

高功率板条增益模块在谐振腔内的透射波前特性实验研究

李 密 胡 浩 邬映臣 赵 娜 李建民 杜应磊 雷 军 石 勇

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 开展了高功率板条增益模块在谐振腔内透射波前特性的实验研究,通过改变谐振腔参数完成了不同提取状态下板条增益模块透射波前的测量。实验表明,功率提取状态对板条的透射波前有着明显的影响。在抽运功率为 10.8 kW 时,相对于平凹腔和非对称输出的平平腔,采用双端对称输出的平平腔提取时,板条增益模块的透射波前畸变最小,其波前畸变峰-谷(PV)值小于 $1.5 \mu\text{m}$ 。

关键词 激光器;板条增益模块;透射波前;谐振腔;波前畸变

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0214003

Experimental Research on the Transmission Wave-Front Characteristic of High Power Slab Gain Module in Resonator

Li Mi Hu Hao Wu Yingchen Zhao Na Li Jianmin Du Yinglei

Lei Jun Shi Yong

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Experimental research about the transmission wave-front characteristic of high power slab gain module in resonator is carried out. The measurement of transmission wave-front of slab gain module under different power extraction status is finished through changing the parameters of the resonator. The experiments indicate that the power extraction status influences the transmission wave-front of slab evidently. Compared with the plano-concave resonator and the asymmetric output plano-plano resonator, the transmission wave-front distortion of the slab gain module is the minimal with the symmetrical output plano-plano resonator, the peak-to-valley (PV) value of the wave-front distortion is less than $1.5 \mu\text{m}$ when the pumping power is 10.8 kW.

Key words lasers; slab gain module; transmission wave-front; resonator; wave-front distortion

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

1 引 言

在高平均功率固体激光器的发展过程中,热效应一直是限制激光器功率提高和光束质量改善的重要因素^[1~4]。已有实验结果证明,传导冷却的端面抽运板条增益模块在热管理方面具有明显的优势,可以获得相当高的储能和较小的波前畸变。该类型的板条增益模块既可以用于放大器链路以实现激光功率放大^[5],也可用于谐振腔以实现振荡输出^[6],具有十分广阔的应用前景。为判断板条增益模块性能

的优劣,研究其透射波前特性具有重要意义。

本文开展了高功率板条增益模块在谐振腔内透射波前特性的实验研究,通过改变谐振腔参数完成了不同提取状态下板条增益模块透射波前的测量。实验表明,双端对称输出的功率提取方式可以更好地抑制板条的边缘效应,可获得相对较小的透射波前畸变。实验模拟了激光放大器的提取过程,为放大器链路中板条增益模块的功率提取方式提供了参考。

收稿日期: 2012-07-30; **收到修改稿日期**: 2012-10-10

作者简介: 李 密(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: limi@tsinghua.org.cn

2 谐振腔设计

实验用增益模块中的板条为键合板条:中间为掺杂区,掺杂原子数分数为 0.1%,两端为非掺杂区。板条厚度小于 3 mm,其端面切角为 45°。提取板条增益模块功率的方法主要有两种:1)建立谐振腔以实现激光振荡输出;2)将高光束质量的种子源扩束、再通过板条增益模块以实现功率提取。相对而言,采用谐振腔方式来提取功率更为简便易行,同时也能模拟放大器的功率提取过程。根据板条内部的激光传输规律,要确保激光在板条端面处不发生劈裂,谐振腔光路与探测光路之间不相互影响,选择谐振腔光轴与端面法线的夹角 $\theta=26.3^\circ$ 。

由于板条的厚度小于 3 mm,该方向的菲涅耳数很小,因而衍射损耗较大。激光束经过腔镜反射回板条端面时,由于板条端面的密度有限,相当一部

分激光功率会在端面处损耗并变成热量,从而导致板条端面温度急剧上升、谐振腔输出功率不稳定,极易造成板条端面的损坏。通过对多种光学谐振腔的比较^[7,8],选择了倒像谐振腔:在板条两边正交地放置两个柱透镜 F_1 和 F_2 ,其焦距均为 170 mm。板条端面分别位于两个柱透镜的焦点,腔镜 M_1 和 M_2 分别位于 F_1 和 F_2 的另一焦点附近。光束离开板条端面,依次通过柱透镜-腔镜-柱透镜并返回到板条端面,正好通过一个 $4f$ 成像系统,光束刚好倒立而大小不变,如图 1 所示。这种谐振腔的特点是:激光束各部分光程差关于光轴对称,可以实现稳定的激光输出^[9]。

为测量板条增益模块的透射波前,将 He-Ne 光扩束成直径为 40 mm 的光束并以 42.1° 的入射角按照 Zig-Zag 光路通过板条,再经 $4f$ 成像系统进入

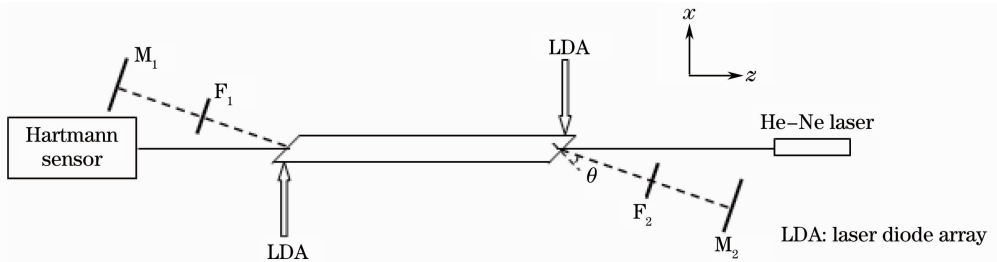


图 1 倒像谐振腔示意图

Fig. 1 Sketch map of image-inverting resonator

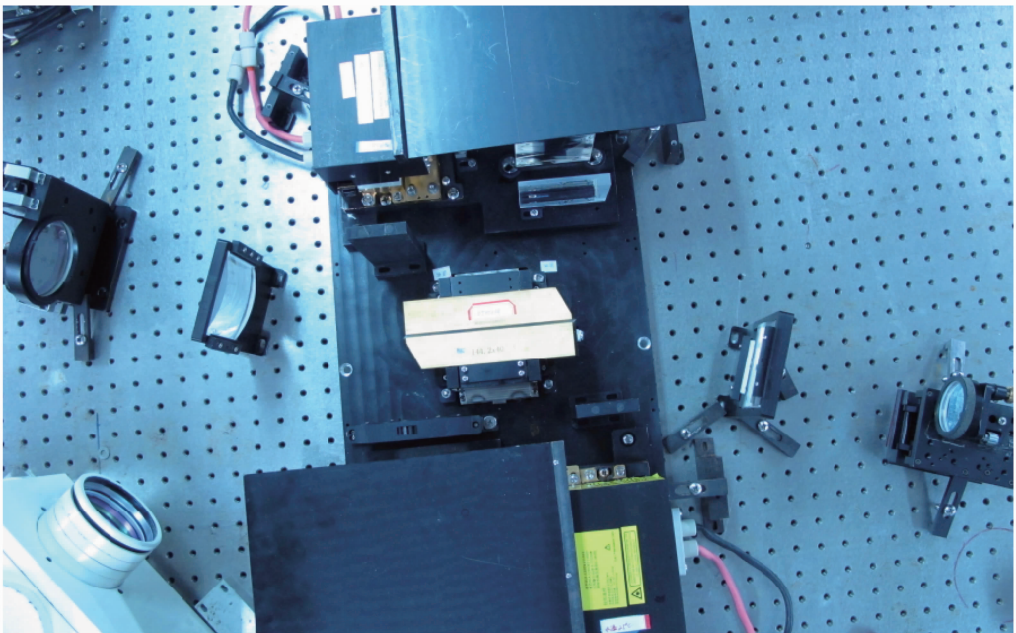


图 2 板条增益模块功率提取实验装置

Fig. 2 Experimental equipment for power extraction on slab gain module

Hartmann 传感器实现透射波前的实时测量。通过改变谐振腔的参数,实现不同功率提取状态下增益模块透射波前的测量。板条增益模块功率提取实验装置如图 2 所示。

表 1 LDA 总抽运功率

Table 1 Total pumping power of LDA

Drive current /A	60	70	80	90	100
Injection power /kW	5.24	6.64	8.05	9.44	10.82

实验中,测得不提取状态下板条增益模块的透射波前(抽运功率 6.64 kW)如图 3 所示,图中 M 为波前相位的最大值, m 为波前相位的最小值, D_{PV} 为

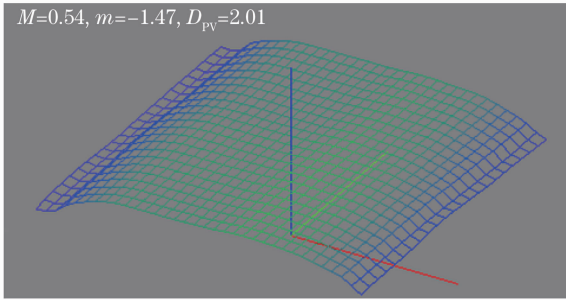


图 3 不提取状态下的透射波前

Fig. 3 Transmission wave-front without power extraction

3 实验结果与分析

实验中,测得板条两端激光二极管阵列(LDA)在不同工作电流下的总抽运功率如表 1 所示。

M 与 m 之差值,下同。

由图 3 可知:不提取时板条的透射波前呈现中间高、边缘低的特点。这是由于板条内部的放大自发辐射(ASE)在板条上、下边缘被吸收而造成的,这种现象可以称为“边缘效应”。

实验中设计了三种不同的功率提取方式,分别如下:1)平凹腔提取;2)非对称输出的平平腔提取;3)对称输出的平平腔提取。

3.1 平凹腔提取

平凹腔凹面镜的曲率半径为 5 m,平面输出镜反射率 $R = 45\%$,在提取时最大工作电流可达 100 A,掺杂区最高温度为 $61\text{ }^\circ\text{C}$ 。不同电流下的激光功率及透射波前畸变的 PV 值如表 2 所示,透射波前如图 4 所示。

表 2 平凹腔的激光功率及透射波前畸变

Table 2 Laser power and transmission wave-front distortion with plano-concave resonator

Drive current /A	60	70	80	90	100
Laser power /W	1296	1832	2308	2840	3240
Distortion PV / μm	0.84	1.05	1.00	1.93	2.64

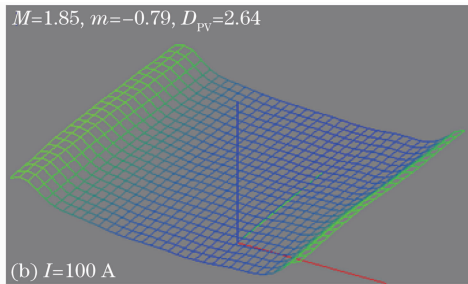
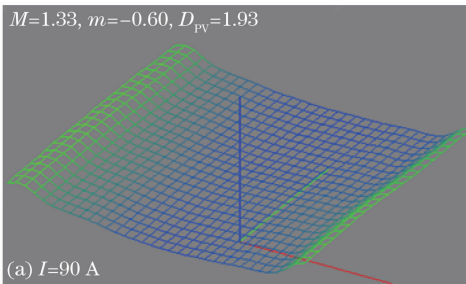


图 4 平凹腔提取状态下的透射波前

Fig. 4 Transmission wave-front under power extraction with plano-concave resonator

3.2 非对称输出的平平腔提取

非对称输出的平平腔输出镜 M_1 和 M_2 的剩余反射率分别为 $R_1 = 45\%$ 、 $R_2 = 60\%$,最大工作电流

可达 100 A,掺杂区最高温度 $77\text{ }^\circ\text{C}$ 。不同电流下的激光功率及透射波前畸变 PV 值如表 3 所示,透射波前如图 5 所示。

表 3 非对称输出的平平腔的激光功率及透射波前畸变

Table 3 Laser power and transmission wave-front distortion under asymmetric output plano-plano resonator

Drive current /A	60	70	80	90	100
Laser power /W	1047	1569	2025	2349	2802
Distortion PV / μm	0.87	0.77	0.87	1.34	1.96

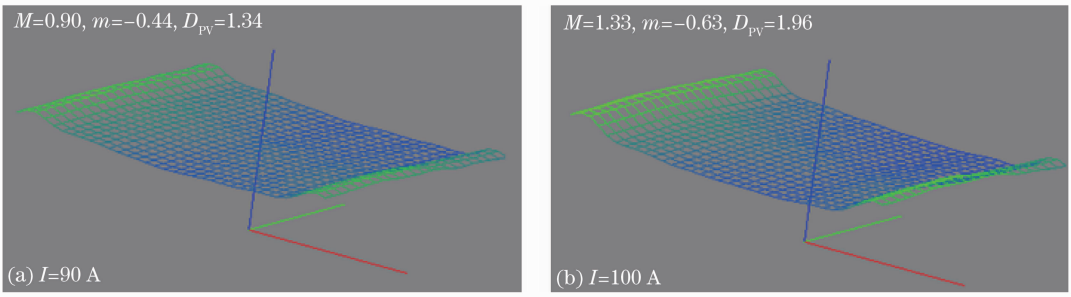


图 5 非对称输出的平平腔提取状态下的透射波前

Fig. 5 Transmission wave-front under power extraction with asymmetric output plano-plano resonator

3.3 对称输出的平平腔提取

对称平平腔的输出镜 M_1 和 M_2 的剩余反射率 $R_1 = R_2 = 45\%$, 在此种情况下工作电流可达 100 A,

掺杂区最高温度为 $71\text{ }^\circ\text{C}$ 。不同电流下的激光功率及透射波前畸变的 PV 值如表 4 所示, 透射波前如图 6 所示。

表 4 对称输出的平平腔的激光功率及透射波前畸变

Table 4 Laser power and transmission wave-front distortion under symmetrical output plano-plano resonator

Drive current /A	60	70	80	90	100
Laser power /W	861	1477	2070	2577	3057
Distortion PV / μm	1.36	1.03	0.83	1.03	1.43

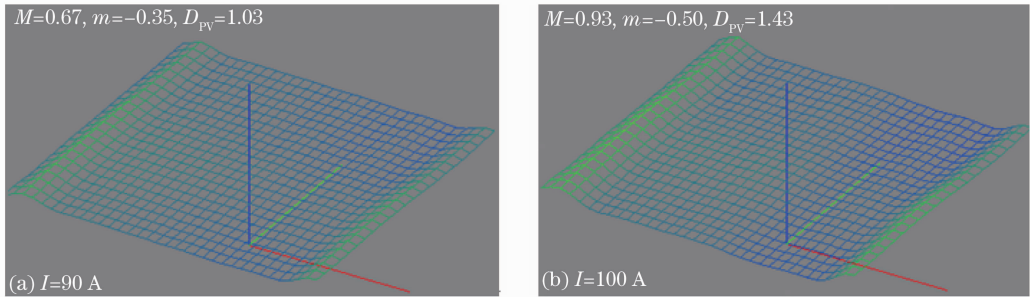


图 6 对称输出的平平腔提取状态下的透射波前

Fig. 6 Transmission wave-front under power extraction with symmetrical output plano-plano resonator

由实验结果可知:

1) 不提取功率时, 板条透射波前呈现中间高、边缘低的特点, 这说明板条边缘的温度比中间高; 提取功率时, 透射波前呈现边缘翘起的特点, 这说明功率提取时板条边缘的温度比中间低, 从而证明了功率提取可以抑制板条内部因 ASE 导致的边缘效应。

2) 抽运功率超过 6.6 kW (工作电流 70 A) 时, 平平腔双端提取时的透射波前畸变 PV 值小于平凹腔提取时的透射波前畸变 PV 值, 即便此时平凹腔输出的激光功率更高。

3) 对于上述两种平平腔提取方式, 前者的工作阈值较低, 在较低的抽运功率时可获得较高的激光输出, 因而低抽运功率时前者的波前畸变较小; 当抽运功率超过 8 kW (对应工作电流为 80 A) 时, 后者可以实现更充分的功率提取, 因而后者获得的波前畸变更小。

从不提取到提取状态, 透射波前由中间高、边缘

低变成中间低、边缘高, 因而必然有一个中间状态可以获得更加平坦的透射波前。初步的设想是减小冷却器宽度, 使得板条边缘的冷却效果略差, 从而在提取时板条的边缘与中央的温度更加接近, 从而波前畸变更小。

平凹腔提取时的透射波前畸变 PV 值明显大于双端对称输出的平平腔提取, 有两种可能的原因: 1) 平凹腔腔内激光强度大约是双端对称输出平平腔腔内激光强度的 2 倍, 对 ASE 效应的抑制更加充分, 从而板条边缘温度相对更低, 与中心区域的温差更大, 故平凹腔提取时的透射波前畸变的 PV 值更大一些; 2) 平平腔的模体积相对于平凹腔而言更大, 平平腔腔内的一部分激光可能会被板条侧边的毛面吸收, 从而对毛面进行加热, 使得板条侧边温度与中心区域的温差减小, 从而平平腔提取时的透射波前畸变的 PV 值更小。

对于采取双端输出的平平腔提取方式, 功率提

取越充分、透射波前畸变越小,因此应当尽可能充分地提取功率。对于双端输出的谐振腔,输出的激光总功率可以写成^[10]:

$$P_{\text{out}} = \left(\frac{1-R_1}{1+R_1} + \frac{1-R_2}{1+R_2} \right) A I_s \left[\frac{2g_0 l}{L - \ln(R_1 R_2)} - 1 \right], \quad (1)$$

式中 R_1, R_2 分别为两输出镜的反射率, A 为激光截面面积, I_s 为饱和光强, g_0 为小信号增益系数, l 为增益长度, L 为腔内各种损耗之和。

根据(1)式可知:当 R_1, R_2 之积保持恒定时,输出功率将在 $R_1 = R_2 = R$ 时取得最大值:

$$P_{\text{out-max}} = 2 \frac{1-R}{1+R} A I_s \left[\frac{2g_0 l}{L - 2\ln R} - 1 \right]. \quad (2)$$

根据实验以及理论分析可知:对于板条增益模块,采用双端对称输出的平平腔进行功率提取时可以更好地抑制板条的边缘效应,从而获得较小的透射波前畸变,同时还应当尽可能选择合适的输出耦合率以实现最充分的功率提取。实验中选择输出镜反射率 $R_1 = R_2 = 45\%$ 来进行功率提取,抽运功率为 10.8 kW 时获得了功率超过 3 kW 的连续激光输出,此时板条增益模块的透射波前畸变的 PV 值小于 $1.5 \mu\text{m}$,边缘效应得到了较好的抑制。

4 结 论

本文开展了高功率板条增益模块在谐振腔内的透射波前特性的实验研究,并进行了理论分析。实验结果和理论分析表明:功率提取状态对板条透射波前有着明显的影响,采用双端对称输出的平平腔进行功率提取时可以更好地抑制板条增益模块的边缘效应,可获得较小的透射波前畸变。此外,谐振腔的输出耦合率还应当与板条增益模块的增益及损耗等相匹配以实现最佳耦合输出。根据实验选择的谐振腔参数,在抽运功率为 10.8 kW 时,采用对称输出的平平腔提取时板条增益模块的透射波前畸变 PV 值小于 $1.5 \mu\text{m}$,较好地抑制了板条的边缘效应。

参 考 文 献

- 1 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618
- 2 He Kunna, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo *et al.*. Overview on laser diode pumped solid-state laser with direct pumping scheme [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1679~1685
何坤娜, 魏志义, 张治国 等. 全固态激光直接抽运技术的发展和研究现状[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1679~1685
- 3 Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang *et al.*. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1686~1692
田长青, 徐洪波, 曹宏章 等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1686~1692
- 4 Liu Huan, Gong Mali, Gao Song. Progress in corner-pumped all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1693~1699
刘 欢, 巩马理, 高 松. 角抽运全固态激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1693~1699
- 5 Jay Marmo, Hagop Injeyan, Hiroshi Komine *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719507
- 6 Li Mi, Hu Hao, Li Jianmin *et al.*. Technology research on kilowatt slab laser with end-pumping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s102001
李 密, 胡 浩, 李建民 等. 千瓦级端面抽运板条激光器技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s102001
- 7 Zhang Lingling, Meng Junqing, Huang Yan *et al.*. Recent advances in high-power solid slab lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 33~36
张玲玲, 孟俊清, 黄 燕 等. 高功率板条激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 33~36
- 8 Zhang Hengli, Yan Ying, Liu Yang *et al.*. Laser diode stack end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with hybrid resonator at 1064 nm and 1342 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2766~2768
张恒利, 闫 莹, 刘 洋 等. 激光二极管阵列端面抽运混合腔 Nd:YVO₄板条 1064 nm 和 1342 nm 激光特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2766~2768
- 9 G. D. Goodno, S. Palese, J. Harkenrider *et al.*. Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1672~1674
- 10 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl. Beijing: Science Press, 2002. 78~90
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 78~90

栏目编辑: 宋梅梅