

高功率固体激光系统空间滤波小孔尺寸设计

张鑫 刘红婕 赵军普 袁强 代万俊 周维 胡东霞 蒋学君

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 高功率固体激光装置中空间滤波器小孔可将光束中非线性增长较快的空间频率成份滤除,改善由光学元件缺陷导致的光束质量下降,因此小孔的尺寸设计是关系滤波效果的关键因素之一。从抑制非线性最快增长频率出发,对神光Ⅲ原型装置中非线性增长最严重的助推放大级非线性增益进行了理论计算,分析了不同频率成份非线性增长的特点,根据分析结果讨论了该级空间滤波器滤波小孔的尺寸设计要求。分析了影响小孔尺寸设计的两个主要因素:等离子体堵孔效应及低频环效应,并讨论了相应尺寸设计要求。根据分析结果,以神光Ⅲ原型装置助推放大级为例对空间滤波小孔尺寸设计方案进行了讨论。

关键词 激光器;固体激光器;空间滤波;滤波小孔;尺寸设计

中图分类号 TN248.1

OCIS 140.0140 140.3460 140.3580

文献标识码 A

Pinhole Design of Spatial Filter in High Energy Solid-State Laser System

Zhang Xin Liu Hongjie Zhao Junpu Yuan Qiang Dai Wanjun

Zhou Wei Hu Dongxia Jiang Xuejun

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

Abstract The spatial filter pinhole in high power solid state laser is used to filter the spatial frequency whose nonlinear growth is fast to improve the beam quality that is destroyed by optical elements defect. Thus the diameter of pinhole is the key factor related to the filtering effect. The nonlinear growth in boost amplifier of Sheng Guang (SG) III prototype is calculated and the characteristics in different spatial frequency are analyzed. Based on the simulation results, the pinhole diameter design in boost amplifier is discussed. The pinhole closure caused by plasma and the low frequency circle in near field in pinhole diameter design is analyzed. According to the simulation results, the pinhole diameter design principle in boost amplifier of SG III prototype is discussed.

Key words lasers; solid laser; spatial filter; pinhole; diameter design

1 引言

在高功率固体激光装置中,由光学元件缺陷引入的相位畸变在所有相位畸变^[1]中占有很大的比重,且覆盖整个频谱范围,对聚焦主瓣、聚焦旁瓣^[2]及光束近场^[3]均会产生影响。不同频段的非线性增长特性有所不同,其中高频段的相位畸变非线性增长较快,容易引起非线性自聚焦,导致光学元件的损伤或破坏。因此,空间滤波器成为高功率固体激光装置中必不可少的关键单元之一^[4],其中滤波小孔起低通滤波作用,仅允许低频成份通过而阻碍高频成份。由于被阻碍的中高频光与小孔板相互作用会产生等离子体溅射,对光束质量产生影响,特别是在长脉冲情况下,还有可能阻碍光传输通道,因此滤波小孔尺寸关系到其滤波效果。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)实验室研究人员针对空间滤波小孔等离子体堵孔的问题进行了大量研究工作^[5]。神光Ⅲ原型装置目前运行在1~3 ns范围,且实验验证了其可行性,不存在明显的等离子体堵孔现象。为了新的物理需求,同样也需要激光装置能够在短脉冲、长脉冲及重复频率条件下运行,这就要求

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-16

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(9140C6803020804)资助课题。

作者简介: 张鑫(1983—),女,研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail: joyce522cn@163.com

空间滤波器滤波小孔不仅能够有效滤除光束中的中高频成份,且在长脉冲运行条件下不会发生堵孔效应。这对空间滤波器小孔尺寸的设计提出了新的要求。本文将结合神光Ⅲ原型装置的性能要求,根据抑制非线性最快增长频率的要求对小孔尺寸的设计进行了研究,讨论了影响尺寸设计的两个方面:等离子体堵孔效应控制及低频环效应,并根据上述三个设计因素对神光Ⅲ原型装置助推放大级滤波小孔尺寸设计进行了讨论。

2 设计原理

在高功率固体激光装置中,高强度非均匀光束在非线性介质中传输时,由于三阶非线性效应,会产生显著的小尺度自聚焦效应,这不仅限制了高功率固体激光装置的输出功率,还威胁着其运行安全。空间滤波器中的滤波小孔可以将部分非线性增长较快的频率成份滤除,从而降低光束调制度。因此,小孔尺寸的大小关系到光束滤波效果。

2.1 理论计算

以神光Ⅲ原型装置为例,非线性自聚焦效应最严重的位置是助推放大级。利用B-T理论^[6]对助推放大级不同空间频率相位畸变的非线性增长进行数值模拟。

助推放大器系统如图1所示,其关键参数如下:几何尺寸为 $590\text{ mm}\times 320\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 的钽玻璃以布儒斯特角放置,动态时的小信号增益系数约为 0.05 cm^{-1} ,钽玻璃的线性折射率为 $n_0=1.528$,非线性折射率为 $n_2=1.15\times 10^{-13}\text{ esu}$,两侧窗口玻璃和透镜玻璃的厚度为 34 mm ,线性折射率为 $n_0=1.528$,非线性折射率为 $n_2=1.46\times 10^{-13}\text{ esu}$ 。由于钽玻璃以布儒斯特角放置,通过单片钽玻璃的光程约为 45.7 mm 。为了便于计算将这个系统等效为平行排布如图1(b)所示的系统,这种等效基本不会影响非线性增长曲线,只是在非线性增长紊乱的区域略有变化。钽玻璃等效间距约为 490 mm ,钽玻璃与窗口间距约等效为 250 mm ,计算时所用的波长 $\lambda_0=1.053\text{ }\mu\text{m}$ 。原型装置系统设计输出能量为 2400 J/ns ,助推放大器处的光束口径为 $27\text{ cm}\times 27\text{ cm}$ 。每张钽玻璃等效为一个薄片,则经过一张钽玻璃片,光强要变化一次,钽玻璃之间光强不变。利用B-T理论数值模拟助推放大级不同空间频率相位畸变的非线性增长,增益分布曲线如图2所示。

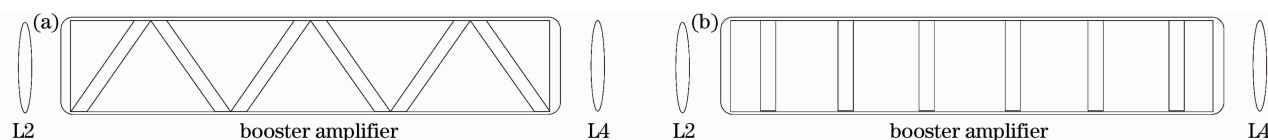


图1 (a)片状放大系统示意图,(b)片状放大系统等效图

Fig. 1 (a) Schematic of disk amplifier, (b) equivalent of disk amplifier

2.2 尺寸确定

图2中实线为由相位畸变引入的振幅谱增益曲线,虚线为由相位畸变引入的相位谱增益曲线,其中 ΔB 为级间B积分增长。根据相位畸变纹波在光传输中作用的不同,可将不同空间周期相位畸变的增益谱曲线按照纹波的增益特性分为A、B、C、D、E五个区域:从图2中可以看出,A区非线性增益近似为零;B区的非线性增益较低,变化缓慢;C区非线性增益较高且迅速增长,很容易引起非线性自聚焦,导致光学元件损伤破坏;D区的非线性增益呈无序增长;E区非线性增益非常低,主要表现为散射。NIF的研究表明^[7,8]低频相位畸变将决定打靶焦斑主瓣,传输过程中可以近似为几何光线光学。中高频相位畸变将决定打靶焦斑的旁瓣,还可能引起非线性自聚焦效应,空间滤波小孔的作用就是将非线性增长较快的中高频成份滤除。

原型装置设计要求在10倍衍射极限内集中大于95%激光能量,对应于光束的基频光发散角 θ 约为

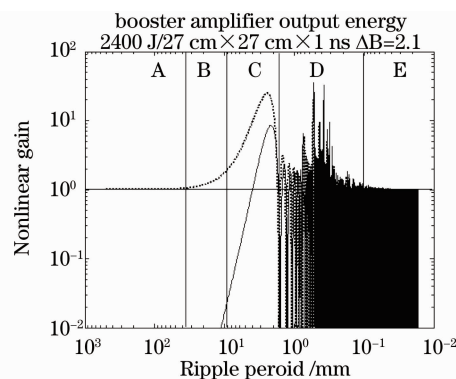


图2 不同空间周期相位畸变对应的非线性增益分布

Fig. 2 Nonlinear gain distribution of different spatial frequency phase deformation

35 μrad ,由关系式 $\Lambda = \lambda/\theta$,其中 λ 为波长, Λ 为对应的空间周期,可得 $\Lambda \approx 30 \text{ mm}$ 。空间周期大于 30 mm 尺度的部分非线性增长几乎为 0,对应于图中 A 区部分;空间周期在 $8.8 \text{ mm} < \Lambda < 30 \text{ mm}$ 的部分为中高频相位畸变中较低频的部分,为图 2 中 B 区部分,对应于焦斑的旁瓣区域,这部分相位畸变不能完全被小孔滤掉(后文进行讨论),只能通过保证光学元件加工质量进行抑制;而空间周期小于 8.8 mm 空间尺度的部分为中高频相位畸变中的较高频成份,这部分频率的相位畸变非线性增益较高,可能会引起激光束的小尺度自聚焦,因此必须利用空间滤波器小孔将其滤掉,对应于图 2 中 C 区及以后的部分。根据上述计算分析,原型装置中助推放大级滤波小孔尺寸的最大值应当与 8.8 mm 空间尺度对应的尺寸一致。

3 影响因素

3.1 等离子体堵孔效应

空间滤波器中小孔板示意图如图 3 所示。光斑入射到小孔板上,低频部分通过小孔进行成像,而高频成份被小孔板挡住,实现滤波。神光 III 原型装置助推放大级中,入射到小孔板边缘的光束功率密度约为 GW/cm^2 量级,足以产生等离子体。等离子体向小孔前表面及小孔内部运动,形成等离子体区。光束通过等离子体区受到等离子体的偏折或阻拦作用,引入不同程度的强度调制,造成光束质量下降。

以神光 III 原型装置运行参数为例,对等离子体喷发现象最严重的助推放大级空间滤波小孔中的等离子体时空特性进行分析。在 3 ns 激光脉冲条件下,助推放大级空间滤波器滤波小孔边缘所受到的激光辐射强度大约为几个 GW/cm^2 ,采用流体力学方程,在等温近似条件下对铝(Al)的等离子体溅射的一维情况进行数值模拟。计算时激光功率密度取 $5 \text{ GW}/\text{cm}^2$,波长为 $1.053 \mu\text{m}$;脉宽为 10 ns。图 4 所示为等离子体电子密度(δ_e)的对数分布情况,单位为 cm^3 。图 5 所示为等离子体扩散速度(v_{diff}),单位为 m/s 。图中 2 mm 位置表示小孔板边缘的位置;纵坐标表示小孔板平面径向方向距离小孔板边缘的大小;横坐标表示时间。

观察图 4 和图 5,可以看出,铝在 $5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 激光功率密度照射下,3 ns 时刻扩散 0.3 mm 左右距离,5 ns 时刻扩散约 0.7 mm,10 ns 时刻扩散约 1.6 mm,外层等离子体扩散速度最快,约为 $10^7 \text{ cm}/\text{s}$ 。因此,滤波小孔等离子体堵孔是小孔设计时必须考虑的因素之一,小孔过小,容易在短时间内引起堵孔,反而造成光束质量下降。神光 III 原型装置目前运行在 1~3 ns 脉宽条件下,等离子体扩散距离短且密度低,其影响可忽略不计;对于未来可能运行在长脉宽条件下时,则必须考虑等离子体堵孔带来的影响,适当增大小孔尺寸可以在一定程度上避免等离子体堵孔现象,但不能解决滤波要求与堵孔问题之间的矛盾。

3.2 低频环效应

空间滤波器滤波小孔尺寸不能过小除了受等离子体堵孔的影响之外,低频环效应也是必须考虑的因素

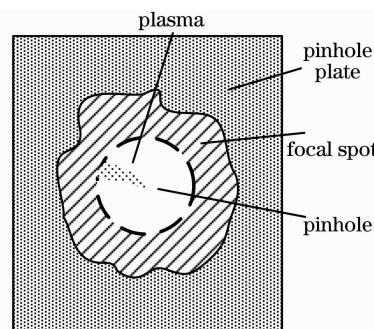


图 3 小孔板及聚焦光斑示意图

Fig. 3 Pinhole plate and focal distribution

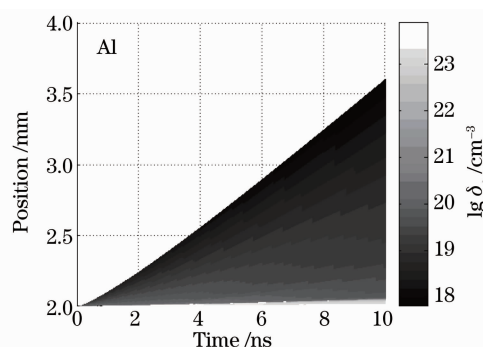


图 4 等离子体密度分布

Fig. 4 Electron density distribution of plasma

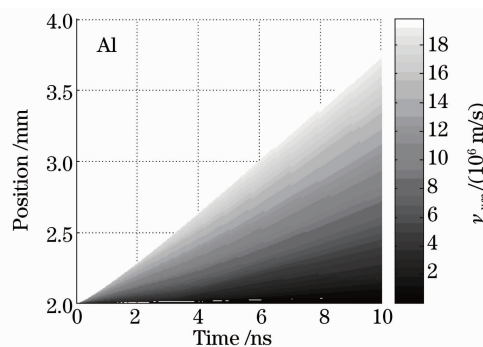


图 5 等离子体扩散速度

Fig. 5 Diffusion velocity of plasma

之一。低频环效应的实质是由于小孔的滤波作用导致空间频率的突然截止,破坏了空间频谱的连续性,导致在光束近场出现低频衍射条纹,降低光束质量,影响滤波效果。图6所示为利用SG99软件模拟的神光Ⅲ原型装置助推放大级滤波小孔采用不同尺寸滤波后像传递面上的光束近场图像,主放注入采用实际采集的光束近场。

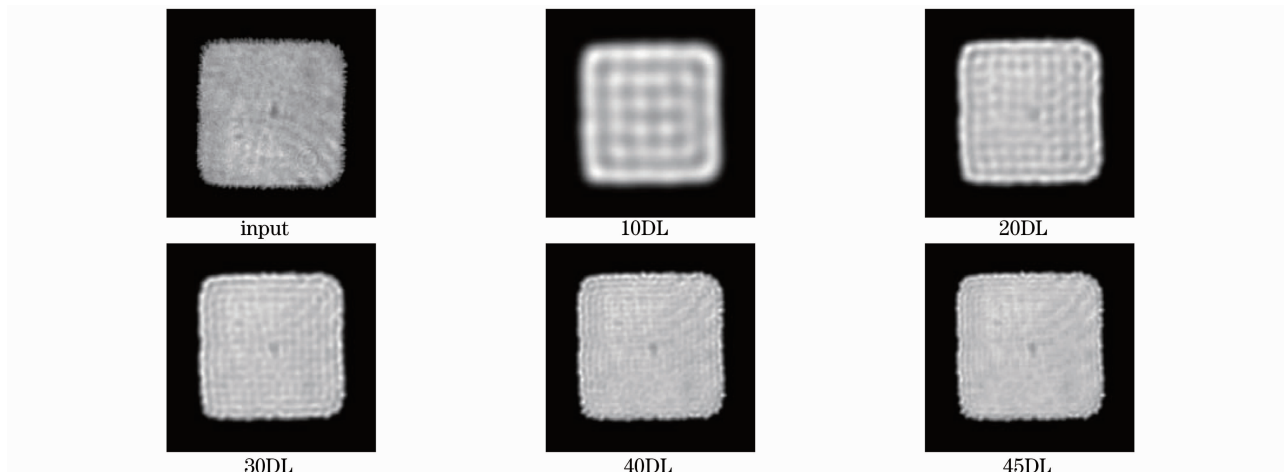


图6 主放助推放大级不同尺寸滤波小孔滤波效果对比

Fig. 6 Comparison of filtering results under different diameters of pinhole in boost amplifier

表1对比了不同尺寸滤波小孔的滤波作用下光束的对比度与调制度。可以看出,经过滤波后光束的调制度有所降低,说明了空间滤波的效果;经20倍衍射极限(20DL)滤波小孔滤波后的光束对比度与注入光束的对比度相当,但20DL以下尺寸的滤波小孔会导致光束对比度的升高。图中已明显可以看出光束近场中存在低频衍射条纹,因此为保证滤波效果滤波小孔尺寸不能小于20DL,这也是图2中B区对应部分不能采用小孔滤波方式滤除的主要原因之一。

表1 不同小孔滤波的光束近场对比度与调制度

Table 1 Contrast and modulation ratio of beam under different pinhole diameter

Pinhole diameter /DL	10	20	30	40	45	input
Contrast ratio	1.1549	1.1358	1.1274	1.1209	1.1181	1.1343
Modulation ratio	3.0867	2.9538	2.9148	2.9356	2.9157	3.4228

4 讨 论

根据上述分析结果可知,空间滤波器滤波小孔尺寸的设计存在上限及下限。上限原则:即为保证抑制非线性最快增长频率,小孔尺寸不能大于中高频空间频率分界点对应的小孔尺寸,对于神光Ⅲ原型装置而言,即8.8 mm空间尺度对应的小孔尺寸;下限原则:从抑制低频环效应考虑,根据上述分析,小孔尺寸不低于20DL对应的小孔尺寸;从抑制等离子体堵孔效应考虑,小孔尺寸不宜过小,但具体设计值应根据激光器实际运行情况而定。

根据上述分析结果对神光Ⅲ原型装置中等离子体堵孔风险最高的助推放大级滤波小孔的尺寸设计进行讨论。根据上限原则,神光Ⅲ原型装置中应将低于8.8 mm空间尺度的频率成份滤除。8.8 mm空间尺度对应的发散角为 $120 \mu\text{rad}$,因此小孔尺寸直径最大不能大于50DL(3.9 mm);根据下限原则,小孔尺寸不低于20DL(1.6 mm)。原型装置目前运行在3 ns激光脉宽条件下,根据模拟计算结果,3 ns时间等离子体仅扩散0.3 mm,且属于稀薄等离子体,对光束影响可以忽略,因此20~50DL尺寸小孔均能满足要求。若运行在10 ns激光脉宽条件下,等离子体扩散至1.6 mm位置,相当于40DL尺寸小孔内部完全充满等离子体,即使小孔尺寸采用上限值50DL,也不能避免等离子体带来的影响,因此神光Ⅲ原型装置未来若需运行在大于10 ns激光脉宽条件下,普通的平面孔难以满足应用需求,需要从材料和结构等多种层面考虑小孔的设计。

5 结 论

从光传输层面对高功率固体激光系统的空间滤波小孔尺寸设计进行了研究。在滤波小孔的实际应用过程中,还应当考虑工程化因素的影响如:自动准直技术、自适应光学(AO)变形镜技术、束匀滑技术以及光束本身的角漂,这些因素都可能导致光束不能顺利过孔,因此适当的余量设计在实际应用中是非常必要的。另外,从抑制等离子体堵孔效应来说,仅靠加大小孔的尺寸不能完全避免问题的出现,小孔材料及结构的良好选择与设计都是避免堵孔现象的关键,这也是我们的进一步工作之一。

参 考 文 献

- 1 J. K. Lawson, C. R. Wolfe, K. R. Manes *et al.*. Specification of optical components using the power spectral density function[C]. *SPIE*, 1995, **2536**: 38~50
- 2 J. E. Rothenberg, J. M. Auerbach, Shamasundar *et al.*. Focal spot conditioning for indirect drive on the NIF[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 65~77
- 3 M. Bray, G. Chabassier. Localised wavefront deformations: propagation in non-linear media[C]. *SPIE*, 1997, **3492**: 480~494
- 4 W. W. Simmons, S. Guch, F. Rainer *et al.*. High-energy spatial filter for removal of small-scale beam instabilities in high-power lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1995, **11**(9): 852
- 5 J. E. Murray, D. Milam, C. D. Boley *et al.*. Spatial filter pinhole development for the national ignition facility[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1405~1420
- 6 V. I. Bespanlov, V. I. Tanalov. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. *JETP Lett.*, 1966, **3**(12): 307
- 7 W. Williams, J. Auerbam, J. Hunt *et al.*. NIF optics phase gradient specification[C]. 1997, UCRL-ID-127297
- 8 J. K. Lawson, J. M. Auerbach, R. E. English *et al.*. NIF optical specifications- the importance of the RMS gradient[C]. UCRL-JC-130032, 1998