

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0272-04

# 高功率激光装置基频光远场的模拟分析

刘红婕, 景 峰, 胡东霞, 彭志涛, 李 强, 周 维, 张 昆

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 实现惯性约束聚变(ICF)需要高质量的远场,而远场是由聚焦前光束的相位和振幅决定的。对高功率固体激光装置,其输出光束的振幅分布主要由注入光束的振幅分布决定,其相位分布主要决定于光路中存在的大口径光学元件,同时高通量运行时的振幅和相位噪声的非线性自聚焦效应对光束远场的影响也不能忽略。基于这些特点,理论分析了影响光束远场的因素以及在高通量下噪声纹波的非线性自聚焦效应,模拟了具有四程放大结构的高功率激光装置的传输特性,分别研究了注入光束振幅和光学元件引入的相位噪声对光束远场的影响。研究表明,大口径光学元件引入的相位噪声是影响远场的主要因素。

**关键词** 激光技术; 远场; 相位噪声; 振幅噪声; 非线性自聚焦效应; 高功率固体激光器

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A

## Numerical Analysis of $1\omega$ Far-Field in High Power Laser System

LIU Hong-jie, JING Feng, HU Dong-xia, PENG Zhi-tao, LI Qiang,  
ZHOU Wei, ZHANG Kun

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

**Abstract** High quality far-field determined by the phase and amplitude distribution of focal beam is necessary for inertial confinement fusion (ICF). To the high power laser system, the amplitude distribution of the output laser beam mainly derives from input beam, while phase distribution mainly come from the large aperture optical elements, especially for the Nd:glass amplifier slab. Nonlinear self-focusing of ripple can effect on far field in high energy too. Based on these factor, the transmit character of high power laser with fourth-pass amplifier was simulated, and the effect of amplitude and phase distribution on far field was analyzed by numerical was. The conclusion is that the most important effect factor on far field is phase distortion come from large aperture optics.

**Key words** laser technique; far field; phase distortion; amplitude distortion; nonlinear self-focusing effect; high power solid laser

## 1 引 言

为了实现“点火”,高功率固体激光装置对打靶光束提出了很高的要求,光束能量高且远场要非常好。以一个典型的高功率激光装置国家点火装置(NIF)<sup>[1]</sup>为例,国家点火装置的远场要求是,70  $\mu$ rad 内包含 95% 脉冲能量。光束远场主要由聚焦前光束的相位和振幅决定的。高功率固体激光装置输出光束的振幅分布由注入光束的振幅分布和光束传输过程中由光学元件引入的调制决定,其中注入光束的强度分布占决定因素。影响高功率固体激光装置输出光束相位的因素主要有以下几种:由片状放大器抽运引入的相位噪声<sup>[2]</sup>,这种误差可分两个方面:动态(氙灯抽运时导致的热畸变)和静态(上一发激

光运行后残留的热畸变),这两个作用都很明显;由光学元件夹持变形、重力引起的弯曲和透镜准直等引入的相位噪声;由光学元件抛光不完美、材料内部瑕疵等引入的相位噪声<sup>[3,4]</sup>;放大器腔内和光束管道里的气体湍流引入的相位噪声等。国家点火装置的研究<sup>[5,6]</sup>表明:前两种相位噪声都可以由变形镜得到很好的校正。变形镜无法很好地矫正气体湍流引入的相位噪声,但这种噪声源对远场焦斑的贡献非常小。只有由光学元件引入的相位噪声不能够完全被变形镜矫正,也不能被忽略,是最终影响光束远场的主要因素。同时还要考虑光束基本是在高通量下运行的,必须考虑光束的非线性自聚焦效应对光束远场特性的影响。

**基金项目:** 国防科技重点实验室基金(51480040104ZW0806)和国家 863 计划资助课题。

**作者简介:** 刘红婕(1978—),女,山东鄄城人,中国工程物理研究院激光聚变研究中心助理研究员,硕士,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail: hongjie3713@sina.com



为 4 J/ns,低通量时注入为 0.1 J/ns。

表 1 为不同条件下基频光焦斑能量的半径所对应的衍射极限倍数。图 2 为理想时(no phase)、仅考虑 Nd 玻璃相位时(phase only)、仅考虑注入光束近场分布时(amplitude only)以及两者全部考虑时(amplitude and phase)的基频光焦斑能量百分比与衍射极限倍数的关系,聚焦透镜的焦距为 3000 mm。图 2(a)为低通量( $E_{in}=0.1$  J/ns)时的情况,图 2(b)为高通量( $E_{in}=4$  J/ns)时的情况。由表 1 和图 2 可以分析影响光束远场的能量集中度的因素。图 3 为不同条件下输出基频光光束的远场分布,图 3(a)~(h)分别为低通量下注入光束理想、不考虑光学元件引入的相位噪声时的情况;高通量下注入光束理想、不考虑光学元件引入的相位噪声时的情况;低通量下注入光束理想、仅考虑钕玻璃引入的相位噪声时的情况;高通量下注入光束理想、仅考虑钕玻璃引入的相位噪声时的情况;低通量下注入光束为原型装置预放的输出光束、不考虑光学元件引入的相位噪声时的情况;高通量下注入光束为原型装置预放的输出光束、不考虑光学元件引入的相位噪声时的情况;低通量下注入光束为原型装置预放的输出光束、考虑钕玻璃引入的相位噪声时的情况;高通量下

注入光束为原型装置预放的输出光束、考虑钕玻璃引入的相位噪声时的情况。比较图 3(c)和(d)可以看出,相位噪声的非线性增长对远场焦斑的影响;比较图 3(c),(d),(e)和(f)可知,相位噪声对远场的影响具有决定因素,振幅噪声对远场焦斑的影响主要体现在全光束自聚焦上;比较低通量和高通量时的输出远场可以看出光束噪声非线性增长对远场焦斑的影响。

表 1 不同条件下一定基频光焦斑能量百分比对应的衍射极限倍数

Table 1 Diffraction limited times corresponding to focal spot diameter that includes certain percent energy with different conditions in  $1\omega$  beam

Percent of focal spot energy /%		80	85	90	95
Ideal input	$E_{in}=0.1$ J/ns	1.5	1.6	1.9	2.3
	$E_{in}=4$ J/ns	3.8	5.1	6.5	8.6
Nd: glass phase	$E_{in}=0.1$ J/ns	4.1	4.8	5.5	7.1
	$E_{in}=4$ J/ns	5.3	6.5	7.9	10.2
Non-ideal input	$E_{in}=0.1$ J/ns	1.6	1.8	2.2	2.6
	$E_{in}=4$ J/ns	3.9	5.1	7.5	11.8
Non-ideal input	$E_{in}=0.1$ J/ns	4.0	4.6	5.3	6.8
	$E_{in}=4$ J/ns	5.1	6.2	7.8	10.3

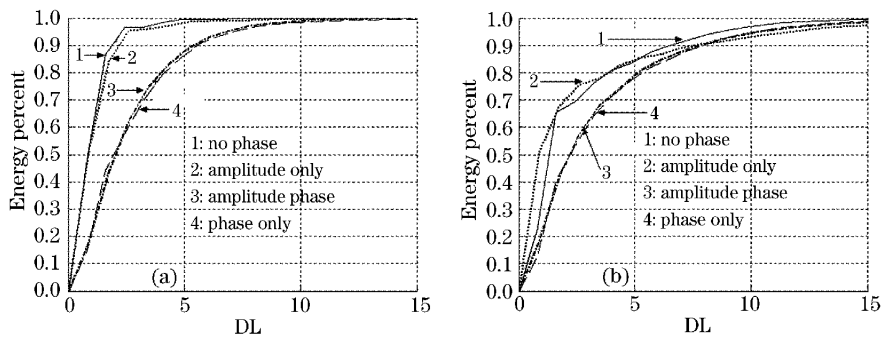


图 2 不同条件下基频光焦斑能量百分比与衍射极限倍数的关系

Fig. 2 Relation of focal spot diameter that includes certain percent energy and diffraction limited times with different conditions in  $1\omega$  beam

低能量注入时可以忽略光束的非线性效应,即认为不存在非线性影响时的情况。高能量注入时的结果与此相比较,就可以看出光束的非线性自聚焦效应对焦斑的影响。分别考虑振幅调制和相位调制对光束远场的影响,低能量注入时决定光束远场分布的是钕玻璃引入的相位调制(包含 95%焦斑能量的半径:相位调制为 7.1 倍衍射极限,而振幅调制为 2.6 倍衍射极限)。高能量注入时相位调制的非线性增长对远场有贡献,但与振幅调制相比,振幅调制

的非线性增长对光束远场的贡献最大(包含 95%焦斑能量的半径:相位调制的非线性增长为 3.1 倍衍射极限,而振幅调制的非线性增长为 9.2 倍衍射极限),而由光束口径引起的全光束自聚焦对远场能量分布的影响占了很大的比重(约 2/3)。高通量时 90%以内的焦斑能量半径主要决定于由光学元件引入的相位噪声,90%以外的焦斑半径主要决定于由注入光束近场分布引入的振幅噪声,这说明光束的旁瓣很大部分是由注入光束引入的振幅噪声的非线

性增长决定的。与仅考虑光学元件相位噪声和仅考虑注入光束的振幅噪声时比较,对注入光束为原型装置预放的输出光束、考虑钹玻璃引入的相位噪声时的情况,仅仅从焦斑能量百分比对应的衍射极限倍数中(从表 1 和图 2)看不出差别,但在远场分布

图中可以明显地看到图 3(g),(f)中远场焦斑旁瓣远远大于图 3(e),(f)中的。国家点火装置的研究表明,这些旁瓣经过三倍频转换器转换到三倍频时将会被放大,对三倍频焦斑有很大的影响。

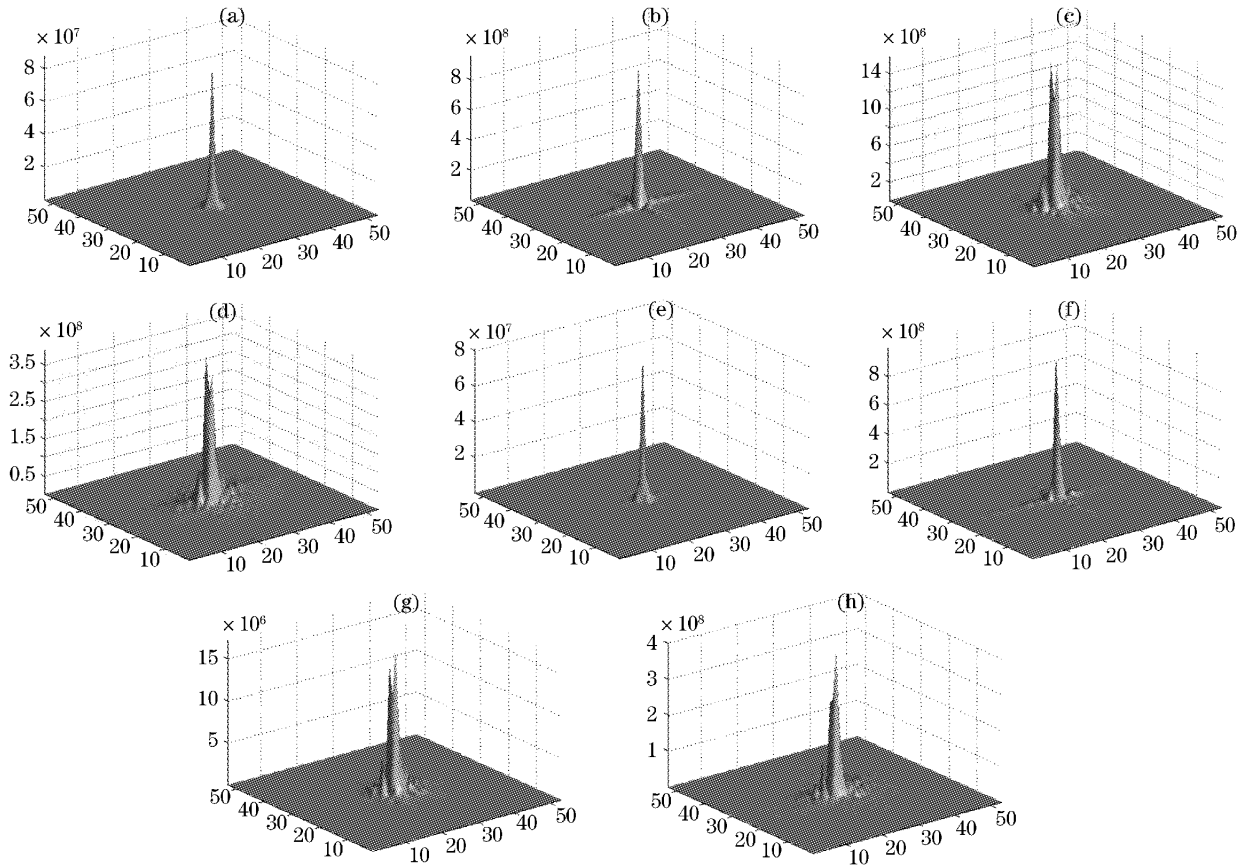


图 3 不同条件下输出基频光光束的远场分布

Fig. 3  $1\omega$  far field distribution with different conditions

## 4 结 论

无论是低通量时还是高通量时,钹玻璃引入的相位噪声都是影响焦斑大小的主要因素。低通量时钹玻璃片的相位几乎决定了高功率固体激光装置基频光输出的远场能量分布。高通量时相位噪声和振幅噪声都能引起高功率固体激光装置基频光远场能量集中度的下降,光束近场对非线性增长的贡献较大,主要来源于光束口径引起的全光束自聚焦。由此可见,高功率固体激光装置得到好的光束远场,主要需要控制的是光学元件面形。另外注入光束的近场分布也是影响光束远场质量的原因之一,主要体现在全光束自聚焦上,需要选取合适的软化因子。

## 参 考 文 献

1 Theodore S. Perry, Bernhard H. Wilde. NIF system-design

- requirements nuclear-weapons physics experiments [R]. <http://www.llnl.gov>, UCRL-ID-120738, 1995
- 2 Mark Rotter, Ken Jancaitis, Chris Marshall *et al.*. Pump-induced wavefront distortion in prototypical NIF/LMJ amplifiers-modeling and comparison with experiments [R]. <http://www.llnl.gov>, UCRL-JC-130044, 1998
- 3 J. H. Campbell, R. A. Hawley-Fedder, C. J. Stolz *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies; an overview [R]. <http://www.llnl.gov>, UCRL-CONF-155471, 2004
- 4 M. L. Spaeth, K. R. Manes, C. C. Widmayer *et al.*. National ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2854~2865
- 5 R. Sacks, J. Auerbach, E. Bliss *et al.*. Application of adaptive optics for controlling the NIF laser performance and spot size [C]. *SPIE*, 1997, **3492**: 344~354
- 6 Richard Zacharias, Exlan Bliss, Mark Feldman *et al.*. The national ignition facility (NIF) wavefront control system [C]. *SPIE*, 1997, **3492**: 678~692
- 7 J. A. Fleck, J. R. Morris, E. S. Bliss. Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier [R]. <http://www.llnl.gov>, UCRL-80138, 1977
- 8 W. W. Simmons, J. T. Hunt, W. E. Warren. Light propagation through large laser system [R]. <http://www.llnl.gov>, UCRL-85470, 1981