

Yb:YAG 表层增益板条激光放大器的研究

李宁, 张伟桥, 刘洋, 唐晓军*

华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 基于光纤与板条结合的主振荡功率放大器(MOPA)结构,以单模光纤激光器作为种子源,对 Yb:YAG 表层增益板条进行功率放大。对单程及双程两种提取方式进行理论计算及实验研究,结果表明:在室温下,获得了 1030 nm 激光输出;当注入种子光功率为 200 W,抽运光功率为 11.2 kW 时,单、双程放大输出功率分别为 1.6 kW 和 2.6 kW,光-光转换效率分别为 12.8% 和 21.4%;测得 Yb:YAG 表层增益板条的透射波前畸变为 $1.3 \mu\text{m}$; Yb:YAG 表层增益板条具有作为高功率激光器增益介质的潜力。

关键词 激光器; 激光放大器; Yb:YAG; 表层增益; 双程提取

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1101003

Yb:YAG Surface Gain Slab Laser Amplifier

Li Ning, Zhang Weiqiao, Liu Yang, Tang Xiaojun*

Science and Technology on Solid-State Lasers Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract A novel Yb:YAG surface gain slab laser amplifier is designed, with a fiber laser seed, using the geometry of master oscillator power amplifier (MOPA). Single-pass and double-pass amplifying are investigated theoretically and experimentally. The results show that 1030 nm laser output is obtained at room temperature. Under the conditions that the total pumping power is 11.2 kW and the injected power of fiber seed laser is 200 W, the output power of single and double pass amplified laser are 1.6 kW and 2.6 kW, respectively, and the optical efficiency of the two methods are 12.8% and 21.4%, respectively. The transmission wavefront of Yb:YAG surface gain slab is measured and the wavefront distortion value is $1.3 \mu\text{m}$. Yb:YAG surface gain slabs have the potential as gain medium of high power lasers.

Key words lasers; laser amplifier; Yb:YAG; surface gain; double-pass amplifying

OCIS codes 140.3460; 140.3280; 140.3480

1 引言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器具有结构紧凑、稳定性好、效率高等优点,广泛应用于军事、工业、医疗等领域^[1]。传统棒状增益介质的热效应问题限制了激光器的输出功率,导致光束质量变差。为此,科研人员先后研发出了板条、薄片等形状的增益介质,降低了高功率固体激光器中热效应的影响^[2]。

主振荡功率放大器(MOPA)既可以获得高功率激光输出,又可以保证光束质量^[3],一直都是研究的热点。2009年,美国诺格公司采用 MOPA 结构的激光放大器获得了 15 kW 的单链路输出功率,之

后通过相干合成获得了功率为 105 kW 的激光输出^[4]。2012年,高清松等^[5]设计了功率为 10 kW 的板条激光放大器,采用一级预放两级主放大器获得了功率为 11 kW 的激光输出,光-光转换效率达到 30%。2016年,雷军等^[6]研究了板条的封装工艺,对焊料层进行优化后使 Nd:YAG 模块的稳定输出功率达到了 4 kW。2017年,李密等^[7]设计了双掺杂浓度 Nd:YAG 复合板条,其抽运功率可达 18.06 kW,双程放大激光输出功率为 7.08 kW,光-光转换效率为 39.2%。2018年,李密等^[8]又设计了 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器,在室温条件下,其抽运功率为 20 kW,输出激光功率为 6 kW,光-光转

收稿日期: 2018-05-17; 修回日期: 2018-06-22; 录用日期: 2018-07-26

* E-mail: atp7up@163.com

换效率约为 24%，宽度范围透射波前畸变峰谷值约为 3 μm。

目前,关于表层增益板条激光器的相关研究还不是很多。2008年,唐晓军等^[9]结合板条与薄片的优点,提出了表层增益板条结构(三明治板条)的概念,即在板条的两个大面上键合百微米量级的Nd:YAG或Yb:YAG掺杂层,这种表层增益板条可以用于谐振腔及激光放大器。2016年,刘洋等^[10]设计了Nd:YAG表层增益激光器,其在单脉冲抽运能量为354 mJ的条件下可以获得121 mJ的激光输出,光-光转换效率和斜效率分别为34%和45%。

本文基于主振荡功率放大器结构,以Yb:YAG表层掺杂晶体作为增益介质,进行一级单程及双程放大理论计算及实验研究。在光纤种子光注入功率为200 W,抽运光功率为11.2 kW的条件下,获得单程和双程激光输出功率分别为1.6 kW和2.6 kW,光-光转换效率分别为12.8%和21.4%,测得透射波前畸变为1.3 μm。表层增益板条放大器或激光器有望获得更高功率和更高效率的激光输出。

2 Yb:YAG 激光动力学

Yb:YAG 作为准三能级系统,其速率方程为

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{I_p}{\tau I_{sp}}(f_1^p n_1 - f_2^s n_2) - \frac{n_2}{\tau} + \frac{I_1}{\tau I_{sl}}(f_3^p n_1 - f_1^s n_2), \quad (1)$$

式中: n_2 和 n_1 分别为上下能级粒子数密度; t 为时间; τ 为激光上能级荧光寿命; f_1^s 和 f_1^p 分别为Yb:YAG能级中上、下能级粒子在各斯塔克子能级的玻尔兹曼小数; I_p 为抽运光强度; I_1 为振荡激光强度; I_{sp} 为抽运饱和光强; I_{sl} 为激光饱和光强。抽运饱和光强及激光饱和光强的表达式为

$$I_{sp} = \frac{h\nu_p}{\sigma_a \tau}, \quad (2)$$

$$I_{sl} = \frac{h\nu_l}{\sigma_e \tau}, \quad (3)$$

式中: h 为普朗克常数; ν_p 、 ν_l 分别为抽运激光频率和输出激光频率; σ_a 为抽运光吸收截面; σ_e 为受激发射截面。

令 $n = n_1 + n_2$, n 表示Yb³⁺的粒子数密度,将其代入(1)式得到

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{I_p}{\tau I_{sp}}[f_1^p n - (f_1^p + f_2^s)n_2] - \frac{n_2}{\tau} + \frac{I_1}{\tau I_{sl}}[f_3^p n - (f_3^p - f_1^s)n_2]. \quad (4)$$

在稳态条件下求解方程可得

$$n_2 = \frac{f_1^p I_p / I_{sp} + f_3^p I_1 / I_{sl}}{1 + (f_1^p + f_2^s) I_p / I_{sp} + (f_1^s + f_3^p) I_1 / I_{sl}} n. \quad (5)$$

吸收系数 α 和增益系数 g 定义为

$$\alpha = \sigma_a [f_1^p n - (f_1^p + f_2^s)n_2], \quad (6)$$

$$g = \sigma_e (f_1^s n_2 + f_3^p n_1) = \sigma_e n [(f_1^s + f_3^p)n_2 - f_3^p n]. \quad (7)$$

将(5)式分别代入(6)式和(7)式中,得到吸收系数和增益系数的表达式:

$$\alpha = \sigma_a n \frac{f_1^p + (f_1^p f_1^s - f_3^p f_2^s) I_1 / I_{sl}}{1 + (f_1^p + f_2^s) I_p / I_{sp} + (f_1^s + f_3^p) I_1 / I_{sl}}, \quad (8)$$

$$g = \sigma_e n \frac{(f_1^p f_1^s - f_3^p f_2^s) I_p / I_{sp} - f_3^p}{1 + (f_1^p + f_2^s) I_p / I_{sp} + (f_1^s + f_3^p) I_1 / I_{sl}}. \quad (9)$$

基于吸收系数和增益系数建立简易的激光放大模型,对单程及双程激光放大器的输出功率和光-光转换效率进行理论计算,所得理论曲线将在实验结果与讨论部分给出。

3 Yb:YAG 表层增益激光放大实验

采用光纤-板条混合的主振荡功率放大器结构,实验装置如图1所示。以单模光纤作为种子源,种子源通过法拉第磁光隔离器(FR)及光束整形扩束器后,再经表层增益板条进行放大。磁光隔离器可以隔离反射的强激光,避免损伤种子源。在实验装置中, $M_1 \sim M_3$ 及 $M_6 \sim M_9$ 均为反射镜,镀有1030 nm的高反膜; M_4 和 M_5 为双色镜(940 nm增透,1030 nm高反)。(1)和(2)分别表示单程放大和双程放大,种子光单程和双程注入板条的角度分别为22°和26°。 F_1 及 F_2 为焦距 $f = 300$ mm的凸透镜。在双程提取时,4f像传递系统的作用是耦合效率。

采用传导冷却端面抽运结构,用恒温水冷系统控制抽运源及热沉的温度,温度分别设置为22℃和13℃。放大器的抽运源共采用4支LD,输出中心波长为942.3 nm。实验中,抽运光入射到板条端面的角度约为22°,总抽运功率达11.2 kW。增益介质为表层掺杂的Yb:YAG晶体,其结构如图2所示。板条尺寸为67 mm×11 mm×1.7 mm,上下两大个面为Yb掺杂区域,掺杂尺寸为50 mm×11 mm×0.3 mm,掺杂Yb³⁺的原子数分数为1.2%。大面通过钢焊接到微通道冷却热沉上散热。为保证抽运

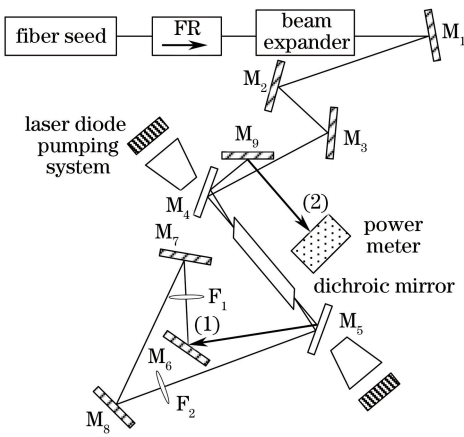


图 1 Yb:YAG 表层增益板条激光放大器装置图
Fig. 1 Schematic of Yb:YAG surface gain slab laser amplifier

光、振荡激光在板条内部全反射,在大面上镀膜,以抑制倏逝波。板条的两个端面为通光面,采用 45°角切割,且镀有波长分别为 940 nm 和 1030 nm 的增透膜。

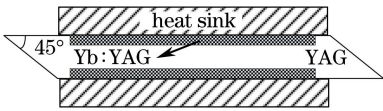


图 2 表层增益板条的结构
Fig. 2 Schematic of surface gain slab

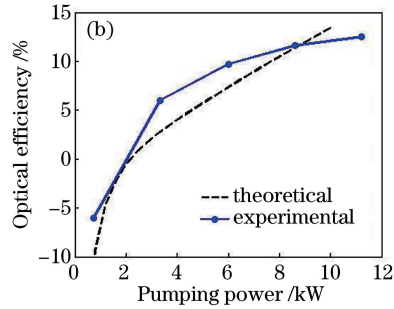
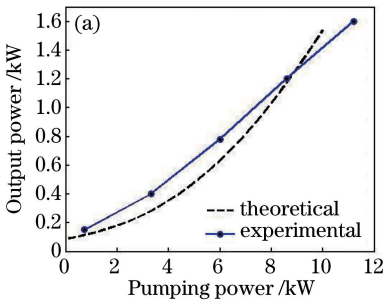


图 3 (a)单程放大激光输出功率曲线及(b)光-光转换效率曲线

Fig. 3 (a) Output power curves and (b) optical efficiency curves of single-pass amplifying

实验中没有测量输出激光的光束质量,因此对表层增益板条激光波前进行测试,结果如图 5 所示。可见:当输出功率为 2.6 kW 时, x 方向的波前畸变为 $1.3 \mu\text{m}$, y 方向的波前畸变为 $0.3 \mu\text{m}$,光束质量较好。输出激光光束尺寸(即板条端面尺寸)为 $11 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$ 。

双程放大的转换效率明显比单程的转换效率高,种子光注入功率在单程放大时较低,因此大量的反转粒子没有被利用,从而影响了放大器的效率。

表层增益结构兼具板条及薄片的优点,抽运光与振荡激光在板条内部沿着“之”字形光路传输,既增加了对抽运光的吸收,又补偿了板条内部径向的温度梯度,能够获得高功率、高光束质量的激光输出;此外,掺杂区域直接与微通道冷却热沉接触,有利于板条的散热。

4 实验结果与讨论

单、双程放大的输出功率和光-光效率曲线如图 3、4 所示。单模光纤种子源的中心波长为 1030 nm ,功率约为 200 W 。对于单程注入,当抽运功率为 11.2 kW 时,放大器输出激光功率为 1.6 kW ,光-光转换效率为 12.8% ;当双程提取时,实验结果与理论计算所得曲线比较符合,抽运功率为 11.2 kW ,输出功率可达到 2.6 kW ,光-光转换效率为 21.4% ;在抽运功率较小的情况下,实验得到的输出功率比理论值大,相应的转换效率也比理论计算值高。总体来说,实验值与理论值较为符合。此外,当抽运功率较小时,增益较小,输出放大的激光功率小于注入种子光功率,因此光-光转换效率为负值。由图 3 和图 4 可以看出:单、双程放大的输入-输出曲线的线性度较好,属于饱和能量提取;在高抽运功率情况下,随着抽运功率增加,输出功率虽仍有增长,但光-光转换效率曲线趋于平稳。

单程放大时,板条内光束的填充因子较小,单、双程放大交叠效率分别为 95% 和 98% ,所以双程提取能够增大光束在板条内的交叠效率,提高对抽运光的利用率,进而获得高功率、高效率的激光输出。在高抽运功率下,光-光转换效率不再增大,初步分析原因为:1)种子光耦合进板条的尺寸较小,交叠效率要比理论计算值低,导致转换效率与理论值相比提前达到极限值;2)板条内部的热累积限制了放大器的提取效率。通过以上分析可以得出,对于表层增益

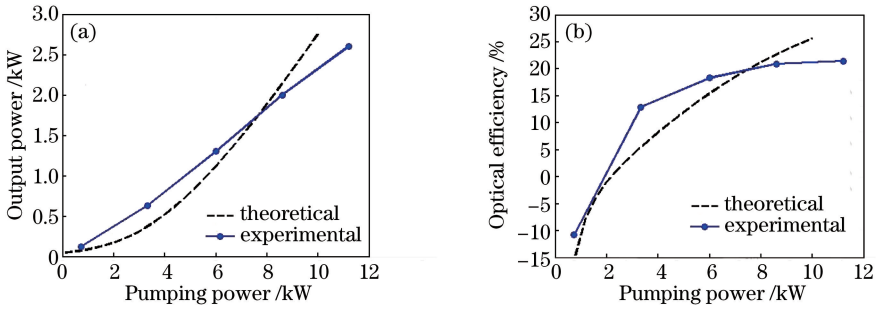


图 4 双程放大激光(a)输出功率曲线及(b)光-光转换效率曲线

Fig. 4 (a) Output power curves and (b) optical efficiency curves of double-pass amplifying

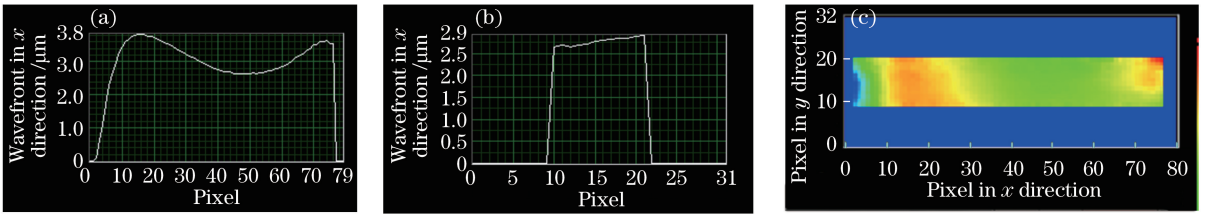


图 5 Yb:YAG 表层增益板条的透射波前。(a) x 方向的波前分布;(b) y 方向的波前分布;(c)二维波前分布

Fig. 5 Transmission wavefront of Yb:YAG surface gain slab. (a) Wavefront in x direction;
(b) wavefront in y direction; (c) wavefront of two-dimension

板条激光放大器,高光束交叠效率以及高效的热管理技术是十分必要的。

5 结 论

介绍了表层增益板条的结构,设计并初步开展了 Yb:YAG 表层增益板条激光放大器的研究。在室温下,获得了 1030 nm 的激光输出,在单模光纤种子源输出功率为 200 W,双端抽运总功率为 11.2 kW 的条件下,单、双程放大的输出功率分别为 1.6 kW 和 2.6 kW,光-光转换效率分别为 12.8% 和 21.4%。对透射波前进行测试后可知,Yb:YAG 表层增益板条具有作为高功率固体激光器增益介质的潜力。

实验结果表明:表层增益结构板条有望获得更高功率、更效率的激光输出。下一步可以在多级放大、谐振腔等方面进行实验研究,以进一步提高输出功率和效率,获得优良的光束质量。

参 考 文 献

[1] Rutherford T S, Tulloch W M, Gustafson E K, *et al.* Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 205-219.
[2] Zhou S H, Zhao H, Tang X J. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.

周寿桓, 赵鸿, 唐晓军. 高平均功率全固态激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605- 1618.
[3] Goodno G D, Palese S, Harkenrider J, *et al.* Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization [J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1672-1674.
[4] Marmo J, Injeyan H. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman [C]. Conference on Fiber Lasers VI - Technology, Systems, and Applications, 2009, 7195: 719507.
[5] Gao Q S, Hu H, Pei Z P, *et al.* Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0202001.
高清松, 胡浩, 裴正平, 等. 10 kW 级固体板条激光放大器设计与实验研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202001.
[6] Lei J, Cao L Q, Lü W Q, *et al.* Progress on packaging technique of Nd:YAG slab gain medium [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(9): 091002.
雷军, 曹礼强, 吕文强, 等. Nd:YAG 板条激光增益介质封装技术研究进展 [J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(9): 091002.
[7] Li M, Hu H, Gao Q S, *et al.* Dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab laser with high power [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 514003.
李密, 胡浩, 高清松, 等. 高功率双浓度掺杂的 Nd:

- YAG 复合陶瓷板条激光器[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 514003.
- [8] Li M, Zhou T J, Xu L, *et al.* Theoretical design and experimental research on high power Yb : YAG ceramic slab laser amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0114001.
李密, 周唐建, 徐浏, 等. 高功率 Yb:YAG 陶瓷板条激光放大器的理论设计与实验研究[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0114001.
- [9] Tang X J, Zhou S H, Du T, *et al.* Gain medium plate bar with sandwich structure and its making method: CN1012420071A[P]. 2008-08-13.
唐晓军, 周寿桓, 杜涛. 三明治结构增益介质板条及其制备方法: CN1012422071A[P]. 2008-08-13.
- [10] Liu Y, Tang X J, Wang Z, *et al.* Laser diode end pumped Nd : YAG surface gain slab lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1001004.
刘洋, 唐晓军, 王喆, 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YAG 表层增益板条激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1001004.