

高功率激光器中两镜型线聚焦空间滤波器的应用

熊 晗

苏州科技大学数理学院, 江苏 苏州 215009

摘要 结合美国国家点火装置(NIF)的部分参数,利用两镜型线聚焦空间滤波器(SSF)来替代主放大腔中的针孔滤波器,对其在高功率激光装置中的应用进行了初步的研究。以NIF为例,SSF的应用可使远场强度降低两个数量级,使腔空间滤波器和放大腔分别缩短约6.2450 m(27%)和13.8707 m(30%),而放大腔中远场强度的降低以及去掉传输空间滤波器中的滤波光阑,又使得主光路中基本无等离子体堵孔的问题。同时,基于平面化离轴偏角的设计思想并结合放大腔中变形镜与反射镜互成物像面的特点,对SSF构成的放大腔进行了离轴多程设计以避免放大自发辐射,为SSF的实际应用以及高功率激光装置的进一步发展奠定了基础。

关键词 激光器;线聚焦空间滤波器;高功率激光;像传递

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091408

Application of Two-Lens Slit Spatial Filter in High Power Lasers

Xiong Han

School of Mathematics & Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China

Abstract Utilizing some parameters of national ignition facility (NIF), the two-lens slit spatial filter (SSF) replaces the pinhole spatial filter in main amplifier cavity for the high-power laser facility, and the application is studied preliminarily. Take NIF as an example, the far-field intensity decreases two orders of magnitude due to the SSF, reducing the cavity spatial filter and the amplifier cavity by about 6.2450 m (27%) and 13.8707 m (30%) respectively. Basically there will be no pinhole (slit) closure problem in the main optical system since the reduction of far-field intensity and the absences of filter aperture in transport spatial filter. Additionally, based on the design of off-axis angle complanation combined with the characteristics of mutual imaging between the distorted mirror and the reflector in amplifier cavity, the off-axis multi-pass of cavity spatial filter composed with SSF is designed to avoid the amplified spontaneous emission, which lays the foundation for the practical application of SSF and the further development of high power lasers.

Key words lasers; slit spatial filter; high power laser; image relaying

OCIS codes 140.3580; 070.6110; 220.2740

1 引言

传统的针孔型空间滤波器(PSF)由一对正透镜和位于透镜共焦面上的滤波小孔组成^[1-5],具有像传递、口径匹配和空间滤波等功能^[6-8],能够保护光路中的光学器件、提高激光装置负载和增强光束近场质量。高功率激光装置中往往有极大的焦斑强度,会导致滤波小孔出现等离子体堵孔效应^[9-11],扭曲或阻碍光脉冲的继续传输。为降低焦斑强度以延迟等离子体堵孔时间,滤波器通常要采用非常大的透镜焦距,同时也必须被置于高真空环境中以避免空气击穿^[12-14]。这些要求大大增加了激光装置规模,降低了系统应用的便利性,限制了输出光束的能量。为了解决这些问题,国内外研究者提出了线聚焦空间滤波器(SSF),通过在滤波器中引入柱面结构,使子午面和弧矢面的聚焦分解开来,将焦点转变为两条正交焦线,从而增大焦斑面积降低远场强度。典型的有2012年美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的Erlandson^[15]提出的四镜型SSF和两镜型

收稿日期:2017-04-26;收到修改稿日期:2017-05-08

基金项目:国家自然科学基金(11504255)

作者简介:熊 晗(1980—),男,博士,讲师,主要从事高功率激光、狭缝滤波方面的研究。E-mail: xh1980xh@126.com

SSF,以及2014年本课题组提出的三镜型SSF^[16]。

柱面结构的引入能够降低远场强度,但也会导致SSF的前(后)焦面在子午和弧矢面上不再重合,从而影响SSF的像传递功能。2014年本课题组通过菲涅耳衍射积分建立起光束在SSF中的理论传输过程,获得了适用于SSF的像传递模式^[16-19],同时也证明了SSF在像传递、口径匹配和空间滤波等功能上与传统的针孔滤波器一致,为其实际应用奠定了一定的基础。

为进一步推进SSF的实用化,本文结合美国国家点火装置(NIF)的部分参数,对两镜型SSF在高功率激光装置中的应用进行了初步的设计研究。同时,为了避免寄生腔中不断增强的放大自发辐射对再生激光增益的消耗^[20-22],还对由两镜型SSF构成的多程放大腔进行了离轴化设计。

2 空间滤波器设计

两镜型SSF的具体结构参数如图1(a)所示。其中 z_1 和 z_2 分别为滤波器的前焦面距离和后焦面距离, $f_{h,1}$ 和 $f_{v,1}$ 分别为透镜Lens-I在水平和竖直方向上的焦距, $f_{h,2}$ 和 $f_{v,2}$ 为透镜Lens-II在水平和竖直方向上的焦距,Slit-I和Slit-II为狭缝光阑。假设 N_h 和 N_v 分别为光束在水平和竖直方向上的放大率,有 $f_{h,2} = N_h \cdot f_{h,1}$ 和 $f_{v,2} = N_v \cdot f_{v,1}$ 。由于 N_h 不等于 N_v (相等则退回到针孔滤波结构),因此光束通过两镜型SSF后将会产生形变,形变过大则光束超过透镜允许的有效尺寸,过小则会使得焦斑面积太小,不能有效降低远场强度。NIF中传输空间滤波器的透镜尺寸为 $434 \text{ mm} \times 434 \text{ mm}$,其有效通光口径为 $406 \text{ mm} \times 406 \text{ mm}$,而光束口径为 $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,光束的零值强度尺寸为 $372 \text{ mm} \times 372 \text{ mm}$ ^[23],在扩束1.09倍的情况下,光束的零值强度口径便会超过透镜的有效通光口径。根据主光路的具体结构参数,并考虑预放输出光束的长宽比为1:1,初步将光束在SSF中从右向左传输时在竖直和水平方向上的形变比例折中选取为 $1.05:0.95$ ^[18]。

激光器主光路如图1(b)所示,其中变形镜(DM)和反射镜分别位于SSF系统的前后焦面上,与SSF一同构成多程放大腔。从预放系统输出的1:1光束经PSF进入主光路中,随后被偏振器反射进入多程放大腔中,通过SSF后光束尺寸从1:1变为 $1.05:0.95$,在变形镜的作用下在放大器2中往返两次进行能量放大,并再次通过SSF到达右侧重新变为1:1尺寸的光束。此时泡克耳斯盒处于通电状态,光束直接穿过偏振器在放大器1中进行来回两次能量放大,之后再经SSF传输到左侧并在放大器2中再进行两次能量放大,最后通过SSF回到右侧。此时泡克耳斯盒断电,右侧的1:1光束经偏振器反射出多程放大腔,并经PSF送入终端光学组件。由于多程放大腔的输出光束刚经过滤波,因此传输空间滤波器无需滤波光阑,只保留其像传递功能。

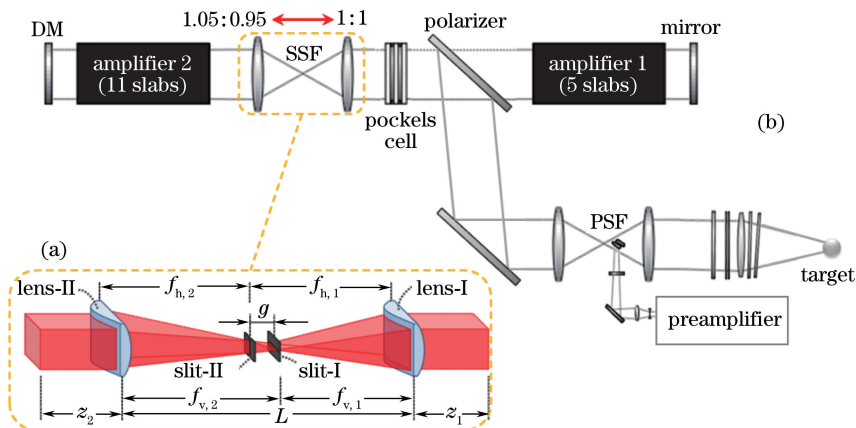


图1 (a)两镜型SSF结构;(b)两镜型SSF的主光路

Fig. 1 (a) Schematic of the two-lens SSF; (b) main optical path of the two-lens SSF

为避免堵孔和降低远场峰值强度,高功率激光系统中滤波器的 F 数通常都比较大,而SSF由于降低了远场强度,因此可以将透镜焦距减小,从而减小激光系统规模。根据文献[16]中对像差的模拟研究,SSF中

透镜 Lens-I 的水平焦距至少要达到 7 m。此外,放大器 2 包含 11 块放大片,要求 SSF 的系统后焦面距离至少达到 7.4 m。结合放大器长度、透镜像差和系统余量等因素,为尽量减小透镜焦距,透镜 Lens-I 在水平方向上的焦距取为 8.5 m。根据滤波器的光束形变比例,此时透镜 Lens-I 在水平和垂直方向上的焦距分别取为 8.5 m 和 8.0854 m,透镜 Lens-II 在水平和垂直方向上的焦距取为 8.0750 m 和 8.4896 m。根据两镜型 SSF 的像传递模式为^[18]

$$\begin{cases} z_1 = f_{h1} \frac{N_h + 1}{N_h + N_v} \\ g = f_{h,1} (N_v - N_h) / (N_v + 1), \\ z_2 = f_{h1} \frac{N_h N_v (N_h + 1)}{N_h + N_v} \end{cases} \quad (1)$$

由此可得,系统前焦面距离 $z_1 = 8.2875$ m,系统后焦面距离 $z_2 = 8.2668$ m,Slit-I 和 Slit-II 两个狭缝平面之间的距离 $g = 0.4146$ m。综合上述参数,可知 SSF 长度为 16.5750 m,放大腔总长为 33.1293 m,相比 NIF 中传统针孔结构分别缩短 37.7%(即 6.2450 m)和 41.9%(即 13.8707 m)。由于 SSF 能够大大降低等离子体堵孔的可能性^[18],因此两个放大器可以采用 11+11 块放大片的形式来提高输出能量,但本文只考虑与 NIF 参数相似的情况,因此仍然采用 11+5 的形式,输出到终端的单路脉冲能量约为 20 kJ。此外,由于传输空间滤波器中无需滤波小孔,不存在等离子体堵孔的可能性,在对传输空间滤波器到靶场的传输距离无要求的情况下,其透镜焦距最低可取至 7 m 左右,使得主光路从放大腔到传输空间滤波器、终端光学组件至靶丸的总长度从传统滤波器主光路的 180 m 降至最短 70 m 左右。

利用 Matlab 软件对 SSF 中的光传输进行模拟仿真。参考 NIF 设置波长为 1053 nm、能量为 20 kJ、脉宽为 3.5 ns,由于缺少主放腔中光束尺寸和阶数的具体参数,参照助推腔将入射光束设为面积为 350 mm × 350 mm 的 8 阶矩形超高斯平顶光束。另外,远场强度大幅降低,减小了等离子体堵孔的可能性,为提高传输光束质量,将主放腔的截止频率从 51 倍降低至 39 倍衍射极限,与助推腔一致。结果表明,光束在 SSF 中的远场峰值强度仅为 1.234×10^{15} W·cm⁻²,狭缝内边缘强度为 2.972×10^{10} W·cm⁻²,比同样条件下 NIF 中的腔空间滤波器降低了两个数量级。对大多数金属材料而言,等离子体产生阈值范围为 $10^9 \sim 10^{11}$ W·cm⁻²,而金的等离子体产生阈值为 10^{12} W·cm⁻²,因此采用 SSF 和高原子序数材料狭缝,使得主光路中基本不存在等离子体堵孔的问题,而远场峰值强度的降低使得滤波器所需的真空气压从约 0.8 Pa 上升到约 4.0 Pa,这些都有利于激光装置规模的减小。

在目前已知的国内外几种 SSF 中,两镜型 SSF 结构最为简单,接近于传统滤波器,仅比传统滤波器多一个狭缝滤波光阑器件,因此在准直调节方面略复杂,对系统的可靠性也有所影响。然而传统滤波器中存在等离子体堵孔的问题,等离子体溅射会造成透镜表面的粒子污染,滤波光阑的等离子体烧蚀又会导致截止频率发生变化,从而需要频繁地进行透镜维护和更换滤波光阑。两镜型 SSF 降低了远场强度,解决了等离子体堵孔问题,从而解决了透镜表面的粒子污染和滤波光阑的等离子体烧蚀问题,可以大大延长透镜的维护周期,减少滤波光阑的器件损耗以及更换光阑之后的重新准直等操作,降低高功率激光系统的维护成本和时间,大大提高系统的使用效率。

3 两镜型 SSF 的离轴化设计

为避免放大自发辐射,高功率激光器中的多程放大腔通常要进行离轴化设计^[9,24]。传统针孔滤波结构的放大腔中,光束的离轴偏角设置在三维空间内,采用多个小孔组成的阵列板作为滤波光阑,每程光束均通过不同的小孔。而 SSF 中存在两条相互错开的正交焦线,相比于针孔滤波结构,其三维空间内的偏角设计更复杂。针对这一问题,根据平面化离轴设计思想以及变形镜与反射镜互成物像面的特点来进行 SSF 的离轴设计。平面化离轴设计思想即将光束的离轴偏角限制在子午或弧矢面内。而变形镜和反射镜分别位于 SSF 的系统前后焦面上,两者位置互成物像面(在 NIF 的光参数条件下,光束往返几次落在物像面上的位置因离轴而产生的轴向位移约为 0.1 mm,径向偏移约为 1 μm,相比焦距而言可忽略不计)。

由于两镜型 SSF 为非对称结构,因此光束在滤波器两侧的偏角并不一样。如图 2 所示,假设光束在右

侧和左侧的偏角分别为 α_1 和 α_2 , 焦距分别为 f_1 和 f_2 , 考虑到偏角大小接近于 0 (焦线偏离光轴的最大距离为 $2\alpha_1 f_1$, 滤波器焦距取为 8.5 m 时, 根据后面所得到的偏角值, 可得最大距离约为 28 mm), 可知两侧光束的偏角关系为

$$\alpha_2 \cdot f_2 = \alpha_1 \cdot f_1, \quad (2)$$

根据 SSF 的参数, (2) 式可写为

$$\alpha_2 \cdot f_{h2} = \alpha_1 \cdot f_{h1}. \quad (3)$$

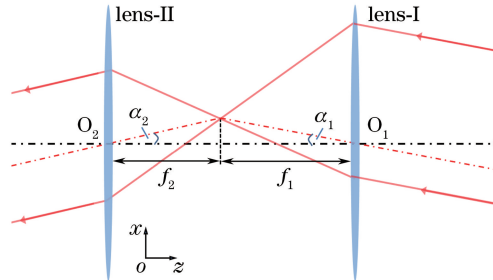


图 2 光束偏角与焦距的关系

Fig. 2 Relationship between focal length and angle of light beam

为调节光束的往返离轴偏角, 并将偏角限制在 $x-z$ 平面内, 变形镜和反射镜均在水平方向上 (即图 3 中 x 方向) 进行倾斜, 大小分别为 $\alpha_2/2$ 和 $\alpha_1/2$ 。受此影响, 往返光束将在 Slit-II 平面上形成相互平行的几条焦线, 而在 Slit-I 平面上将形成位于同一直线上的几条焦线。光迹 1、2、3、4 分别代表光束在放大腔中的多程往返轨迹。如图 3(a) 所示, 光束从右侧以 $-\alpha_2$ 的角度经反射进入放大腔中, 根据变形镜和反射镜的倾角并结合 (3) 式可知, 左侧光迹与光轴的夹角分别为 $\angle 1 = \alpha_2$, $\angle 2 = 0$, $\angle 3 = -\alpha_2$, $\angle 4 = 2\alpha_2$, 右侧光迹与光轴的夹角分别为 $\angle 1 = -\alpha_2$, $\angle 2 = 0$, $\angle 3 = \alpha_1$, $\angle 4 = -2\alpha_1$ 。

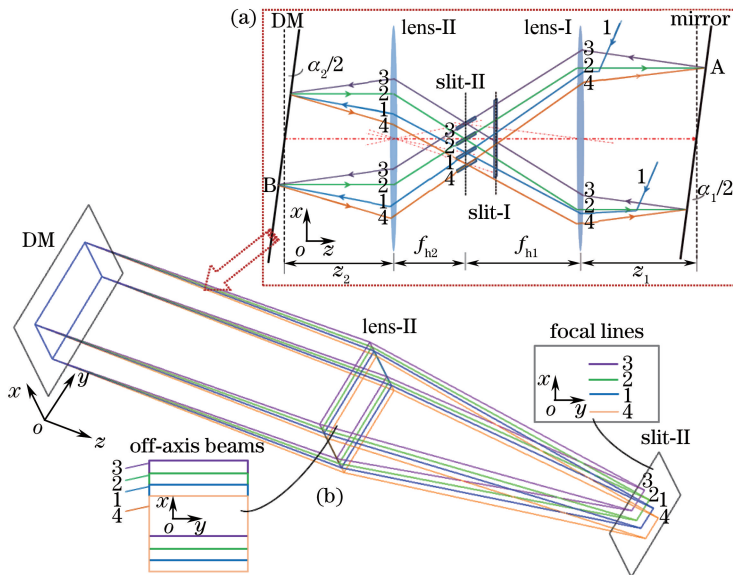


图 3 (a) 两镜型 SSF 中的离轴四程放大光路; (b) 左侧部分的立体示意图

Fig. 3 (a) Optical path of off-axis four-pass amplifier in the two-lens SSF; (b) stereogram of the left part

参考 NIF 将截止频率取为 39 倍衍射极限 (对应衍射角 α 为 $\pm 100 \mu\text{rad}$), 狭缝宽度 $w = \alpha \cdot f_{h1}$ 。根据往返光束的偏角, Slit-II 平面上的滤波光阑形成如图 4 所示的狭缝阵列, 其中狭缝间距 d 需要足够大以阻挡有害的中高频从其他狭缝通过, 同时又要避免过大的离轴偏角影响放大器尺寸和能量提取率。考虑到部分高频会在传输过程中自动溢出光路, 以及 NIF 原型 Beamllet 的远场分布^[9] 在接近 $\pm 200 \mu\text{rad}$ 时强度便会迅速下降, 本文将偏角 α_1 初步设为 1.667 mrad, 从而 Slit-II 平面上的狭缝间距 $d = 14.17 \text{ mm}$ 。同理,

Slit-I平面上几条焦线的中心间距为 13.48 mm。根据两镜型 SSF 的聚焦特点,焦线 I、II 的长度分别约为 17 mm 和 18 mm,因此 Slit-I 平面上的焦线之间会有部分重合,但由于焦斑强度仅为 $10^{10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 量级,因此前一程光束激发的等离子体对后一程光束的影响非常有限。

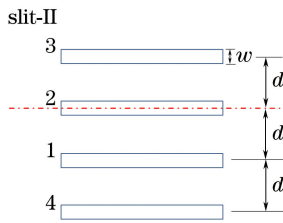


图 4 Slit-II 平面上的滤波狭缝示意图

Fig. 4 Schematic of filtering slit in slit-II plane

受离轴偏角影响,光束将会在放大器的端面上产生沿 x 方向的偏移,并且偏移量与放大器离变形镜(或反射镜)的距离成正比,从而影响放大片的尺寸设计,如图 5 所示。为减小放大片尺寸、提高光束在放大器中的填充因子,放大器需要尽量贴近变形镜(或反射镜)放置。假设左侧放大器 2 中光束在 x 方向的尺寸为 Dx_2 (即 $0.95 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$),光迹 1 偏角导致的偏移距离为 x_{2-1} ,光迹 2 偏角导致的偏移距离为 x_{2-2} ,其他依次类推,可知:

$$\begin{cases} x_{2-3} = a_2 L_2 \\ x_{2-4} = 2a_2 L_2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 L_2 为左侧放大器长度,约为 7.4 m。计算可知光束在 x 方向所占范围为 $x_{2-3} + x_{2-4} + Dx_2$, y 方向所占范围为 $1.05 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,因此放大器 2 的有效尺寸要能容纳 $369.8286 \text{ mm} \times 367.5000 \text{ mm}$ 的光束。对于右侧的放大器 1,由于光迹 1 不经过放大器 1,而光迹 4 在进入放大器 1 之前就会被反射出主光路,因此光迹 3 在右侧放大器中的偏角最大。放大腔右侧为 1:1 的原尺寸光束,设其 x 方向尺寸为 Dx_1 (即 350 mm),光迹 3 偏角导致的偏移距离为 x_{1-3} ,可知:

$$x_{1-3} = a_1 L_1, \quad (5)$$

式中 L_1 为右侧放大器长度(约为 3.4 m)。计算可知光束在 x 方向所占范围为 $x_{1-3} + Dx_1$, y 方向所占范围为 350 mm 。因此放大器 1 的有效尺寸要能容纳面积为 $355.3731 \text{ mm} \times 350.0000 \text{ mm}$ 的光束。

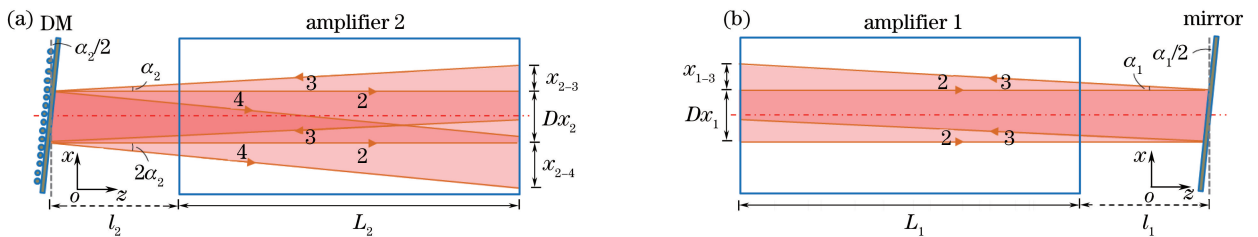


图 5 (a)左侧放大器和(b)右侧放大器的水平方向光束尺寸比例图

Fig. 5 Dimensional proportion of horizontal beam of (a) left-side amplifier and (b) right-side amplifier

4 预放注入系统和传输空间滤波器的焦面匹配

传输空间滤波器负责将光束投递到终端光学组件进行频率转换和打靶,传输距离越长越有利于排布光路,但也会增大装置规模,提高建造成本。针孔滤波结构的焦面平移功能则可以在不影响其他功能的情况下将传输空间滤波器一端的空置距离转移到另外一端,这样既不会增加装置规模又能提高传输距离,其原理如图 6 所示。图中透镜 Lens-I 和 Lens-II 组成一个像传递系统,焦距分别为 f 和 F 。假设 Lens-I 左边焦面上一点点高为 y_1 ,经 Lens-I 成像后高为 y_2 ,现将物点向右平移 x_1 距离,根据牛顿公式可知:

$$\begin{cases} x_1 \cdot x_2 = f \cdot f \\ \beta_1 = \frac{x_2}{f} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 β_1 是 lens-I 的成像放大率, x_2 为像面到像方焦点的轴向距离。像点 y_2 通过透镜 lens-II 继续成像到 y_3 , 此时:

$$\begin{cases} x_2 \cdot x_3 = F \cdot F \\ \beta_2 = \frac{F}{x_2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 β_2 是 lens-II 的成像放大率。结合(6)、(7)式可得:

$$\begin{cases} \frac{x_1}{x_3} = \frac{f^2}{F^2} \\ \beta = \frac{y_3}{y_1} = \frac{F}{f} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 β 是焦面移动后像传递系统的总放大率。由(8)式可知, 针孔滤波器的焦面平移特性: 1) 前后焦面的移动方向一致; 2) 系统的总放大率不受焦面移动的影响; 3) 前后焦面的移动距离与总放大率的平方成正比。

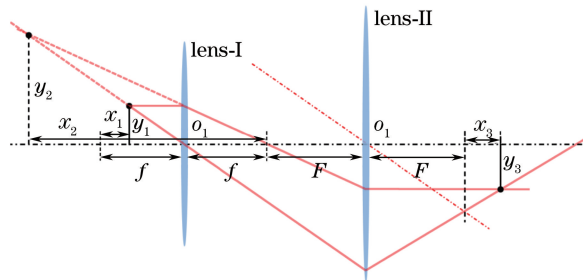


图 6 焦面平移的几何分析

Fig. 6 Geometrical analysis of focal plane translation

根据图 1 中的主光路概念设计, 预放输出光束利用传输空间滤波器的左端透镜注入主光路中, 然而为了避免光束自由传输带来的衍射影响, 传输空间滤波器与预放注入系统两者的左端焦面应设在同一位置, 因此传输空间滤波器的焦面移动也会影响预放注入系统的焦面位置。传输空间滤波器放大率设为 1 倍, 焦距设为 F , 预放注入系统的两个透镜焦距分别设为 f 和 F (共用透镜)。由于没有确切的 NIF 中的预放输出光束尺寸, 因此参考相关点火装置将预放输出光束尺寸粗略设为 35 mm, 预放注入系统的放大率 N 为 10 倍。假设传输空间滤波器左端焦面缩短距离 l , 相应右端焦面增加距离 l , 则根据(8)式预放注入系统的右端焦面将向右移动距离 l/N^2 。

5 结 论

结合 NIF 的部分参数, 采用两镜型 SSF 来替代主放大腔中的针孔型空间滤波器, 对其在高功率激光装置中的应用进行了初步的设计研究。结果表明, 采用两镜型 SSF 可将放大腔中的远场强度降低两个数量级, 同时将长为 23 m 的腔空间滤波器缩短约 27%, 将长为 47 m 的放大腔缩短约 30%。受主光路结构调整的影响, 传输空间滤波器中不再需要滤波光阑, 而腔空间滤波器中狭缝内边缘强度仅为 $10^{10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 量级, 因此主光路中基本不存在等离子体堵孔的问题, 提升了设备建造和维护的便利性。由于远场强度的降低, 放大腔所需的真空环境气压从约 0.8 Pa 提高到约 4.0 Pa, 从而降低了对真空辅助设备的要求, 有利于减小高功率激光器的总体规模。此外, 基于平面化离轴偏角的方法并结合放大腔中变形镜与反射镜互成物像面的特点, 对 SSF 构成的多程放大腔进行了离轴设计, 同时也对放大器尺寸进行了重新设计以适应两镜型 SSF 对光束带来的形变作用, 放大器 1 和放大器 2 的有效尺寸分别要能容纳约 $370 \text{ mm} \times 368 \text{ mm}$ 和 $355 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 的光束。最后讨论了预放注入系统和传输空间滤波器的焦面平移的匹配问题, 结果表明, 将传输空间滤波器的左端焦面缩短距离 l , 则预放注入系统的右端焦面将向右移动距离 l/N^2 。

参 考 文 献

- [1] Simmons W W, Guch S, Rainer F, *et al.* A high energy spatial filter for removal of small scale beam instabilities in

- high power solid state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(9): 852.
- [2] Tang Shiwang, Zhu Haidong, Guo Ailin, *et al.* Study of simulation and experiment of the prompt pump-induced wavefront of the four-pass amplification high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0702005.
唐仕旺, 朱海东, 郭爱林, 等. 四程放大高功率激光驱动器动态波前模拟与实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0702005.
- [3] Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing[J]. Applied Physics Letters, 1973, 23(11): 628-630.
- [4] Glaze J A. High energy glass lasers[J]. Optical Engineering, 1975, 15(2): 45-54.
- [5] Bliss E S, Sommargren G E, Weaver H J. Loss of focusable energy due to small-scale nonlinear effects[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(9): 851.
- [6] Wang Guiying, Zhao Jioyian, Zhang Mingke, *et al.* Basic study on spatial filter used in Nd-glass high power laser system[J]. Acta Physica Sinica, 1985, 34(2): 171-181.
王桂英, 赵九源, 张明科, 等. 钕玻璃高功率激光系统中的空间滤波器的基本研究[J]. 物理学报, 1985, 34(2): 171-181.
- [7] Bettinger A, Charles C, Osmalin J, *et al.* Laser beam brightness improvement with high power spatial filtering[J]. Optics Communications, 1976, 18(1): 176-177.
- [8] Meng Shaoxian. Suppression of self-focusing through spatial filtering and relay imaging in a high power laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1998, 35(9): 8-12.
孟绍贤. 高功率激光系统通过空间滤波和中继成像抑制自聚焦[J]. 激光与光电子学进展, 1998, 35(9): 8-12.
- [9] Murray J E, Milam D, Boley C D, *et al.* Spatial filter pinhole development for the national ignition facility[J]. Applied Optics, 2000, 39(9): 1405-1420.
- [10] Pearlman J S, Anthes J P. Closure of pinholes under intense laser radiation[J]. Applied Optics, 1977, 16(8): 2328-2331.
- [11] Dimakov S A, Zavgorodneva S I, Koval'chuk L V, *et al.* Investigation of the threshold of formation of a plasma screening radiation in a spatial filter[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1989, 19(6): 803.
- [12] Murray J E, Milam D, Boley C D, *et al.* Spatial filter issues[C]. SPIE, 1999, 3492: 496-503.
- [13] Murray J E, Estabrook K G, Milam D, *et al.* Spatial filter issues[C]. SPIE, 1996, 3047: 207-212.
- [14] Sato S, Ashida H, Arai T, *et al.* Vacuum-cored hollow waveguide for transmission of high-energy, nanosecond Nd:YAG laser pulses and its application to biological tissue ablation[J]. Optics Letters, 2000, 25(1): 49-51.
- [15] Erlandson A C. Spatial filter for high average power lasers: US8320056[P]. 2012-11-27.
- [16] Xiong H, Yuan X, Zhang X, *et al.* Performance of a simplified slit spatial filter for large laser systems[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 22211-22219.
- [17] Xiong Han. The study on beam propagation characteristics in slit spatial filters[D]. Suzhou: Soochow University, 2014: 15-101.
熊 晗. 狭缝型空间滤波器的光束传输特性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014: 15-101.
- [18] Xiong H, Gao F, Zhang X, *et al.* Characteristics and performance of a two-lens slit spatial filter for high power lasers[J]. Optics Communications, 2017, 390: 16-21.
- [19] Wan Jing, Xiong Han, Zhang Xiang, *et al.* Beam propagation characteristics in four-cylindrical-lens slit spatial filter[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0907001.
万 晶, 熊 晗, 张 翔, 等. 基于四柱透镜结构的线聚焦型空间滤波器光束传输特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0907001.
- [20] Maskaly G R, Petruska M A, Nanda J, *et al.* Amplified spontaneous emission in semiconductor-nanocrystal/synthetic-opal composites: Optical-gain enhancement via a photonic crystal pseudogap[J]. Advanced Materials, 2006, 18(3): 343-347.
- [21] Wang Haiyan, Zhang Yating, Jin Lufan, *et al.* Acceleration aging study of amplified spontaneous emission broadband source[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405003.
王海艳, 张雅婷, 金露凡, 等. 放大自发辐射光噪声的加速老化研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405003.
- [22] Luo Yi, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *et al.* Research progress on amplified spontaneous emission suppression in pulsed

fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 020004.

罗 亿, 王小林, 粟荣涛, 等. 脉冲光纤放大器放大自发辐射抑制的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 020004.

[23] English R E, Miller J, Laumann C, *et al.* Optical system design[R]. ICF Annual Report, 1998: 112-125.

[24] Murray J E, Downs D C, Hunt J T, *et al.* Off-axis multipass amplifier as a large aperture driver stage for fusion lasers [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(5): 826-834.