

端抽运 Nd:YAG 板条激光器的退偏特性及偏振控制

吴振海, 徐 浏, 王君涛, 汪 丹*, 周唐建, 胡 浩

中国工程物理研究院应用电子学研究所高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 研究了高功率端抽运 Nd:YAG 板条激光器的退偏特性。使用高功率偏振片和 90°石英旋光片, 实现了对高功率板条激光器输出激光的偏振状态控制和退偏补偿, 有效提升了激光器线偏振光输出功率, 改善了线偏振光近场光强分布的均匀性。实验结果表明, 通过优化偏振补偿, 输出线偏振激光功率由 8.7 kW 提升至 9.6 kW, 退偏率由 30.8% 降至 3.1%。

关键词 激光技术; 板条激光器; Nd:YAG; 退偏补偿; 偏振控制

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0114001

Depolarization Feature and Polarization Control in End-Pumped Nd:YAG Slab Lasers

Wu Zhenhai, Xu Liu, Wang Juntao, Wang Dan, Zhou Tangjian, Hu Hao

Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Institute of Applied Electronics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The depolarization feature in high power, end-pumped Nd:YAG slab lasers is studied. The polarization control and depolarization compensation in high power slab laser output are realized with the usage of high power polarizer and 90° quartz rotator, which effectively improves the polarized output power and the uniformity of the near-field light intensity distribution. The experimental results indicate that, via the optimization of depolarization compensation, the output power of linearly polarized laser is increased from 8.7 kW to 9.6 kW, and the depolarization rate is decreased from 30.8% to 3.1%.

Key words laser technique; slab laser; Nd:YAG; depolarization compensation; polarization control

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.3530; 140.3580

1 引 言

二极管抽运的固体激光器(DPL)具有功率高、光束质量好、结构紧凑、系统稳定等优点,广泛应用于工业加工、科学研究、国防军事等领域^[1-2]。传导冷却端抽运板条(CCEPS)激光器^[3-4]因抽运光沿板条长度方向传输,可实现低掺杂浓度长程吸收,有效降低板条内部热梯度,减小热致光学畸变。此外,激光在板条中以“之”光路进行传播,所有光线都经过板条厚度方向上的高温和低温区域,补偿了厚度方向上的光学畸变,提升了输出激光的光束质量,降低了退偏率。

刘亮等^[5-6]从理论上研究了 CCEPS 的热致退偏损耗,结果表明,单个板条增益模块构成的 CCEPS 的平均退偏损耗低于 3%。但在高功率抽运条件下,“之”光路难以完全补偿热致双折射效应引起的退偏损耗^[7-8]。此外,板条宽度方向上的边缘效应导致退偏损耗增大,焊接应力局部不均、大面全反射膜层缺陷以及材料缺陷使板条内部应力分布局部不均匀,同样增加了退偏损耗^[9]。

当多个板条增益模块串联使用时,前级退偏损耗被后级放大,降低了激光器线偏振激光输出功率。本文分析了高功率端抽运 Nd:YAG 板条增益模块的退偏特性,研究了多模块串联放大下的偏振控制及退偏补偿方法。根据不同模块的退偏特性,使用高功率偏振片和 90°石英旋光片进行退偏光滤除和退偏

收稿日期: 2016-05-13; 收到修改稿日期: 2016-08-25

作者简介: 吴振海(1990—),男,硕士,主要从事固体激光技术及应用方面的研究。E-mail: zhenhai@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: 20930103@zju.edu.cn

补偿。实验结果表明,通过优化偏振补偿方式,激光器线偏振输出功率由 8.7 kW 提升至 9.6 kW,退偏率由 30.8% 降至 3.1%。

2 端抽运板条增益模块退偏特性研究

理论模拟表明,均匀散热下的高功率抽运 CCEPS 激光器不能完全消除退偏损耗^[10]。板条键合区附近是晶体内部温度梯度极大值和应力集中区域,由于边缘效应,应力极大值出现在键合区宽度方向的边缘处。该应力导致介质折射率分布发生变化,引发了折射率椭球的旋转,产生了双折射效应。当入射线偏振光通过该区域时,强烈的热致双折射效应使其偏振状态发生变化,从而产生严重的退偏损耗。

为了研究板条增益介质的退偏特性,搭建了图 1 所示的测试装置。被测板条增益介质为键合的 Nd:YAG 晶体,端面经 45° 切割并镀有 1064 nm 增透膜和 808 nm 高反膜。10 kW 激光二极管阵列(LDA)抽运光经晶体端面全反射进入晶体内部,分别利用不同的激光器发出的光以不同的通光角度在晶体中以“之”方式传输来进行能量提取和偏振测试。

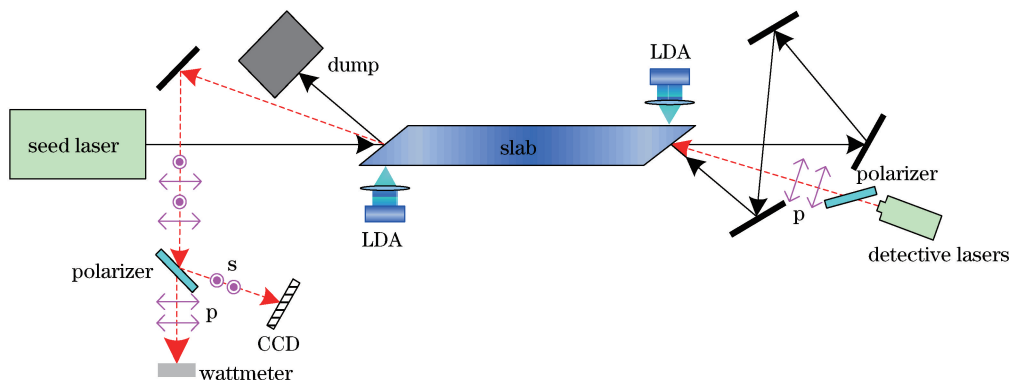


图 1 板条增益介质退偏特性测试装置

Fig. 1 Setup for testing depolarization feature of slab gain medium

图 1 中实线为被测板条双程提取光路,虚线为偏振测试光路,p、s 分别为 p、s 偏振光。中心波长为 1064 nm、功率为 3 kW 的窄线宽激光先后两次射入被测板条进行双程放大,从而实现板条内能量的饱和和提取^[11]。同时使用与板条口径匹配的低功率激光,以 p 偏振光作为探测光(功率约为 1 W)入射被测板条。输出激光经 4f 成像系统传递至偏振片,热致退偏光被偏振片分离,使用电荷耦合器件(CCD)测试退偏光的强度分布。

对 4 个不同的板条增益模块进行测试,其相对退偏强度分布测试结果如图 2 所示,其中矩形框内为板条端面在 CCD 中的光斑形态。图 2(a)表明,板条增益介质退偏主要位于宽度方向上的边缘处,这与理论预测结果基本相同,主要是板条增益介质键合区极大的热致应力及宽度方向上的边缘效应造成的。

由图 2(b)~(d)可知,在相同抽运及能量提取状态下,板条 III、IV 和 I 的退偏区域相似,均主要集中在板条介质的上下边缘。板条 I 的退偏区域较大且向中间延伸,可能是该模块冷却器散热不佳导致。三个板条增益模块的退偏区域部分重合,可以通过模块间的相互补偿来降低退偏损耗^[12]。板条 II 的退偏区域比较分散,可能是由于焊接或镀膜缺陷导致了板条晶体内部应力分布局部不均匀。该原因造成的退偏分布没有明显规律,难以通过相互补偿方法来降低退偏损耗,但可以使用高功率偏振片将其滤除,消除前级退偏光造成的后级放大过程中的能量消耗。

为研究上述 4 个板条增益模块串接使用下的退偏特性,设计并搭建了图 3 所示的光学系统,其中①~⑤为偏振片或旋光片放置的位置。该系统的构型为主振荡功率放大(MOPA)结构。以功率 500 W、线偏振(偏振度大于 97%)、窄线宽(波长 1064.45 nm,线宽小于 0.3 nm)的光纤激光器输出光作为种子激光。为提高注入光线偏振度,同时避免光纤激光器被系统回光干扰,光路中加入法拉第隔离器(FR)和偏振片。种子激光经扩束整形后近似平行光入射至板条增益模块,偏振态为 p 偏振。为实现板条增益模块内储能的充分提取,种子激光首先在板条 I、II 中进行双通放大,然后在板条 III、IV 中进行单通放大。具体光路为种子激光

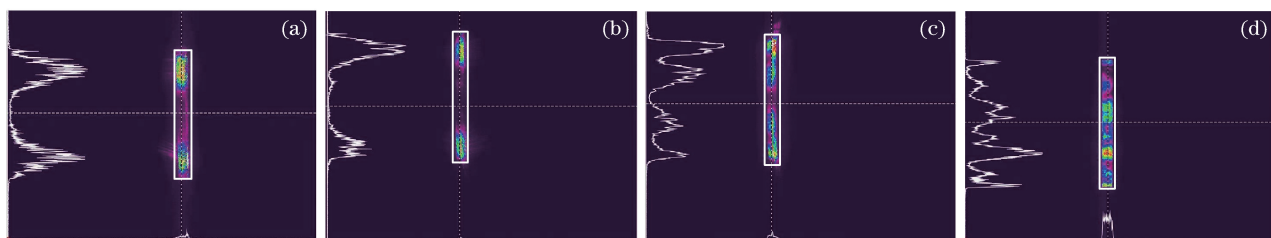


图 2 不同板条增益模块的相对退偏强度分布。(a) 板条 III; (b) 板条 IV; (c) 板条 I; (d) 板条 II

Fig. 2 Relative depolarization intensity distributions under different slab gain modules.

(a) Slab III; (b) slab IV; (c) slab I; (d) slab II

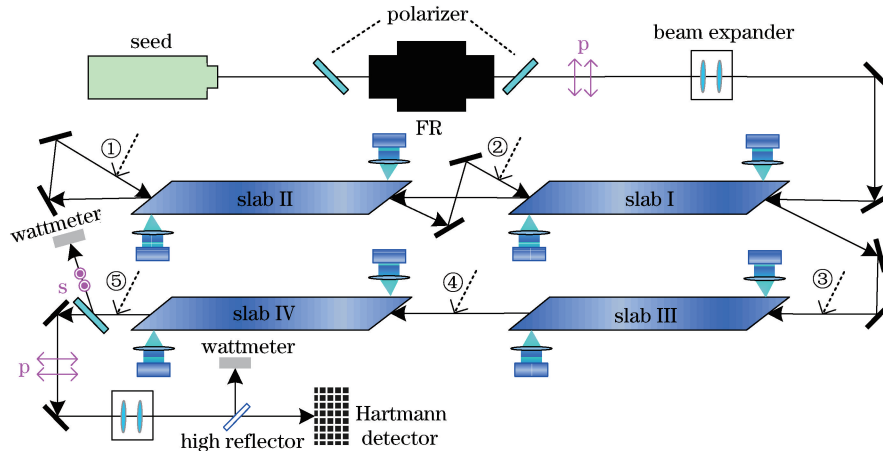


图 3 退偏控制验证实验系统装置

Fig. 3 Experimental setup for testing depolarization control

依次通过板条 I、II 进行第一、二通次放大,然后通过反射镜折返光路,再依次进入板条 II、I 进行第三、四通放大,最后依次通过板条 III、IV 进行第五、六通次放大。各通次间采用 4f 像传递系统,使激光在板条中近似平行光传输,减小激光传输过程中的衍射损耗。

输出激光通过高功率偏振片以分离 s 退偏光,测得 s 退偏光功率为 3.88 kW, p 偏振光功率为 8.7 kW,退偏率为 30.8%。经 x、y 方向扩束整形后, p 偏振光被哈特曼探测器接收,得到输出线偏振激光的近场分布如图 4(a)所示,其中椭圆标出的暗区为输出激光中退偏较大的区域。由图可以看出,线偏振激光的近场光斑多处退偏严重,光强分布均匀性较差。这表明未作退偏控制的板条增益模块串联使用时,板条介质内部的退偏损耗不仅导致线偏振输出功率降低,退偏率升高,还严重影响了线偏振激光的近场强度分布,增加了后续进行的变形镜波前主动校正的难度。图 4(b)为输出线偏振激光的波前分布,其均方根为 0.2874,光束质量为 3.46。

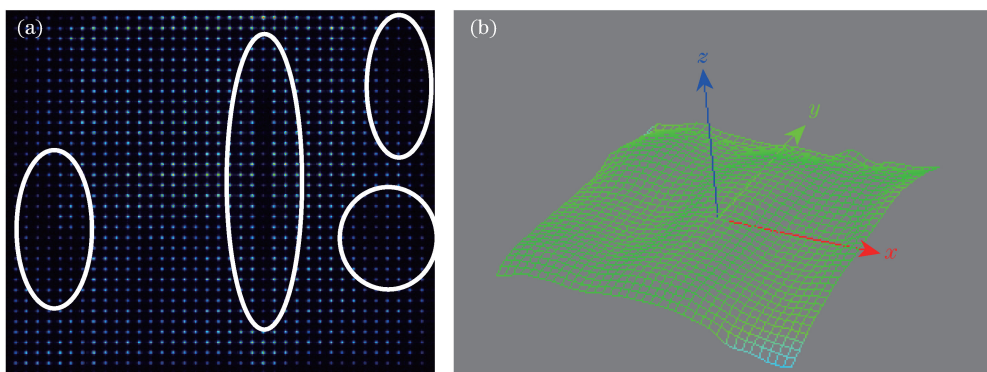


图 4 输出线偏振激光的(a)近场分布和(b)波前分布

Fig. 4 (a) Near-field distribution and (b) wavefront distribution of linearly polarized laser output

3 多模块串接放大下的偏振损耗控制与补偿

由图 2 可知,板条 I、II 的退偏区域比较分散,强度分布不规律,难以通过偏振补偿措施来减小退偏损耗。为防止板条 I、II 产生的退偏光被后续板条增益介质放大,提高后续板条增益介质反转粒子数的有效利用率,这里使用了高功率偏振片将该部分退偏光滤除。设计了两组实验:A 组,在第三通放大前(图 3 中位置①处)加入偏振片,滤除前两通放大产生的退偏光;B 组,在 A 组基础上,再在第五通放大前(图 3 中位置③处)加入偏振片,滤除第三、四通产生的退偏光,实验结果如表 1 所示。

表 1 A、B 两组实验结果

Table 1 Experimental results from experiments A and B

Experiment	Depolarization rate /%	Polarized power /kW
A	26.9	8.76
B	13.8	8.87

A 组实验线偏振光输出功率为 8.76 kW,输出激光退偏率为 26.9%。相较于无偏振片情况,线偏振输出功率变化不大,其原因可能是前两通的放大功率较低,产生的退偏光较少,对后续放大影响小。B 组实验线偏振光输出功率为 8.87 kW,输出线偏振激光的近场分布如图 5 所示。由图可见,退偏严重区域减少,线偏振光的光强分布较均匀,退偏率由未作退偏控制的板条增益模块串联使用时的 30.8%降至 13.8%,线偏振光输出功率提升了 1.9%。这表明高功率偏振片的加入减小了前级退偏光对后级板条增益模块放大的影响,改善了输出线偏振光的光强分布均匀性。

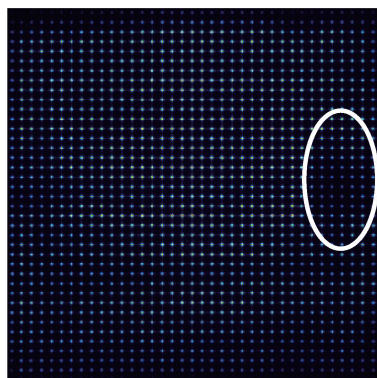


图 5 B 组实验输出线偏振激光的近场分布

Fig. 5 Near-field distribution of linearly polarized laser output in experiment B

由图 2 可知,板条 III、IV 的退偏区域集中在板条宽度方向的边缘处,且两个板条增益模块的退偏区域部分重合。因此考虑使用 90°石英旋光片在两个板条增益模块之间进行退偏补偿,减小退偏损耗,提高线偏振输出功率。C 组实验是在 B 组实验基础上,在板条 III、IV 之间(图 3 中位置④处)加入一片石英旋光片。激光通过板条 III 后,由于退偏区域的存在,激光中 o 光和 e 光的相位延迟不同,导致输出激光偏振态发生变化。经过石英旋光片后,o 光和 e 光的偏振方向互换。当激光入射进板条 IV 时,原板条 III 中的 o 光和 e 光分别以 e 光和 o 光在板条 IV 中传输,板条 IV 退偏区域和板条 III 的部分重合补偿了板条 III 中 o 光和 e 光相位延迟的差异。输出激光再经石英旋光片(图 3 中位置⑤处)后恢复原偏振态,从而实现了板条 III、IV 的退偏补偿。测得不同板条增益模块抽运时输出激光中退偏激光的比例,以及最终输出激光的退偏率和线偏振输出功率,测试结果如表 2 所示。

表 2 B、C 两组实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results between experiment B and C

Experiment	Depolarization rate with different slabs pumped /%			Polarized output power /kW
	I, II	I, II, III	I, II, III, IV	
B	0.6	12.2	13.8	8.87
C	1.5	12.8	3.1	9.60

在 C 组实验中,当只有板条 I、II 抽运时,由于位置③处高功率偏振片的选偏作用,理论上注入板条 III 的激光为纯 p 偏振光,因此测得输出激光的退偏率仅为 1.5%。再抽运板条 III 后,输出激光退偏率上升至 12.8%,与 B 组实验数据相符。同时抽运 4 个板条增益模块,在未加入石英旋光片的 B 组实验中,输出激光退偏率上升至 13.8%,说明板条 IV 产生了退偏损耗。而在加入石英旋光片的 C 组实验中,输出激光退偏率降至 3.1%,线偏振光输出功率提升至 9.6 kW,这表明石英旋光片使板条 IV 较好地补偿了板条 III 的退偏损耗。图 6(a)为补偿后的输出线偏振激光的近场分布,其分布均匀,无明显退偏严重区域。图 6(b)为输出线偏振激光的波前分布,均方根为 0.2588,光束质量为 3.53。与图 4(b)进行比较发现,补偿前后波前均方根、光束质量差异很小,在测量误差范围之内,说明加入偏振片和旋光片对波前及光束质量的影响很小。在图 3 所示系统中,影响激光光束质量的主要因素是板条内部的热分布,偏振片和旋光片对板条内部的热分布影响很小,因此对光束质量的影响也很小。

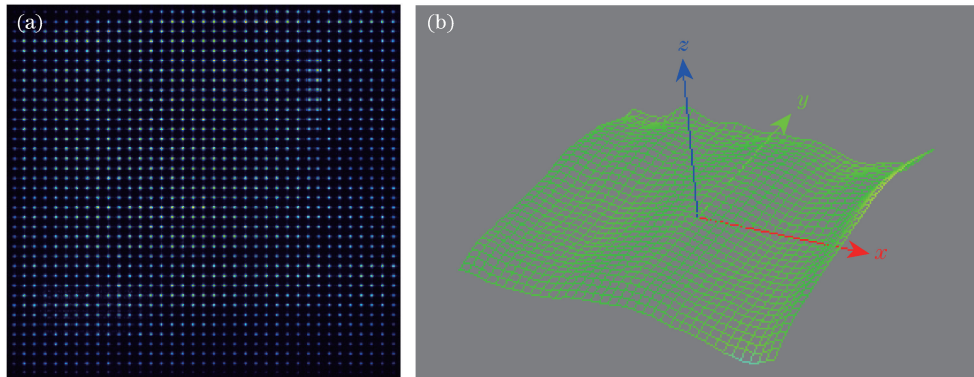


图 6 C 组实验输出线偏振激光的(a)近场分布和(b)波前分布

Fig. 6 (a) Near-field distribution and (b) wavefront distribution of linearly polarized laser output in experiment C

4 结 论

研究了高功率端抽运 Nd:YAG 板条激光器中多个板条串联使用时的退偏特性,针对不同退偏特性的板条增益模块,使用高功率偏振片和 90° 石英旋光片进行退偏光滤除和退偏补偿,提高了线偏振光的输出功率,改善了线偏振光近场光斑分布的均匀性。

参 考 文 献

- [1] Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhengping, *et al.* Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW[J]. Chinese J 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.
- [2] Shang Jianli, Yu Yi, An Xiangchao, *et al.* Influence and compensation of intra-cavity defocusing in unstable resonator Nd:YAG thin-disk laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102005.
尚建力, 于 益, 安向超, 等. 非稳腔 Nd:YAG 薄片激光器腔内离焦的影响和补偿[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102005.
- [3] Injeyan H, Hoefler C S. End pumped zig-zag slab laser gain medium: US6094297[P]. 2000-07-25.
- [4] Wang Juntao, Wang Xiaojun, Zhou Tangjian, *et al.* Design of end-pumped double cladding Nd:YAG planar waveguide laser amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102009.
王君涛, 王小军, 周唐建, 等. 端面抽运双包层 Nd:YAG 平面波导激光放大器设计[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102009.
- [5] Liu L, Guo S F, Lu Q S, *et al.* Stress-induced depolarization loss in a YAG zigzag slab[J]. Optics and Laser Technology, 2011, 43(3): 622-629.
- [6] Tang B, Zhou T J, Wang D, *et al.* Optical distortions in end-pumped zigzag slab lasers[J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 2693-2702.
- [7] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, *et al.* Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1247-1249.

- [8] Ostermeyer M, Mudge D, Veitch P J, *et al.* Thermally induced birefringence in Nd:YAG slab lasers[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(21): 5368-5376.
- [9] Wang Dan, Zhou Tangjian, Li Mi, *et al.* Measurement system of characteristic of end-pumped slab amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10): 1002004.
汪 丹, 周唐建, 李 密, 等. 端抽运板条放大器特性参数测试系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1002004.
- [10] Liu Liang. Research on thermal effect in conduction cooled end-pumped slab amplifier [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
刘 亮. 传导冷却端面抽运板条放大器热效应研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- [11] Wang Dan, Zhou Tangjian, Wang Juntao, *et al.* Hundreds Watts Nd:YAG slab laser amplifier with high beam quality [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002001.
汪 丹, 周唐建, 王君涛, 等. 百瓦级高光束质量 Nd:YAG 板条激光放大器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002001.
- [12] Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen. Thermal-induced birefringence-compensated laser system with two Nd:YAG rods[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(11): 1483-1487.
刘 崇, 葛剑虹, 项 震. 双棒串接补偿热致双折射效应激光谐振腔[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1483-1487.