

# 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

万晶<sup>1</sup> 熊哈<sup>2</sup> 张翔<sup>1</sup> 庄振武<sup>1</sup> 袁孝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006

<sup>2</sup>苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009

**摘要** 针对美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室所提出的四柱透镜结构的线聚焦型空间滤波器(线型滤波器), 根据瑞利-索末菲衍射积分和利用 Matlab 软件对光束在线型滤波器中的传输进行了理论模拟研究, 得到了线型滤波器的像传递模式并对其空间滤波功能进行了对比研究。与传统的针孔滤波器不同, 线型滤波器的系统前后焦面并不只与透镜焦距有关, 还与柱面镜在  $x$  和  $y$  方向错开的距离相关, 其优点是能将高功率激光装置中的远场强度降低约 3 个数量级, 从而大大减小滤波器规模, 但同时也带来一个不足之处, 即线型滤波器只能在 1 倍口径匹配条件下满足严格的像传递功能。在 1 倍口径匹配条件下, 线型滤波器的空间滤波功能与传统针孔滤波器也是一致的。

**关键词** 激光光学; 空间滤波; 针孔; 线聚焦; 像传递

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0907001

## Beam Propagation Characteristics in Four-Cylindrical-Lens Slit Spatial Filter

Wan Jing<sup>1</sup> Xiong Han<sup>2</sup> Zhang Xiang<sup>1</sup> Zhuang Zhenwu<sup>1</sup> Yuan Xiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China*

<sup>2</sup>*School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China*

**Abstract** Based on the four-cylindrical-lens slit spatial filter proposed by American Lawrence Livermore National Laboratory, the beam propagation characteristics in the slit spatial filter has been studied with Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral and commercial Matlab software on image relay and spatial filtering. Unlike the conventional pinhole spatial filter, the front (back) focal plane of the slit spatial filter system is not only related with focal length, but also with the distance between the cylindrical lenses, which is beneficial for greatly decreasing the focal intensity in high-power lasers by about 3 orders of magnitudes and greatly decreasing the scale of the spatial filter. However, with the slit spatial filter, negative point is also brought about that, the image relay of slit spatial filter can be strict satisfied only in the situation of 1 time beam expansion. In the situation of 1 times beam expansion, the spatial filtering of the slit spatial filter is consistent with the conventional pinhole spatial filter.

**Key words** laser optics; spatial filter; pinhole; slit; image relaying

**OCIS codes** 070.6110; 070.7345; 110.4850; 220.3620

## 1 引言

如今的激光强度已经达到  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>, 由于光路中的灰尘和光路的不均匀性等以及光学元器件表面和内

收稿日期: 2015-03-19; 收到修改稿日期: 2015-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(91023009, 61108024, 61275140)

作者简介: 万晶(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率激光、狭缝滤波方面的研究。

E-mail: wanjing1046040159@163.com

导师简介: 袁孝(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事纳米结构光学器件制备、光电材料与激光技术方面的研究。

E-mail: xyuan@suda.edu.cn(通讯联系人)

部的损伤点、污点等,强激光束将不可避免受到空间频率的调制。尤其是在高功率的聚变激光装置中,调制中的中高频成分将会随传输距离而出现非线性的增长,从而导致光束中小尺度自聚焦和成丝等现象<sup>[1]</sup>的出现,进而破坏输出光束质量以及损坏激光介质和光学元器件。

在目前的高功率激光装置中,空间滤波器被用来滤除光束中有害的中高空间频率成分,能有效地抑制小尺度自聚焦现象,提高激光器的负载能力和输出光束质量<sup>[2-3]</sup>,目前已是高功率激光系统中不可或缺的关键装置之一。除空间滤波功能外,空间滤波器还承担着像传递和口径匹配等其它功能,像传递功能用于将光束逐级向后投递以避免自由传输带来的衍射破坏光束质量,而口径匹配功能用于匹配前后系统光束口径。

传统的针孔型空间滤波器由一对正透镜和位于透镜共焦点上的一个滤波小孔组成<sup>[4]</sup>。针孔滤波器中的光束被聚焦为点状光斑,而高功率激光装置中的聚焦光斑强度极大,并且滤波小孔在焦面上的截止半径必须小于一定的尺寸才能有效滤除具有较快非线性增长的中高空间频率,因此高功率激光装置中的滤波小孔往往会受到强光辐照,导致等离子体堵孔现象<sup>[5]</sup>。此外,强激光系统中的空间滤波器必须被置于高真空环境中以避免远场中的空气击穿现象<sup>[6-8]</sup>。这些问题对于大型激光系统的建造、使用和维护都提出了苛刻的要求。

通过在滤波系统中加入柱面镜,使得光束的点状聚焦被分解为子午面和弧矢面两个方向的线状聚焦,在一个方向聚焦的同时另一方向没有聚焦或者是没有处于完全聚焦状态,从而大大增加光束的焦斑面积,有利于减小滤波器的尺寸和降低滤波器中的真空度。1983年中国科学院上海光学精密机械研究所余文炎等<sup>[9]</sup>采用双狭缝光阑对像散光束进行滤波,但并未提及相关性能和结构参数。2012年美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的 A C Erlandson<sup>[10]</sup>在一项线型滤波器的专利中采用4块柱面镜组成线型滤波结构,并在2个共焦面上分别放置狭缝光阑用于滤波。但专利中并没有对线型滤波器的主要功能进行详细的理论或实验论证研究。

针对四柱透镜构成的线型滤波器,本文利用瑞利-索末菲衍射积分并采用商用 Matlab 软件对光束在线型滤波器中的传输进行进一步的理论模拟研究,以了解线型滤波器的像传递和空间滤波等主要功能,同时对线型滤波器在大型固体激光装置中的应用进行初步仿真分析。

## 2 理论模拟计算

四柱透镜结构的线型滤波器如图 1 所示。假设左边 2 块柱面镜的透镜焦距均为  $f$ ,右边两块柱面镜的透镜焦距均为  $F$ ,狭缝光阑间距(即  $x$  和  $y$  2 个方向的聚焦错开距离)为  $d$ 。

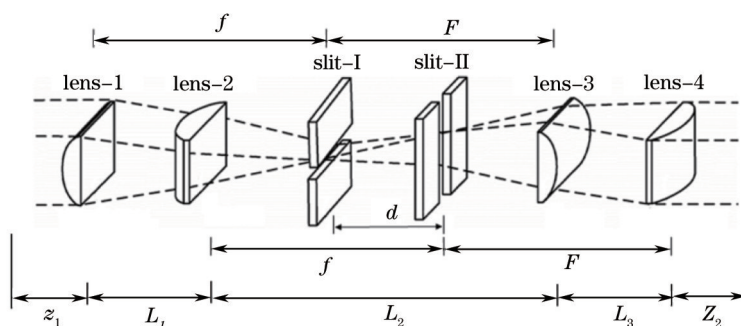


图 1 线型滤波结构参量示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure parameters of slit spatial filter

由于柱面镜的引入,光束在  $x$  和  $y$  方向上的聚焦是分开进行的,因此 2 个方向上的前焦面或者后焦面并不重合,这就导致无法判断线型滤波器在整体上的前后焦面位置。采用高斯光束从左边第 1 块柱面镜的前面未知距离  $z_1$  处入射(距离  $z_1$  处即为整个系统潜在的前焦面位置),经过线型滤波系统后从右边最后 1 块柱面镜的后面未知距离  $z_2$  处出射(距离  $z_2$  处即为整个系统潜在的后焦面位置)。利用瑞利-索末菲衍射积分来描述光束在光学器件之间的自由传输过程,同时利用透镜变换公式来描述透镜对光束起的相位变化作用<sup>[11]</sup>,所得输出函数形式  $U$  如下所示

$$U_o(x_s, y_s) = \frac{1}{i\lambda z_2 i\lambda L_3 i\lambda L_2 i\lambda L_1 i\lambda z_1} \int \int \exp(ikr_4) \exp\left(-ik \frac{y_4^2}{2f_4}\right) \int \int \exp(ikr_3) \exp\left(-ik \frac{x_3^2}{2f_3}\right) \int \int \exp(ikr_2) \exp\left(-ik \frac{y_2^2}{2f_2}\right) \int \int \exp(ikr_1) \exp\left(-ik \frac{x_1^2}{2f_1}\right) \int \int \exp(ikr_0) U_i(x_0, y_0) dx_0 dy_0 dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 dx_3 dy_3 dx_4 dy_4, \quad (1)$$

其中,  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、 $\dots$ 、 $(x_s, y_s)$  分别表示在线型滤波器的入射面、第1块柱面镜一直到出射面等位置的变量,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  和  $f_4$  分别表示第1至第4块柱面镜的焦距,  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  分别是光束在不同透镜之间的自由传输距离。输入高斯光束的函数形式  $U_i$  为

$$U_i = \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{w^2}\right), \quad (2)$$

其中,  $w$  是高斯函数的束腰半径。将(2)式代入(1)式, 考虑在  $N$  倍口径匹配情况下有  $F=N \cdot f$ , 在傍轴近似条件下对(1)式进行解析, 可得线型滤波器输出光束的函数形式为

$$U_o(x, y) = \frac{kw^2}{N} \exp(i\mathbf{k}S) \times \sqrt{\frac{1}{2z_2 + 2z_1 N^2 + 2d - N^2 2f - N2f - ikw^2 N^2}} \times \sqrt{\frac{1}{2z_2 + 2z_1 N^2 + 2dN^2 - N^2 2f - N2f - ikw^2 N^2}} \times \exp\left(\frac{1}{2z_2 + 2z_1 N^2 + 2d - N^2 2f - N2f - ikw^2 N^2} ikx^2\right) \times \exp\left(\frac{1}{2z_2 + 2z_1 N^2 + 2dN^2 - N^2 2f - N2f - ikw^2 N^2} iky^2\right) \quad (3)$$

其中,  $S$  为系统总光程,  $\mathbf{k}$  为波矢量。根据(3)式, 要使输出光与入射高斯光的函数形式一致, 需要满足下面两式

$$z_2 + z_1 N^2 + d - fN^2 - fN = 0, \quad (4)$$

$$z_2 + z_1 N^2 + dN^2 - fN^2 - fN = 0. \quad (5)$$

(4)式和(5)式分别表示光束在  $x$  和  $y$  方向满足成像所需要的条件。从两式可见, 除非使得  $x$  和  $y$  2个方向的错开距离  $d$  为零, 系统退回到针孔滤波结构才能在任意扩束倍数条件下满足像传递要求, 否则必须让  $N$  为1才能使线型滤波器满足像传递功能, 表明线型滤波器只有在1倍口径匹配条件下才能满足像传递要求。在  $N$  为1时, 根据(4)式和(5)式有

$$z_2 + z_1 = 2f - d. \quad (6)$$

其中,  $z_1$  和  $z_2$  具有无穷多个解, 表明线型滤波器具有焦面平移的特性。假设使  $z_1$  方向的焦面移动  $l_1$  距离, 相应导致  $z_2$  方向焦面同样移动  $l_2$  距离, 其他均不变, 在满足焦面平移特性的情况下可得到

$$(z_2 + l_2) + (z_1 + l_1) = 2f - d. \quad (7)$$

利用(7)式减去(6)式可得

$$l_1 = -l_2. \quad (8)$$

(8)式表明前后焦面的平移距离大小一样, 且方向相同( $z_1$  增大则  $z_2$  减小)。为了给定一个确定的模型以便后续模拟计算, 根据系统前后对称的特点, 取系统的前焦面与后焦面距离相等, 因此有

$$z_2 = z_1 = f - d/2. \quad (9)$$

线型滤波器具有前后反转对称性质, 两个光阑平面上焦线的长宽是一样的。这里采用远场强度分布的顶部区域值下降到  $1/e^2$  时的宽度来定义焦斑主瓣的长宽值, 结合滤波器的几何结构, 理论上可得到焦线的长度和主瓣半宽分别为

$$l = W \cdot d / f, \quad (10)$$

$$\omega = \lambda f / D. \quad (11)$$

其中,  $W$  为矩形光束的长宽值,  $D$  为对角线长度。

采用 Matlab 软件对所得到的线型滤波器的像传递模式进行模拟验证, 并与传统的针孔滤波器进行对比。入射光束采用面积  $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的 10 阶矩形超高斯平顶光束<sup>[12-15]</sup>, 加上振幅调制深度 10% 的十字叉丝, 叉丝宽度  $0.5 \text{ mm}$ , 波长  $1064 \text{ nm}$ , 透镜焦距均取  $0.5 \text{ m}$ , 狭缝光阑的间距  $d$  取为三分之二焦距值。所得结果如图 2 所示, 其中图 2(a) 为入射光束, 图 2(b) 为针孔滤波器的像传递输出光束, 图 2(c) 为线型滤波器的像传递输出光束, 图 2(d) 为焦面平移后 ( $l$  取  $0.1 \text{ m}$ ) 线型滤波器的像传递输出光束。针孔滤波器输出光束的近场调制度和近场对比度分别为  $1.0877$  和  $0.0615$ , 线型滤波器输出光束的近场调制度和近场对比度分别为  $1.0731$  和  $0.0612$ , 焦面平移后分别变为  $1.0702$  和  $0.0613$ 。通过对比两种滤波器的输出光束, 可得结论如下: 1) 由图可见, 两种滤波器均能完整且无明显畸变地将入射波面上的十字特征像投递到输出光束波面上; 2) 以针孔滤波波结构作为参考, 两种滤波器输出光束在近场调制度和近场对比度上的差异分别为  $-1.34\%$  和  $-0.45\%$ , 焦面平移后的差异分别变为  $-1.61\%$  和  $-0.33\%$ 。因此可以推断, 理论上所得到的线型滤波器的像传递模式是完全能够满足像传递功能的, 其像传递效果与针孔滤波器一致, 并且线型滤波器是满足焦面平移特性的。

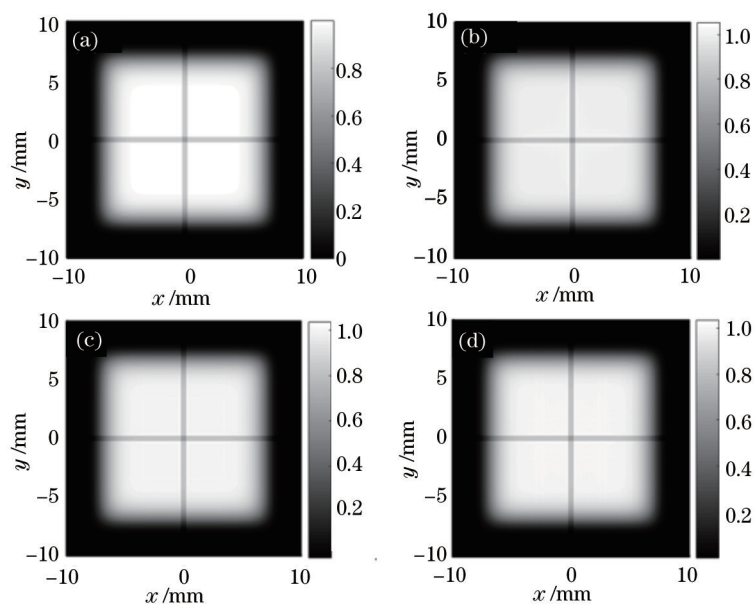


图 2 像传递功能对比。(a) 入射光束; (b) 针孔滤波器像传递输出近场分布; (c) 线性滤波器像传递输出近场分布;

(d) 焦面平移后线型滤波器的像传递输出近场分布

Fig.2 Comparison of image relaying. (a) Incident beam; (b) relayed beam with pinhole; (c) relayed beam with slit spatial filter;

(d) relayed beam with slit spatial filter after focal planes shifting

图 3 是模拟得到的光阑 I 和光阑 II 平面上的远场强度分布图, 模拟结果表明焦线长度和主瓣半宽分别约为  $10.0 \text{ mm}$  和  $0.027 \text{ mm}$ , 而根据(10)式和(11)式的计算结果焦线长度和主瓣半宽分别为  $10.0 \text{ mm}$  和  $0.025 \text{ mm}$ , 可见计算结果与模拟结果是相符合的。

将滤波光阑分别加入针孔滤波器和线型滤波器光路中, 对两种滤波器的空间滤波功能进行对比。去掉十字叉丝调制, 用宽度  $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的硬边光阑拦截光束以产生调制, 截止频率取为 12 倍衍射极限 ( $0.69 \text{ mm}^{-1}$ )。两种滤波器输出光束的近场强度分布分别如图 4(a) 和 (b) 所示。图 4(c) 为入射光束的频谱分布, 图 4(d) 和 (e) 分别为针孔滤波器和线型滤波器滤波后的输出光束频谱, 由图可见光束经过线型滤波器后, 大于  $0.69 \text{ mm}^{-1}$  的空间频率均被滤除, 说明其滤波功能同样有效。此时线型滤波器输出光束的近场调制度和近场对比度分别为  $1.0573$  和  $0.0284$ , 针孔滤波器输出光束的分别为  $1.0582$  和  $0.0289$ 。以针孔滤波波结构作为参考, 两种滤波器输出光束在近场调制度和近场对比度上的差异分别为  $-0.09\%$  和  $-1.73\%$ , 可忽略不计。因此可以证明线型滤波器的空间滤波功能与针孔滤波器一致。

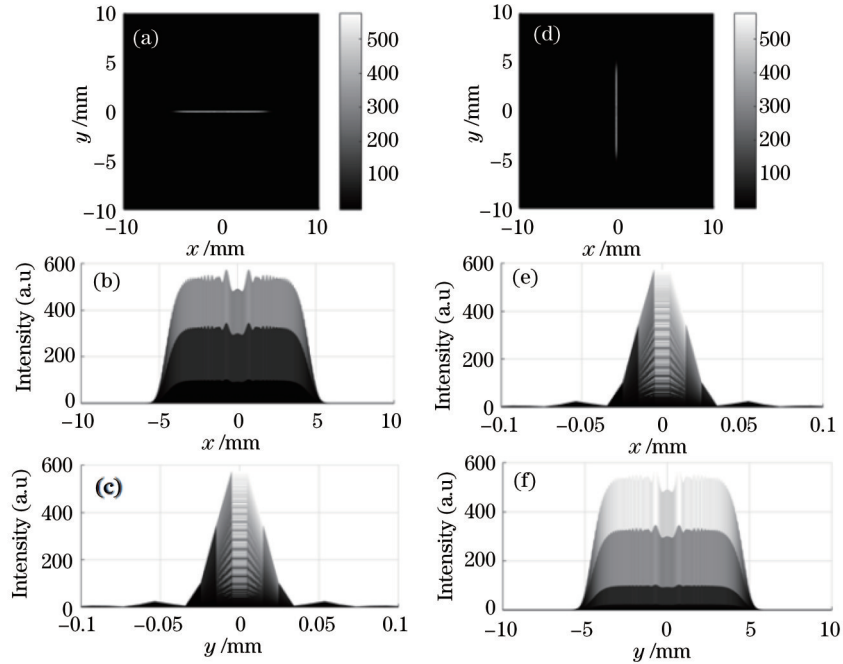


图3 光阑平面的远场强度分布(a)光阑 I 俯视图; (b) 光阑 I  $x$ - $z$  方向侧视图; (c)  $y$ - $z$  方向侧视图; (d) 光阑 II 俯视图; (e) 光阑 II  $x$ - $z$  方向侧视图; (f) 光阑 II  $y$ - $z$  方向侧视图

Fig.3 Focal lines at the focal planes of spatial spectrum in the plane of slit. (a) Vertical view of slit-I; (b)  $x$ - $z$  directional side view of slit-I; (c)  $y$ - $z$  directional side view; (d) vertical view of slit-II; (e)  $x$ - $z$  directional side view of slit-II; (f)  $y$ - $z$  directional side view of slit-II

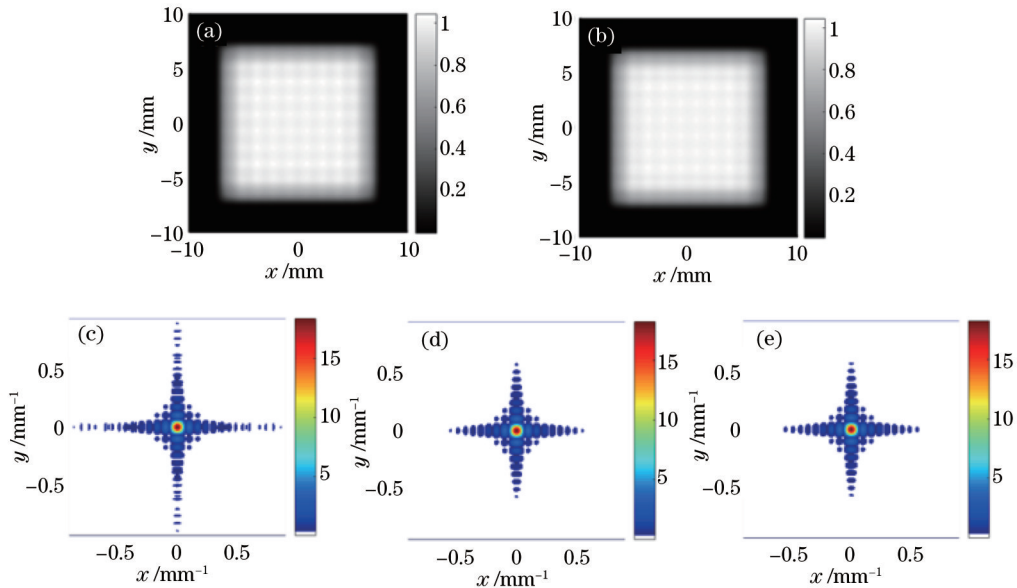


图4 滤波功能对比。(a) 针孔滤波器的滤波输出近场分布; (b) 线性滤波器的滤波输出近场分布; (c) 为入射光束频谱分布; (d) 针孔滤波器的滤波输出频谱分布; (e) 线性滤波器的滤波输出频谱分布

Fig.4 Comparison of spatial filtering. (a) Filtered beam with pinhole spatial filter; (b) filtered beam with slit spatial filter; (c) spatial spectrum of the incident beam; (d) spatial spectrum of filtered beam with pinhole spatial filter; (e) spatial spectrum of filtered beam with slit spatial filter

以国家点火装置(NIF)装置中的传输空间滤波器作为分析对象,应用线型滤波器对实际的大型固体激光装置进行仿真对比分析。NIF装置中的传输空间滤波器为传统的针孔型滤波结构,入射光束为面积  $350\text{ mm} \times 350\text{ mm}$  的 8 阶矩形超高斯平顶光束,波长  $1053\text{ nm}$ ,截止频率设在 39 倍衍射极限( $0.096\text{ mm}^{-1}$ ),入射光功率  $20\text{ kJ}/3.5\text{ ns}$ ,

透镜焦距 29.7 m。模拟结果表明,传输空间滤波器的远场峰值强度为  $4.3 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ ,滤波小孔内边缘上的辐照强度为  $4.8 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ ,与文献[6,16]中所述的实际数据(分别为  $3.5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ ,  $5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ )基本相符合,可见所采用的模拟程序较为合理。模拟得到的入射光束近场强度分布以及功率谱密度<sup>[17-20]</sup>分别如图 5(a)和(b)所示,其近场调制度为 1.0684,近场对比度为 0.0420。输出光束的近场强度分布及功率谱密度(PSD)分别如图 5(c)和(d)所示,此时近场调制度为 1.0205,近场对比度为 0.0313。从图中可看出近场分布明显变得平滑,在  $0.1 \text{ mm}^{-1}$  之后的空间频率被滤除干净。

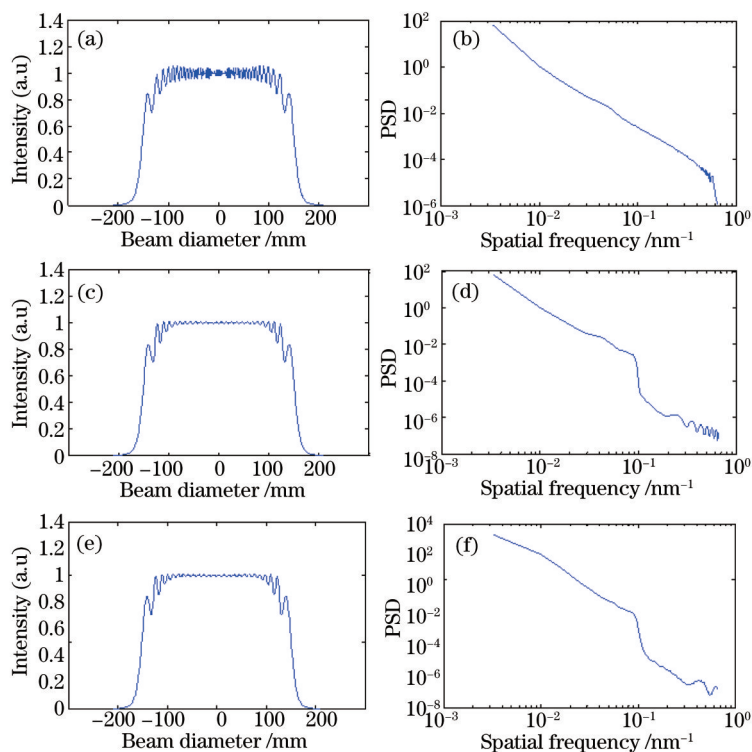


图 5 针孔型和线聚焦型空间滤波器的滤波效果。(a) 入射光束的近场强度; (b) 入射光束的 PSD; (c) 传输空间滤波器的输出近场分布; (d) 传输空间滤波器的输出 PSD 分布; (e) 线型滤波器的输出近场强度; (f) 线性滤波器的输出 PSD 分布

Fig.5 Spatial filtering effect of pinhole and slit spatial filters. (a) Incident beam; (b) incident beam PSD;

(c) filtered beam with transport spatial filter in NIF system; (d) filtered beam's PSD with transport spatial filter; (e) filtered beam with slit spatial filter; (f) filtered beam's PSD with slit spatial filter

采用线型滤波器来替换传输空间滤波器。滤波光阑平面之间的间距是在一定范围内(零到焦距值之间)可任意设定的,不同间距值对应着不同的焦斑面积大小,为方便考虑,光阑平面之间的间距选为三分之二焦距值。图 6 为光束的远场强度随透镜焦距的变化,由于像差的原因(模拟透镜为球面曲率透镜),从图 6 中可见远场峰值强度在焦距取值较小时会随焦距而增大,在焦距取 7 m 左右的时候达到最大,随后开始随焦距增大而正常减小。为使线型滤波器的结构更为紧凑,将线型滤波器的焦距取为 7 m。此时,线型滤波器的总长度仅为 18.667 m,远小于传输空间滤波器的 60 m 长度,远场峰值强度为  $6.3 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ,滤波狭缝内边缘上的辐照强度为  $6.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ ,与传输空间滤波器相比分别降低了 682 倍和 800 倍。线型滤波器在焦距取 7 m 时的输出光束近场分布如图 5(e)所示,其近场调制度和近场对比度分别为 1.0211 和 0.0307,与传输空间滤波器输出光束的差异分别为 0.06% 和 1.9%,可忽略不计。对应的 PSD 分布如图 6(f)所示,可见在  $0.1 \text{ mm}^{-1}$  之后的空间频率被线聚焦滤波器滤除干净。从线型滤波器和传输空间滤波器在输出光束功率谱密度和近场分布上的差异来看,透镜焦距的大幅减小对输出光束带来的综合像差上的影响很小。此时线型滤波器的系统  $F$  数为 14,基本能满足一般光学系统的要求。

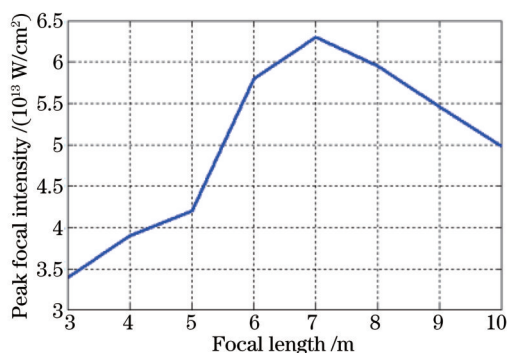


图6 线聚焦型滤波器中的远场强度随焦距变化

Fig.6 Dependence of the intensities of the filtered beams with slit spatial filter with the focal length of lenses

上述例子是在没有考虑靶场排布所需像传递长度的情况下得到的尽量紧凑的线型滤波器模型,当焦距取7 m、光阑平面间距为三分之二焦距值时,像传递长度仅约9 m,而NIF装置中所能提供的像传递长度约为60 m。在实际应用中,像传递长度可通过改变透镜焦距和光阑平面间距来进一步调整,例如当焦距取23 m、光阑平面间距为六分之一焦距值时,像传递长度可达到42 m,此时滤波器长度为49.8 m,远场强度相比传输空间滤波器降低了200多倍。继续减小光阑平面间距和增大焦距,在滤波器长度相当的情况下线型滤波器提供的像传递长度可无限接近于NIF装置中提供的60 m长度。此外,当采用线型滤波器来替代腔空间滤波器以及预放系统中的传统空间滤波器时,由于不用考虑靶场排布所需较长的像传递长度,因此仍然可以采用较小的系统 $F$ 数。

### 3 结 论

根据瑞利-索末菲衍射积分和透镜变换公式对线聚焦型空间滤波器的像传递和空间滤波等主要功能进行了理论模拟分析,求得像传递模式,并对其在大型激光系统中的应用进行了初步仿真分析。在1倍口径匹配条件下线型滤波器的像传递功能和空间滤波功能与传统针孔滤波器是一致的,其不足之处在于线型滤波器只能在1倍口径匹配条件下满足严格的像传递功能,这使其实际应用受到一定的限制。利用线型滤波器来替换NIF装置中的传输空间滤波器,模拟结果表明,采用线型滤波器可将远场峰值强度和狭缝内边缘辐照强度分别降低682倍和800倍,因此能够有效抑制等离子体堵孔效应并大大减小透镜焦距,使得滤波器长度从60 m缩短至18.667 m。当然,透镜焦距的大幅减小会导致在对滤波器进行离轴多程放大设计时光束离轴偏角和各类像差的增大,同时也会导致线型滤波器所能提供的像传递长度减小,影响大型激光装置的靶场排布,最终的焦距选取还需要结合整个光路的优化设计等等来进行,这些都是将来做进一步的具体研究时需要考虑的。

### 参 考 文 献

- 1 N N Akhmediev, V I Korneev, R F Nabiev. Modulation instability of the ground state of the nonlinear wave equation: optical machine gun[J]. *Opt Lett*, 1992, 17(6): 393-395.
- 2 W W Simmons, S Guch, Jr F Rainer, *et al.*. A high energy spatialfilter for removal of small scale beam instabilities in high power solid state lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, 11(9): 852.
- 3 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.
- 4 J T Hunt, J A Glaze, W W Simmons, *et al.*. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. *Appl Opt*, 1978, 17(13): 2053-2057.
- 5 J E Murray, D Milam, C D Boley, *et al.*. Spatial filter pinhole development for the National Ignition Facility[C]. *Appl Opt*, 2000, 39(9), 1405-1420.

- 6 J E Murray, D Milam, C D Boley, *et al.*. Spatial filter issues[C]. SPIE, 1999, 3492, 496–503.
- 7 J E Murray, K G Estabrook, D Milam, *et al.*. Spatial filter issues[C]. SPIE, 1996, 3047, 207–212.
- 8 S Sato, H Ashida. Vacuum-cored hollow waveguide for transmission of high-energy, nanosecond, Nd:YAG laser pulses and its application to biological tissue ablation[J]. Opt Lett, 2000, 25(1): 49–51.
- 9 Yu Wenyan, Wang Guiying, Wang Shisen, *et al.*. Diagnosis and compensation of wavefront distortion of laser beams[J]. Chinese J Lasers, 1983, 10(4): 220–224.  
余文炎, 王桂英, 王士森, 等. 激光束波面畸变的全息诊断与补偿[J]. 中国激光, 1983, 10(4): 220–224.
- 10 A C Erlandson. Spatial Filter for High Average Power Lasers: US Patent, 8320056[P]. 2012–11–27.
- 11 J W Goodman. Introduction to Fourier Optics 2nd Edition[M]. New York: Mac. Graw-Hill, 1996.
- 12 A A Tovar. Propagation of flat-topped multi-Gaussian laser beams[J]. Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision, 2001, 18(8): 1897–1904.
- 13 Chen Jiannong. Propagation and transformation of flat-topped multi-Gaussian beams in a general nonsymmetrical apertured double-lens system[J]. Journal of the Opt Society of America A-Optics Image Science and Vision, 2007, 24(1): 84–92.
- 14 Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, *et al.*. Propagation of flat-topped multi-Gaussian beams through a double-lens system with apertures[J]. Opt Express, 2009, 17(15): 12753–12766.
- 15 Ma Xuemei, Han Kai, Zhang Bin. Prediction for wavefront correction effect of discrete deformable mirror based on filter function[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101002.  
马雪梅, 韩开, 张彬. 基于滤波函数的分立变形镜波前校正效果预估[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101002.
- 16 D Milam, J E Murray, K G Estabrook, *et al.*. Pinhole closure measurements[C]. SPIE, 1998, 3492, 504–509.
- 17 Zhao Junpu, Hu Dongxia, Zhou Wei, *et al.*. Analysis of near-field power spectral density in high-power solid-state laser[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s1): 118–122.  
赵军普, 胡东霞, 周维, 等. 高功率固体激光近场强度功率谱密度特性分析[J]. 光学学报, 2008, 28(s1): 118–122.
- 18 Yang Wang, Huang Wei, Xu Weicai, *et al.*. Analysis of mid-spatial frequency surface errors effects on local flare in lithographic projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922001.  
杨旺, 黄玮, 许伟才, 等. 光学表面中频误差对光刻物镜短程杂散光影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922001.
- 19 Zheng Lina, Kuang Haipeng, Li Wenming, *et al.*. Method of pedestal component elimination based on line CCD for spatial-filter velocimetry signal[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0211001.  
郑丽娜, 匡海鹏, 李文明, 等. 基于线阵 CCD 的空间滤波测速信号基频消除方法[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0211001.
- 20 Zhang Rongzhu, Cai Bangwei, Yang Chunlin, *et al.*. Numerical method of the power spectral density[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(6): 661–664.  
张蓉竹, 蔡邦维, 杨春林, 等. 功率谱密度的数值计算方法[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 661–664.

栏目编辑: 韩峰