

文章编号: 0258-7025(2007)05-0633-04

低功率激光二极管抽运的室温运转 Yb:YAG 激光器

田玉冰^{1,2}, 檀慧明¹, 曹洪忠^{1,2}, 李义民^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 报道了低功率激光二极管(LD)抽运的 1030 nm Yb:YAG 全固态激光器。由于 Yb:YAG 为准三能级结构, 自吸收损耗大, 振荡阈值高, 因此采用双路偏振耦合系统增加注入功率密度, 并通过降低晶体掺杂浓度, 选取合适晶体厚度, 用半导体制冷器(TEC)有效制冷, 在线性腔中实现了 1030 nm 波长稳定输出。Yb:YAG 晶体 Yb 离子掺杂原子数分数为 8%, 几何尺寸为 $\phi 11 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$, 晶体面对输出镜一端镀 940 nm 高反膜, 使未被吸收的抽运光反射回去, 再次抽运晶体, 从而提高了抽运光的利用效率, 当注入功率为 2 W 时, 1030 nm 输出功率为 192.8 mW, 光-光转换效率为 9.6%, 2 h 内稳定度小于 3.5%。

关键词 激光技术; Yb:YAG 晶体; 激光二极管端面抽运; 准三能级; 全固态激光器

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Low Power Laser Diode-Pumped Solid-State Yb:YAG Laser at Room Temperature

TIAN Yu-bing^{1,2}, TAN Hui-ming¹, CAO Hong-zhong^{1,2}, LI Yi-min^{1,2}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A low power laser diode (LD) end-pumped Yb:YAG laser has been demonstrated. At room temperature, the Yb:YAG laser has a quasi-three-level structure; and the lasing threshold is high because of serious re-absorption at the laser wavelength. In order to improve pump intensity, double LD polarization coupling system was employed in the experiment. The stable operation at 1030 nm was realized in a linear cavity by reducing doping concentration and efficient cooling with thermal electric cooler (TEC). The crystal is 0.7 mm in thickness and 11mm in diameter. The doping concentration (atomic percent) is 8%. The end face of crystal is coated for high reflection at 940 nm, which leads to a second pass of the pump light. The maximum output power of 192.8 mW at 1030 nm is obtained when the incident power is 2 W. The optical-optical conversion efficiency is 9.6%. The power instability is better than $\pm 3.5\%$ in 2 hours.

Key words laser technique; Yb:YAG crystal; laser diode end-pumping; quasi-three-level; solid-state laser

1 引言

近年来,随着高性能 InGaAs 二极管激光器的发展和成本的降低,掺 Yb³⁺ 激光材料引起了人们的广泛重视。由于 Yb³⁺ 吸收带在 0.9~1.1 μm 波长

范围,能与 InGaAs 激光二极管(LD)抽运源有效耦合,而且 Yb:YAG 晶体具有高的量子效率、长的荧光寿命(951 μs)和非常低的量子缺陷(8.6%),使得 Yb:YAG 晶体更适合于激光二极管抽运以实现固

收稿日期:2006-06-26; 收到修改稿日期:2006-12-15

作者简介:田玉冰(1976—),男,河北人,博士研究生,主要从事全固态激光器及非线性频率变换技术的研究。

E-mail: tianyb76@yahoo.com.cn

导师简介:檀慧明(1954—),男,吉林人,研究员,博士生导师,目前研究方向为固体激光器与非线性光学。

E-mail: hmtan2223@yahoo.com.cn

体激光器的高功率、高效、小型化和集成化。现在国际上已经实现了激光二极管抽运 Yb:YAG 固体激光器连续,调 Q,单频及锁模等运转方式^[1~6],国内也开展了相关方面的研究工作^[7,8],但由于在低功率激光二极管抽运 Yb:YAG 时,1030 nm 波长的光通过激光晶体时会存在强的自吸收效应,国内目前未见抽运功率低于 2 W 实现 1030 nm 波长输出的相关报道,本文通过对准三能级系统固体激光器室温运转条件的分析,降低掺杂浓度、减小晶体厚度、有效散热,实现了 Yb:YAG 激光器 1030 nm 波长的低功率室温稳定运转。

2 Yb:YAG 光谱特性及 1030 nm 波长室温运转的理论分析

2.1 光谱特性

Yb³⁺ 作为能级结构最简单的激活离子,电子构型为 4f¹³, 仅有一个基态 ²F_{7/2} 和一个激发态 ²F_{5/2}, 两者的能量间隔约为 10000 cm⁻¹。YAG 基质中强的晶场作用导致了 Yb³⁺ 离子的斯塔克能级分裂,基态和激发态分别分裂为四个和三个能级,如图 1 所示,形成准三能级的激光运行机制。激发态 ²F_{5/2} 最低子能级 10327 cm⁻¹ 和基态 ²F_{7/2} 的 612 cm⁻¹ 子能级

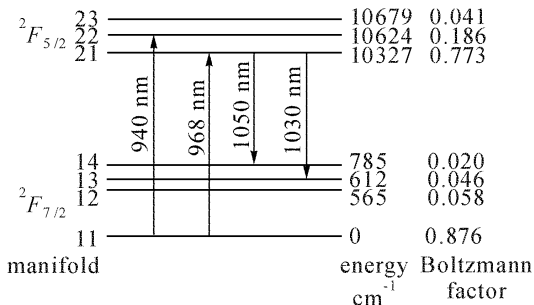


图 1 Yb³⁺ 离子能级结构图

Fig. 1 Energy level diagram of Yb³⁺ ion in YAG crystal

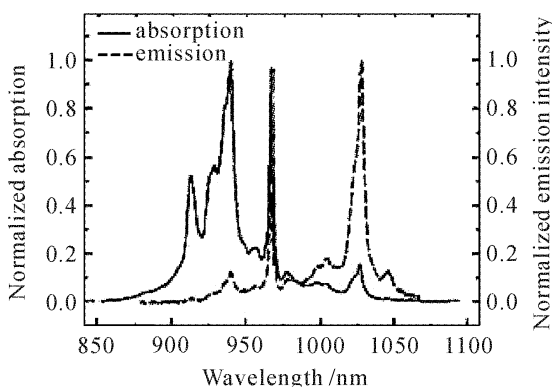


图 2 Yb:YAG 在 300 K 的吸收及辐射谱

Fig. 2 Absorption and emission spectra of Yb³⁺ YAG crystal at 300 K

间的激光波长为 1030 nm,激发态 10327 cm⁻¹ 和基态 785 cm⁻¹ 能级间的激光波长为 1050 nm,发射截面分别为 2.1 × 10⁻²⁰ cm² 和 0.31 × 10⁻²⁰ cm²。

从图 2 可以看出 Yb:YAG 的主吸收峰有两个,中心波长分别位于 941 nm 和 970 nm 处。941 nm 的峰值吸收截面较大,更适合于激光二极管抽运,并且由于该波长处的吸收带宽高达 18 nm,使得激光二极管不需要复杂的温控系统。Yb:YAG 的发射谱中心波长位于 1030 nm 处,由于吸收谱在该波长处与发射谱有重叠,所以存在自吸收现象。

2.2 1030nm 波长室温运转的理论分析

1030 nm 谱线属于准三能级系统之间的跃迁,在室温低功率抽运情况下,自吸收效应对其影响较大,使得 1030 nm 波长并不容易形成振荡^[9,10],而 1050 nm 波长几乎不存在自吸收,很容易起振,其振荡会消耗大部分上能级的粒子数,进一步抑制了 1030 nm 波长的输出。因此要想获得 1030 nm 振荡,必须尽量减小自吸收效应的影响并抑制 1050 nm 波长振荡。

自吸收与 Yb³⁺ 离子浓度、晶体厚度有关^[10]。图 3 为自吸收损耗示意图,定义吸收深度为抽运光经增益介质吸收而衰减为原强度的 1/e 时的深度,若离子浓度高,则吸收率越高,吸收深度越短,抽运光在很浅的地方就被大量吸收,造成增益介质的后半段自吸收损耗大于增益,使输出功率下降。所以激活介质存在一个最佳长度(介质过短,抽运光不能有效吸收,介质过长又导致低能级自吸收严重)^[11],应取左端面至两曲线交点之间的距离 ab。通过实验比较了不同掺杂浓度和厚度的晶体,最终选用的晶体厚度为 0.7 mm,掺杂原子数分数为 8%。

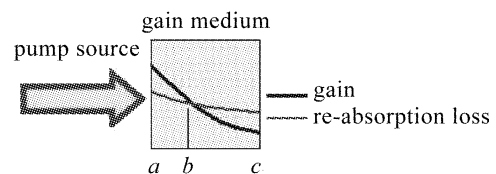


图 3 增益与自吸收损耗示意图

Fig. 3 Schematic of gain and re-absorption loss

温度对自吸收也有较大影响,当散热不佳或抽运功率升高时,晶体温度将急剧上升,根据玻尔兹曼定律,下能级粒子数增多,增加了对 1030 nm 光子的吸收,使自吸收严重,因而必须有效散热^[12]。实验采用圆盘状的激光晶体,晶体直径为 11 mm,将其固定在铝座上,用半导体制冷器(TEC)对其单独制冷。

由于晶体与热沉的接触面积很大,使得热量从 Yb:YAG 晶体传导到热沉的效率非常高。

实验中考虑了自吸收,并采取了相应措施,由于自吸收效应的减小,使 1030 nm 波长在模式竞争中处于优势,同样的透过率对 1050 nm 波长起振影响较大。通过比较不同透过率的输出镜发现,在提高透过率 ($T > 8\%$) 的基础上,只要 1050 nm 透过率略大于 1030 nm 波长透过率即可抑制 1050 nm 波长起振,因此并没有针对 1050 nm 单独镀膜,实验中采用 1064 nm 输出镜,对 1050 nm 和 1030 nm 的透过率分别为 27.1% 和 25.9%。

3 实验装置

如图 4 所示,整个实验系统由激光二极管抽运源,透镜耦合系统, Yb:YAG 晶体和输出耦合镜组成。抽运源为 Spectra Physics 公司生产的 2 W 激光二极管,为了有效地提高抽运功率密度,采用两个激光二极管偏振耦合系统(图中两个激光二极管的发射面为垂直放置),实验时调整激光二极管温度,使其发射谱处于 Yb:YAG 的吸收峰 941 nm 处,从激光二极管出射的激光经过准直、整形、聚焦后在 Yb:YAG 晶体上形成一个半径约为 100 μm 的光斑,光强分布为高斯分布。由于所用透镜没有针对 940 nm 镀膜,耦合效率只有 50%。Yb:YAG 晶体规格为 $\phi 11 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为 8%,左端面对 940 nm 光镀增透膜,同时对 1030 nm 光镀高反膜,右端面对 1030 nm 光增透,同时对 940 nm 光镀高反膜,使抽运光反射回去,再次抽运 Yb:YAG 晶体,提高抽运光的利用效率;输出镜为 $R = 100 \text{ mm}$ 的凹面镜对 1030 nm 的透过率为 25.9%,对 1050 nm 的透过率为 27.1%,与 Yb:YAG 晶体的前端面构成平凹谐振腔。

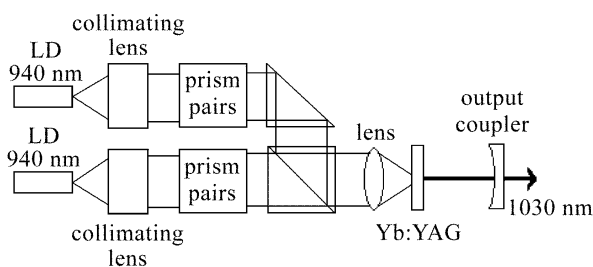


图 4 激光二极管抽运 Yb:YAG 晶体结构示意图
Fig. 4 Schematic of LD-pumped Yb:YAG crystal

根据 Paolo Laporta 的模式匹配原则^[13],要实现端面抽运激光器的高效基模运转,必须使抽运光

斑半径小于或等于激光晶体上基模激光的光斑半径。实验时选取腔长 L 为 55 mm,谐振腔为半共焦腔,由公式 $w_0 = \{\lambda / [\pi \sqrt{L(R-L)}]\}$ 可计算出振荡光腰半径为 127.75 μm ,大于抽运光斑半径 100 μm ,符合模式匹配原则。

4 实验结果

图 5 是 1030 nm 基频光随入射到 Yb:YAG 晶体内 940 nm 抽运光功率的变化情况。从图中可以看出,激光器的阈值功率为 380 mW。当入射至 Yb:YAG 晶体上的抽运功率为 2 W 时,1030 nm 基频光输出功率为 192.8 mW,光-光转换效率达 9.6%。激光输出稳定,经测定 2 h 内的稳定度小于 3.5%。图 5 中输出功率略有起伏,是由于两个激光二极管分别由两路电源控制,在调节过程中很难保证两路抽运功率始终保持一致,从而使耦合功率密度有微小波动而造成的。

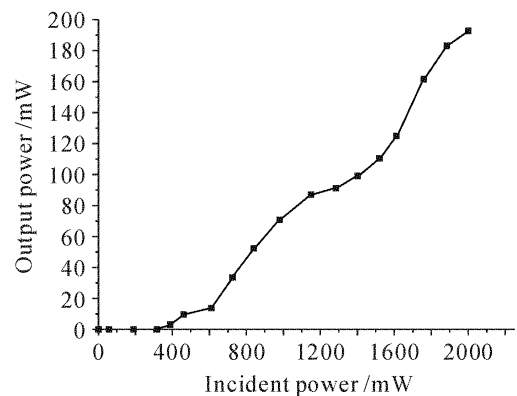


图 5 1030 nm 激光输出功率随入射抽运光功率变化关系

Fig. 5 Output power versus incident power for Yb:YAG laser

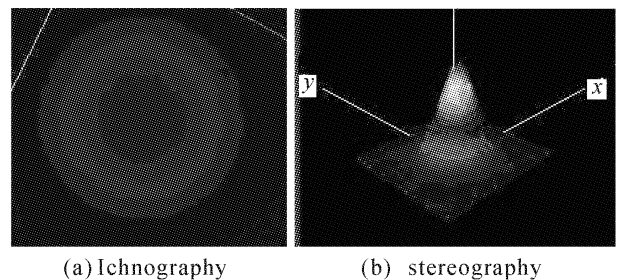


图 6 1030 nm 激光光斑质量

Fig. 6 Spot quality of 1030 nm laser

图 6 为采用美国 Photon 公司生产的光束轮廓仪记录的激光远场光斑照片,(a)和(b)分别为激光光束的二维和三维光强分布图,经测定光斑椭圆度

为0.90,由图可以看出激光光束的对称性很好,光斑质量较高。

5 结 论

讨论了在室温条件下采用纵向端面抽运来实现 Yb:YAG 的 1030 nm 波长的准三能级系统激光运转,获得了 192.8 mW 的 1030 nm 的基频光输出。由于实验条件的限制,抽运光耦合效率不高,为 50%,因此转换效率低,进一步优化设计工作仍在进行中,相信转换效率将会进一步提高。

致谢 感谢第 209 研究所徐天华为本实验提供 Yb:YAG 晶体。

参 考 文 献

- 1 P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang *et al.*. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14):1089~1090
- 2 T. Y. Fan, S. Klunk, G. Henein. Diode-pumped Q-switched Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(6):423~425
- 3 T. Y. Fan, J. Ochoa. Tunable single-frequency Yb:YAG laser with 1-W output power using twisted-mode technique [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(10):1137~1138
- 4 U. Brauch, A. Giesen, M. Karszewski *et al.*. Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):713~715
- 5 C. Hönninger, G. Zhang, U. Keller *et al.*. Femtosecond Yb:YAG laser using semiconductor saturable absorbers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(23):2402~2404
- 6 T. Y. Fan. Aperture guiding in quasi-three-level lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8):554~556
- 7 Li Lei, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. LD-pumped Yb:YAG chip laser with high beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1285~1288
李磊,杨苏辉,孙文峰等. 激光二极管抽运的高光束质量的 Yb:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(11):1285~1288
- 8 Xu Shixiang, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. Laser diode-pumped efficient tunable Yb:LYSO laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):799~800
徐世祥,李文雪,郝强等. 半导体激光器抽运新型高效、调谐 Yb:LYSO 激光器[J]. 光学学报, 2006, **26**(5):799~800
- 9 Wu Haisheng, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. $M^2 \leq 1.14$ diode-pumped Yb:YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):961~964
吴海生,闫平,巩马理等. $M^2 \leq 1.14$ 的 LD 抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(11):961~964
- 10 Wang Xiaodan, Zhao Zhiwei, Xu Xiaodong *et al.*. Spectroscopic properties of Yb:Y₃Al₅O₁₂ with Yb-doping concentration 0.5 at.-% [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **31**(11):692~696
王晓丹,赵志伟,徐晓东等. Yb 掺杂原子数分数为 0.5% 的 Yb:Y₃Al₅O₁₂ 晶体的光谱分析[J]. 中国激光, 2006, **31**(11):692~696
- 11 Haixia Ma, Qihong Lou, Yunfeng Qi *et al.*. Theoretical study on longitudinally pumped Yb³⁺:Y₂O₃ lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1):28~30
- 12 T. Y. Fan. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(6):1457~1459
- 13 Paolo Laporta, Marcello Brusaard. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(10):2319~2326