A laser diode (LD) array side-pumped high-power continuous wave 1338 nm Nd:YAG laser was reported. By analyzing the characteristic of transition and corresponding stimulated-emission cross section in Nd:YAG crystal, according to the coupling condition of energy transition and material-determined wavelength, reasonable coupling parameters of laser rod and cavity mirrors were designed. Therefore, the 1064 nm and 1319 nm lasering was suppressed and 1338 nm laser was successfully gained. Using the high power LD side-pumped module, the output of laser with planar-planar cavity were studied under transitions of the output mirror of 5.3%, 7.4% and 11%. The output of the different cavity lengths were studied. The maximal 1338 nm wavelength output power of larger than 100 W was achieved under 555 W pumping power. The optical efficiency of the laser system is more than 18%, the slope efficiency is about 35% and the M^2 of the output beam is 36.

Key words laser technique; laser diode side pump; Nd:YAG crystal; 1338 nm single wavelength

1 引 言

1.3 μm 波段的激光具有处于大气透过窗口、光纤低损耗和接近零色散区域, 以及水对该波段激光的吸收较大等特点。目前, 大气环境检测、光纤通信和激光医疗等领域都迫切要求开发出高功率的

1.3 μm 波段的激光器。Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄, Nd:YAlO₃ 等晶体都是优良的激光晶体材料^[1~3], 在 1.3 μm 波段有出色的性能^[4~6]。但是由于 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 或受自身性能的制约, 或受生长工艺的制约, 无法实现大尺寸、高功率工作。Nd:

收稿日期: 2006-10-27; 收到修改稿日期: 2007-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(60208001)和福建省科技专项(2004HZ01-1)资助课题。

作者简介: 陈 静(1980—), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要从事激光二极管抽运固体激光器及变频研究。

导师简介: 张 戈(1972—), 男, 福建人, 副研究员, 主要从事激光、非线性光学材料及相关器件研究。

E-mail: zhg@fjirsm.ac.cn (通信作者)

YAlO₃的各项物化性能都很好,但目前商品化程度低,价格相对较高。而 Nd:YAG 晶体具有热导率大、破坏阈值较高、生长工艺成熟及商品化程度高等优点,是获得高功率1.3 μm波段激光的首选材料。Nd:YAG 晶体1.3 μm波段激光的研究近年有较大的进展^[7~10]。

对激光材料中特定的跃迁来说,受激发射截面 σ 是决定激光阈值和效率的重要参数之一。不同的研究者用不同的测量方法得到的受激发射截面值差异较大,目前普遍使用的是 Singh 等^[11]测量的温室下 Nd:YAG 晶体的受激发射截面和荧光分支比的数据。Nd:YAG 晶体有三条主要的跃迁谱带,其中最强烈的跃迁谱线来自 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 跃迁,发射1 μm波段的荧光,其中受激发射截面和荧光分支比最大的是 Stark 能级 R_2 到 Y_3 的跃迁,对应1064 nm的荧光,其次是 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 和 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 的跃迁,分别发射0.9 μm和1.3 μm波段的荧光。三种跃迁的荧光分支比约为60:25:14。这三种跃迁中, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 和 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁为四能级系统, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 为准三能级系统。准三能级系统由于对激光运转时的激光晶体温度很敏感,当晶体温度过高时,不容易产生粒子数反转,一般采用激光二极管(LD)端面抽运方式。在侧面抽运方式下,受制冷机制所限,不易产生激光,因此在谐振腔中可以不必考虑该波长的振荡。由于晶体场的作用造成 Stark 能级分裂, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 的跃迁发射多条波长的荧光,其中1319 nm和1338 nm谱线的受激发射截面较大且相当,约为 $9.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,其余跃迁的值均不到上述两谱线的一半。因此要得到1338 nm的激光,不仅要抑制1064 nm激光振荡,还要克服1319 nm谱线的竞争作用。本实验中采用对1064 nm和1319 nm波长的光有较大透射损耗的输出耦合镜来实现。

2 实验与结果

图1为激光二极管阵列(LDA)侧面抽运的1338 nm Nd:YAG 激光器的实验示意图。采用北京国科世纪激光有限公司销售的大功率激光二极管侧面抽运模块(型号 GKPM-150)。激光二极管阵列成120°对称分布,对激光晶体均匀抽运。激光二极管阵列的最大电流为45 A,对应抽运功率约为555 W。冷却水的温度在15~25 °C范围内可调。调节冷却水的温度可以改变激光二极管发射的波长,使其与激光增益介质的峰值吸收波长相匹配,提高

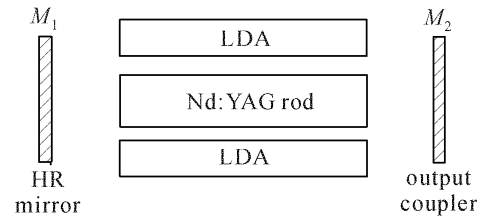


图1 激光二极管阵列侧面抽运1338 nm Nd:YAG 激光器实验示意图

Fig. 1 Schematic setup of the LD array side-pumped 1338 nm Nd:YAG laser

抽运效率。实验中冷却水温为20 °C。

Nd:YAG 晶体棒的尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为1.1%。棒的两端面镀波长1338 nm,1319 nm和1064 nm的增透膜。激光谐振腔采用由两块平面镜组成的对称腔。全反射镜 M_1 的内表面镀有对1338 nm波长的光高反射($R > 99.8\%$),对1064 nm波长的光有较大透射率的膜($T > 50\%$)。输出耦合镜 M_2 对1338 nm波长部分反射。

输出耦合镜 M_2 的透射率对输出波长和功率有重要影响。根据文献^[10]报道的在多条跃迁谱线间选择特定波长激光振荡的耦合率条件,为了获得1338 nm单谱线激光,1319 nm的透射率需比1338 nm高5%左右。受镀膜技术所限,实验中采用的输出耦合镜在1319 nm波长的透射率与1338 nm的差值大于3%,通过光栅单色仪测定输出激光的谱线纯度,未发现1319 nm激光,说明3%的透射率差值已经可以获得单波长的激光输出。

实验中使用了透射率分别为5.3%,7.4%和11.0%的三组输出耦合镜,输出功率随抽运功率的变化曲线如图2所示。

由图2可知,腔镜的输出耦合率对性能的影响

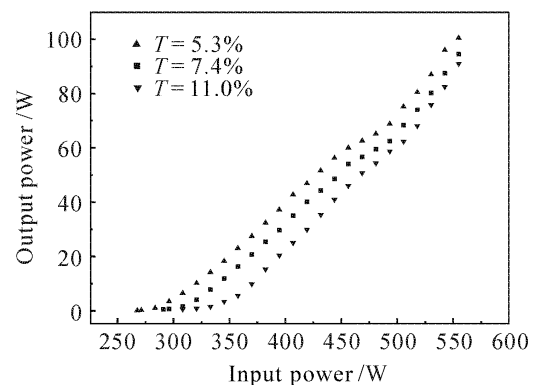


图2 不同输出耦合镜激光性能的比较

Fig. 2 Laser output power versus input power for different output couplers

很大。不同的输出镜在中小抽运功率下性能差异显著:透射率越小,阈值越低,输出功率越高;在同等抽运功率下,使用不同腔镜的输出功率的差异大于 10 W。这是由于激光器的输出耦合率过大,则腔内损耗过大,腔内光子的反馈不足,从而激光阈值高,输出功率小;输出耦合率减小时,可以增大光子在腔内的反馈,从而减小阈值,获得较大的有效输出,但如果输出耦合率过小时,虽然腔内有很强的反馈,但是无法有效输出。这种差异在高抽运功率时减小了。从图 2 还能看出,在 450~500 W 的抽运功率区间,输出耦合率为 5.3% 的功率曲线上斜率明显变小,这可能是由于发生了激光模式的变化,即由较低阶模向高阶模变化所至。而输出耦合率为 7.4% 和 11.0% 的输出曲线显示,随着输出耦合率的提高这种变化越来越不明显。

在输出耦合率分别为 11.0%, 7.4% 和 5.3% 时,对应的最大输出功率分别为 91 W, 94.5 W 和 100.5 W, 光-光转换效率分别为 16.3%, 17.0% 和 18.1%, 斜率效率分别为 37.64%, 35.45% 和 35.06%。从斜率效率可以看出,如果抽运功率继续增大,高耦合输出率的镜片将有更大的激光输出。由于受抽运功率所限,在实验中以 5.3% 的输出耦合率较为适合。

采用 PIN 光电二极管作为探测器,通过光栅单色仪测量输出激光的波长。如图 3 所示,从 1060~1370 nm 波长范围内,仅观察到 1338.2 nm 的输出信号。结果表明,1064 nm 和 1319 nm 的谱线被有效抑制,实现了 1338 nm 单一波长输出。

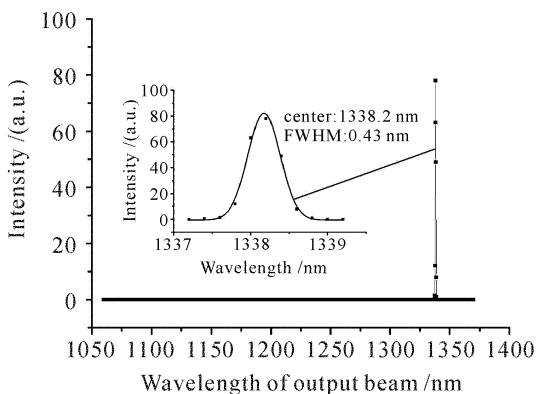


图 3 1338 nm 激光输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of 1338 nm laser

为了获得最佳的谐振腔参数,比较了透射率为 5.3% 的输出镜在腔长 L 分别为 20 cm, 25 cm, 30 cm 时的性能。实验结果如图 4 所示。

由图 4 可知,激光谐振腔的腔长越短,腔内损耗

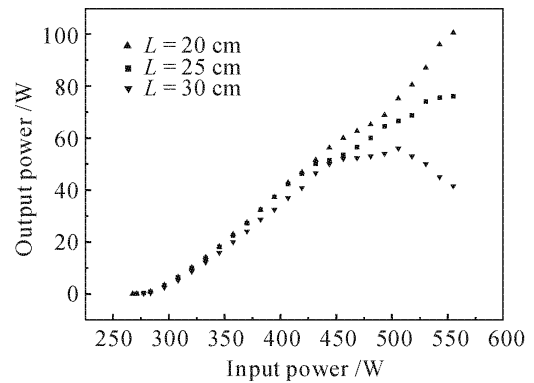


图 4 不同腔长时的激光性能比较

Fig. 4 Laser output power versus input power at different cavity lengths

越小,激光阈值越低,输出功率越大。当 L 分别为 20 cm, 25 cm, 30 cm 时,最大输出功率分别为 100.5 W, 76 W 和 56 W。在低抽运功率时 ($P < 450$ W),输出功率差别不大;当抽运功率增强后 ($P > 450$ W),输出功率随腔长的变化明显。当腔长为 30 cm 时,输出功率的增长幅度明显减小,甚至还出现负增长的情况,这是由于谐振腔受晶体的热聚焦效应的影响,逐渐趋于非稳定腔,造成功率波动和下降。显然,腔长越短,受晶体的热聚焦效应影响越小。应该看到,由于受激光棒和抽运模块尺寸的限制,腔长不可能无限短,而且短的谐振腔会使输出光束的质量和模式变差,因此应用时要根据实际需要权衡利弊,选择合适的腔长。采用刀口法测量了百瓦输出的 1338 nm 连续激光的光束质量,其 M^2 约为 36。

3 结 论

通过分析激光晶体的跃迁谱线和受激发射界面,合理设计腔镜的镀膜参数,成功地抑制了增益最强的 1064 nm 激光振荡和 1319 nm 激光的竞争,实现了 1338 nm 单一波长的激光输出。实验比较了不同输出耦合率、不同腔长对激光性能的影响。在输出耦合率 $T = 5.3\%$, 腔长 $L = 20$ cm, 抽运功率为 555 W 时得到 100.5 W 的 1338 nm 激光,其光-光转换效率为 18.1%, 斜率效率为 35%, 输出光束的 M^2 因子约为 36。

参 考 文 献

- Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end-pumped 1386 nm Nd:YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1069~1072

- 李海峰,周睿,赵璞等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 实现 1386 nm 连续波激光输出[J]. 光学学报, 2006, **26**(7):1069~1072
- 2 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 162 W laser diode-pumped Nd:YAG intracavity-doubled laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1459~1462
姚震宇,蒋建锋,涂波等. 162 W 激光二极管抽运 Nd:YAG 腔内倍频激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(11):1459~1462
- 3 Chuanbo Gong, Changshui Chen, Bian Wu *et al.*. All solid-state passively Q-switched frequency-doubled intra-cavity Nd:GdVO₄/KTP laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2):94~96
- 4 Y. F. Chen, L. J. Lee, T. M. Huang *et al.*. Study of high-power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser at 1.34 μm; influence of Auger upconversion [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **163**(4-6):198~202
- 5 C. Du, S. Ruan, H. Zhang *et al.*. A 13.3-W laser-diode-array end-pumped Nd:GdVO₄ continuous-wave laser at 1.34 μm [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(1):45~48
- 6 H. Y. Shen, Y. P. Zhou, R. R. Zeng *et al.*. Laser action of Nd:YAlO₃ at 1300 nm [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(6):3373~3375
- 7 Wang Zhiyong, Wang Tao, Yao Jianquan. Study on 1319 nm CW Nd:YAG laser with 43 W output power [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(11):1235~1236
王志勇,王涛,姚建铨. 高功率 1319 nm CW Nd:YAG 激光器的研究[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(11):1235~1236
- 8 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu *et al.*. Study on CW Nd:YAG laser at 1319 nm [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(4):20~22
王涛,姚建铨,李喜福等. 波长 1319 nm 连续 Nd:YAG 激光器的研究[J]. 激光杂志, 2003, **24**(4):20~22
- 9 Yong Wei, Ge Zhang, Chenghui Huang *et al.*. High power single wavelength 1338 nm Nd:YAG laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, **38**(3):173~176
- 10 Wei Yong, Zhang Ge, Huang Chenghui *et al.*. A 1318.8 nm/1338 nm simultaneous dual wavelength Nd:YAG laser [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(3):164~166
魏勇,张戈,黄呈辉等. 1318.8 nm/1338 nm 同时振荡双波长 Nd:YAG 激光器[J]. 激光与红外, 2005, **35**(3):164~166
- 11 S. Singh, R. G. Smith, L. G. Van Uitert. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd³⁺ in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **10**(6):2566~2572