

文章编号: 0258-7025(2004)11-1285-04

激光二极管抽运的高光束质量的 Yb:YAG 薄片激光器

李 磊, 杨苏辉, 孙文峰, 赵长明

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 演示了激光二极管(LD)端面抽运 Yb:YAG 薄片固体激光器,抽运源是美国相干公司(COHERENT)光纤耦合输出半导体激光器,光纤输出芯径为 800 μm ,在 940 nm 处最大输出功率为 13.56 W,由于光纤输出芯径较大,不利于抽运光和振荡光的模式匹配,为了得到较小的抽运光斑,采用了焦距比为 30:12 的耦合透镜组压缩入射到晶体端面的抽运光光腰半径,晶体为原子掺杂浓度 8 at.-%,几何尺寸为 $\phi 7 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ 国产 Yb:YAG 晶体,整个实验装置采用温差电致冷(TEC)和循环水冷却方式,实验中得到了 3.06 W 的连续激光输出,激光器的斜率效率为 33.1%,测得 M^2 因子在 x 和 y 方向分别为 1.54 和 1.73,具有良好的光束质量。

关键词 激光技术;Yb:YAG 薄片激光器;激光二极管抽运;光束质量

中图分类号 TN 242 **文献标识码** A

LD-Pumped Yb:YAG Chip Laser with High Beam Quality

LI Lei, YANG Su-hui, SUN Wen-feng, ZHAO Chang-ming

(Department of Opto-Electronic Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A laser diode (LD) end-pumped Yb:YAG ($\text{Yb}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) chip laser has been demonstrated. The pumping source is a fiber coupled laser diode array with maximum output power of 13.56 W at 940 nm. The diameter of the fiber is 800 μm . Two lenses with focal length ratio of 30:12 have been used to compress the pumping light into the laser crystal. 3.06 W continuous wave (CW) output power was obtained from the 8 at.-% doped, 1.6 mm thick Yb:YAG crystal, the whole experiment set was cooled by thermoelectric cooler (TEC) and cooling water, slope efficiency was 33.1%, the M^2 values were measured to be 1.54 and 1.73 in the x and y directions respectively.

Key words laser technique; Yb:YAG chip laser; LD-pumped; beam quality

1 引 言

近年来随着高功率 InGaAs 激光二极管(LD)制造技术的不断完善和发展,大功率 LD 抽运 Yb:YAG 固体激光器呈现出蓬勃发展的态势。Yb:YAG 是具有准三能级结构的激光晶体,相对于 Nd:YAG 有很多优点:对抽运光的吸收带宽很宽(约 18 nm),这样对于抽运源就没有苛刻的温控限制;允许掺杂浓度高,吸收系数大,有利于抽运光的充分吸收和减小晶体厚度,这些特点都有利于激光器的小型

化。另外 Yb:YAG 晶体还具有低量子缺陷(8.6%)、长上能级寿命(0.95 ms)、对抽运光的热转换率低($\leq 11\%$)、理论上不存在激发态吸收和上转换等优点,现在国际上已经实现了 LD 抽运 Yb:YAG 固体激光器连续,调 Q,单频可调谐,锁模等运转方式^[1~5],千瓦级以上的激光器也已经实现,但国内对该领域的研究相对较少^[6~8]。

我们用美国相干(COHERENT)公司 LD 光纤输出抽运源,国产 Yb:YAG 晶体实现了 LD 抽运 Yb:YAG 固体激光器 3.06 W 连续输出,光-光转换

收稿日期:2003-07-16;收到修改稿日期:2003-10-22

基金项目:军用固体激光技术国防科技重点实验室基金(00JS08.1.3.BQ0103)资助项目。

作者简介:李 磊(1971—),男,安阳人,北京理工大学光电工程系博士生,安阳师范学院教师,主要从事新型固体激光器方面的研究。E-mail:lloasis@bit.edu.cn

效率 26.8%，斜率效率 33.1%。

2 实验装置

如图 1 所示,整个激光装置由 LD 抽运源,透镜耦合系统,Yb:YAG 晶体及散热装置和输出耦合镜组成。半导体激光器是一个高度集成化的光纤阵列封装(FAP)设备,峰值波长在 940 nm 附近,输出光纤芯径为 800 μm ,数值孔径 0.16,由于光纤芯径较大,不利于提高抽运光功率密度,因此抽运光透镜耦合系统采用了焦距为 30 mm 和 12 mm 的透镜组来压缩抽运光的光斑半径。Yb:YAG 晶体为 8 at.-% 掺杂的薄片 ($\phi 7 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$),前表面对 940 nm 光镀增透(AR)膜,透过率(T)为 84.09%,同时对 1030 nm 光镀反射率为 99.63%的高反(HR)膜作为前平面腔镜;Yb:YAG 晶体的后端面对 1030 nm 光增透,透过率为 81.49%,同时对 940 nm 光镀高反膜,反射率为 99.36%,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;输出镜为曲率为 100 mm 的凹面镜,对 1030 nm 光的透过率为 3.02%,与 Yb:YAG 晶体前端面构成平凹谐振腔,腔长约 50 mm,谐振腔为半共焦腔,由公式 $w_0^2 = (\lambda/\pi) \sqrt{L(R-L)}$ 计算出振荡光腰为 128 μm 。

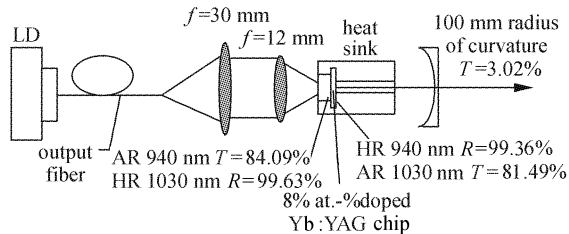


图 1 激光二极管抽运 Yb:YAG 薄片激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of LD-pumped Yb:YAG chip laser

Yb:YAG 晶体材料的一个不足之处是激光下能级常温下热平衡粒子数浓度较高,因此有效制冷是获得高效输出的关键措施之一。实验中晶体装夹在导热性好的铜热沉上,铜热沉两侧用温差电致冷器(TEC)制冷,温差电致冷器的冷端涂覆导热硅脂紧贴铜热沉的两个侧面,热端通过涂覆导热硅脂紧贴两个水套,水套通以循环水冷却。

3 双透镜抽运光耦合系统

为了提高抽运光功率密度,更好地实现模式匹

配,采用了一定焦距比的透镜组来压缩抽运光入射到晶体上的光斑大小,但是同时要兼顾压缩后光发散角不能太大的原则,如图 2 所示,已知两个透镜的焦距 f_1 和 f_2 ,设从光纤输出激光的光斑半径为 w_1 ,经过透镜组后的光斑半径为 w_2 ,则 $w_2 = (f_2/f_1)w_1 = 160 \mu\text{m}$ 。实验中焦距为 12 mm 的透镜对 940 nm 抽运光镀增透膜,焦距为 30 mm 的透镜未镀增透膜。

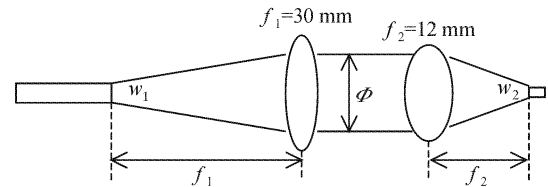


图 2 抽运光耦合透镜组

Fig. 2 Coupling optics for pumping beam

4 晶体厚度的确定

由于 Yb:YAG 晶体除了对抽运光有较强的吸收外,对振荡光也有较强的自吸收作用,因此在特定抽运条件下,晶体的厚度对激光器的性能起决定性的作用。在加工晶体之前,要确定晶体的厚度,根据激光谐振腔的小信号增益理论,激光振荡的阈值关系式为^[9]

$$g_0 l = \left| \ln(\sqrt{R_1 R_2} V_s) \right| \quad (1)$$

式中 $g_0 l$ 为小信号增益, l 为晶体厚度, R_1 和 R_2 为两个谐振腔镜的反射率, V_s 为振荡光的损耗系数

$$V_s = \exp(-\alpha_0 l) \quad (2)$$

式中 α_0 为晶体对振荡光的吸收系数。 $g_0 l$ 与晶体增益介质参数联系起来,有关系式

$$g_0 l = \Delta N \sigma l \quad (3)$$

式中 ΔN 为反转粒子数密度, σ 为振荡光受激发射截面。反转粒子数与晶体吸收抽运光功率的关系为

$$P_{\text{abs}} = \frac{\Delta N h \nu_p \Delta V}{\tau} \quad (4)$$

式中 ΔV 为抽运光模体积, τ 为荧光寿命。

计算条件假定为:晶体前表面对 940 nm 抽运光高透,1030 nm 振荡光高反,后端面对 1030 nm 振荡光高透,940 nm 抽运光高反,晶体掺杂浓度为 8 at.-%,腔内的损耗除了振荡光的再吸收和输出损耗外其他损耗忽略不计,代入相关的参数值进行数值计算并作图,得到在 12 W 抽运,抽运光斑 160 μm 时晶体厚度与输出功率的关系曲线,如图 3 所示,输出功率较高是由于忽略了其他损耗的缘故,但

是晶体厚度与输出功率的变化趋势是一定的。由计算结果得到晶体厚度在 1.6 mm 时输出功率最大。

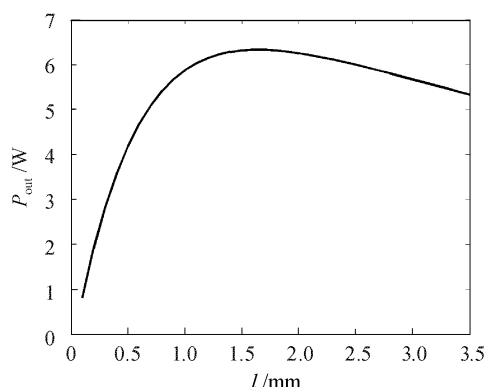


图 3 计算得到的输出功率与晶体厚度的关系

Fig. 3 Output power versus crystal thickness

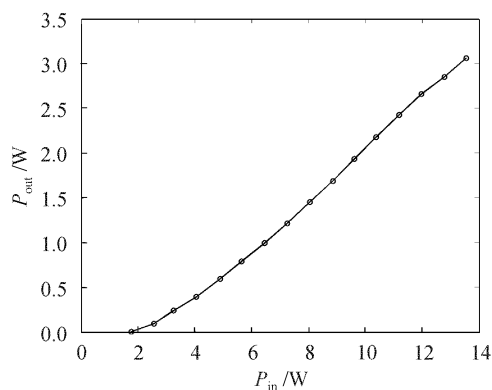


图 4 Yb:YAG 激光器输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power versus pump power for Yb:YAG laser

5 实验结果

在控制 LD 的温度为 18℃ 的情况下,温差电致冷器制冷铜热沉,温差电致冷器热端水冷,得到 Yb:YAG 固体激光器输出功率与 LD 抽运光功率的数值关系,如图 4 所示。

所得到的最大输出功率为 3.06 W,对应 LD 通过双透镜输出功率为 13.56 W,但是由于晶体前面对 940 nm 抽运光的透过率只有 84.09%,因此实际上注入到 Yb:YAG 晶体里的功率是 11.4 W,光-光转换效率为 26.8%,阈值抽运功率为 2.56 W,计算出的斜率效率为 33.1%。

实验测量了输出激光的光束质量,激光光束经过焦距 $f = 120$ mm 的透镜后,其光斑半径与距离 Z 的关系如图 5 所示,其中 w_x 和 w_y 分别代表 x 和 y 方向的光斑半径, z 轴为光轴方向的相对位置坐标。所测 M^2 在 x 方向和 y 方向的值分别为 $M_x^2 = 1.54, M_y^2$

$= 1.73$,从测量数据可以看出激光光束的对称性较好,为近基横模输出,具有较高的光束质量。

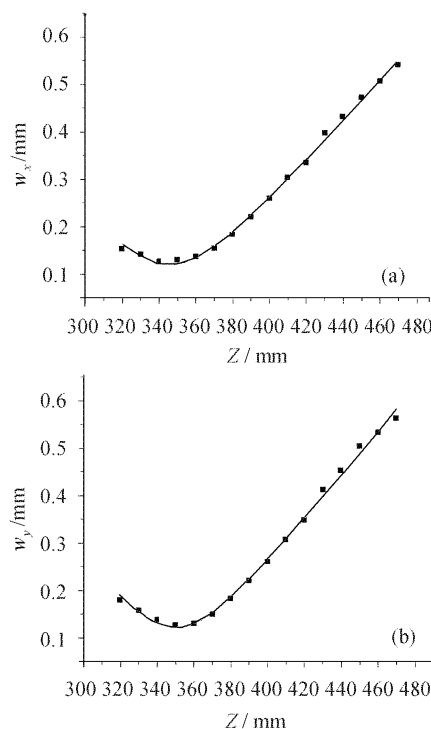


图 5 x 方向(a)和 y 方向(b)激光光斑半径与距离 Z 的关系

Fig. 5 Laser beam radius in x (a) and y (b) directions versus distance from focusing lens Z

6 结 论

通过优化晶体厚度,采用半共焦腔实现了 LD 端面抽运 Yb:YAG 固体激光器 3.06 W 激光输出,光-光转换效率为 26.8%,激光器具有良好的光束质量。

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 Yin Hongbing, Deng Peizhen, Zhang Junzou *et al.*. Growth of Yb:YAG crystal and its spectral properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(2):227~230

- 尹红兵,邓佩珍,张俊洲等. Yb:YAG晶体的制备与光谱特性[J]. 光学学报, 1997, 17(2):227~230
- 7 Li Xiaoli, Shi Xiangchun, Shi Peng *et al.*. Temperature effect of Yb:YAG thin disk laser crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(10):1268~1271
- 李小莉,施翔春,石 鹏等. Yb:YAG薄片激光介质的温度效应[J]. 光学学报, 2001, 21(10):1268~1271
- 8 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
- 9 N. Hodgson, H. Weber. *Optical Resonators* [M]. Springer, 1996. 307

一种抗湿性丙烯酸胺基光致聚合物及全息特性

全息存储的应用在很大程度上取决于是否有合适的存储材料。光致聚合物作为一种体全息存储材料,具有高的感光灵敏度、高分辨率、高衍射效率及高信噪比,大的动态范围,可用完全干法处理及快速显影,最有可能成为数字全息存储的一次写入型材料。但这种材料受环境影响很大,特别是湿度的影响。在普通实验条件下,材料的可重复性差。当环境湿度过大时,膜极易吸水,致使衍射效率较低,甚至没有衍射效率^[1~4]。

在以前所制备材料的基础上^[4],我们制备了一种新型的丙烯酸胺基光致聚合物,以固态引发剂 N-苯基甘氨酸代替传统的易吸水的液态引发剂三乙醇胺,这种聚合物对环境湿度不敏感,材料稳定性高,而且制备膜所需要的干燥时间大大缩短。以聚乙烯醇(PVA)作为粘结剂,丙烯酸胺(AA)作为单体,以固态 N-苯基甘氨酸(PG)作为引发剂,藻红 B(ErB)作为光敏剂,并加入增塑剂二甲亚砜(DMSO)。由于藻红 B 的最大吸收波长在 528 nm,所以适合用 Ar⁺ 激光器作为记录光源。实验时,采用 90°光路记录非倾斜光栅,通过对分光束调节将光分成两束强度相等的光,在样品上相互干涉,形成全息图。再现时用 633 nm 的 He-Ne 激光器以 Bragg 角入射,因为所用染料藻红 B 在 633 nm 处几乎没有吸收^[4]。通过测量材料的衍射效率随曝光时间变化,对材料的组份进行优化。实验结果表明,聚合物中光敏剂浓度有一个最佳值,应控制在 10^{-4} mol/L。当光敏剂浓度过高时,容易形成染料二聚体^[5],使感光灵敏度下降。光敏剂主要影响了全息图的感光灵敏度,对衍射效率影响不大。引发剂 N-苯基甘氨酸也有最佳掺杂浓度,为 8.83×10^{-3} mol/L,当引发剂浓度小于 8.83×10^{-3} mol/L 时,衍射效率与感光灵敏

度均随引发剂浓度增加而增加,当浓度超过 8.83×10^{-3} mol/L 时,又随引发剂浓度增加而下降。总体来说,聚合物中引发剂及光敏剂对全息图的衍射效率影响不大,主要决定了光聚物的感光灵敏度。相反地,增塑剂对光聚物衍射效率影响较大,对感光灵敏度没有多大影响,在聚合物中的最佳浓度为 0.3 mol/L。所制备的光聚物衍射效率可以达到 50% 以上,感光强度只有 60 mJ/cm²,可用于数字全息存储。

参 考 文 献

- 1 S. Martin, P. Lecler, V. Toel *et al.*. Characterization of an acrylamide-based dry photopolymer holographic recording material [J]. *Opt. Eng.*, 1994, 33(12):3942~3945
 - 2 Salvador Blaya, Luis Carretero, Ricardo Mallavia *et al.*. Optimization of an acrylamide-based dry film used for holographic recording [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(32):7604~7610
 - 3 F. T. O'Neill, J. R. Lawrence, J. T. Sheridan. improvement of holographic recording material using aerosol sealant [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2001, 3(2):20~25
 - 4 Huang Mingju, Yao Huawen, Chen Zhongyu *et al.*. The holographic characteristics of the photopolymer based on the monomer acrylamide radical [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, 13(11):1138~1140
- 黄明举,姚华文,陈仲裕等. 基于丙烯酸胺基单体的光聚物的全息特性[J]. 光电子·激光, 2002, 13(11):1138~1140
- 5 L. Carretero, S. Blaya, A. Fimia *et al.*. Study of the quantum yield and molar absorptivity for a dye photobleaching in a holographic recording material [C]. *SPIE*, 1998, 3294:91~98

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所,
上海 201800

² 河南大学物理与信息光电子学院,
河南 开封 475000

弓巧侠¹, 黄明举^{1,2}, 顾冬红¹, 干福熹¹

收稿日期:2004-04-09;
收到修改稿日期:2004-09-24