

# 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

陈 林 谢旭东 陈远斌 刘建国 王正辉 郝 欣 刘 勇 郑奎兴

中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 氙灯抽运将导致钕玻璃内产生不均匀温升,这是产生应力退偏的根本原因。热致应力退偏效应将直接降低系统效率、影响光束质量,因此确定片内的温度分布以及应力分布,准确预测由此带来的光束退偏特性并合理设计光束填充因子是十分重要的。介绍了我国第一台单束输出能力超过万焦耳的惯性约束聚变激光驱动器中大口径高通量验证实验平台片状放大器的热致退偏效应,通过理论模拟计算获得了钕玻璃片内三维温升分布、应力分布与由此导致的退偏分布特性,结果表明,片状放大器在 5.28%/cm 平均小信号增益系数输出的情况下整个光束口径内的应力双折射是很小的,但方光束的四个角部处的应力双折射较严重,最大的退偏量约为 0.13%,该结果与劳伦斯·利弗莫尔实验室实验测得的结果基本一致。输出的激光近场结果表明,片状放大器热致退偏效应可满足大能量装置输出设计要求。

**关键词** 激光光学;热致应力退偏;片状放大器;理论模拟;实验研究

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s114007

## Investigation on Depolarization of Slab Amplifiers on Integration-Test-Bed

Chen Lin Xie Xudong Chen Yuanbin Liu Jianguo Wang Zhenghui Hao Xin  
Liu Yong Zheng Kuixing

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

**Abstract** Xenon lamp-pumped Nd:glass will result in uneven temperature rise, which will produce thermal stress birefringence and induce depolarization. Depolarization will directly reduce the system efficiency, beam quality. So, it is important to confirm the temperature distribution and stress distribution, to accurately predict the resulting depolarization of the beam, and to design rational beam filling factor. Based on the electro-optical conversion model, we used three-dimensional ray tracing to obtain the distribution of thermal power source. with heat conduction theory, we calculated the three-dimensional temperature distribution of the laser glass and the stress distribution and the resulting depolarization distribution. The results show that the stress birefringence within the beam diameter is small, but the four corners of square beam department of the stress birefringence are more serious, with the largest depolarization about 0.13%. The results are consistent with the experimental results of Lawrence Livermore national laboratory. The near field results of outputted laser show that the thermal induced depolarization of the slab amplifiers satisfies the output design demand of high energy equipment.

**Key words** laser optics; depolarization; slab amplifiers; simulation; experimental research

**OCIS codes** 140.6810;230.4480;140.3530

## 1 引 言

片状放大器主要解决装置纵向能量传递转换问题,为装置提供超过 99%的能量与功率,是装置最重要的部分之一。大口径高通量验证实验平台是我国第一台单束万焦耳激光输出驱动器,也是继美国国家点火

收稿日期: 2015-04-25; 收到修改稿日期: 2015-06-12

作者简介: 陈 林(1984—),男,硕士,助理研究员,主要从事专业高功率固体激光等方面的研究。

E-mail: linxiaogiao@126.com

设施(NIF)装置、法国兆焦耳激光器(LMJ)装置之后第三台实现单束激光超过万焦耳输出的装置,采用了400 mm口径片状放大器与离轴多程放大的主放大结构,片状放大器小信号增益系数达到5.28%/cm,最高输出能量达到19.6 kJ/5 ns。

氙灯抽运将导致钕玻璃介质内的不均匀温升,由此在介质内造成的热应力又会在介质内引起折射率的不均匀,使介质由各向同性变为各向异性,导致热应力双折射。在线偏振光工作的大口径激光器件中,热应力双折射不仅会引起严重的退偏损耗,降低系统效率,而且会提高光束近场对比度,影响光束质量。因此,确定片内的温度分布以及应力分布,准确预测由此带来的光束退偏特性并合理设计光束填充因子是十分重要的。

本文主要研究了400 mm单口径片状放大器的热致应力退偏问题。利用三维光线追迹和有限元分析方法,详细模拟计算了钕玻璃介质内的三维应力分布,由此预测了退偏分布特性,并与美国劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)的实验结果进行了对比。仿真结果表明,在5.28%/cm高增益输出情况下,片状放大器热致应力退偏满足装置大能量输出设计要求。

## 2 理论计算模型

研究钕玻璃片热致应力退偏主要考虑单次抽运引发的瞬态温度分布,模拟计算流程如图1所示:1)采用Powell等<sup>[1]</sup>的经验模型计算氙灯辐射光谱与能量分布;2)根据抽运腔结构,采用三维光线追迹方法计算钕玻璃片内抽运能量沉积与分布;3)采用三维光线追迹方法计算自发辐射荧光在抽运过程中片内放大特性(ASE)及包边吸收ASE特性<sup>[2-3]</sup>,计算包边玻璃温升及分布;4)根据钕玻璃片内初始抽运能量沉积分布与热功率转换定标因子,计算钕玻璃片内热功率源分布,得到片内瞬态温升及分布;5)根据钕玻璃温升与装校结构计算钕玻璃热致应力分布;6)考虑水平方向偏振的激光束以布儒斯特角入射至钕玻璃片时的情形<sup>[4-5]</sup>,如图2所示,并根据应力分布计算热致退偏特性<sup>[6-7]</sup>。

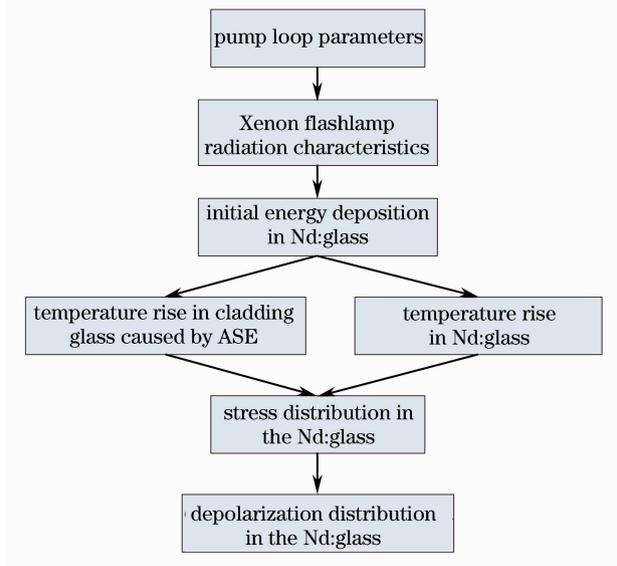


图1 热致应力退偏计算模型

Fig. 1 Depolarization thermally induced stress calculation model

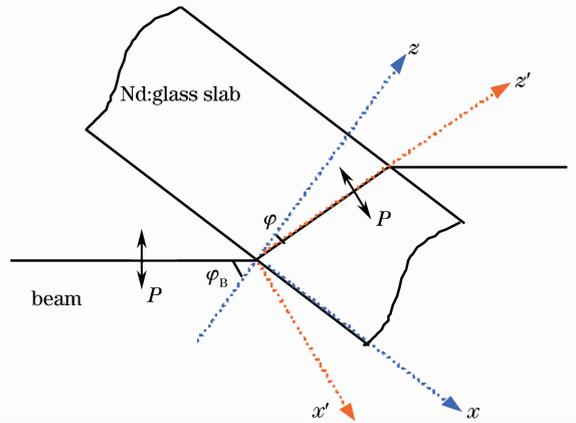


图2 以布儒斯特角入射的水平偏振激光束

Fig. 2 Brewster angle to the horizontal polarization of the incident laser beam

各向同性的钕玻璃存在应力时折射率方程变为一个椭球方程:

$$B_1 x_1^2 + B_2 x_2^2 + B_3 x_3^2 + 2B_4 x_2 x_3 + 2B_5 x_1 x_3 + 2B_6 x_1 x_2 = 1, \quad (1)$$

式中  $B_{1,2,3} = B_0 + \delta B_{1,2,3}$ ,  $B_{4,5,6} = \delta B_{4,5,6}$ ,  $\delta$  为相对相位延迟。

当光束以布儒斯特角入射时<sup>[4-5]</sup>,  $\varphi_B + \varphi = \pi/2$ 。张量变化  $\delta B$  和变形的变换关系为分别为:

$$\delta B' = A^T(\varphi) \cdot \delta B \cdot A(\varphi), \quad (2)$$

$$dr' = A(\varphi) \cdot dr, \quad (3)$$

式中,变换矩阵  $A$  为:

$$\mathbf{A}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

因此,

$$\delta B'_1 = \delta B_1 \cos^2 \varphi + 2\delta B_5 \sin \varphi \cos \varphi + \delta B_3 \sin^2 \varphi, \quad (5)$$

$$dz' = dx \cdot \sin \varphi + dz \cdot \cos \varphi. \quad (6)$$

考虑到折射率随温度的变化之后,最后可以得到钕玻璃片存在温度和应力的情况下,折射率变为:

$$n(x', y', z') = n_0 + \beta \cdot T(x', y', z') - \frac{1}{2} n_0^3 \delta B'_1(x', y', z'), \quad (7)$$

式中,  $\beta$  为钕玻璃材料的折射率温度系数,折射率导致的相对相位延迟为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l \Delta n dz. \quad (8)$$

线偏振激光通过应力双折射介质之后透射率为:

$$T = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \sin^2 \left( \frac{\delta}{2} \right). \quad (9)$$

$I_{\text{in}}$  和  $I_{\text{out}}$  分别表示入射光强和经过两偏振片后的出射光强,退偏量  $\eta = (I_{\text{in}} - I_{\text{out}}) / I_{\text{in}}$ 。

### 3 计算与实验结果分析

400 mm 单口径片状放大器基本结构如图 3 所示,所采用的钕玻璃片热特性参数如表 1 所示。钕玻璃片安装环境洁净度优于 100 级,以避免表面附着杂质颗粒造成激光损伤。运行完毕后钕玻璃片采用洁净度优于 100 级的氮气进行吹扫,以促进热畸变的恢复与避免气溶胶在其表面的附着。隔板玻璃置于氙灯和激光片之间。这样安排有三个目的:1)避免氙灯产生的声波传输进光路中,引起波前畸变;2)提供一个屏障避免氙灯腔和片腔之间相互污染;3)形成一个通道用以使流动的冷却气体可以环绕氙灯进行冷却。同时为提高抽运光传输效率,隔板玻璃镀有化学膜层,对氙灯光的平均透射率可大于 94%。氙灯反射器采用了镀银平板反射器,对氙灯光的平均反射率可大于 92%。

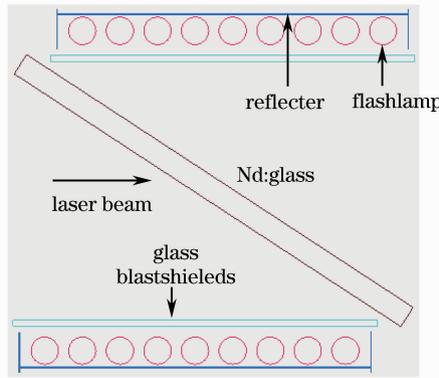


图 3 400 mm 单口径片状放大器基本结构

Fig. 3 Basic structure of the slab amplifiers with a 400 mm aperture

表 1 钕玻璃热特性参数

Table 1 Thermal parameters of Nd:glass

Thermal conductivity, $\kappa$ / (W/mK)	0.614	Mass density, $\rho$ / (kg/m <sup>3</sup> )	$2.83 \times 10^3$
Linear thermal expansion coefficient, $\alpha$ / K	$107 \times 10^{-7}$	Specific heat, $C_p$ / [J / (kg·K)]	$0.75 \times 10^3$
Temperature coefficient of refractive index, $dn/dT$ / K	$-4.3 \times 10^{-6}$	Elastic modulus, $E$ / GPa	64.95
Index of refraction, $n_0$	1.534	Poisson's ratio, $\mu$	0.2735

#### 3.1 温度与应力分布

根据以上计算模型,模拟计算得钕玻璃内三维温升分布与应力分布,如图 4~6 所示,片内最高温升约为

0.85 ℃。由于钕玻璃片布儒斯特角排布的抽运结构,钕玻璃片内温升为不均匀分布,单面沿长度方向呈逐渐降低的梯度分布。为抑制钕玻璃片内寄生振荡,在钕玻璃四周采取包边措施吸收放大自发辐射荧光,因此单次抽运结束后包边玻璃的温升远大于钕玻璃片内的温升,约为 3.2 ℃。温度梯度产生的应力分布带来钕玻璃片“S”形变形分布,同时带来激光波前畸变。

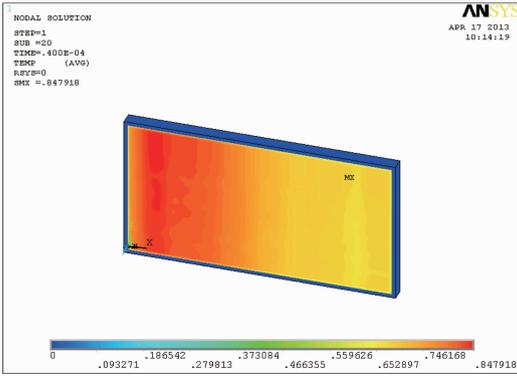


图 4 钕玻璃片内瞬态温度分布

Fig. 4 Transient temperature distribution in Nd:glass

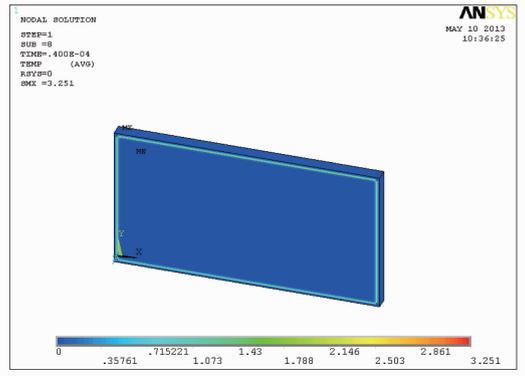


图5 包边瞬态温升

Fig. 5 Transient temperature distribution in cladding glass

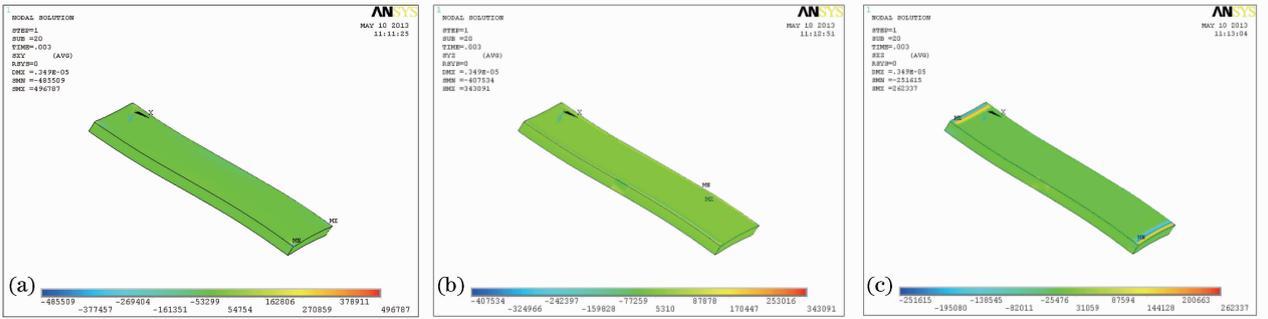


图 6 钕玻璃介质中的应力分布。(a) $xy$ 面剪切应力分布;(b) $yz$ 面剪切应力分布;(c) $xz$ 面剪切应力分布

Fig. 6 Stress distribution in the Nd:glass. (a)  $xy$ -plane shear stress distribution ; (b)  $yz$ -plane shear stress distribution ; (c)  $xz$ -plane shear stress distribution

### 3.2 退偏分布

对应于图 4~6 所示的钕玻璃片的温度分布与剪切应力分布,水平偏振的激光束以布儒斯特角入射至钕玻璃片之后,在通过 400 mm×400 mm 的净通光口径范围内钕玻璃片后的退偏损耗分布如图 7 所示。可

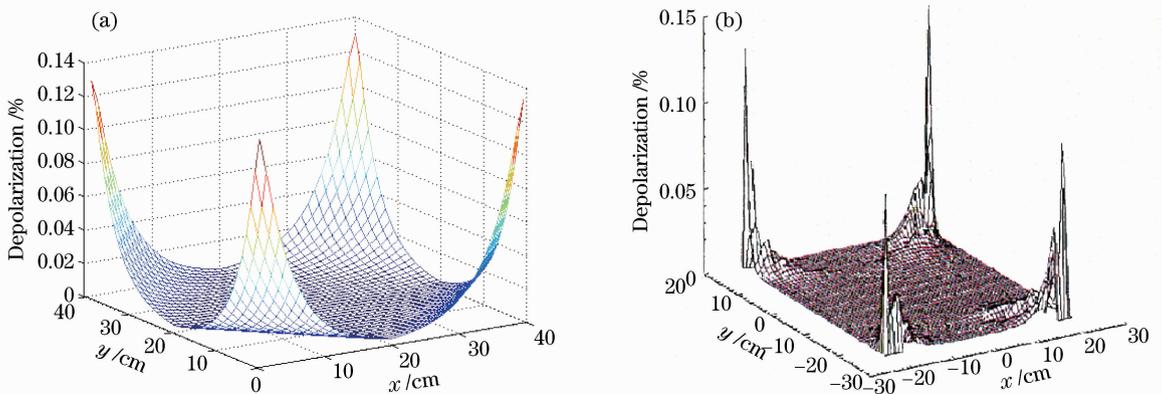


图 7 400 mm 单口径片状放大器热致应力退偏。(a)模拟计算退偏分布;(b)LLNL 实验测量退偏分布

Fig. 7 Depolarization distributed in slab amplifiers. (a) Depolarization distributed by simulation; (b) experimental measurements distributed depolarization in LLNL

见,整个光束口径内的应力双折射导致的退偏损耗很小,但光束的4个角部处的应力双折射较严重,最大的退偏量为0.13%,但依然满足大口径高通量验证实验平台360 mm×360 mm光束口径、离轴多程放大构型设计要求,与美国LLNL公布的热退偏数值基本一致<sup>[5]</sup>。

### 3.3 装置输出结果

大口径高通量验证实验平台采取了“离轴多程+光束反转”的主放大结构,光束口径为360 mm×360 mm,激光输出近场调制度为1.56:1,对比度为0.12,如图8所示,对应片状放大器正方形通光口径热致退偏效应较严重的四个角,激光输出近场并未出现不均匀,表明片状放大器热致退偏效应可以满足装置大能量输出要求,装置基于热退偏效应的光束填充因子设计是合理的。

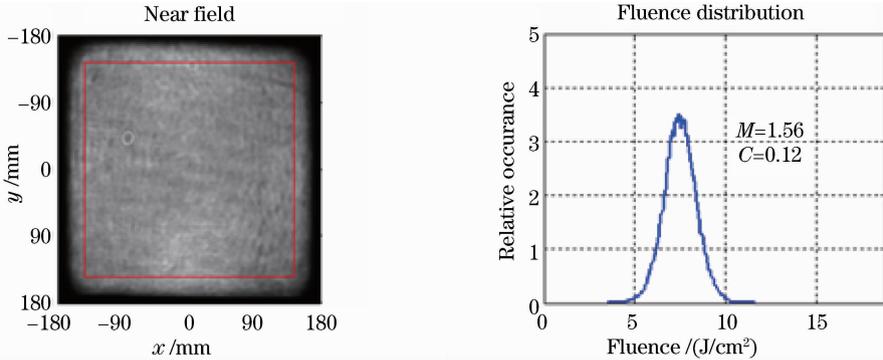


图8 装置激光输出近场特性。(a)近场光斑;(b)通量分布

Fig. 6 Near-field characteristics of the laser output. (a) Near filed spot; (b) fluence distribution

## 4 结 论

研究了我国第一台单束输出能力超过万焦耳的激光驱动器—大口径高通量验证实验平台片状放大器在高增益情况下的退偏分布特性。结果表明,整个光束口径内的应力双折射是很小的,但方光束的四个角部处的应力双折射较严重,最大的退偏量约为0.13%,该结果与LLNL实验测得的结果基本一致,为激光离轴多程放大填充因子的设计提供依据。并且在目前抽运结构下,退偏量可以满足装置大能量输出设计要求。

## 参 考 文 献

- 1 H T Powell, A C Erlandson, K S Jancitis, *et al.*. Laser Program Annual Report[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, CA, 1986.
- 2 He Shaobo. Investigation on Amplification of Spontaneous Emission in Laser Amplifiers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002: 6–10.  
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: 6–10.
- 3 Zhang Hua, Fan Dianyuan. Study on amplification of spontaneous emission in Nd:glass slab amplifiers[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(6): 1047–1051.  
张 华, 范滇元. 钕玻璃片状激光放大器自发辐射放大特性的研究[J]. 物理学报, 2000, 49(6): 1047–1051.
- 4 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.
- 5 Cao Dingxiang. Thermal Effect of High-Power Solid-State Laser Systems and Thermal Management Research[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 147–172.  
曹丁象. 高功率固体激光系统的热效应及热管理研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2008: 157–172.
- 6 Ou Qunfei, Chen Jianguo, Feng Guoying, *et al.*. Analyses of thermal depolarization in ring laser diode array side-pump rod laser[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(7): 797–801.  
欧群飞, 陈建国, 冯国英, 等. 环形激光二极管抽运激光棒的热致退偏分析[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 797–801.
- 7 Li Gang, Feng Guoying, Li Wei, *et al.*. Depolarization loss in square sheets Nd:YAG laser medium induced by stress birefringence[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 38–43.  
李 刚, 冯国英, 李 伟, 等. Nd:YAG方形薄片激光介质应力双折射及退偏损失[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 38–43.

编辑的问题:

1. 请作者按照中文标题给出对应的英文标题,注意翻译的准确性。
2. 请作者给出收稿日期,收到修改稿日期,基金项目,作者邮箱。
3. 请作者给出参考文献一详细的作者列表