

端抽运板条放大器特性参数测试系统

汪 丹^{1,2} 周唐建^{1,2} 李 密^{1,2} 童立新^{1,2*} 胡 浩^{1,2} 高清松^{1,2}

¹高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 利用端抽运板条放大器多角度通光的特点,建立了一套板条放大器各特性参数的测试系统,实现了动态加载条件下板条放大器的可提取功率、波前畸变及退偏度等多参数的同步测试。该系统包含千瓦级的窄线宽注入光源及提取功率测试系统,高精度热致波前畸变及退偏测试系统。当注入光源功率为2.7 kW,抽运电流为90 A时,板条放大器中可提取功率约为2.9 kW,波前畸变幅值差值小于1 μm(27 mm口径),热致退偏约为5.1%。对比无注入光时测得的放大器相关特性参数,两者差异较大,说明了该测试系统对于准确掌握板条放大器性能的必要性。

关键词 激光器;板条放大器;端抽运;波前畸变;热致退偏

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1002004

Measurement System of Characteristic Factors of End-Pumped Slab Amplifier

Wang Dan^{1,2} Zhou Tangjian^{1,2} Li Mi^{1,2} Tong Lixin^{1,2} Hu Hao^{1,2} Gao Qingsong^{1,2}

¹Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Taking advantage of multi-angles light paths in end-pumped slab amplifier, a measurement system of characteristic factors of end-pumped slab amplifier is established, which can accurately detect the extracted power, wavefront distortion and depolarization at the same time. This system contains a kilo watt level and narrow linewidth seed source, highly accurate detectors of thermal induced wavefront distortions and depolarization. When the seed source is 2.7 kW and the pump current is 90 A, the extracted power from the slab amplifier is about 2.9 kW, the wavefront distortions is less than 1 μm (aperture of 27 mm), and the depolarization is about 5.1%. Compared with the factors under the non-extraction, the differences between them are distinct, which proves that the detecting system is essential to accurately acquire the qualities of slab amplifiers.

Key words lasers; slab amplifier; end pumped; aberration of wavefront; thermal-induced depolarization

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.3530

1 引 言

板条放大器^[1-2]是实现高能激光器集成化、标准化以及小型化的核心部件。由于板条介质中自身应力、焊接应力以及激光二极管(LD)抽运等因素导致放大器含有较多的像差^[3]。当种子激光经过放大器放大时,各类型像差附加到种子激光中,输出激光波前恶化,导致输出激光光束质量较差^[4-5]。另外在激光放大过程中,由于高功率抽运及散热不均,热致波前畸变及热致退偏严重,导致输出激光的线偏振功率及光束质量急剧降低。因此需准确掌握板条放大器相关特性参数,以提升放大器的性能,为实现高能激光器高质量输出奠定基础。

在以往的研究中^[6-7],板条放大器实现了高功率抽运、能量未提取条件下的波前畸变探测及抽运耦合结构

收稿日期: 2015-04-28; 收到修改稿日期: 2015-06-09

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60890201)

作者简介: 汪 丹(1983—),男,硕士,主要从事固体激光技术及应用方面的研究。E-mail: 20930103@zju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: tonglx@caep.cn

优化。但是在高能激光系统中,放大器工作在能量提取状态下,使用非提取下放大器测试的特性参数来预测其性能,结果未必准确。另外这种测试方法不能得到板条放大器在各抽运功率下的可提取功率,不利于掌握和优化放大器的整体性能。鉴于此,研制了板条放大器特性参数测试系统,通过千瓦级窄线宽种子激光注入,实现了板条放大器可利用功率的充分提取。利用高精度的波前畸变及退偏测试系统,准确掌握放大器的各特性参数,实现放大器中抽运耦合系统的动态优化,有利于提升板条放大器的输出光束质量。

本文报道了一套高功率端抽运板条放大器测试系统,注入种子光源为窄线宽(小于0.1 nm)激光,最大输出功率高于2.7 kW,近场光强均匀性优于75%,实现了对被测板条放大器可利用功率的饱和提取。利用板条型介质多角度通光特性,实现了动态加载条件下板条放大器的波前畸变、可提取功率及退偏度等多参数的同步测试。测试结果表明,板条放大器在能量提取与非提取下各特性参数差异较大,说明了该测试系统有利于准确掌握放大器的性能。

2 实验装置

图1为板条放大器特性参数测试系统结构示意图。高功率端抽运板条放大器测试系统包括千瓦级注入光源、高精度透射波前测试及退偏探测系统等。千瓦级注入光源提供约2.7 kW的注入功率,两次通过板条放大器进行放大,实现对板条放大器内储能的充分提取。在放大激光输出端测量板条放大器抽运前后的激光功率,得到板条放大器可提取的功率。He-Ne光选择另一个通光角度入射到板条放大器,由波前传感器探测板条放大器抽运前后的He-Ne光波前变化,从而获得板条放大器波前畸变值。同理,另选一个通光角度探测线偏光的退偏大小,通过其来表征了板条放大器的偏振性能。

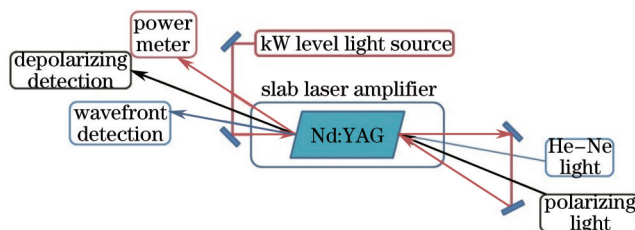


图1 板条放大器特性参数测试系统结构示意图

Fig.1 Configuration of detecting system of slab amplifier characteristic factors

2.1 千瓦级光源

千瓦级光源为实现与板条放大器通光口径匹配,光斑整形为30 mm×2.5 mm的矩形。该光源在满负荷运转下可输出功率为2.7 kW,其光功率密度为3.6 kW/cm²。板条放大器增益介质为Nd:YAG晶体,其饱和功率密度^[6]为2.9 kW/cm²,因此仅单通放大下,注入功率密度已达到饱和功率密度的1.24倍。为更加充分提取放大器中的可利用功率,准确掌握板条放大器可利用的能量,采用了双通注入放大,在第二通放大下,注入功率密度约可达到饱和密度的2倍以上。

Nd:YAG晶体荧光谱线在波长1064 nm处窄而尖锐,谱线宽度小于0.45 nm。其光谱特性决定了只有使用窄线宽且中心波长精确对准的注入光源,才能实现对板条放大器中储能的高效提取。另外注入光源近场光强分布的均匀性,影响了储能提取的均匀性,从而影响板条放大器内局部温度场变化,进一步影响波前及

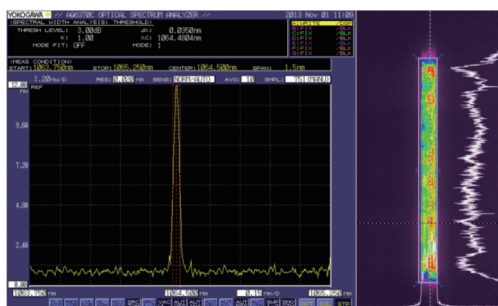


图2 注入光源的光谱特征及光强分布

Fig.2 Spectrum factor and power distribution of input seed beam

退偏探测结果的准确型性。本文使用的千瓦级光源光谱宽度小于 0.1 nm, 中心波长为 1064.48 nm, 近场光强分布均匀性优于 75%, 如图 2 所示。

2.2 波前畸变探测系统

波前探测系统由 He-Ne 光源、传输光路及高精度 Hartmann 波前传感器组成。He-Ne 激光器发射低功率、衍射极限的 632.8 nm 激光, 采用大倍率扩束系统可得到光强均匀、波面近似为平面波的输出光束, 其波前幅值差(PV)小于 $0.1 \lambda (\lambda=632.8 \text{ nm})$ 。Hartmann 波前传感器测量精度优于 $0.1 \mu\text{m}$, 微透镜阵列口径(D)和焦距(F)分别为 0.108 mm 和 2.67 mm, 动态测量范围为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。利用板条晶体多角度 zig-zag 光路特点, He-Ne 光与提取激光可无干扰的同时通过板条晶体, 实现提取条件下的波前畸变测量。近平面波的 He-Ne 光在板条介质内部以全反射的方式通过板条放大器, 为准确反映放大器在工作点下的热致波前畸变, He-Ne 光的入射选通角为双通提取光路选通角的中间值。为防止带有波前畸变的出射光由于空间传输导致的在波前传感器上窜孔径现象, 采用 4f 像传递系统将板条放大器出口处的 He-Ne 光成像到 Hartmann 波前传感器中, 从而准确获得放大器在能量提取状态下的波前畸变。

2.3 热致退偏探测系统

同样利用板条晶体多角度 zig-zag 光路特点, 热致退偏探测系统可实现与波前探测系统及能量提取光路无干扰同时探测。3 W 的 p 偏振光源采用大倍率的扩束系统实现光强在口径为 30 mm×2.5 mm 范围内近似均匀分布, 经过板条放大器后, 利用 4f 像传递系统将含有退偏的输出光引入到远处(约 2 m)的退偏功率探测器, 以防止高功率抽运光及高强度放大激光背景对功率探测的影响。退偏功率探测器由 p 偏振片及两台高精度功率探头组成。为消除强激光背景辐射的影响, 在计算放大器退偏时, 需首先测量各功率探头在放大器能量提取但无偏振探测光源下的背景辐射, 以提高探测的准确度。

2.4 不同通光角度对特性参数测试结果的影响

板条增益介质具有多角度通光特性, 可实现板条放大器各特性参数的同步测量。但是在实际应用中, 放大器使用的通光角度一般仅为一个或两个, 如果实际使用的角度不是测试时的角度, 则各特性参数的测试结果并不能准确反映放大器的性能。下面本文将简要分析不同通光角度对特性参数测试结果的影响。板条放大器增益晶体尺寸为 150 mm×30 mm×2.5 mm(长×宽×厚), 光束在晶体内沿着长度方向以全反射 zig-zag 光路的方式传输, 全反射界面两边介质为 Nd:YAG 和 SiO₂, 其折射率分别为 1.82 和 1.46。依照相关文献^[8]计算方法, 不同通光角度对应光程如表 1 所示。假设板条放大器内的抽运强度及冷却都均匀, 则热致波前畸变及热致退偏将随着光程长度增加而增加, 将他们之间的增长关系简化为线性关系, 则相邻两通光角度内热致波前畸变及退偏差异约小于 3%, 在整个可使用角度范围内, 差异约为 13%。因此在测试放大器时应尽量测试实际使用角度下的特性参数, 以提高测试结果的有效性。

表 1 不同通光角度下的光程

Table 1 Optical paths in different incident angles

Incident angle / (°)	16	20.8	26	32	38.3	45.5
Optical path /mm	186	180.3	174.7	170.4	165.6	161.6

3 实验结果与分析

3.1 板条放大器可提取的储能

千瓦级光源输出 2.7 kW 功率注入到板条放大器中, 在没有抽运板条放大器的情况下, 注入光两次通过板条放大器, 其输出功率为 2.47 kW, 即板条中的双通损耗(α_1)约为 8.5%。当抽运电流为 90 A, 即抽运功率(I_p)为 9.1 kW 下, 利用楔镜分光方式测得板条放大器输出功率为 5.6 kW, 提取功率(I_e)为 2.9 kW。输出功率考虑到抽运耦合损耗 $\alpha_2=13\%$, 板条介质对抽运光的未吸收损耗 $\alpha_3=5\%$, 放大激光在板条中的传输损耗 $\alpha_4=8.5\%$, 量子效率 $\eta_1=95\%$, 斯托克斯效率 $\eta_2=75.9\%$, 估算抽运光转化为板条内的储能效率 $\eta_3=(1-\alpha_1)\times(1-\alpha_2)\times(1-\alpha_3)\times(1-\alpha_4)\times\eta_1\times\eta_2=54.5\%$ 。因此在注入功率为 2.7 kW、抽运电流为 90 A 下, 对储能的提取效率 $\eta_4=I_e/(I_p\times\eta_3)=58.5\%$ 。为估算该注入功率是否达到饱和提取的要求, 在抽运电流 90 A 下, 改变注入激光功率, 并测试和计算其提取效率, 其结果如图 3 所示。由图可知, 较小的功率密度注入时, 提取效率偏低, 说明未对储能形成饱和提取。当

注入功率达到 2.23 kW 时,提取效率达 61%,此时提取效率最大。进一步增加注入功率,由于达到储能的饱和和提取,输出功率增加值小于放大器的传输损耗,表现为提取效率的降低,但此时仍然是储能的饱和提取状态,说明了注入 2.7 kW 已经实现对放大器储能的饱和提取,可提取的储能约为 3 kW。在抽运电流为 80 A 时,不同注入功率对提取效率的影响效果基本相同。

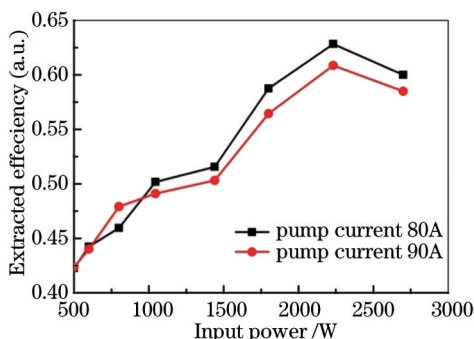


图3 不同注入功率下的提取效率

Fig.3 Extracted efficiencies in different input powers

3.2 波前畸变

通过高精度的热致波前畸变探测系统可得到板条放大器在高功率抽运下的波前畸变。为减小测量误差,将标准 He-Ne 光源在自由空间中传播到 Hartmann 波前传感器的波前标定为 0,则后续测量到的波前畸变为在测试光路中板条放大器所引入的波前畸变,包括了由板条介质材料、焊接等原因形成的静态畸变,也包括了由于高功率抽运形成的热致波前畸变。图 4 显示了在抽运电流为 90 A 下,板条放大器在储能提取与非提取条件下的波前畸变。由图可知,在能量未提取的板条放大器中,因放大发自辐射(ASE)等原因产生的大量废热使板条介质在宽度方向上存在较大的温度梯度,透射波前畸变 PV 值大于 20 μm。在能量提取状态下,大量抽运能量被用于注入激光的放大,ASE 效应得到明显抑制,透射波前畸变 PV 值小于 4 μm,在中间约 27 mm 平坦区域,透射波前 PV 值小于 0.6 μm。另外由于能量非提取下的波前畸变中出现大的离焦像差(二阶热透镜效应),导致更高阶的起伏表现不明显,而这种离焦像差对于放大器的输出光束质量影响较小,因此不利于板条放大器性能的准确掌握。在能量提取下的波前畸变中,由于能量提取降低了板条介质的温度,基本消除了离焦像差的影响,发现在中间相对平坦区域存在明显的高低起伏结构,这种高阶畸变对放大后的输出激光光束质量影响较大,因此能量提取下的波前畸变测量对放大器抽运耦合结构的优化及在激光系统中的使用提供了精确的数据支持。

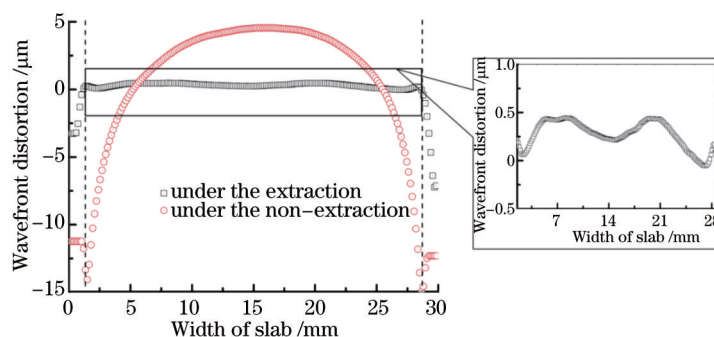


图4 能量提取与非提取下的波前畸变

Fig.4 Wavefront distortions under the extraction and non-extraction

3.3 热致退偏

表 2 显示了板条放大器在高功率抽运及能量饱和提取下,偏振探测光退偏率随抽运电流变化关系,其中 P 为输出偏振光功率, S 为输出退偏光功率, P_1 为偏振光功率探头处背景功率, S_1 为退偏光功率探头处背景功率, β 为退偏率,且 $\beta=(S-S_1)/(P+S-P_1-S_1)$ 。测试结果表明,当热沉积密度较小时,板条介质中的 zig-zag 光路可较好地补偿厚度方向温度梯度产生的退偏,放大器整体退偏不明显。但当热沉积密度较大时,由于焊接应

力局部不均、大面全反射膜层缺陷、板条介质端面及边缘效应等因素导致局部退偏不能得到有效补偿,这些区域产生了强烈的退偏,降低了板条放大器偏振光输出功率。

表 2 不同抽运电流下的退偏

Table 2 Depolarization in different pumped currents

Current /A	0	30	40	50	60	70	80	90
P /mW	1610	1780	1900	2130	2340	2670	2900	3200
S /mW	1.7	6	9	13	22	50	107	192
P_1 /mW	0	40	50	60	70	84	100	110
S_1 /mW	0	5.6	5.6	8.6	12	16	21	26
Depolarization /%	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	1.3	3	5.1

另外,测试了非能量提取下,板条放大器退偏率与抽运电流的关系,如图 5 所示。对比相同电流、能量提取下的退偏率,两者在高功率抽运下差异较大,说明了非提取下的测试结果不能准确反映板条放大器的质量。

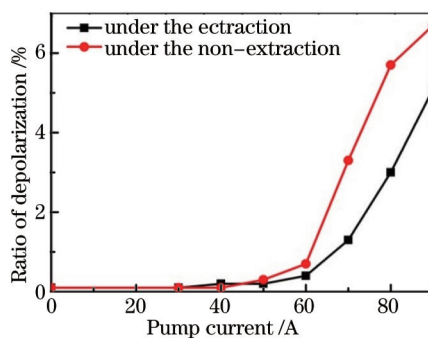


图 5 不同抽运电流下的退偏

Fig.5 Depolarization in different pumped currents

4 结 论

为准确掌握端抽运板条放大器在高功率抽运及能量提取下的各特性参数,实现对板条放大器性能的实时优化,建立了一套板条放大器特性参数测试系统。该系统可实现板条放大器热致波前畸变,热致退偏及可提取功率的同步测试。高功率、均匀分布的千瓦注入级光源实现了板条放大器储能的饱和及均匀提取,在此基础上得到影响输出光光束质量的热致波前畸变高阶结构及强热沉积密度下的退偏率,提升了对板条放大器性能掌握的准确性。能量非提取下的测试结果与提取下的结果差异较大,说明了这套特性参数测试系统的必要性。

参 考 文 献

- 1 B Bishop. Northrop Grumman Scales New Heights in Electric Laser Power, Achieves 100 Kilowatts From a Solid-State Laser[OE]. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575, March 18, 2009.
- 2 Sun Zhe, Chen Xin, Jiang Menghua, *et al.*. Compact laser diode side-pumped multipass Nd:YVO₄ slab laser amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602018.
孙 哲, 陈 欣, 姜梦华, 等. 结构紧凑型激光二极管侧面抽运多通 Nd:YVO₄板条激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602018.
- 2 R J Shine, Jr, A J Alfrey, *et al.*. 40 W CW TEM₀₀ mode diode laser pumped Nd:YAG miniature slab laser[J]. Opt Lett, 1995, 20(5): 459-561.
- 3 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.
- 4 Zheng Jiankui, Bo Yong, Xie Shiyong, *et al.*. High power quasi-continuous-wave diode-end-pumped Nd:YAG slab amplifier at 1319[J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(7): 074202.
- 5 Liu Lei, Wang Chao, Wang Wentao, *et al.*. Evaluation on laser beam quality and its application on high power slab laser[J]. Acta

Optica Sinica, 2013, 33(s1): s114006.

刘 磊, 王 超, 王文涛, 等. 光束质量评价及其在高功率板条激光器中的应用[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s114006 .

6 W Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 162-165.

7 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. 激光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.

8 Xing Fu, Qiang Liu, Xingpeng Yan, *et al.*. End-pumped Nd: YAG zigzag slab laser with weak pump absorption[J]. Chin Phys Lett, 2009, 7(6): 060492.

栏目编辑: 宋梅梅