

Nd:YAG 板条激光器边缘畸变抑制

李 密^{1,2,3} 胡 浩^{1,2} 唐 淳^{1,2} 雷 军^{1,2} 石 勇^{1,2} 陈小明^{1,2}
周唐建^{1,2} 李建民^{1,2} 吕文强^{1,2} 赵 娜^{1,2} 邬映臣^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

³中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 分析了传导冷却与端面抽运的 Nd:YAG 板条激光器边缘畸变的形成原因, 并进行了抑制边缘畸变的实验研究。根据实验参数进行了数值模拟, 模拟结果与实验结果吻合。以液态环氧胶为导热材料对激光器板条侧面进行实时冷却, 可增加板条内部荧光从侧面逸出的能量比例, 从而减小放大自发辐射, 边缘畸变量峰谷值约减小 50%。该方法有利于提高板条激光器的光束质量和输出功率。

关键词 激光技术; 板条激光器; 透射波前; 边缘畸变; 传导冷却

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1214003

Edge Distortion Suppressing in Nd:YAG Slab Laser

Li Mi^{1,2,3} Hu Hao^{1,2} Tang Chun^{1,2} Lei Jun^{1,2} Shi Yong^{1,2} Chen Xiaoming^{1,2}
Zhou Tangjian^{1,2} Li Jianmin^{1,2} Lü Wenqiang^{1,2} Zhao Na^{1,2} Wu Yingchen^{1,2}

¹*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

²*Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

³*Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*

Abstract The causation of edge distortion in conduction-cooled and end-pumped Nd:YAG slab laser is analyzed and the experiment to suppress the slab edge distortion is conducted. The numerical simulation is done based on the experimental paramters indicating the result is consistent with the experimental one. The usage of the liquid epoxy-mucilage as heat conduction material to make a real-time cooling of the laser slab side can increase the energy ratio of fluorescence escaping from the laser slab side, which results in the reduction of the amplified spontaneous emission and the edge distortion peak-vallege value by 50%. This method possesses the advantage of enhancing the slab laser beam quality and output power.

Key words laser technique; slab laser; transmission wavefront; edge distortion; conduction cooling

OCIS codes 140.2010; 140.3410; 140.3460; 140.3480; 140.3530; 140.3580

1 引 言

主振荡功率放大-二极管抽运固态激光器(MOPA-DPL)是实现高平均功率激光输出的主要技术途径之一, 基于板条 MOPA-DPL 的 100 kW 高平均功率激光输出已有报道^[1-2]。传导冷却、端面抽运的激光板条单元是该技术的核心器件。目前已有的激光板条边缘部分的透射波前通常存在较大畸变, 影响了激光板条的实际可用口径、输出功率和光学效率, 进而影响了输出光束的质量^[3-4]。本文分析了造成激光输出边缘畸变过大的原因, 进行了板条边缘畸变抑制技术的实验研究和数值模拟, 研究结果为减小板条边缘畸变、增大激光板条可用口径提供了一定的参考。

收稿日期: 2016-06-13; **收到修改稿日期:** 2016-08-03

作者简介: 李 密(1981—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事固体激光方面的研究。E-mail: limi@tsinghua.org.cn

导师简介: 唐 淳(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光方面的研究。E-mail: tangchun21@gmail.com

2 板条边缘畸变的成因分析

为了实现有效散热,板条的两个大面被焊接在铜热沉上。为抑制板条内部的放大自发辐射(ASE),防止寄生振荡出现,板条的两个侧面通常处理为粗糙面。二极管发出的抽运光经扩束耦合整形系统后在宽度方向上的发散角约为 3° 。进入板条后,抽运光束逐渐发散并入射到板条的侧面。入射到板条侧面的抽运光部分被吸收、部分逸出或反射回板条内被 Nd:YAG 再次吸收。Nd³⁺ 吸收能量后变为激发态,激发态 Nd³⁺ 自发辐射的荧光再次入射到板条侧面,被侧面吸收,如图 1 所示,其中 x 方向为板条的厚度方向, y 方向为板条的宽度方向, z 方向为板条的长度方向,坐标原点为板条左下端的尖角,AB 表示板条的上侧面,DC 表示板条的下侧面。板条的“之”字形光路增大了荧光的光程,在高增益条件下会出现很强的 ASE^[5],从而导致板条边缘出现较大的温度梯度和严重的波前畸变。

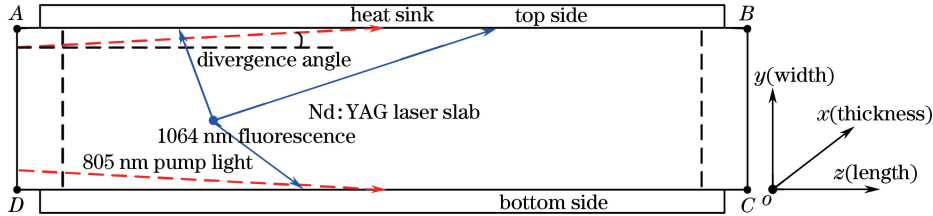


图 1 板条侧边吸收抽运光和荧光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pump light and fluorescence absorbed at laser slab side

在抽运光进入板条前加设限宽光阑,通过调节光阑宽度来改变入射到板条内部的抽运光宽度。图 2 为未提取条件下(无种子光注入或者谐振腔振荡输出),不同抽运光宽度(抽运光强相同)对应的透射波前曲线。由图 2 可以看到,未提取条件下的透射波前边缘部分有明显畸变。在提取和不提取两种情况下(抽运功率相同),板条透射波前如图 3 所示。由图 3 可知,在提取条件下,由于 ASE 得到有效抑制,入射到板条边缘的荧光相应减少,因此板条边缘的温度梯度减小。充分提取后,靠近板条边缘 2 mm 区域内的透射波前畸变量峰谷(PV)值由未提取时的 10 μm 以上减少到 8 μm 以下。

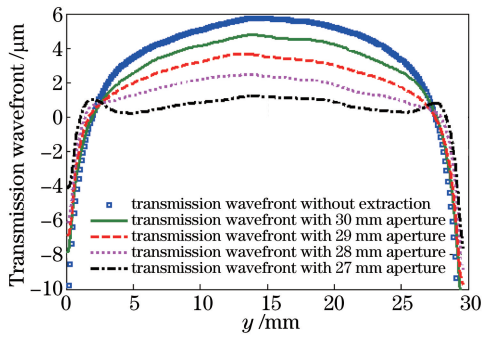


图 2 未提取条件下,不同抽运宽度对应的透射波前

Fig. 2 Transmission wavefront versus pumping width under the condition of without extraction

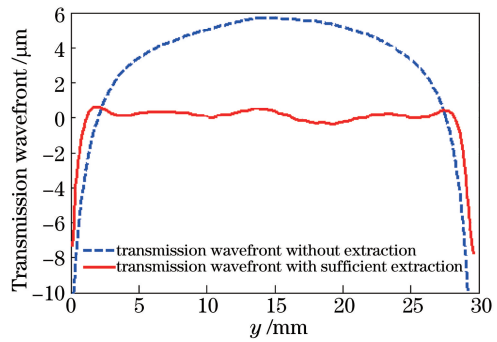


图 3 提取和不提取情况下的透射波前

Fig. 3 Transmission wavefronts under the conditions of with and without extraction

理论分析和实验结果均表明,板条侧面对抽运光和 ASE 的吸收是导致激光板条透射波前边缘畸变过大的主要原因。因此,可以通过减少板条侧面对抽运光、ASE 的吸收或对板条边缘进行实时冷却来抑制边缘畸变。本文选择对侧面进行实时冷却的方式来抑制边缘畸变。

3 板条边缘畸变的抑制

忽略端面效应和热应力导致的波前畸变,只考虑热梯度导致的透射波前畸变,通过板条宽度方向的透射波前曲线推导出宽度方向上的温度分布。根据折射率随温度的变化规律,得到板条宽度方向上的光程差为

$$l_{\text{opd}}(y) = \int_0^L \frac{dn}{dT} \cdot [T(y, z) - T_{\text{ave}}] \cdot \frac{dz}{\sin \beta}, \quad (1)$$

式中 dn/dT 为 Nd:YAG 折射率随温度的变化系数, L 为板条长度, $T(y, z)$ 为板条上温度分布, T_{ave} 为板条的平均温度, β 为激光束在板条大面上的反射角。“之”字形光路导致激光的传输路径长度大于板条的长度, 如图 4 所示, 因此计算光程差时需要乘以系数 $1/\sin \beta$ 。实验中 Hartman 波前传感器测得的波面是等相位面, 因此板条透射波面上滞后的区域温度较高、超前的区域温度较低。

对于总长度为 L 、厚度为 t 的板条, 激光束不发生劈裂时大面反射角 β 满足^[6]

$$L - t = 2Nt \tan \beta, \tag{2}$$

式中 N 为激光束在板条内传输的周期数(光束在大面反射次数为 $2N$)。

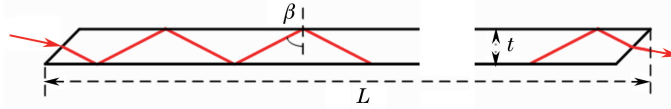


图 4 激光束在板条中的传输路径

Fig. 4 Transmission route of laser beam in slab

已知激光板条双端对称抽运时, 单端注入功率密度为 $I_0 = 6.4 \text{ kW/cm}^2$, 板条掺杂区吸收系数为 $\alpha = 0.25 \text{ /cm}$, 掺杂区长度 $L_0 = 12 \text{ cm}$, 长度方向上的抽运功率密度分布为

$$I(z) = I_0 \{ \exp(-\alpha z) + \exp[-\alpha(L_0 - z)] \}. \tag{3}$$

已知 Nd:YAG 板条在充分提取条件下, 其吸收的抽运功率约有 32% 转变为热量^[7], 由此可以计算出板条掺杂区的热沉积功率密度分布为

$$q(z) = \alpha \eta I_0 \{ \exp(-\alpha z) + \exp[-\alpha(L_0 - z)] \}, \tag{4}$$

式中 η 为 Nd:YAG 在充分提取条件下的热比例。根据(4)式, 可以计算出板条掺杂区的最大热沉积功率密度为 540 W/cm^3 , 最小热沉积功率密度为 230 W/cm^3 , 平均热沉积功率密度为 325 W/cm^3 。已知铜热沉的冷却水温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 热沉与板条大面的换热系数约为 $2.5 \text{ W/(cm}^2 \cdot \text{K)}$ 。基于以上参数, 利用 ANSYS 软件计算得到的 Nd:YAG 板条表面的温度分布如图 5 所示。从图 5 可知, 板条两个键合区的温度最高, 键合区侧面的最高温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

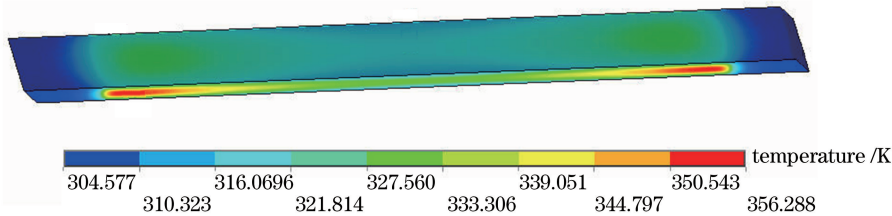


图 5 激光板条温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of laser slab

为了对板条侧面进行实时冷却, 设计了一种长 65 mm 、厚 2.2 mm 的通水冷却条, 其与两个热沉之间保持 0.15 mm 的缝隙以实现热隔离。冷却条内部通水区域为 $1.2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 其中 1.2 mm 为平行于板条厚度方向的尺寸, 2 mm 为平行于板条宽度方向的尺寸。通水冷却条的底面厚度为 1 mm , 冷却水流量为 0.4 L/min , 冷却水温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验中使用了两个通水冷却条, 由于键合区温度最高, 因此冷却水从靠近键合区的进水口进入、从中间的出水口流出以获得最佳的冷却效果。

通水冷却条与板条上侧面直接接触冷却后, 透射波前如图 6 所示, 板条边缘 2 mm 区域内的畸变量 PV 值由 $10 \text{ } \mu\text{m}$ 减小到 $7 \text{ } \mu\text{m}$ 。该冷却方式主要的影响区域为板条上边缘 2 mm 区域范围内, 对板条的下半部分尤其是近下边缘 5 mm 区域内几乎无影响。

以液态环氧胶作为导热介质对板条上侧面实时冷却后, 透射波前如图 7 所示, 板条上边缘 2 mm 范围内的波前畸变 PV 值由 $10 \text{ } \mu\text{m}$ 减小到 $4.5 \text{ } \mu\text{m}$, 下边缘 2 mm 内的波前畸变 PV 值由 $8.5 \text{ } \mu\text{m}$ 减小到了 $5.4 \text{ } \mu\text{m}$ 。相比于直接接触冷却方式, 此方法能更好地减小边缘畸变。这是由于环氧胶增大了板条内荧光从侧面逸出的能量比例^[8], 抑制了 ASE, 降低了下边缘的温度。

以固态环氧胶作为导热介质对板条上侧面实时冷却后, 透射波前如图 8 所示, 板条上边缘 2 mm 内的畸

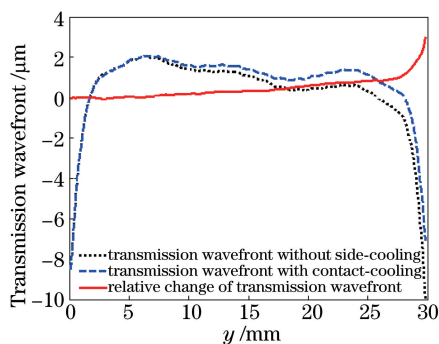


图 6 直接接触冷却对板条透射波前的影响
Fig. 6 Effect of directly-contact-cooling on slab laser transmission wavefront

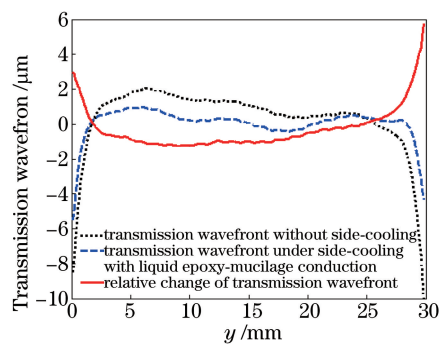


图 7 液态环氧胶导热对板条透射波前的影响
Fig. 7 Effect of liquid epoxy-mucilage conduction on slab laser transmission wavefront

变 PV 值由 $10 \mu\text{m}$ 减小到 $6.2 \mu\text{m}$, 下边缘 2 mm 内的畸变 PV 值由 $8.5 \mu\text{m}$ 减小到 $5.5 \mu\text{m}$ 。对比图 6 可知, 固态和液态环氧胶的导光效果基本一致。不同的是, 固态环氧胶增大了板条侧面与通水冷却条之间的热阻, 导致板条侧面实时冷却效果变差。

上述三个冷却实验结果表明: 环氧胶可增大荧光从板条侧面逸出的能量比例; 以液态环氧胶作为导热介质对板条侧面进行实时冷却, 可减小约 50% 的边缘畸变量 PV 值, 改善了板条中间的波前分布和光束质量, 增大了板条可用口径。

实验用环氧胶的折射率为 1.52, 因而 Nd:YAG 与环氧胶之间的全反射临界角为 56° , Nd:YAG 与空气之间的全反射临界角为 33° 。设定直接接触冷却的换热系数为 $0.12 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 、固态环氧胶导热的换热系数为 $0.08 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 、液态环氧胶导热的换热系数为 $0.16 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$, 铜热沉的换热系数为 $2.5 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$, 抽运光发散角为 3° 且其强度沿板条长度方向呈指数衰减。

已知 Nd:YAG 的热导率为 $0.14 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 、比热容为 $590 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, Nd:YAG 板条在提取条件下的光-光转换效率约为 35%, 热比例(吸收的抽运光能量中转换为热量的比值)约为 32%, 荧光比例(吸收的抽运光能量中转换为荧光能量的比值)约为 33%。若辐射到板条侧面的荧光有 10% 转换为热量, 当有环氧胶时荧光透射率提高, 该比例降低到 6%。数值模拟了无环氧胶、液态环氧胶和固态环氧胶导光时激光板条的透射波前, 如图 9 所示。

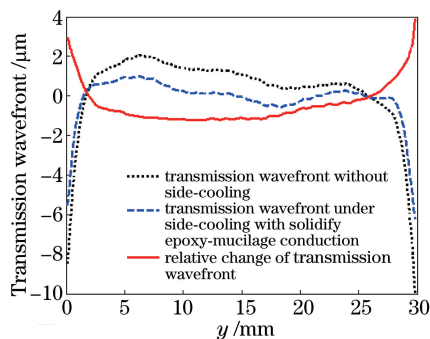


图 8 固态环氧胶导热对板条透射波前的影响
Fig. 8 Effect of solid epoxy-mucilage conduction on slab laser transmission wavefront

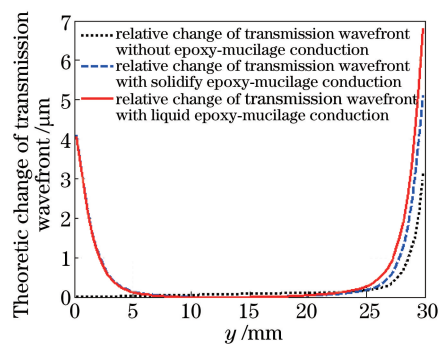


图 9 理论上不同导热方式对透射波前的影响
Fig. 9 Theoretical effects of different heat conduction methods on transmission wavefront

由图 9 可知: 1) 对板条上侧面采取直接接触冷却方式时, 透射波前的变化量主要体现在上侧面附近数毫米宽度范围内, 最大变化量约为 $3 \mu\text{m}$, 而在下侧面附近没有变化, 与实验结果吻合; 2) 采用液态环氧胶导热冷却方式时, 下侧面附近的透射波前变化量为 $4 \mu\text{m}$, 上侧面附近的透射波前变化量更大, 约为 $7 \mu\text{m}$, 与实验结果吻合; 3) 采用固态环氧胶进行导热冷却方式时, 下侧面附近透射波前的变化量同样也为 $4 \mu\text{m}$, 上侧面附近透射波前的变化量小于液态环氧胶导热时的变化量, 约为 $5 \mu\text{m}$, 与实验结果相符。在数值模拟时, 由于未考虑冷却器宽度方向不同位置冷却能力的差异以及抽运光光强在板条宽度方向上的起伏, 因此得到的

透射波前变化曲线较实验测得的数据曲线平整。

4 结 论

对抑制激光板条的边缘畸变进行了理论分析和初步的实验研究。实验结果表明,在单端抽运功率密度为 6.4 kW/cm^2 、充分提取条件下,以液态环氧胶作为导热材料对 30 mm 宽的 Nd:YAG 激光板条侧面进行实时冷却,透射波前边缘畸变量 PV 值减小 50% 左右。该方法有利于增大激光板条的可用尺寸,提高板条激光器的光束质量。

参 考 文 献

- 1 Marmo J, Injeyan H, Komine H, *et al.* Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman [C]. SPIE, 2009, 7195: 719507.
- 2 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.
- 3 Mu Jie, Wang Xiao, Jing Feng, *et al.* Effect of wavefront distortion on coherent beam combination in high power laser facilities[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602010.
母 杰, 王 逍, 景 峰, 等. 高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602010.
- 4 Pan Sunqiang, Zhao Zhigang, Liu Chong, *et al.* Mechanism investigation of beam quality evolution within laser oscillator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111406.
潘孙强, 赵智刚, 刘 崇, 等. 激光振荡器内光束质量演变的机理研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111406.
- 5 Koehner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Chen Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 165-170.
克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 165-170.
- 6 Li Mi, Hu Hao, Li Jianmin, *et al.* Technology research on high power slab laser end-pumped with laser diode arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514004.
李 密, 胡 浩, 李建民, 等. 二极管阵列端面抽运高功率板条激光器技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514004.
- 7 Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1457-1459.
- 8 Sridharan A K, Saraf S, Sinha S, *et al.* Zigzag slabs for solid-state laser amplifiers: Batch fabrication and parasitic oscillation suppression[J]. Applied Optics, 2006, 45(14): 3340-3351.