

文章编号: 0253-2239(2010)03-0827-06

# 空间滤波器小孔对谱色散匀滑使用效果的影响

李菁辉<sup>1</sup> 张琥杰<sup>1</sup> 周申蕾<sup>1</sup> 冯伟<sup>2</sup> 朱俭<sup>2</sup> 林尊琪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

**摘要** 利用柯林斯(Collins)传输公式和将硬边光阑展开为有限个复高斯函数之和的方法,分析了在静态高功率激光器系统中选取不同尺寸的空间滤波器小孔对谱色散匀滑(SSD)效果的影响,并且通过 K. R. Manes 等提出的统计光学模型,给出了存在相位畸变和振幅调制时小孔选取的模拟计算方法。数值模拟表明,在神光 II 第 9 路多功能激光器系统中,目前使用的空间滤波器小孔会使部分色散光束的光谱成分被阻断,使得焦斑通量对比度从无孔时的 22% 增大到 36%,影响光 SSD 效果;分析给出了满足光 SSD 使用的空间滤波器的小孔尺寸。

**关键词** 谱色散匀滑;空间滤波器;柯林斯传输公式;硬边光阑;透镜阵列

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0827

## Effect of Smoothing by Spectral Dispersion Considering the Hole Used in Spatial Filter

Li Jinghui<sup>1</sup> Zhang Hujie<sup>1</sup> Zhou Shenlei<sup>1</sup> Feng Wei<sup>2</sup> Zhu Jian<sup>2</sup> Lin Zunqi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> Shanghai Institute of Laser and Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

**Abstract** Based on the method of Collins diffraction integral formula and expanding the rectangular function into a sum of complex Gaussian functions, the effect of smoothing by spectral dispersion (SSD) considering the hole size used in spacial filter is studied, and the method of the selection of hole size in view of aberration is given in the article using the statistical optics model raised by K. R. Manes et al. . Numerical simulation show that the holes now used in experiment are small for SSD, fluence beam contrast without holes raise from 22% to 36%, and calculate the needed pinhole size for SSD.

**Key words** smoothing by spectral dispersion; spacial filter; Collins diffraction integral formula; diaphragm with hard-wedge; lens array

## 1 引言

激光靶面均匀辐照技术的研究对惯性约束聚变实验、高压状态方程研究、X 光激光实验等具有重要意义<sup>[1]</sup>。在神光 II 第 9 路多功能激光器上进行光谱色散匀滑(SSD)与衍射光学元件(DOE)联用的初步实验研究中发现<sup>[2,3]</sup>,使用目前的空间滤波器小孔,焦斑的匀滑没有达到预期效果。主要分析空间滤波器小孔尺寸对 SSD 应用效果的影响,并通过数值计算给出了针对 SSD 使用的优化小孔尺寸。

## 2 理论基础

### 2.1 SSD 的匀滑原理

SSD 的工作过程如图 1 所示<sup>[4]</sup>。设入射单色激光的光场为

$$E(x, y, z, t) = E_0(x, y, z) \exp(i\omega_0 t), \quad (1)$$

通过相位调制器后光场产生附加的相位延迟为<sup>[5]</sup>

$$E_M(x, y, z, t) = E_0(x, y, z) \sum_n J_n(\delta) \exp[i(\omega_0 + n\omega_m)t]. \quad (2)$$

收稿日期: 2009-04-24; 收到修改稿日期: 2009-05-18

作者简介: 李菁辉(1980—),女,硕士研究生,主要从事光谱色散匀滑方面的研究。E-mail: lip512@126.com

导师简介: 林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,主要从事高功率激光技术和激光等离子体等方面的研究。

E-mail: zqilin@mail.shcnc.ac.cn

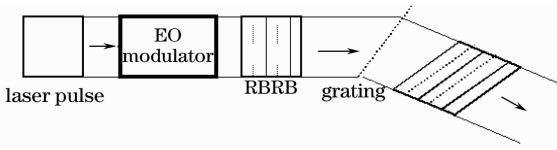


图1 SSD的工作原理示意图

Fig. 1 Sketch map of SSD system

经过相位调制器后,单色激光频谱以激光脉冲中心频率  $\omega_0$  为中心被展宽,其频谱具有分立结构,相邻边频之间的间隔为  $\omega_m$ ,  $J_n$  为  $n$  阶第一类贝塞尔函数,它是频率为  $\omega_0 + n\omega_m$  的光波分量的振幅。 $\omega_m$  是调制器的调制圆频率,  $\delta$  为调制深度。调制带宽(即展宽后的频谱宽度)可表示为  $\Delta\nu = \delta\omega_m/\pi$ 。

之后激光经过光栅色散(设色散方向沿  $X$  方向),光场变为

$$E_D(x, y, z, t) = E_0(x, y, z) \sum_n J_n(\delta) \exp[i(\omega_0 + n\omega_m)t - ik_n \mathbf{R}], \quad (3)$$

$n\omega_m/\omega_0$  很小时

$$E_D(x, y, z, t) = E_0(x, y, z) \times \exp(i\omega_0 t) \sum_n J_n(\delta) \exp(in\omega_m t) \exp(in\alpha x), \quad (4)$$

式中

$$\alpha = \omega_m \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\lambda}{c} = \omega_m \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{c/(\omega_0/2\pi)}{c} = 2\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\omega_m}{\omega_0}.$$

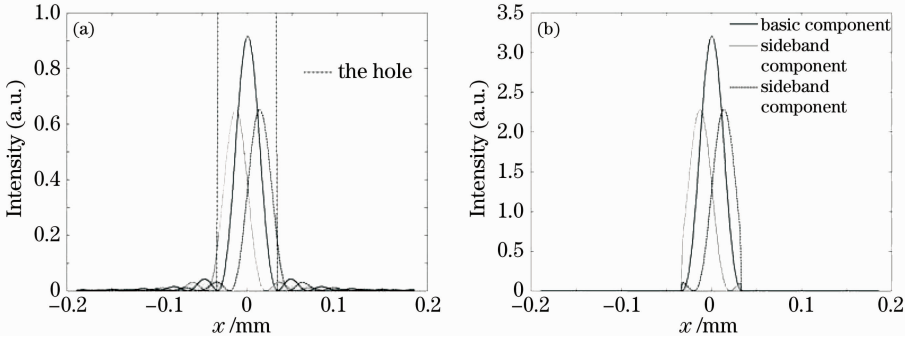


图3 色散光束在小孔前(a)和小孔后(b)各个频谱成分振幅分布

Fig. 3 Amplitude of dispersive laser before a hole (a) and after a hole (b)

根据 Collins 公式<sup>[8]</sup>,振幅分布为  $E_{in}(x_0, y_0, z_0, t)$  的光束经过一个 ABCD 系统后振幅分布为

$$E_{out}(x, y, z, t) = 1/(i\lambda B) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{in}(x_0, y_0, z_0, t) \times \exp[ik(z - z_0)] \exp\left\{\frac{ik}{2B}[A(x_0^2 + y_0^2) - 2(xx_0 + yy_0) + D(x^2 + y^2)]\right\} dx_0 dy_0. \quad (5)$$

对于一个空间滤波器,可以将其分解为两个  $abcd$  系统和一个半径为  $r$  的硬边光阑,如图 4 所示。

光栅使得各个频谱成分在频域空间远场分散开后形成不同的光强分布,如图 2 所示<sup>[6]</sup>,各个频谱成分在靶面会有微小的位移,这些不同时刻出现的频谱成分经过时域叠加,便可在时间平均的意义上消除一定的空间调制,达到匀滑光束的目的。

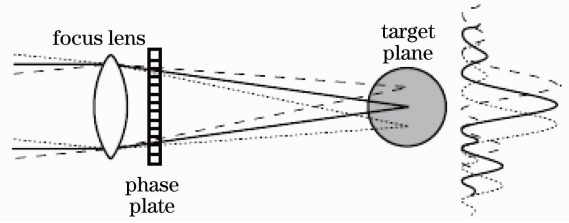


图2 SSD匀滑原理示意图

Fig. 2 Principle of low SSD smoothing the focus

## 2.2 光谱色散下的光束在空间滤波器中的传输

由于光谱色散后的光束需在有多个空间滤波器组成的系统中传输,而各个频谱成分在空间滤波器焦点处会色散展宽,如果空间滤波器的小孔尺寸不够大,将会使部分频谱成分被小孔拦截,如图 3 所示,这部分频谱成分将不能起到匀滑光束的作用。然而,如果小孔尺寸太大,将不能起到对空间高频成分的滤波作用<sup>[7]</sup>。因此研究经过光谱色散后的光束经过空间滤波器的传输是十分必要的。

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f_1 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{l_1}{f_1} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{l_2}{f_2} & f_2 \\ -\frac{1}{f_2} & 0 \end{bmatrix},$$

小孔即半宽为  $r$  的硬边光阑的孔径函数

$$T(x) = \begin{cases} 1, & |x| < r \\ 0, & |x| > r \end{cases}. \quad (6)$$

在实际计算中可以采用 J. J. Wen 等<sup>[9]</sup> 提出的

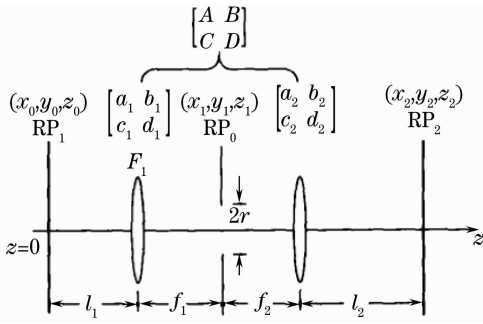


图4 空间滤波器系统

Fig. 4 A spatial filter system

用有限个复高斯函数之和逼近硬边光阑孔径函数的方法,该方法在模拟计算中具有快速、精确的优点。将  $T(x)$  展开为有限复高斯函数之和

$$T(x) = \sum_{m=1}^N F_m \exp\left(-\frac{G_m x^2}{r^2}\right), \quad (7)$$

式中  $F_m$  和  $G_m$  分别为展开系数和复高斯函数系数,模拟计算表明,当  $N=10$  时便可得到足够精确的结果,具体取值时可参考文献[9]。

色散光束通过空间滤波器的传输就可以看作是

光束依次通过  $\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix}$  光学系统、硬边光阑和

$\begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix}$  光学系统的传输。

为了快速得到计算结果,只考虑一维情况。令光束在入射参考面  $RP_1$  上的振幅分布为

$$E_{in}(x_0, z_0, t) = E_D(x_0, z_0, t),$$

根据(5)式,光束在参考面  $RP_0$  上的振幅分布为

$$E_1^-(x_1, z_1, t) = \sqrt{\frac{1}{i\lambda b_1}} \int_{-\infty}^{+\infty} E_D(x_0, z_0, t) \exp[ik(z_1 - z_0)] \times \exp\left[\frac{ik}{2b_1}(a_1 x_0^2 - 2x_1 x_0 + d_1 x_1^2)\right] dx_0, \quad (8)$$

上式为色散光束经过  $\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix}$  光学系统后到达小

孔所在平面  $RP_0$  前的振幅分布。经过小孔后在  $RP_0$  的振幅分布为  $E_1^+(x_1, z_1, t) = E_1^-(x_1, z_1, t)T(x_1)$ 。

最后再经过  $\begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix}$  光学系统,光束在参考面  $RP_2$

上的振幅分布为

$$E_2(x_2, z_2, t) = \sqrt{\frac{1}{i\lambda b_2}} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1^+(x_1, z_1, t) \exp[ik(z_2 - z_1)] \times \exp\left[\frac{ik}{2b_2}(a_2 x_1^2 - 2x_2 x_1 + d_2 x_2^2)\right] dx_1. \quad (9)$$

上述计算没有考虑相位畸变和振幅畸变,而这些畸变会影响小孔处焦斑尺寸和形态,利用 K. R. Manes 等<sup>[10]</sup>提出的统计光学模型描述这些畸变,这个模型将高功率激光系统中存在振幅调制和相位畸变的光场表示为

$$E_{\text{aberration}}(x, z, t) = E(x, z, t) \exp\left(-\frac{x^2 \sigma_p^2}{L_p^2}\right) + \sigma_A^2 \left[-\left(\frac{1}{L_A^2} + \frac{\sigma_p^2}{L_p^2}\right)x^2\right], \quad (10)$$

式中  $L_A$  和  $L_p$  分布表示振幅调制和相位畸变的尺度,  $\sigma_A^2$  是光强调制强度,  $\sigma_p^2$  是相位误差幅度,通常  $I$  远大于噪声光强  $\sigma_A^2$ 。这个有畸变的光束经过与上文中类同的计算,便可以得到在畸变色散光束在参考面  $RP_2$  上的振幅分布。

### 2.3 神光II第9路空间滤波器的小孔尺寸选择

考虑到在靶面的匀滑目标是  $40 \sim 80 \mu\text{m}$ ,以最后一级空间滤波器为例,计算匀滑目标为  $s_0 = 40 \mu\text{m}$ ,靶面焦距为  $1575 \text{ mm}$  时高功率激光系统中各级空间滤波器所需小孔尺寸。

如图5所示,经过光谱色散后的理想光束经过透镜  $L_1, L_2$  和  $L_3$ ,边频  $\omega_{N/2}$  与基频  $\omega_0$  在  $L_3$  的焦点处展开距离为  $\theta_3 = s_0/2f_3 = 12.7 \mu\text{rad}$ ,  $\theta_1 = f_2\theta_2/f_1 = f_2\theta_3/f_1 = 9348 \text{ mm} \times 12.7 \mu\text{rad}/9329.221 \text{ mm} = 12.725 \mu\text{rad}$ ,因此小孔尺寸必须满足  $2r/f_1 \geq 2\theta_1 = 25.45 \mu\text{rad} \Leftrightarrow 3.2 \text{ DL}$ , DL 为衍射极限。依次类推得到满足谱色散匀滑条件的各级空间滤波器所需小孔尺寸,如表1所示。

表1 各级空间滤波器所需小孔尺寸

Table 1 Needed-hole size of each spacial filter

Spacial filter	Hole side / $\mu\text{rad}$
SF2	2479.65
SF3	821.30
SF4	275.80
SF5	138.20
SF6	93.30
SF7	44.26
SF8	25.45

与现在使用的空间滤波器小孔尺寸相比较,发现 SF2 的小孔不能满足匀滑需求,而其它的空间滤波器小孔都能够使所有的频谱成分通过。如果要让全部频谱成分通过,必须使 SF2 的小孔扩大至  $6\text{DL}$  (在 SF2 和 SF3 中间插入  $8:5$  的软边光阑)。

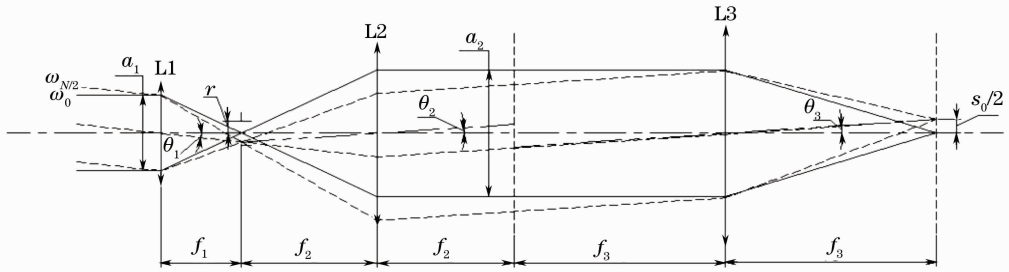


图 5 小孔尺寸选择原则示意图

Fig. 5 Sketch map of hole size selection principle

### 3 数值计算结果及分析

基于以上理论,用数值方法计算第 9 路中的 SSD 单元在经过七级空间滤波器再经过透镜阵列(LA)在靶面的光强分布(如图 6 所示)。假设入射到 SSD 系统的单色光场的空间分布为 6 阶超高斯型,  $E(x, z, t) =$

$\exp(-x^6/\omega_0^6)\exp(i\omega_0 t)$ ,  $\omega_0$  为光束半宽,取  $\omega_0 = 2.75$  mm,电光调制器的调制频率为 3 GHz,调制深度为 5,入射到 SF2 的光谱展宽光束色散系数为  $19677 \mu\text{rad}/\text{nm}$ ,LA 的透镜元焦距为 121147 mm,直径为 50 mm,靶镜焦距为 1575 mm<sup>[11]</sup>。

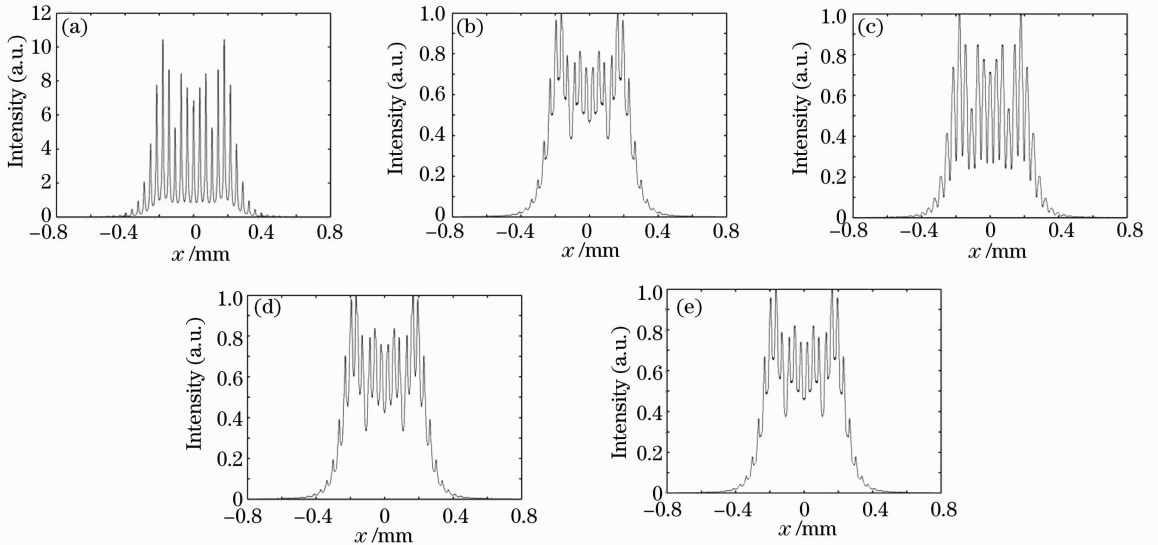


图 6 空间滤波器小孔对 SSD 效果的影响。(a)无 SSD;(b)无小孔时加上 SSD;(c)使用目前小孔加上 SSD;(d)按照表 1 设计的小孔加上 SSD;(e)适当扩大表 1 设计的小孔加上 SSD

Fig. 6 Affection of the holes with different size. (a) without SSD; (b) without hole using SSD; (c) with working-hole using SSD; (d) with needed-hole described in table 1 using SSD; (e) with expanding-hole basing on table 1 using SSD

从模拟结果可以看出,经过理想光学系统传输,不使用 SSD 时,焦斑通量对比度<sup>[12]</sup>  $\sigma_{\text{rms}} = 0.81$ ;使用 SSD 且没有小孔限制时,  $\sigma_{\text{rms}}$  下降到 0.22;使用目前的小孔,  $\sigma_{\text{rms}} = 0.37$ ,匀滑效果没有达到无孔时的效果;按照表 1 设计小孔,  $\sigma_{\text{rms}} = 0.25$ 。图 7 为图 6 对应的能量占有率比较图,图中 a~e 对应图 6(a)~(e)。

按照表 1 设计的小孔虽然使焦斑不均匀度下降,但还未达到最佳状态,是因为表 1 是按照使边频成分的零级峰通过设计的。而要满足匀滑要求,必须使边频的一部分次级峰也要通过,否则会损失边

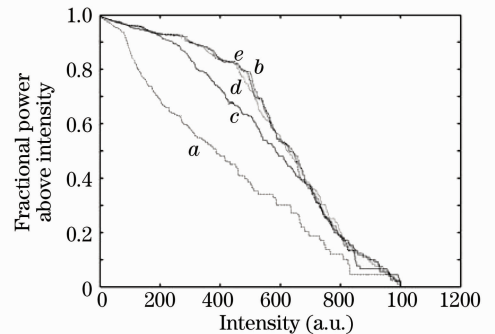


图 7 能量占有率比较图

Fig. 7 FOPAI comparisons

频能量,影响匀滑效果。因此必须在表 1 基础上适当扩大小孔尺寸,经过模拟计算,每一级空间滤波器的小孔再增大 7 倍衍射极限时, $\sigma_{\text{rms}}=0.22$ ,达到最佳匀滑效果,如图 6(e)所示。

对上述 5 种情况做能量分布函数(FOPAI)<sup>[12]</sup>  $f_{\text{FOPAI}}$  分析,

$$f_{\text{FOPAI}}(I_0) = \frac{\int_{\text{beam area where } I(x,y) \geq I_0} I(x,y) dx dy}{\int_{\text{beam area}} I(x,y) dx dy},$$

在没有 SSD 作用时(如图 7 中曲线 a 所示),能量分布在各个层次,不是很匀滑,使用 SSD 以后的各种情况都要比不使用 SSD 的能量分布均匀。可以看出,在使用新设计的小孔后,FOPAI 值几乎和不使用小孔

时重合(如图 7 中曲线 b 和 e 所示),SSD 的使用效果不会受到小孔的影响。

考虑到畸变的影响,选取(10)式中的  $\sigma_p^2/L_p^2 = 7/\omega_0^2$ ,  $\sigma_A = 0.3$ ,  $L_A^2 = 5\omega_0^2$ ,使得有畸变焦斑的尺寸为无畸变时的 2 倍(只关注焦斑尺寸,所以畸变参数可以任意选取)。模拟结果如图 8 所示,不使用 SSD 时  $\sigma_{\text{rms}} = 0.83$ ,使用 SSD 并且没有小孔限制时  $\sigma_{\text{rms}} = 0.23$ ,使用 13DL 小孔时  $\sigma_{\text{rms}} = 0.24$ ,可见畸变导致光束焦斑增大,必须增大小孔尺寸才能使色散匀滑取得良好的使用效果,模拟计算表明,这种情况下小孔尺寸增大到 14DL 时, $\sigma_{\text{rms}} = 0.23$ ,达到了无孔时的效果。

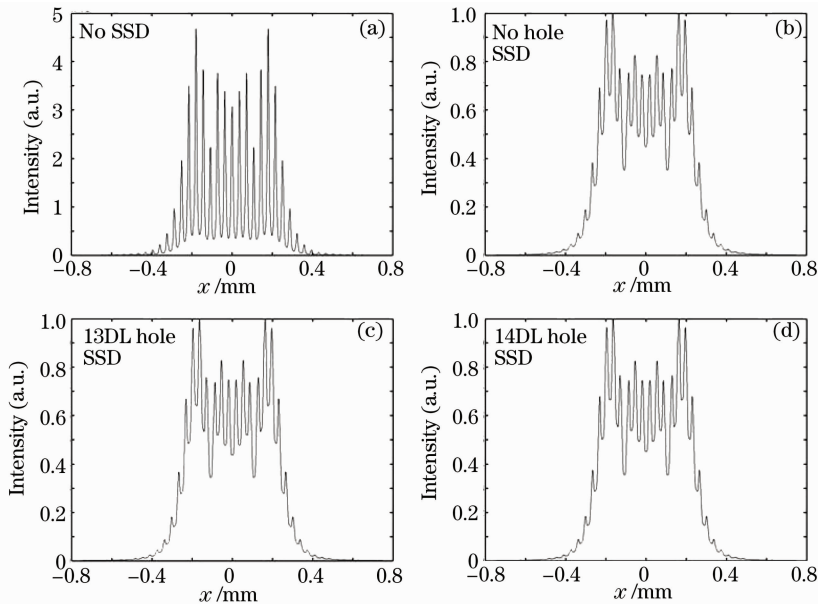


图 8 考虑畸变时空滤波器小孔对 SSD 效果的影响

Fig. 8 Affection of the holes with different size considering the aberration

## 4 结 论

采用 J. J. Wen 等<sup>[9]</sup>提出的将硬边光阑展开为有限个复高斯函数之和的方法,利用 Collins 公式,模拟了被 SSD 色散展宽后的六阶超高斯激光经过具有不同尺寸滤波小孔的空间滤波器系统的传输结果,并且给出了存在振幅和相位畸变时选取小孔尺寸的模拟计算方法,对于指导谱色散匀滑工作的进一步研究与实现有重要的意义。如果能够在各级空间滤波器小孔处测量静态无色散和有色散光束的真实焦斑尺寸,调整畸变参数模拟真实畸变,将会大大推进焦斑匀滑工作的进程。

## 参 考 文 献

- Xie Yongjie, Liu Jingru, Zhao Xueqing. Laser beam smoothing and uniform illumination in ICF[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(6): 454~459  
谢永杰, 刘晶儒, 赵学庆. ICF 中光束平滑及靶面辐射均匀性技术评述[J]. *激光技术*, 2001, **25**(6): 454~459
- Liu Qiang, Wu Rong, Zhang Xiaobo *et al.*. Technical optimization of multi-level diffractive optical elements[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1165~1168  
刘 强, 邬 融, 张晓波 等. 多台阶衍射光学元件的工艺优化[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1165~1168
- Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Analysis of laser optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and special method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 534~538  
李 平, 马 驰, 栗敬钦 等. 时域与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 534~538
- Zhou Shenlei, Lin Zunqi, Zhu Jian *et al.*. Computation and study of smoothing by spectral dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005,

- 32**(3): 341~345  
周申蕾, 林尊琪, 朱 俭 等. 谱色散匀滑的计算研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 341~345
- 5 S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456~3462
- 6 Two-dimensional SSD on OMEGA [R]. Laboratory for Laser Energetics(LLE) Review, 1996, **69**: 1~10
- 7 Pu Zhengcai, Ji Xiaoling. Approximate transmission equations of complicated optical imaging systems with a flat Gaussian beam through a hard edged aperture [J]. *J. Sichuan Normal University (Natural Science)*, 2005, **28**(2): 194~197  
蒲政才, 季小玲. 平顶高斯光束通过硬边光阑复杂光学成像系统的近似传输公式[J]. 四川师范大学学报:自然科学版, 2005, **28**(2): 194~197
- 8 S. A. Collins. Lens-system diffraction integral written terms of matrix optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1970, **60**(9): 1168~1177
- 9 J. J. Wen, M. A. Breazeale. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams [ J ]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, **83**(5) : 1752~1756
- 10 K. R. Manes, W. W. Simmons. Statistical optics applied to high-power glass lasers[J]. *J. O. S. A. (A)*, 1985, **2**(4): 528~538
- 11 Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi *et al.*. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens array[J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(1): 27~31  
丘 悦, 钱列加, 黄宏一 等. 用消衍射方法改善透镜列阵的辐照均匀性[J]. 中国激光, 1995, **A22**(1): 27~31
- 12 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status [ J ]. *Appl. Opt.*, **46**(16): 3276~3303