

大口径N31钕玻璃片高增益情况下热性能研究

温 磊^{1,2} 陈 林^{3*} 刘建国³ 陈远斌³ 谢旭东³ 刘 勇³ 郑奎兴³ 陈 伟² 胡丽丽² 吴谊群⁴

¹中国科学院大学, 北京 100049

²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元技术研发中心, 上海 201815

³中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

⁴中国科学院上海光学精密机械研究所高密度光存储技术实验室, 上海 201800

摘要 大口径高通量验证实验平台(以下简称ITB装置)是我国为开展惯性约束聚变(ICF)研究而研制的激光装置, 单束输出能量达到了19.6 kJ(基频发射波长为1053 nm, 脉宽为5 ns)。对大口径N31钕玻璃片在ITB装置400 mm×400 mm单口径片状放大器系统上应用的热特性进行了实验研究, 结果表明: 在增益系数为5.28% cm⁻¹高增益情况下, 整个激光链路热致动态波前畸变峰谷值 d_{pv} 约为5.3 λ, 处于变形镜校正范围之内; 结合合理设计冷却方案, 剩余波前畸变恢复时间约为2.5 h, 满足了系统运行发次间隔为4 h的设计要求。

关键词 光学器件; 钕玻璃; 片状放大器; 400 mm×400 mm口径; 热效应

中图分类号 TN244

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0306001

Investigation on Thermal Effect of N31 Neodymium Glass in High Gain Performance

Wen Lei^{1,2} Chen Lin³ Liu Jianguo³ Chen Yuanbin³ Xie Xudong³ Liu Yong³

Zheng Kuixing³ Chen Wei² Hu Lili² Wu Yiqun⁴

¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

²High Power Laser Components R & D Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China

³Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

⁴Laboratory for High Density Optics Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The integration-test-bed (ITB) device is established for research on inertial confinement fusion(ICF) in China. The single-beam output energy reaches 19.6 kJ successfully when the fundamental frequency emission wavelength is 1053 nm and the pulsewidth is 5 ns. Experimental results of thermal effect of 400 mm×400 mm aperture slab amplifiers in ITB devices show that the peak-to-valley value d_{pv} of pump-induced wave-distortion of the whole laser chain is about 5.3 λ, in the revise extension of deformable mirror, when the gain coefficient is 5.28% cm⁻¹. Combined with the optimizations of heat management, the thermal recovery time is about 2.5 h, which can satisfy the requirement of 4 h/shot.

Key words optical devices; neodymium glass; slab amplifier; 400 mm×400 mm aperture; thermal effect

OCIS codes 140.3280; 140.3530; 160.3380

1 引 言

国内外惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)激光驱动器如美国国家点火(National Ignition

收稿日期: 2015-10-08; 收到修改稿日期: 2015-11-17

作者简介: 温 磊(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事磷酸盐钕玻璃激光性能方面的研究。E-mail: wenlei@siom.ac.cn

*通信联系人。E-mail: inxiaoqiao@126.com

Facility, NIF)装置、中国神光系列激光装置等均采用了氙灯抽运钕玻璃的片状放大器系统^[1]。氙灯抽运带来的钕玻璃片内不均匀温升及包边吸收放大自发辐射(ASE)荧光发热是系统热效应的根本原因,而热效应会引起钕玻璃片的变形和光束波前畸变。这一问题可分为两方面来考虑^[2-4],一方面是动态波前畸变,另一方面是剩余热畸变恢复。前者主要研究在氙灯抽运过程中,由于氙灯光和放大自发辐射造成钕玻璃片内的温度不均匀分布引起的瞬态热畸变问题,确保整个激光链路的动态波前畸变处于变形镜校正范围之内;后者主要研究装置在下次运行时,由于前次的剩余温度梯度附加引起的光束波前畸变,合理设计冷却方案,提高运行效率,从而提高装置效费比。本文结合以往工作进展^[5-8],介绍了国产大口径N31钕玻璃片在ITB装置400 mm×400 mm单口径片状放大器系统上应用的热特性,重点关注了在强抽运密度情况下热致波前畸变的变化及热恢复情况。

2 实验装置及热效应物理模型

大口径高通量验证实验平台装置(ITB)400 mm×400 mm单口径片状放大器系统基本结构如图1所示,主要包括尺寸为810 mm×460 mm×40 mm的大口径N31钕玻璃片、隔板玻璃、脉冲氙灯等光学元件与片箱、框架构件(FAU)、灯箱、反射器等机械组件,其中钕玻璃片与主激光方向呈布儒斯特角放置,可提供400 mm×400 mm的正方形通光口径。隔板玻璃置于氙灯和钕玻璃片之间以形成冷却气体通道,同时为提高系统抽运光传输效率,隔板玻璃镀有化学膜层,对氙灯抽运光的平均透射率大于94%;反射器采用了镀银处理,对氙灯抽光的平均反射率大于92%。本次实验采用的大口径N31钕玻璃片热特性物理参数如表1所示。

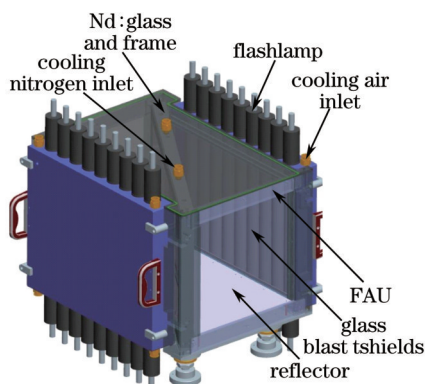


图1 400 mm×400 mm单口径片状放大器基本结构

Fig.1 Structure of the slab amplifiers with 400 mm×400 mm aperture

表1 N31钕玻璃热特性物理参数

Table 1 Thermal Properties of N31 neodymium glass

Property	Value
Thermal conductivity, κ / (W/mK)	0.56
Linear thermal expansion coefficient, α / K^{-1}	1.27×10^{-5}
Temperature coefficient of refractive index, dn/dT / K^{-1}	-4.3×10^{-6}
Index of refraction, n_0	1.532
Mass density, ρ / (kg/m ³)	2.83×10^3
Specific heat, C_p / [J/(kg·K)]	0.75×10^3
Elastic modulus, E / GPa	64.95
Poisson's ratio, μ	0.2735

抽运带与激光上能级之间的Stokes效应及抽运带光子的无辐射弛豫效应是钕玻璃片内发热的主要原因^[9-10]。由于钕玻璃片与光束呈布儒斯特角的排布结构,氙灯抽运光经抽运腔传输对钕玻璃片形成非均匀抽运。对于动态波前畸变问题,钕玻璃材料典型的热导率一般在0.5~1.2 W/mK之间,同时氙灯抽运过程一般为数百微秒,因此可不考虑钕玻璃片内的热传导效应。因此,非均匀抽运和放大自发辐射效应(ASE)将造成钕玻璃片及包边的瞬态不均匀温升。当钕玻璃片内存在温度梯度分布时,会引起片的机械变形和热应力分

布,由于折射率是温度和应力的函数, $n = n(T, \sigma)$, 所以片的机械变形和折射率的改变使得钕玻璃片引入的光程(L_{op})分布不均匀。

$$L_{op} = \int n(x, y, z) dr(x, y, z), \quad (1)$$

$$n(x, y, z) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T}(T - T_0) + \frac{\partial n}{\partial \sigma} \cdot \sigma, \quad (2)$$

式中 n_0 是钕玻璃材料在常温下的均匀折射率, $\partial n / \partial T$ 是折射率温度系数, $\partial n / \partial \sigma$ 是应力光学系数张量。

氙灯放电结束之后放大器模块的热恢复过程则由标准的不含热源瞬态热传导方程确定,可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \Delta T \\ T(x, y, z; 0) = T_0(x, y, z) \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma_1} = h_c (T \Big|_{\Sigma_1} - T_z) \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma_2} = h'_r (T^4 \Big|_{\Sigma_2} - T_z^4) \end{cases} \quad (3)$$

边界条件为对流换热边界条件以及辐射换热边界条件,初始条件是氙灯放电结束后灯、隔板玻璃、钕玻璃片及包边的瞬态温度分布。求解方程(3)需要确定的是初始温度分布 $T_0(x, y, z)$ 、对流换热系数 h_c 、以及辐射换热系数 h'_r 。

3 理论模拟与实验研究结果

片状放大器基本抽运条件为:抽运密度约 19 J/cm^3 (电容器储能/钕玻璃体积),抽运脉宽约 $620 \mu\text{s}$ (10%电流宽度),强抽运密度条件下获得小信号增益系数约为 $5.28\% \text{ cm}^{-1}$ 的高增益输出。结合大口径 N31 钕玻璃片热性能参数,计算钕玻璃片(除包边)瞬态温度分布如图 2 所示。由于瞬态温升分布不考虑钕玻璃片内热传导效应,因此瞬态温升分布与抽运场分布是一致的,片内最高温升约 0.85 K ,沿宽度方向基本一致,而沿长度方向则表现出非一致性。这是由于在图 1 所示的抽运结构条件下,在钕玻璃长度方向每支氙灯与钕玻璃片的间距是不一致的,造成每支氙灯的抽运腔传输效率是随着间距增大而变小,由此造成长度方向的非均匀抽运与非均匀热分布;而在宽度方向则基本是均匀抽运,由此瞬态的温升基本是一致的。同时对整个抽运过程的放大自发辐射效应开展追迹计算,以确定包边吸收放大自发辐射荧光特性及瞬态温升分布,如图 3 所示。

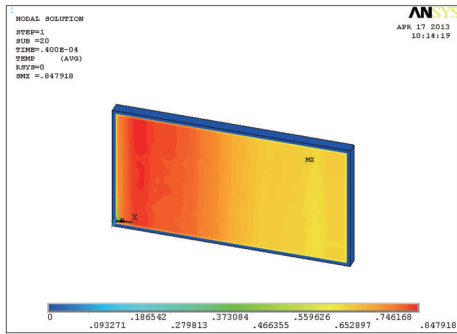


图 2 钕玻璃片内瞬态温度分布

Fig.2 Transient temperature distribution in neodymium glass

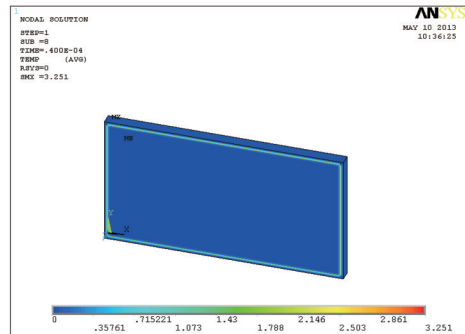


图 3 钕玻璃包边瞬态温升

Fig.3 Transient temperature rising of cladding

根据以上初始温度分布,钕玻璃片的装夹方式为包边位置四周固定,无应力装夹,作为计算钕玻璃片瞬态变形分布有限元计算的初始边界条件,结果如图 4 所示。非均匀温升导致整个钕玻璃片变形呈“S”形变,最大变形量约为 $0.35 \mu\text{m}$ 。由(1)式、(2)式可知,钕玻璃片变形对波前畸变起主要作用。计算大口径 N31 钕玻璃片在小信号增益系数为 $5.28\% \text{ cm}^{-1}$ 高增益输出条件下的瞬态波前畸变如图 5 所示,动态波前畸变 d 的峰谷值 d_{pv} 约为 0.31λ 。利用哈特曼实验测量整个激光链路动态波前畸变,首先测试系统静态波前畸变,然后在主激光通过时刻(即系统增益最大时刻)测试系统波前畸变,二者的差值为动态波前畸变,测试结果如图 6 所示, d_{pv} 约为 5.3λ ,均方根值 r_{rms} 约为 1.3λ ,平均单片 d_{pv} 约为 0.294λ ,处于变形镜设计校正范围之内,满足系统

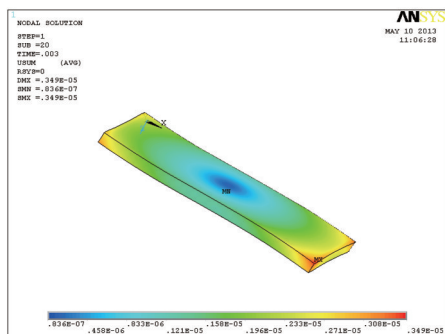


图4 不均匀温升导致钕玻璃片“S”形变

Fig.4 Nonuniform temperature rising induced S deformation of glass disc

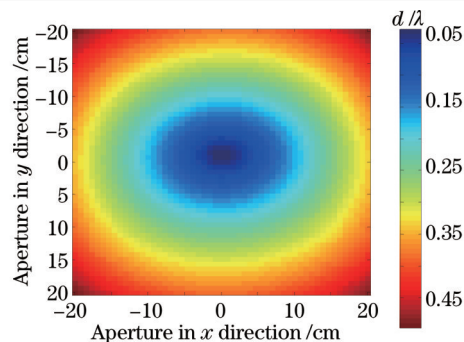


图5 单片单程动态波前畸变模拟计算结果

Fig.5 Simulated calculation results of dynamic wavefront distortion in single disc and single pass

设计要求。理论模拟与实验结果均呈碗状分布,二者符合得较好。

钕玻璃片的剩余波前畸变恢复过程也将利用哈特曼来完成测量。主放电运行完成后,按照片状放大器设计冷却方案:1)先对片箱进行10 min氮气吹扫,设计放大器进气口氮气流速约为10 m/s,气压约为1 kPa,洁净度为100级,对钕玻璃片进行冷却并吹扫片箱内气溶胶;2)对氙灯进行40 min干燥空气吹扫冷却,设计空气气压约为1 kPa,放大器进气口流速约为10 m/s;3)自然冷却过程。实验测量整个激光链路热恢复过程中剩余波前畸变如图7与图8所示,氮气吹扫完成后整个激光链路的 d_{pv} 高达 7.6λ , r_{rms} 为 1.8λ ,相比主激光通过时刻波前畸变大,这是由于氙灯温升远高于钕玻璃片的温升,作为热源对钕玻璃片进行辐射加热使得波前畸变大。完成氙灯冷却过程后,整个激光链路的 d_{pv} 降至 1.4λ , r_{rms} 降为 0.3λ ;在主放电运行完成150 min后 d_{pv} 降至 0.5λ , r_{rms} 降为 0.1λ ,此时整个激光链路波前畸变的变化非常缓慢,进入相对稳定期,此时已满足下一次发射的要求。

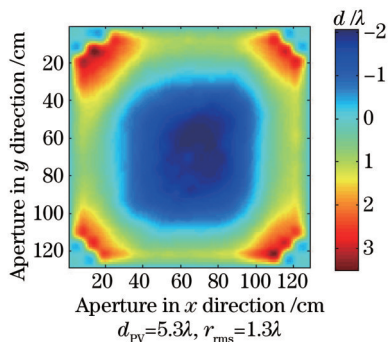


图6 激光链路动态波前畸变实验测量结果

Fig.6 Test results of dynamic wavefront distortion in whole bunch of laser

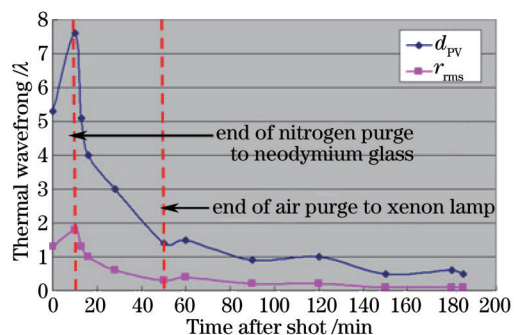


图7 实验测量热恢复过程中 d_{pv} 值与 r_{rms} 值变化

Fig.7 Test results of d_{pv} and r_{rms} values variation in thermal recovery process

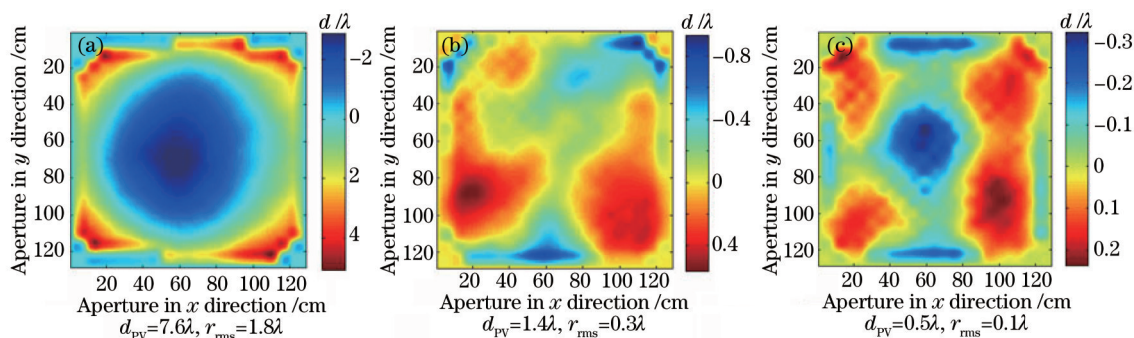


图8 热恢复过程中激光链路的波前畸变。(a) 10 min; (b) 50 min; (c) 150 min

Fig.8 Wavefront distortions in thermal recovery process in whole bunch of laser. (a) 10 min; (b) 50 min; (c) 150 min

4 结 论

本文研究了大口径 N31 钹玻璃片在 ITB 装置 400 mm×400 mm 单口径片状放大器系统上的应用热特性。在小信号增益系数为 $5.28\% \text{ cm}^{-1}$ 的高增益输出条件下, 整个激光链路动态波前畸变处于变形镜校正范围之内; 同时结合合理的冷却吹扫方案使得系统剩余波前畸变的恢复时间小于 4 h, 满足系统设计要求, 综合验证了大口径 N31 钹玻璃片的激光物理性能, 保障了大口径高通量验证实验平台装置的激光输出性能。

参 考 文 献

- 1 Lawrence Livermore National Laboratory. Inertial Confinement Fusion-1998 ICF Annual Report, UCRL-LR-105820-98[R]. 1998: 49-50.
- 2 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, Wang Chengcheng, *et al.*. Studies in thermal recovery of slab amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(s1): 145-148.
於海武, 郑万国, 王成程, 等. 片状放大器热恢复研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(s1): 145-148.
- 3 S Sutton, A Erlandson, R London, *et al.*. Thermal recovery of the NIF amplifiers[C]. 3 nd Annual Conference on Solid-State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, 1998.
- 4 He Shaobo. Studies on Characteristic of Spontaneous Radiation Amplify in Laser Amplifier[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2002.
贺少勃. 激光放大器中自发辐射放大特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.
- 5 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo, *et al.*. Modeling of residual thermo-optical distortions of the main amplifier of SG-III prototype [J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(5): 385-390.
於海武, 郑万国, 贺少勃, 等. 神光 III 原型装置主放大器剩余热畸变模拟研究[J]. 中国激光, 2001, 28(5): 385-390.
- 6 Chen Lin, Xie Xudong, Chen Yuanbin, *et al.*. Investigation on depolarization of slab amplifiers on integration-test-bed[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s114007.
陈 林, 谢旭东, 陈远斌, 等. 大口径高通量验证实验平台片状放大器热致退偏效应研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s114007.
- 7 Wang Wenyi, Zhao Junpu, Chen Lin, *et al.*. Research on saturation amplification characteristics for large-aperture Nd: glass multi-pass laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s214007.
王文义, 赵军普, 陈 林, 等. 大口径钹玻璃多程激光系统饱和和放大特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s214007.
- 8 Hu Junjiang, Meng Tao, Wen Lei, *et al.*. Experiment investigation on residual stress of Nd: glass edge cladding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0206001.
胡俊江, 孟 涛, 温 磊, 等. 激光钹玻璃包边残余应力实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0206001.
- 9 Lawrence Livermore National Laboratory. Physics Basis for Optical Performance of the NIF Amplifiers, UCRL-ID-132680[R]. 1999: 99-129.
- 10 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo, *et al.*. Numerical simulation of thermal recovery of the multi-segment amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(4): 411-415.
於海武, 郑万国, 贺少勃, 等. 组合式片状放大器热恢复模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 411-415.

栏目编辑: 宋梅梅