

## 400 mm 口径 4 × 2 组合式片状放大器动态漂移

王振国, 陈林, 薛娇, 吴文龙\*, 刘建国, 刘勇, 王琳

中国工程物理研究院激光聚变研究中心 四川 绵阳 621900

**摘要** 在大口径片状放大器系统中,非对称泵浦导致经过增益介质的激光束发生动态漂移。研究了泵浦场对称性(用钽玻璃长度方向中心左右两侧的泵浦能量比值表征)对光束动态漂移的影响,建立了理论模型并开展了实验研究。实验结果表明,当增益介质泵浦场的对称性约为 1.038 : 1 时,泵浦致光束的动态波前倾斜值约为  $0.98\lambda$ (波长为 1053 nm 的激光经过六张钽玻璃片后的累积波前畸变量,  $\lambda=1053$  nm),375 mm 光束口径下激光单次经过单钽玻璃片的动态漂移角度约为  $0.32 \mu\text{rad}$ ,与理论模型吻合较好。激光装置全链路的分析结果表明,在基于反转器的四程放大构型中,累积的动态波前倾斜峰谷值约为  $2.78\lambda$ ,漂移比例(漂移量与 30 倍衍射极限下的小孔直径的比值)约为 2.14%。

**关键词** 激光器;片状放大器;泵浦对称性;动态漂移;模拟计算;实验研究

中图分类号 O140

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0905001

## 1 引言

目前,用于惯性约束聚变(ICF)研究的美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳装置(LMJ)等大能量激光装置均采用了氙灯泵浦钽玻璃的 400 mm 口径 4 × 2 组合式片状放大器系统<sup>[1]</sup>。钽玻璃尺寸约为 810 mm × 460 mm × 40 mm,与光束传输方向呈布儒斯特角放置,氙灯从两侧进行泵浦,可提供 400 mm × 400 mm 的正方形通光口径<sup>[2]</sup>。美国国家点火装置采取了多程放大构型,在 360 mm 光束口径下泵浦致光束的动态漂移约为  $4 \mu\text{rad}$ <sup>[3-5]</sup>。

泵浦致光束的动态漂移主要是主激光在增益峰值时刻经过放大器时相对静态时刻的指向漂移。泵浦致光束的动态漂移研究是为了确保主激光顺利经过空间滤波器小孔,并为滤波小孔尺寸和变形镜补偿工作模式等提供设计依据。泵浦光在钽玻璃片端面的分布不对称是导致光束动态漂移的主要原因,高重复频率下钽玻璃激光器的热效应研究也得到了广泛关注<sup>[6]</sup>。当然,激光束的波前畸变还会影响激光远场的时空分布特性<sup>[7]</sup>,本文仅就波前畸变对光束角漂的影响进行了分析。

本文研究了泵浦场的对称性(用钽玻璃长边中心左右两侧的泵浦能量比值表征)对光束动态漂移的影响,建立了理论模型,并开展了实验研究。实验结果表明,当增益介质泵浦场的对称性约为 1.038 : 1 时,泵浦致光束的动态波前倾斜值约为  $0.98\lambda$ (波长为 1053 nm 的激光经过六张钽玻璃片后的累积波前畸变量,  $\lambda=1053$  nm),375 mm 光束口径下激光单次经过单钽玻璃片的动态漂移角度约为  $0.32 \mu\text{rad}$ ,与理论模型吻合较好。激光装置全链路的分析结果表明,采用基于反转器的四程放大构型,装置累积的动态波前倾斜约为  $2.78\lambda$ ,漂移比例(漂移量与 30 倍衍射极限下的小孔直径的比值)约为 2.14%;采用与 NIF 装置类似的片状放大器与四程放大构型,增益介质泵浦场的对称性约为 1.0065 : 1,累积的动态波前倾斜约为  $1.51\lambda$ ,360 mm 光束口径下的动态总漂移约为  $4.2 \mu\text{rad}$ 。波前畸变的测量方法有很多种<sup>[8]</sup>,本文采用哈特曼波前传感器测量法。

## 2 基本原理

## 2.1 系统介绍

实验装置为一组三片长的 400 mm 口径 4 × 2

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-09-28; 录用日期: 2021-10-18

通信作者: \*wwl803sc@163.com

组合式片状放大器,如图 1 所示。在放大器高度方向,四片钕玻璃片叠加,形成四个通光子口径,宽度方向有两个通光子口径,总体形成  $4 \times 2$  的通光口径,氙灯从两侧对钕玻璃片进行泵浦。三片长是指每个子口径中的激光束经过三张钕玻璃片,本文实验装置为三个单片长的  $4 \times 2$  片状放大器的组合,而通常大型激光装置中的放大器多为七片长、九片长、十一片长等,均为单片长片状放大器的组合。在本实验装置中,为了提高氙灯光的利用率,侧灯箱采用

了镀银渐开线反射器,中灯箱采用了镀银菱形反射器,400~1000 nm 氙灯光的光谱平均反射率约为 93%。隔板玻璃置于灯箱与钕玻璃片之间,镀有宽带的增透膜,400~1000 nm 氙灯光的光谱平均透过率约为 96%。钕玻璃片的激光物理基本参数如表 1 所示,尺寸约为 810 mm $\times$ 460 mm $\times$ 40 mm,四周各有约 12 mm 厚度的包边用于吸收放大自发辐射荧光。

对比目前国外主要装置的 400 mm 口径  $4 \times 2$  组合式片状放大器系统,其主要参数如表 2 所示,

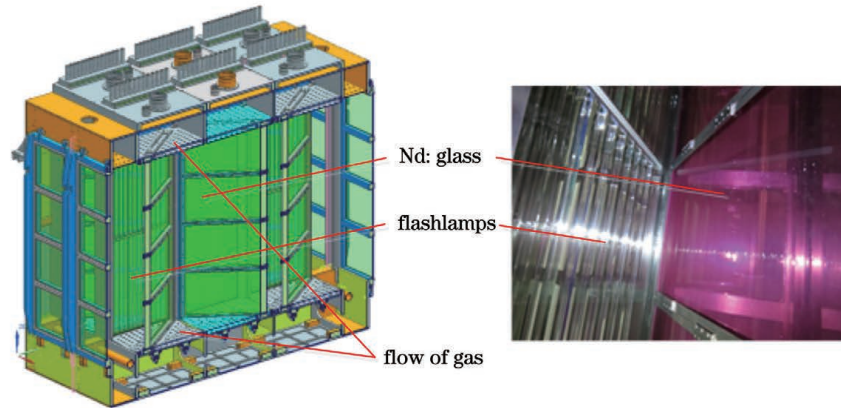


图 1 400 mm 口径  $4 \times 2$  组合式片状放大器示意图(三片长)

Fig. 1 Schematic of  $4 \times 2$  combined chip amplifier with 400 mm diameter (length of three pieces)

表 1 钕玻璃的主要激光物理参数

Table 1 Main laser physical parameters of neodymium glass

Parameter	Nd : glass grade	Linear expansion coefficient @30–300 °C / ( $10^{-7} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	Thermal conductivity @25 °C / [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	Thermo-optical coefficient@20–100 °C / ( $10^{-6} \cdot \text{°C}^{-1}$ )
Content	N31	10.7	0.558	1.4
Parameter	Specific heat / [ $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	Refractive index temperature coefficient@20–100 °C / ( $10^{-6} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	Elastic modulus /GPa	Poisson's ratio
Content	0.75	-4.3	64.95	0.2735

表 2 泵浦方案的基本技术参数

Table 2 Basic technical parameters of pumping scheme

Pumping scheme	Main discharge voltage /kV	Delay between main-discharge and pre-discharge / $\mu\text{s}$	Pulse width of discharge current / $\mu\text{s}$	Number of xenon lamps per pump circuit
Ours	31	250	~450	2
NIF	24	250	~470	2
Pumping scheme	Number of pump circuits per amplifier module	Diameter of xenon lamp /mm	Arc length of xenon lamp /mm	Pressure of xenon lamp /Torr
Ours	20	37	1850	180
NIF	10	48	1800	110

其中  $1 \text{ Torr} = 133.3223684 \text{ Pa}$ 。国外装置中脉冲氙灯直径为  $48 \text{ mm}$ ，侧灯箱有 6 支氙灯，中灯箱有 8 支氙灯，两灯串联为一个回路，单回路的能库储能为  $\sim 110 \text{ kJ}$ ，输出最高小信号增益系数约为  $5.3\%/\text{cm}^{[9]}$ ；本装置脉冲氙灯直径为  $37 \text{ mm}$ ，侧灯箱有 14 支氙灯，中灯箱有 12 支氙灯，两灯串联为一个回路，单回路的能库储能为  $\sim 70 \text{ kJ}$ ，输出最高小信号增益系数约为  $5.6\%/\text{cm}$ 。

## 2.2 数值模拟的理论模型

泵浦光在钨玻璃片上的非对称分布为钨玻璃端面带来温度梯度以及热应力的不均匀分布。对于固体材料，其折射率是随温度的变化而变化的，即存在  $dn/dT$  ( $n$  为介质折射率,  $T$  为介质温度)；同时因热膨胀的影响，不同温度将导致介质的厚度发生不同变化。这就使得当一束激光经过具有不同温度分布及热应力分布的激光介质时，不同位置的光束其光程不相等，介质表面相当于由无数个不同透镜或棱镜拼接而成，导致激光光束发生漂移。而泵浦的对称性与泵浦构型相关，因此该过程仅能利用数值模拟的方法进行分析，其理论模型如图 2 所示。

在氙灯辐射光谱方面，根据文献[10-11]可建立完整的氙灯辐射光谱的数值模拟计算模型。氙灯光

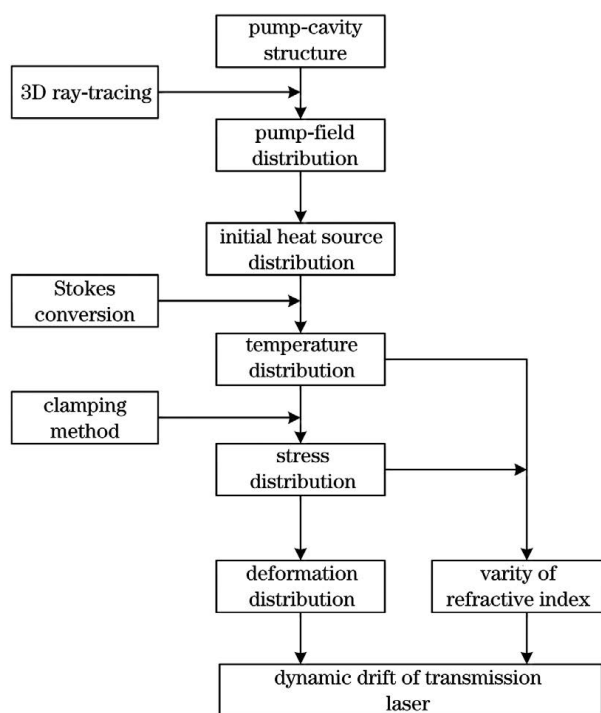


图 2 泵浦致光束指向漂移模型

Fig. 2 Model for pump-induced beam pointing drift

从氙灯的侧壁辐射到氙灯外，其单位侧面积上辐射的氙灯光功率  $P_{in}$  (光谱在  $400 \sim 1000 \text{ nm}$  范围内)为

$$P_{in} = 2.81 \exp(1.48 \ln J + 0.90 \ln d + 0.20 \ln p + 0.50 \ln J \ln p), \quad (1)$$

式中： $J$ 、 $d$ 、 $p$  分别为电流密度 ( $\text{kA}/\text{cm}^2$ )、内径 ( $\text{cm}$ ) 和充气压 ( $\text{Torr}$ )。根据参考文献[12]和[13]，可以得到数值仿真计算结果，如图 3 所示。

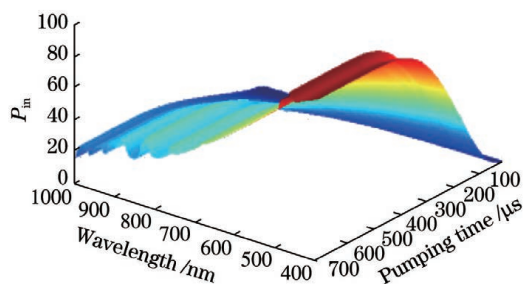


图 3 氙灯辐射光谱的模拟计算结果

Fig. 3 Simulation calculation results of xenon lamp radiation spectrum

基于氙灯辐射光模型，对泵浦腔开展三维光线追迹，从而获得泵浦场分布。利用一个 7 维向量  $[x_1, x_2, x_3, \cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma, p]$  来描述氙灯发出的每一条光线，其中  $[x_1, x_2, x_3]$  为光线的起始位置， $[\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma]$  为光线的方向矢量，而  $p$  即为该光线所携带的能量。光线从氙灯管壁的起始点

发出后，程序将通过算法自动搜索其在泵浦腔中的真实传输路径，直至其被钨玻璃片吸收、反向传输或壁面多次反射导致能量损耗至初始值的 2% 以下而终止。本装置泵浦场分布如图 4 所示，以钨玻璃片的左下角为原点，钨玻璃片长度方向为  $x$  轴，钨玻璃片高度方向为  $y$  轴。两种方案的泵浦场特性对比如图 5 所示，其中  $L$  为钨玻璃片水平方向的空间位置， $R$  为该空间位置的泵浦光强度与钨玻璃片表面平均泵浦光强度的平均值之比。在本装置方案中，由于侧灯箱排布的氙灯数量多于中灯箱，泵浦场在钨玻璃长度方向上主要表现出非对称性，强度最大值靠近侧灯箱，泵浦对称性约为  $1.038 : 1$ ，泵浦场均匀性(最大值与平均值的比值<sup>[14]</sup>)约为  $1.027 : 1$ ；采用类似 NIF 装置的方案，泵浦对称性约为  $1.0065 : 1$ ，泵浦场均匀性约为  $1.036 : 1$ 。因此本装置方案在高增益条件下，增益有更好的均匀性分布，但光束动态漂移相对更大。

由于钨玻璃材料典型的热导率约为  $0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，氙灯泵浦过程为数百  $\mu\text{s}$ ，因此激

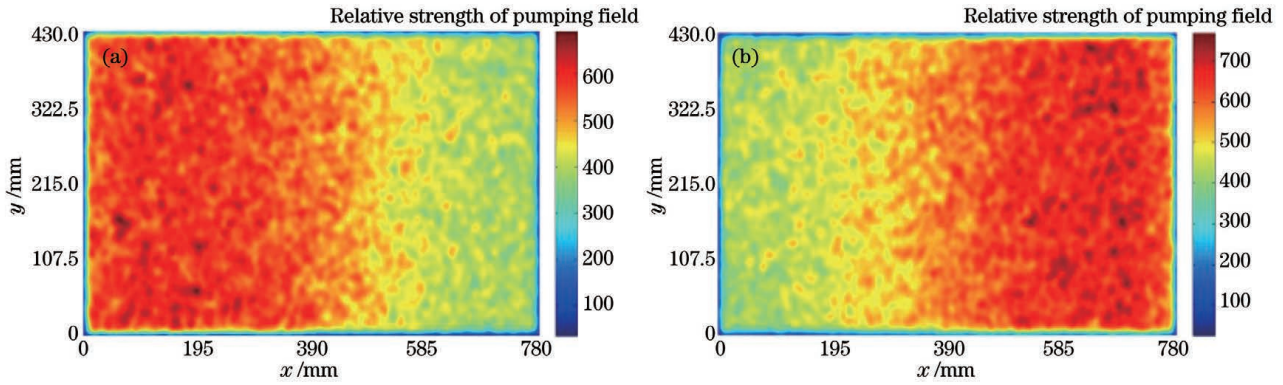


图 4 本装置不同位置处的泵浦场分布。(a)中灯箱端面;(b)侧灯箱端面

Fig. 4 Pump field distributions at different positions of our device. (a) End-face near mid-lamp-box; (b) end-face near side-lamp-box

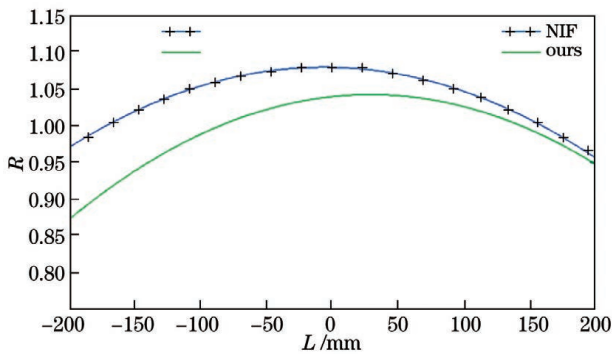


图 5 不同泵浦构型的泵浦对称性

Fig. 5 Pump symmetries for different pump configurations

光在增益峰值时刻经过介质时的动态漂移可不考虑钼玻璃片内热传导所带来的影响。非均匀泵浦导致钼玻璃片的瞬态不均匀温升,温度梯度引起的片内热应力分布<sup>[15]</sup>为

$$\delta_s = \frac{2\alpha E}{3(1-\nu)}\Delta T, \quad (2)$$

折射率是温度和应力的函数,即

$$n(x, y, z) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T}(T - T_0) + \frac{\partial n}{\partial \sigma}\sigma, \quad (3)$$

因此动态波前畸变为

$$O_{PD} = \frac{2\pi}{\lambda} \int n(x, y, z) dr(x, y, z), \quad (4)$$

式中: $\alpha$  为热膨胀系数; $E$  为杨式模量; $\nu$  为泊松比; $\Delta T$  为温差; $n_0$  为钼玻璃片在常温下的均匀折射率; $\partial n/\partial T$  为温度折射率系数; $\partial n/\partial \sigma$  为应力光学系数。波前畸变的更多细节可以通过 Zernike 多项式系数来研究。根据研究者提出的表征方法<sup>[16]</sup>,相位场可以展开为

$$\phi = \sum_j a_j Z_j, \quad (5)$$

式中: $Z_j$  是诺尔系数为  $j$  的 Zernike 多项式; $a_j$  是对应的权重系数即 Zernike 系数。2 阶与 3 阶分量表征了波前畸变中的倾斜特性。

钼玻璃片内的温度梯度与应力梯度会引起片的机械变形。基于图 4 所示的泵浦场分布,通过建立钼玻璃片三维模型并划分网格,利用有限元的方法计算得到温度、应力与变形的分布,如图 6 所示,单

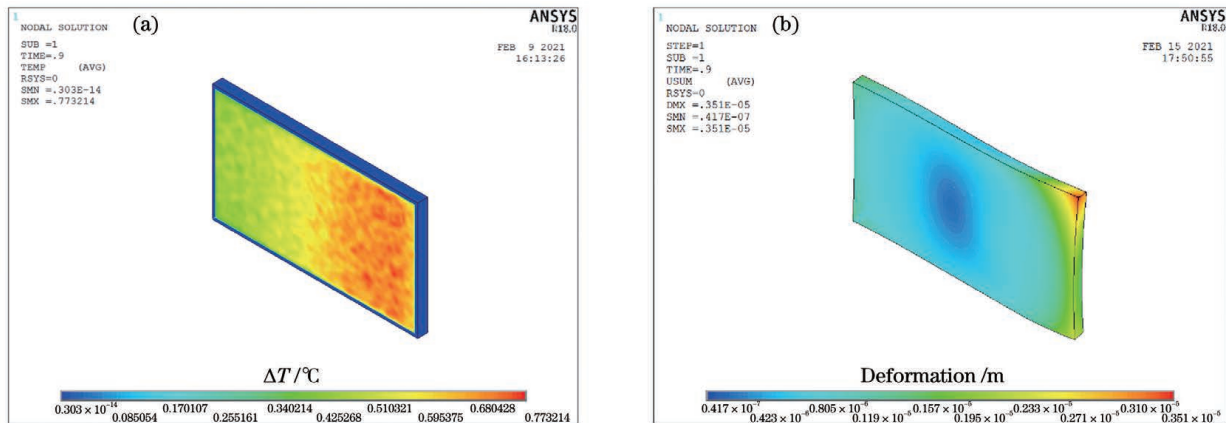


图 6 有限元方法的计算结果。(a)泵浦致温度分布;(b)泵浦致变形分布

Fig. 6 Calculation results by finite element method. (a) Pump-induced temperature distribution; (b) pump-induced deformation distribution

次泵浦瞬态最高温升约为 0.77 °C, 温度分布规律与泵浦场分布规律一致; 整体呈“S”形变, 变形最大位置位于钽玻璃顶角处。根据以上结果计算激光以布儒斯特角入射时, 单次经过单片钽玻璃后在钽玻璃片长度、高度方向上的动态漂移量峰谷(PV)值分别约为 0.121λ 与 0.114λ。

### 2.3 实验研究结果

实验光路如图 7 所示, 利用一台单模激光器作为种子光, 经过整形、扩束后成为 385 mm 的方形光束, 光束经过三个片状放大器模块并被腔镜反射后返回, 等效钽玻璃片数为 6。

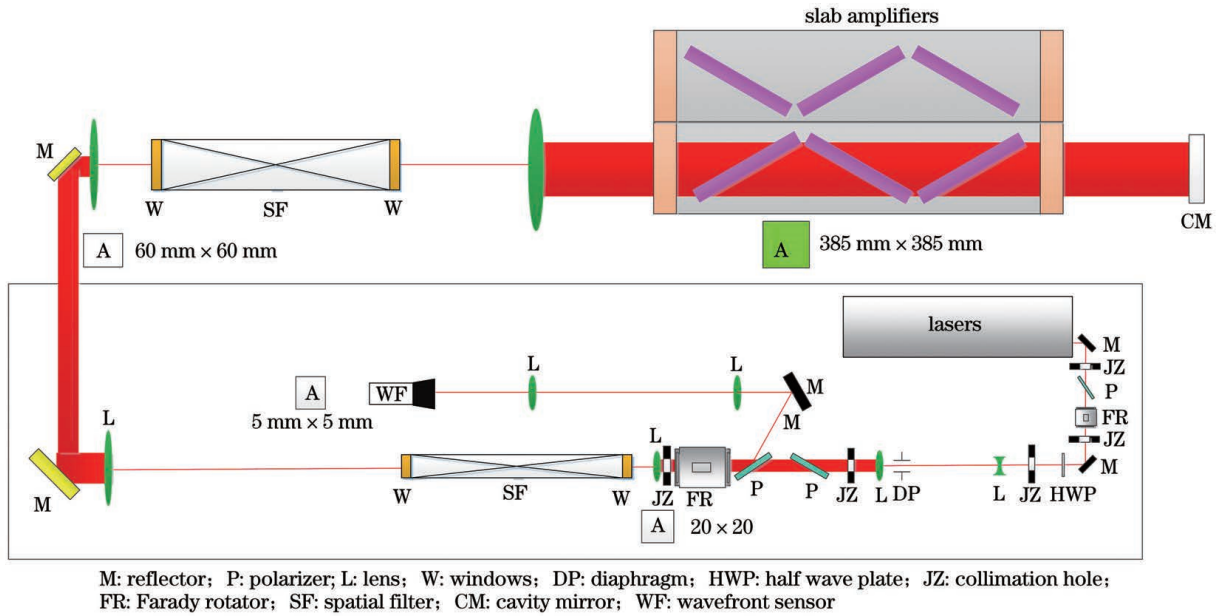


图 7 实验光路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental optical path

将哈特曼波前传感器放置于图 7 所示光路的 WF 处, 测量的动态波前倾斜分量的分布如图 8 所示, 倾斜分量的 PV 值约为 0.98λ, 倾斜分量的倾斜方向在光束口径内与水平方向的夹角(ω)约为 45°, 因此激光经过单张钽玻璃片时, 单程的光束动态漂移角度 φ 为

$$\varphi = \frac{\kappa\lambda}{aN\sin(\omega)}, \quad (6)$$

式中: κ 为倾斜分布的 PV 值; a 为光束口径; N 为

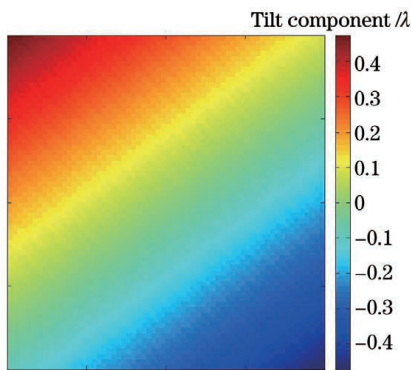


图 8 实验装置的动态波前倾斜分量的分布

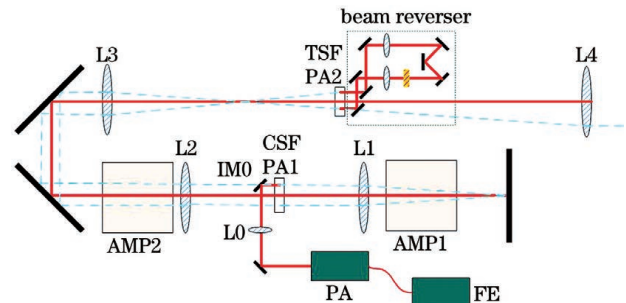
Fig. 8 Tilt component distribution of dynamic wavefront of experimental device

激光经过的等效钽玻璃片数, N=6。由式(6)可得, φ 约为 0.32 μrad。

### 3 分析与讨论

国内外类似的典型大能量激光装置的光路主要有两种, 一种是基于反转器的多程光路, 另外一种是在腔内全四程的多程放大光路。

在基于反转器的多程光路中, 如图 9 所示, 腔内放大器(靠近腔镜)考虑为九片长, 助推放大器(远离腔镜)考虑为七片长。种子光注入后经腔内空间滤



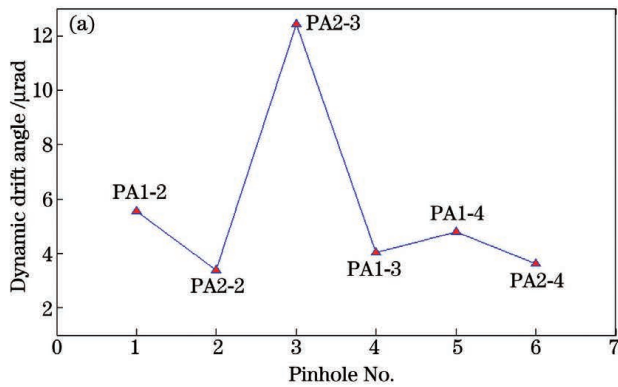
FE: front end; PA: pre amplifier; L0, L1, L2, and L3: lens; IM0: injection mirror; AMP1: main amplifier; AMP2: booster

图 9 基于反转器的多程光路

Fig. 9 Multi-pass optical path based on inverter

波器(CSF)的滤波小孔 PA1-1 扩束,通过腔内放大器,经腔镜反射后再次通过腔内放大器,经腔内空间滤波器的滤波小孔 PA1-2 传输后通过助推放大器,然后通过传输空间滤波器(TSF)的滤波小孔 PA2-2 进入光束反转器;光束返回经过传输空间滤波器的滤波小孔 PA2-3 后,依次通过助推放大器、腔内空间滤波器的滤波小孔 PA1-3 与腔内放大器,经腔镜再次反射后依次通过腔内放大器、腔内空间滤波器的滤波小孔 PA1-4、助推放大器与传输空间滤波器的滤波小孔 PA2-4 后输出。

由于空间滤波器的镜像效应以及经过装置反转



器后光束会翻转 90°,因此全链路累积的动态波前倾斜畸变值( $\Phi$ )为

$$\Phi = [(2\kappa N_1 - \kappa N_2)^2 / 36 + (\kappa N_1 - \kappa N_2)^2 / 9]^{0.5}, \quad (7)$$

式中: $N_1$  为腔内放大器数量; $N_2$  为助推放大器数量。由式(7)可得, $\Phi$  约为  $2.78\lambda$ 。

腔内空间滤波器与传输空间滤波器各滤波小孔处的动态漂移角度如图 10 所示,PA2-3 是小口径光路,因此具有最大的漂移角度,约为  $12.4 \mu\text{rad}$ ;传输空间滤波器最后一级 PA2-4 小孔输出的激光动态漂移角度约为  $3.6 \mu\text{rad}$ ,漂移量约为  $112.7 \mu\text{m}$ ,漂移比例约为 2.14%。

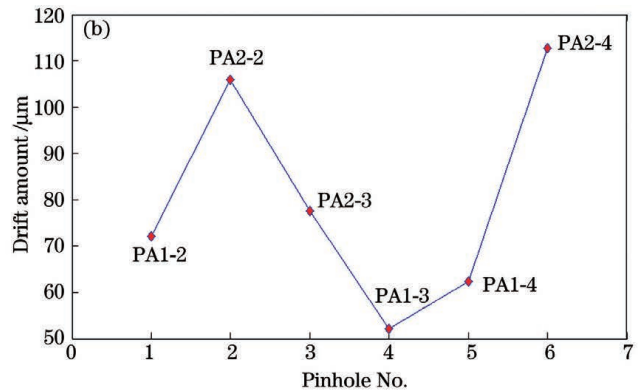


图 10 空间滤波器各小孔处的动态漂移角度及漂移量。(a)动态漂移角度;(b)漂移量

Fig. 10 Dynamic drift angle and drift amount at each hole of spatial filter. (a) Dynamic drift angle; (b) drift amount

在腔内全四程的多程光路中,如图 11 所示,腔内放大器为十一片长,助推放大器为五片长。种子光从传输空间滤波器注入,经过助推放大器后由偏振片反射进入腔内放大器,依靠等离子体电光开关的调控,在腔内放大器内经过四程放大后由偏振片

反射导出,最后经过助推放大器输出。片状放大器采用的脉冲氙灯直径为 48 mm,侧灯箱含 6 支氙灯,中灯箱含 8 支氙灯。数值模拟计算得到,该构型中激光单次经过单钽玻璃片的光束动态波前倾斜分量的 PV 值约为  $0.028\lambda$ ,全装置等效 54 片累积的动

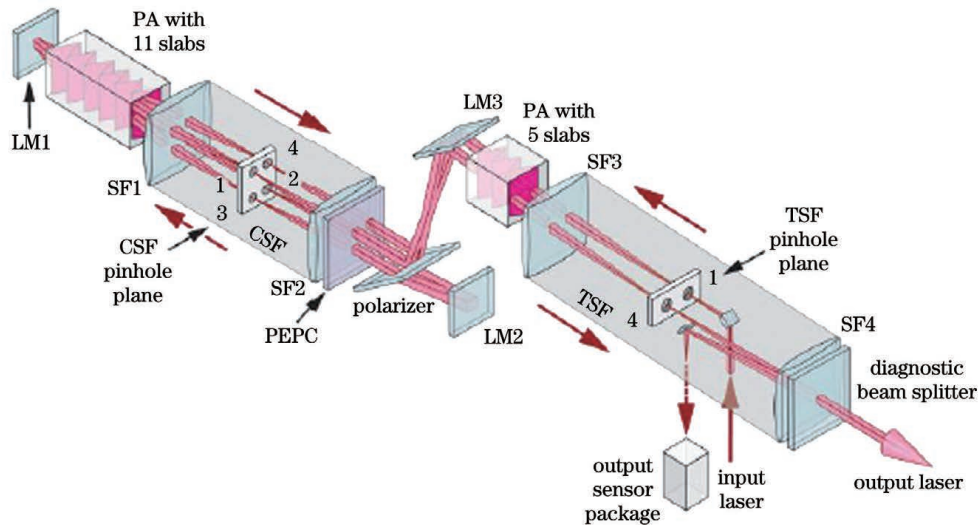


图 11 腔内全四程的多程光路

Fig. 11 Full four-pass multi-pass optical path in cavity

态波前倾斜约为  $1.51\lambda$ , 动态漂移预测值约为  $4.2\ \mu\text{rad}$ (光束口径按照  $360\ \text{mm}\times 360\ \text{mm}$  计算), 与美国 NIF 装置的预测结果(约为  $4\ \mu\text{rad}$ )<sup>[3-5]</sup> 较吻合。

## 4 结 论

介绍了大口径片状放大器中泵浦对称性对光束动态漂移的影响。以数值模拟计算的方式, 对比了两种大口径片状放大器及放大构型的光束动态漂移特性, 并实验研究了一种多灯非对称排布泵浦的大口径高增益片状放大器的泵浦致光束动态漂移特性。当钽玻璃片泵浦场的对称性约为  $1.038:1$  时, 泵浦致光束动态波前倾斜 PV 值约为  $0.98\lambda$ (6 片累积),  $375\ \text{mm}$  光束口径下激光单次经过单钽玻璃片的动态漂移角度约为  $0.32\ \mu\text{rad}$ , 与理论模型吻合较好。

## 参 考 文 献

- [1] Sawicki R H. The national ignition facility: laser system, beam line design, and construction [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 43-54.
- [2] Horvath J A. NIF/LMJ prototype amplifier mechanical design [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3047: 148-157.
- [3] Woodruff J, van Arsdall P, Bliss E. National ignition facility sub-system design requirements supervisory control software SSDR 1.5.2 [EB/OL]. (1996-08-29) [2021-03-05]. [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc693519/m2/1/high\\_res\\_d/594978.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc693519/m2/1/high_res_d/594978.pdf).
- [4] Erlandson A C, Rotter M D, Frank M D, et al. Design and performance of the beamlet amplifiers [R]. Oak Ridge: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1996.
- [5] Shapiro A. A three-dimensional finite element heat transfer code [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [6] 杨思达, 印定军, 甘泽彪, 等. 高能量重复频率钽玻璃激光器的热效应实验研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0901004.  
Yang S D, Yin D J, Gan Z B, et al. Thermal effect of high energy repetition rate Nd: glass laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0901004.
- [7] 胡必龙, 王道, 李伟, 等. 压缩聚焦过程中的波前畸变对远场时空分布影响 [J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1132001.  
Hu B L, Wang X, Li W, et al. Wavefront distortion effect on far-field spatio-temporal distribution in compression and focusing process [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1132001.
- [8] 韩妍娜, 胡新奇, 董冰. 一种扩大夏克-哈特曼波前传感器动态范围的迭代外推法 [J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1611004.  
Han Y N, Hu X Q, Dong B. Iterative extrapolation method to expand dynamic range of Shack-Hartmann wavefront sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1611004.
- [9] Zacharias R A, Bliss E S, Feldman M, et al. National Ignition Facility (NIF) wavefront control system [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3492: 678-692.
- [10] Electronics technologist-NIF power conditioning systems [EB/OL]. [2021-03-05]. <https://www.llnl.gov/join-our-team/careers/find-your-job/engineering/all/3743990000056368>.
- [11] Powell H T, Erlandson A C, Jancaitis K S, et al. Flashlamp pumping of Nd: glass disk amplifiers [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1277: 103-120.
- [12] Kelly J H, Brown D C, Abate J A, et al. Dynamic model of xenon-pumped Nd: glass large-aperture amplifiers [J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69: 1595-1605.
- [13] 张华. 高功率钽玻璃激光放大器优化设计的理论与实验研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 1999.  
Zhang H. Theoretical and experimental research on optimal design of high power neodymium glass laser amplifier [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1999.
- [14] 孙志红, 彭志涛, 刘华, 等. 高功率激光近场空域计算方法 [J]. 中国激光, 2008, 35(4): 544-548.  
Sun Z H, Peng Z T, Liu H, et al. Calculated methods of high power laser near field parameters [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(4): 544-548.
- [15] 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.  
Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X, Transl. Beijing: Science Press, 2002.
- [16] 叶红卫, 李新阳, 鲜浩, 等. 光学系统的 Zernike 像差与光束质量  $\beta$  因子的关系 [J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1420-1427.  
Ye H W, Li X Y, Xian H, et al. Relationship between Zernike wavefront errors and beam quality factor  $\beta$  for optics system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(6): 1420-1427.

# Dynamic Drift of Laser in $4 \times 2$ Assembled Slab Amplifier with 400 mm Aperture

Wang Zhenguo, Chen lin, Xue Qiao, Wu Wenlong\*, Liu Jianguo, Liu Yong, Wang Lin  
*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*

## Abstract

**Objective** The research of inertial confinement fusion (ICF) has been a hot spot in international research in recent decades. The slab amplifier provides more than 99% of the energy for the entire laser device and is the heart. However, during laser amplification, asymmetric pumping causes uneven heating of the gain medium, resulting in a drift in the laser propagation direction through the neodymium glass sheet, that is, an angular drift of the laser. The accurate evaluation of the angular drift influences the multi-pass design of the amplifier, which ensures the main laser passes through the spatial filter aperture smoothly and provides a design basis for the filter aperture size and the working mode of the deformable mirror compensation. Starting from the influence of the pump on the medium, we have independently developed a set of design models, hoping to design the amplifier more accurately based on domestic components and obtain a smaller and more accurate angular drift, which is helpful to the better design of chip amplifiers.

**Methods** A theoretical model is established as shown in Fig. 2. We first use the pump configuration as the input condition to obtain the pump field distribution on the gain medium through three-dimensional ray tracing, and then obtain the heat distribution on the gain medium. On the one hand, the thermal distribution is first combined with the boundary conditions of the clamping method to obtain the stress distribution on the gain medium, and then the surface shape distribution is obtained. On the other hand, the heat distribution and stress distribution jointly determine the distribution of refractive index changes on the gain medium. These two together determine the angular drift of the transmitted laser beam. This article uses the model to design and manufacture the amplifier. A set of three pieces of 400 mm diameter  $4 \times 2$  combined chip amplifiers is developed. In the height direction of the amplifier, the stack of four neodymium glass plates forms four laser apertures, and there are two laser apertures in the width direction, forming a total of  $4 \times 2$  light-through aperture. The xenon lamp pumps the neodymium glass sheet from both sides. The main laser physical parameters of neodymium glass used in the design and experiment are shown in Table 1, and the basic technical parameters of the pumping scheme are shown in Table 2.

**Results and Discussions** Using the model to calculate the device shown in Table 1, the obtained pump field distribution is shown in Fig. 4 and the comparison of the pump field characteristics of the two schemes is shown in Fig. 5. The device scheme has a better gain uniformity distribution under high gain conditions, but the beam dynamic drift is relatively large.

There are two typical schemes of high-energy laser devices at home and abroad. One is the multi-path optical path based on the inverter as shown in Fig. 9. The dynamic wavefront tilt distortion value accumulated in the entire link is given by Eq. (7), and it is about  $2.78\lambda$  (the detection wavelength  $\lambda$  is 1053 nm). The dynamic drift angle of the output laser in the last pass is about  $3.6 \mu\text{rad}$ , the drift amount is about  $112.7 \mu\text{m}$ , and the drift ratio (ratio of drift amount to aperture diameter at 30 times diffraction limit) is about 2.14%.

The other is the full four-pass multi-pass amplification optical path in the cavity, as shown in Fig. 11, which is used to check the calculation results of the model. In this configuration, the peak valley (PV) value of the dynamic wavefront tilt component of the laser beam passing through the single neodymium glass plate is about  $0.028\lambda$ , and the cumulative dynamic wavefront tilt of the equivalent 54 pieces chip amplifiers is about  $1.51\lambda$ . Then the predicted dynamic drift is about  $4.2 \mu\text{rad}$  (the beam diameter is calculated as  $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ ), which is consistent with the prediction result of the National Ignition Facility device (about  $4 \mu\text{rad}$ ).

**Conclusions** In this article, the influence of pump symmetry on the dynamic drift of the beam in a large-aperture chip amplifier is introduced. The beam dynamic drift characteristics of two large-aperture slab amplifiers and amplification configurations are compared by the numerical simulation calculations, and a large-aperture high-profile pump based on a pulsed xenon lamp with a diameter of 37 mm and asymmetrical arrangement of multiple lamps is



studied experimentally. The dynamic drift characteristics of the beam caused by the pump of the gain slab amplifier are studied. When the symmetry of the pump field of the neodymium glass sheet is about 1.038:1, the pump-induced beam dynamic wavefront tilt PV value is about  $0.98\lambda$  (6 sheets accumulation), and the dynamic drift angle of a single laser passing through a single neodymium glass plate is about  $0.32 \mu\text{rad}$  in 375 mm beam aperture, which is well consistent with the result of the theoretical model. This can provide reference for the design of slab amplifiers with different pump configurations as well as the design of multi-path optical paths of laser devices and the design of spatial filter apertures.

**Key words** lasers; slab amplifier; pumping symmetry; dynamic drift; simulation; experimental study