

高功率激光系统空间滤波的离焦容限分析

单泉源 张军勇 张艳丽 焦兆阳 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 在惯性约束聚变高功率激光装置中,严重的低频波前畸变会引起空间滤波的小孔截断,降低光束质量。采用相位调制的离焦波前来分析不同程度的离焦对空间滤波过孔和输出光束质量的影响,得到了空间滤波器对波前离焦的容限。在这种模型下的计算结果表明,球面相位因子入射光聚焦光斑焦点位置的偏移距离与其曲率半径成反比,光束质量随着输入光束曲率半径的绝对值减小而降低。对于等焦距 11.8 m、小孔半径角 $200 \mu\text{rad}$ 的空间滤波器,临界频率处畸变波前的球面相位因子曲率半径绝对值不能小于 3.5 km。曲率半径为 3 km 时,相位调制的空间频率小于 1.57 mm^{-1} 时光束质量会急剧下降。

关键词 激光技术;高功率激光;波前畸变;空间滤波;离焦容限;相位调制

中图分类号 TL632⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0902006

Analysis of the Defocusing Tolerance of Spatial Filtering in High Power Laser Systems

Shan Quanyuan Zhang Junyong Zhang Yanli Jiao Zhaoyang Zhu Jianqiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China)

Abstract In the inertial confinement fusion high power laser systems, the severe low frequency wavefront distortion will result in laser beam cutoff, and reduce laser beam quality due to the pinhole of the spatial filter. Based on the spherical wave factor with phase ripples, the defocusing tolerance of spatial filtering has been studied in detail. In this model, the calculation result shows that the shift distance of the actual frequency-plane in the spatial filter is in inverse proportion to the curvature radius. In addition, the beam quality will reduce with the curvature radius decreasing. For a specified spatial filter with parafocal length of 11.8 m and filtering pinhole radius of $200 \mu\text{rad}$, the curvature radius absolute value of the spherical wave factor should not be small than 3.5 km for the critical frequency. When the curvature radius grows to 3 km, the beam quality will deteriorate rapidly as the spatial frequency of phase ripples become smaller than 1.57 mm^{-1} .

Key words laser technique; high power laser; wave-front distortion; spatial filtering; defocusing tolerance; phase ripples

OCIS codes 140.3280; 140.3295; 140.3518; 330.6110

1 引 言

在惯性约束聚变高功率激光装置中,波前畸变的存在会使光束远场表现为不规则的畸形,影响空间滤波的过孔效率,进而影响光路准直的精度,破坏光斑分布的均匀性,降低光束质量。通常采用空间滤波器抑制波前的中、高频畸变^[1],但是来源于注入波前失谐或滤波调整失调的低频畸变仍会较大程度

地影响滤波效果。低频的波前畸变误差,可以在全口径内展开成不同的模式的组合,比如平移、倾斜、离焦、像散、彗差和球差等。不同模式的低频畸变经过空间滤波器所形成的聚焦光斑分布各异,另外不同程度畸变的聚焦焦点位置也会发生移动。这些情况导致滤波小孔的位置只能调节到某一特定波前成分的频谱面,而其他波前成分是失调的。另一方面

收稿日期: 2012-05-09; **收到修改稿日期**: 2012-06-11

作者简介: 单泉源(1986—),男,硕士研究生,主要从事光传输方面的研究。E-mail: ashesofshan@gmail.com

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器总体光学设计、结构设计等方面的研究。

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

放大系统中的空间滤波器透镜焦距很大,景深比较长,滤波小孔难以调整到准确的位置上,这也会造成空间滤波失调。因而有必要研究失调的波前成分在空间滤波器的传输特性,以及滤波失调的容限。

本文以离焦这一低频波前畸变的典型模式作为例子,通过分析不同程度的离焦对空间滤波过孔和输出光束质量的影响,从而得出高功率激光系统对波前离焦的容限。从理论上推导相位调制的离焦波前的滤波传输方程,通过数值计算对比了相位调制球面相位因子光束和平行光束滤波特性,从总体上分析球面相位因子对空间滤波的影响,并具体分析了不同曲率半径的球面相位因子对出射光束质量的影响,最后在理论分析和模拟计算的基础上得到了空间滤波对离焦的容限。

2 畸变光束通过空间滤波器

1975年 Simmons 等^[1]提出把空间滤波器应用到高功率激光装置中,最初是用来抑制非线性折射率引起的强光束自聚焦现象,特别是由于小的相位及振幅调制引起小尺度自聚焦。随后, Hunt 等^[2,3]更加详尽地阐述了空间滤波器的另一特有性质——像传递功能,即光束保持长距离、高质量传输而减少衍射效应的影响。后续相关研究人员针对空间滤波器的研究做了很多细致的工作,研究主要集中于滤波小孔几何结构、材料参数设计和透镜参数设计^[4,5~8],以克服高能量密度焦点处的等离子体堵口效应,以及在理想波面条件下研究空间滤波器的传输变换特性^[6,7]。然而实际光束总会由于光学元件波前缺陷或放大器中的热效应和增益饱和效应变得具有一定的振幅和相位畸变,因此研究畸变光束通过空间滤波器的传输特性具有实际必要性。

图 1 和图 2 分别为理想光束和畸变光束通过空间滤波器的示意图。理想情况下,光束平行入射,滤波小孔位于频谱面上,出射光场是入射光场的镜像,如图 1 所示。畸变光束通常带有平移、倾斜、离焦、像散、彗差和球差等像差因子,频谱面聚焦光斑的分布和位置都是多种多样的,必然会出现滤波小孔位置失调的情况,致使部分波前成分的焦点位置与小孔位置不重合,如图 2 所示。不同程度的像差导致的焦点偏移量不同。以离焦为例,曲率半径越小的离焦,聚焦光斑在光束中轴线移动的距离越远。下面就以离焦,即球面相位因子为例,研究不同程度的离焦对空间滤波器的影响,分析空间滤波对离焦失调的容限。

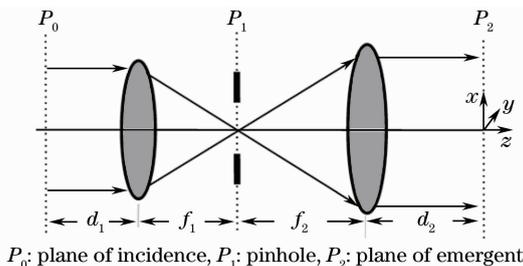


图 1 理想光束通过空间滤波器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ideal beam propagating through spatial filter

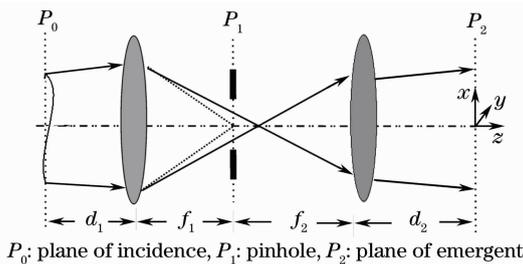


图 2 畸变光束通过空间滤波器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of distortion beam propagating through spatial filter

3 相位调制的离焦波前的滤波理论分析

离焦的波前包含球面相位因子,即发散球面相位和会聚球面相位因子。图 3 给出了发散球面相位因子的滤波示意图,与会聚球面相位因子的图示类似。

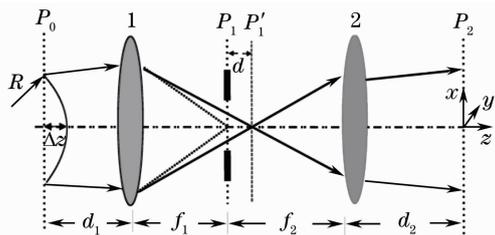


图 3 发散球面相位因子的空间滤波

Fig. 3 Spherical wave factor beam propagating through spatial filter

图中的 f_1, f_2 为两透镜的焦距,两透镜共焦面在 P_1 上,由于球面因子的存在,光束的实际频谱面为 P_1' ,入射面 P_0 与透镜 1 的距离为 d_1 ,出射面 P_2 与透镜 2 的距离为 d_2 ,光束沿着 z 轴传播, (x, y) 面为光束横截面。没有波前畸变的理想光束平行入射时,频谱面 P_1' 与透镜共焦面 P_1 重合。滤波小孔位于透镜共焦面上。下面给出不同曲率半径 R 下光场的传输解析式,发散球面因子 R 取正数,会聚球面波因子 R 取负数。

国家点火装置(NIF)主放大装置中的腔空间滤波器的两透镜是等焦距的^[8],可实现等比例的光束传输。在此对具有曲率半径 R 球面波因子的光束进行分析。利用传输矩阵可以推出球面相位因子的实际频谱面 P_1' 与滤波小孔的距离 d 为

$$d = \frac{f_1^2}{R}. \quad (1)$$

假设光束全口径记为 ω_0 ,由于 $R \gg \omega_0 \gg \Delta z$, 球面波矢高为

$$\Delta z \approx \frac{\omega_0^2}{8R}. \quad (2)$$

针对波前离焦,光场的低频部分取球面相位因子,高频部分选余弦相位周期调制^[9,10],球面波因子中心对称分布,入射光束的光场复振幅可写为

$$U_0(x_0, y_0, 0) = \left[A_0 \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \exp\left(-\frac{4nx_0^2}{\omega_0^2}\right) \sum_{m=1}^N \frac{(-1)^{m-1}}{N} \binom{N}{m} \exp\left(-\frac{4my_0^2}{\omega_0^2}\right) \right] \times \left[\exp\left(\frac{jkx_0^2}{2R} + \frac{jky_0^2}{2R}\right) \right] \{ \exp[jv_0 \cos(q_x x_0 + q_y y_0)] \}, \quad (3)$$

它包含三部分:第一部分是矩形平顶高斯分布^[11],其中 A_0 为常数, N 为平顶高斯光束的阶数,选取 $N=10$, ω_0 为光束的全口径;第二部分是球面发散相位因子, R 为球面相位因子曲率半径, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数;第三部分是正弦相位调制, v_0 为相位调制幅度,考虑到在非线性放大介质中的增长,在此选择 v_0 的值较为适中。 (q_x, q_y) 分别为 (x, y) 方向相位调制的

调制圆频率。

光场的周期相位调制,可利用贝塞尔函数进行展开

$$\exp(j\rho \cos \theta) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} j^l J_l(\rho) \exp(jl\theta), \quad (4)$$

将入射面到小孔的传输矩阵代入 Collins 公式,结合(4)式,可得到在小孔处的光场为

$$U_1(x_1, y_1) = \frac{1}{j\lambda f_1} \int U_0(x_0, y_0, 0) \exp\left(\frac{-jkx_0 x_1}{f_1} - \frac{jky_0 y_1}{f_1}\right) dx_0 dy_0 = \frac{A_0 \pi}{j\lambda f_1} \sum_l \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N j^l J_l(v_0) \frac{(-1)^{n-1}}{N} \times \frac{(-1)^{m-1}}{N} \binom{N}{n} \binom{N}{m} \sqrt{\frac{1}{A_n A_m}} \exp\left[\frac{1}{4A_n} \left(lq_x - \frac{kx_1}{f_1}\right)^2 + \frac{1}{4A_m} \left(lq_y - \frac{ky_1}{f_1}\right)^2\right], \quad (5)$$

式中

$$A_n = -\frac{4n}{\omega_0^2} + \frac{jk}{2R}, A_m = -\frac{4m}{\omega_0^2} + \frac{jk}{2R}.$$

文献[4]研究了为克服等离子体封堵效益而对小孔结构和材料的优化,这里将小孔简化为方形孔,小孔处的透射率函数为

$$T(x_1, y_1) = \begin{cases} 1, & -a < x_1, y_1 < a \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

可以得到输出面上的光场为

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{1}{j\lambda f_2} \iint U_1(x_1, y_1) T(x_1, y_1) \exp(-jkx_1 x_2 / f_2 - jky_1 y_2 / f_2) dx_1 dy_1 = -\frac{A_0 f_1}{4f_2} \sum_l \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N j^l J_l(v_0) \frac{(-1)^{n-1}}{N} \frac{(-1)^{m-1}}{N} \binom{N}{n} \binom{N}{m} \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{F}a - \frac{E-jD}{2\sqrt{F}}\right) + \operatorname{erf}\left(\sqrt{F}a + \frac{E-jD}{2\sqrt{F}}\right) \right] \times \exp[-AB^2 + (E-jD)^2 / (4F)] \left[\operatorname{erf}\left(\sqrt{F_1}a - \frac{E_1-jD_1}{2\sqrt{F_1}}\right) + \operatorname{erf}\left(\sqrt{F_1}a + \frac{E_1-jD_1}{2\sqrt{F_1}}\right) \right] \times \exp[-A_1 B_1^2 + (E_1-jD_1)^2 / (4F_1)], \quad (7)$$

式中

$$A = -\frac{1}{4A_n}, \quad B = lq_x, \quad C = k/f_1, \quad D = kx_2/f_2, \quad E = 2ABC, \quad F = AC^2,$$

$$A_1 = -\frac{1}{4A_m}, \quad B_1 = lq_y, \quad C_1 = k/f_1, \quad D_1 = ky_2/f_2, \quad E_1 = 2A_1 B_1 C_1, \quad F_1 = A_1 C_1^2.$$

同样可推导出平行光束在滤波小孔处和出射面的光场分布,在这里就不赘述了。

4 基本参数设定和光束质量评价

NIF 装置采用的空间滤波器滤波透镜焦距 $f_1 = f_2 = 11.8 \text{ m}$, 小孔半径角 $200 \mu\text{rad}$, 那么(6)式中方形小孔半边长 $a = 2.36 \text{ mm}$, 光束全口径为 $w_0 = 372 \text{ mm}^{[8]}$ 。取波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $v_0 = 0.5$, $N = 10$ 。

为了突出空间滤波器滤波的效果,正弦相位周期调制的空间频率选取在临界点,使正弦周期一级频谱正好位于小孔边界。由于 $q_x = q_y = \sqrt{2}q/2 = \sqrt{2}\pi/L$, 则调制周期为 $L = \sqrt{2}\lambda f_1 / (2a)$ 。

空间滤波器出射光束质量采用近场光束质量评价方法来描述,包括填充因子和光束通量对比度。填充因子的定义为

$$F = I_{\text{avg}} / I_{\text{max}}, \quad (8)$$

光束通量对比度的定义为

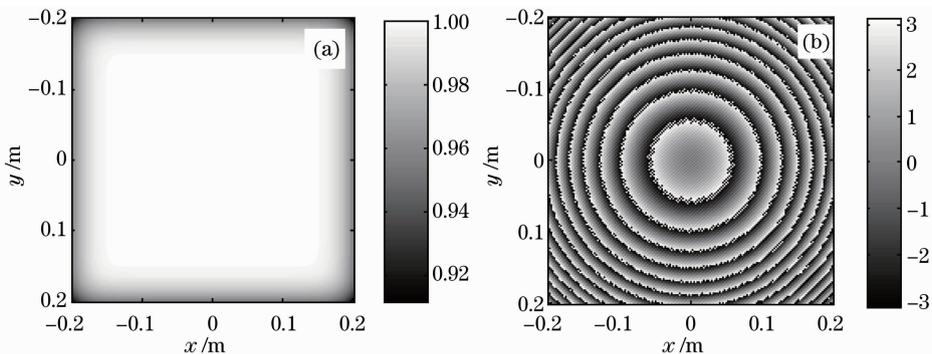


图 4 相位调制发散球面相位因子的入射光场分布。(a)强度分布;(b)相位分布
Fig. 4 Incidence field distribution of spherical wave factor beam with phase ripples.

(a) Intensity distribution; (b) phase distribution

图 5 和图 6 分别为发散球面因子光束和非离焦光束在空间滤波器小孔处的光场分布。除形成了中心亮斑外,二、四象限对角线处(红圈标出)形成了两个旁瓣中心亮斑[图 6(a)做了放大,红圈并不是真实旁瓣位置]。图 5(b)、6(b)给出了旁瓣的具体强度分布。这是由周期性相位的空间调制作用而产生

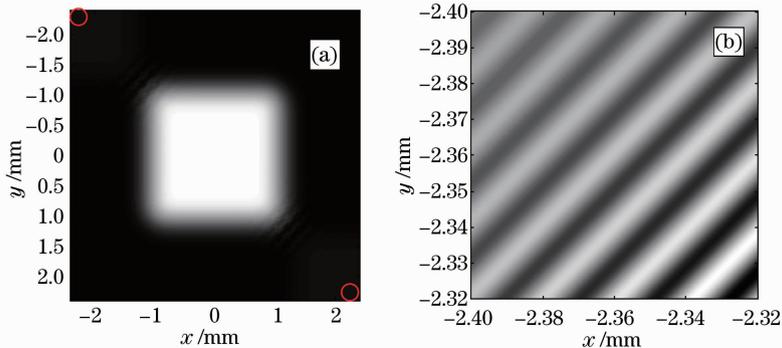


图 5 发散球面相位因子光束在小孔处的光场分布。(a)总强度分布;(b)旁瓣强度分布
Fig. 5 Field distribution of spherical wave factor beam with phase ripples on pinhole.

(a) Total intensity distribution; (b) side lobe intensity distribution

5 发散球面因子光束与非离焦光束的滤波对比

以发散球面相位因子为例,与非离焦光束在空间滤波器的滤波特性进行对比,总体上分析发散球面因子对空间滤波的影响。会聚球面因子的滤波特性与发散球面因子类似。

在神光 II 装置中,曲率半径大于 5 km 的入射光视为平面波。在这里取 $R = 3 \text{ km}$ 时,由(1)式可求得此时光束实际频谱面偏离滤波小孔的距离 $d = f_1^2 / R = 0.046 \text{ m}$ 。由(2)式可得畸变波前的矢高为 $\Delta z = \frac{w_0^2}{8R} = 5.8 \mu\text{m}$, 相当于 5.5 个波长。此时入射光场的分布特征如图 4 所示,入射光场强度为平顶高斯分布,整体的相位分布为同心圆。

的,周期性相位调制可以等效成多个平面波空间频率成分的叠加,图 5(b)、6(b)所示的旁瓣是由于周期相位调制展开的 ± 1 级空间频率成分导致的。发散球面因子下,小孔处中心光斑的分布范围有非常

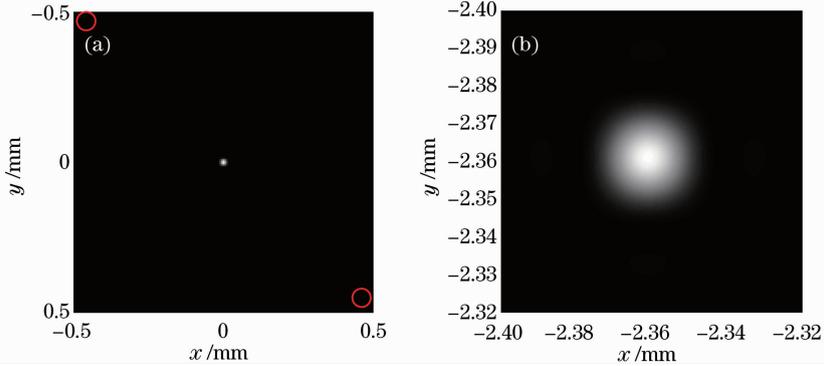


图 6 非离焦光束在小孔处的光场分布。(a)总强度分布;(b)旁瓣强度分布

Fig. 6 Field distribution of non-defocusing beam with phase ripples on pinhole.

(a) Total intensity distribution; (b) side lobe intensity distribution

图 7(a)和(b)分别是非离焦光束和发散球面相位因子光束空间滤波器在出射面的一维光场强度分布。从图 7(a)很难看到波形调制,调制参数填充因子 $F \approx 0$, 通量对比度 $C \approx 1$, 光束的近场均匀性非常

明显的增加,呈平顶方形分布。二、四象限对角线处的旁瓣不但扩散,而且出现了明显的斜条纹。表明透镜的焦平面并不是光束的远场焦面,光束进入了菲涅耳衍射区。

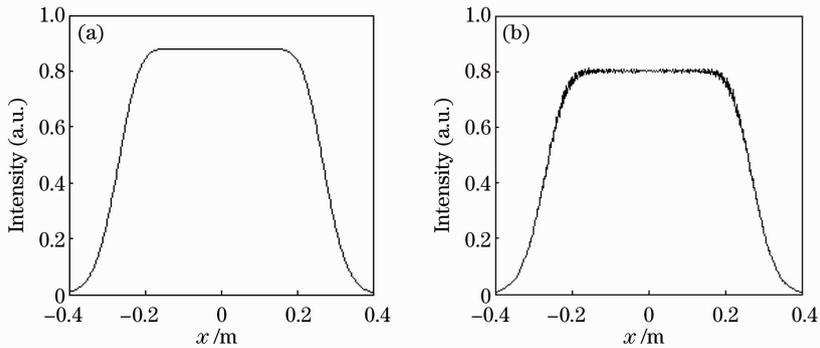


图 7 (a)非离焦光入射时出射面的光场一维强度分布;(b) $R=3$ km 的发散球面光束出射面的光场一维强度分布

Fig. 7 (a) Field distribution of non-defocusing beam with phase ripples on the plane of emergent; (b) field distribution of divergent spherical wave factor beam with phase ripples on the plane of emergent with $R=3$ km

6 容限分析

6.1 滤波小孔的截断影响

首先分析主光斑不会被滤波小孔截取时,发散相位因子曲率半径的容限。当发散球面相位因子曲率半径 R 减小时,滤波小孔处中心亮斑会扩散。图 8(a)显示了当 $R=1.5$ km 时滤波小孔处的光场强度分布,此时中心光斑几乎充满了整个小孔。如果曲率半径进一步减小,滤波小孔将会截掉主光束。发散球面相位因子已严重影响空间滤波的过孔。图 8(b)显示了此时出射面的一维光场分布,强度调制已经非常强烈,光束均匀性大大下降,填充因子 $F=$

0.8149, 通量对比度 $C=0.0723$, 相比于理想波前,填充因子低了 18.5%, 通量对比度高了 7.2%。这时光束实际频谱面偏离滤波小孔的距离为 0.093 m, 波前矢高为 $11.5 \mu\text{m}$, 即 11 个波长。

与之对应的 $R=-1.5$ km 所得结果与发散球面波类似, 填充因子 $F=0.7985$, 通量对比度 $C=0.0726$ 。相比于理想波前, 填充因子降低了 20.0%, 通量对比度提高了 7.3%。

综上所述, 球面相位因子曲率半径的绝对值 $|R|$ 超过 1.5 km 时, 将会影响到主光束在空间滤波器的过孔效率。

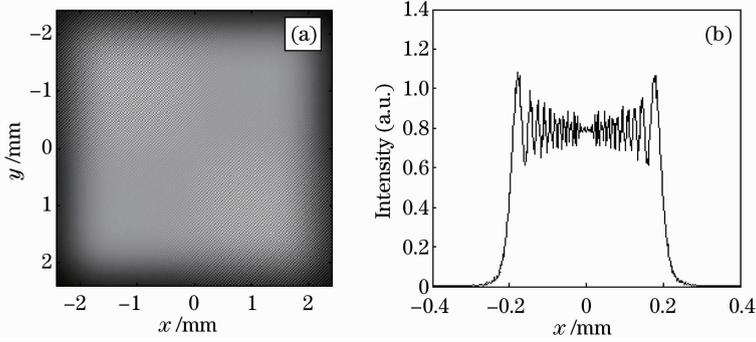


图 8 $R=1.5$ km 的发散球面相位因子。(a)小孔处的光场分布;(b)出射面的一维强度分布
Fig. 8 Divergent spherical wave factor beam with phase ripples with $R=1.5$ km. (a) Intensity distribution on the pinhole; (b) intensity distribution on the plane of emergent

6.2 相同相位周期调制下球面相位因子曲率半径的影响

在满足过孔的情况下,进一步分析正弦相位周期调制载波下,空间滤波出射光束质量随球面相位因子曲率半径的变化,从而获得出射光束质量开始明显下降时对应的曲率半径 R 。

由于满足过孔时发散球面因子曲率半径绝对值 $|R| > 1.5$ km;另一方面,计算结果显示,当 $|R| > 4$ km时,填充因子 $F \approx 1$,通量对比度 $C \approx 0$,光束均匀性保持稳定。因此,选取球面因子曲率半径绝对值 $|R|$ 在 $1 \sim 4$ km之间做进一步分析,可以涵盖过孔容限 $|R| = 1.5$ km 的临界情况。图 9 和图 10 分别给出了球面因子曲率半径在 $1 \sim 4$ km和 $-4 \sim -1$ km,相位调制球面相位因子光束经空间滤波器滤波后出射光束的填充因子和调制度变化曲线。当球面因子曲率半径绝对值减小时,出射光束的填充因子会迅速下降,调制度增大,光束均匀性下降。当曲率半径增大时,出射光束的填充因子增大,调制度下降,光束均匀性提高。从图可以得到转折点在 $|R| = 3.5$ km 附近。对于发散球面相位因子来说, $R = 3.5$ km,实际频谱面偏离滤波小孔的距离为 0.040 m,畸变波前的矢高为 $5.0 \mu\text{m}$,即 4.7 个波长。此时填充因子 $F = 0.9973$,通量对比度 $C = 0.0012$ 。相比于主光斑截断 $R = 1.5$ km时,填充因子高了 27.5% ,通量对比度低了 98.3% ;相比于理想波前,填充因子低了 0.3% ,通量对比度高了 0.1% 。

对于会聚球面相位因子来说, $R = -3.5$ km,实际频谱面偏离滤波小孔的距离为 -0.040 m,畸变波前的矢高为 $5.0 \mu\text{m}$,即 4.7 个波长,填充因子 $F = 0.9966$,通量对比度 $C = 0.0012$ 。相比于主光斑截断 $R = -1.5$ km时,填充因子提高了 31.1% ,通量

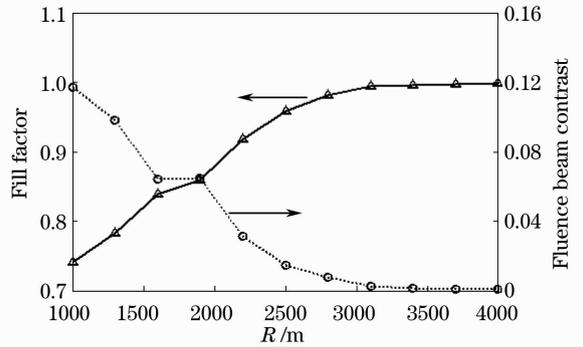


图 9 出射光束填充因子和通量对比度与发散球面因子曲率半径的关系
Fig. 9 Fill factor and fluence beam contrast of the emergent light according to the radius of curvature of divergent spherical wave factor beam

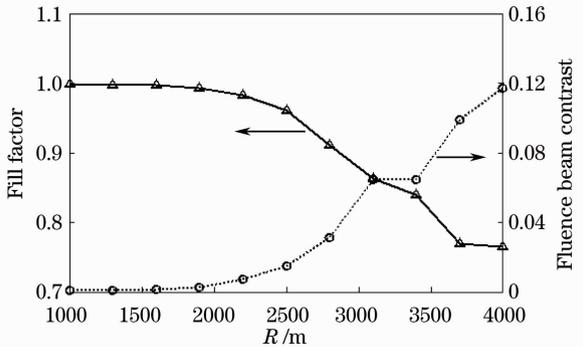


图 10 出射光束填充因子和通量对比度与会聚球面因子曲率半径的关系
Fig. 10 Fill factor and fluence beam contrast of the emergent light according to the radius of curvature of convergent spherical wave factor beam

对比度降低了 98.3% ;相比于理想波前,填充因子降低了 0.3% ,通量对比度提高了 0.1% 。

6.3 调制周期的影响

固定球面相位因子发散曲率半径不变时,研究不同空间周期的相位调制下空间滤波出射光束的填

充因子和调制度变化。

图 11 给出了 $R=3$ km 时,当相位调制周期改变时,出射光场的填充因子和调制度的变化特性。可以看出随着调制周期的变大,出射光场的光束均匀性会下降;当调制周期变小时,出射光场的光束均匀性保持稳定。转折点在调制周期 $L=4.0$ mm 附近,对应的空间频率为 $q=1.57$ mm^{-1} ,此时填充因子 $F=0.9914$,通量对比度 $C=0.0040$,相比于理想波前,填充因子降低了 0.9%,通量对比度提高了 0.4%。因此相位调制空间频率小于 1.57 mm^{-1} 时光束均匀性会迅速下降。当波前相位调制的频率较低时,为了保证良好的出射光束质量,畸变波前的球面相位因子必须限制在一定的范围, R 不能太小。

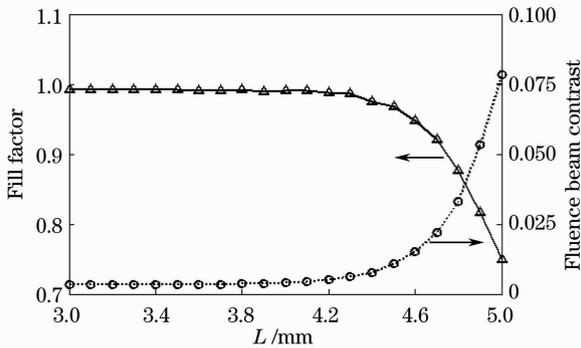


图 11 出射光束填充因子和通量对比度与相位调制周期的关系

Fig. 11 Fill factor and fluence beam contrast of the emergent light according to the modulation period of convergent spherical wave factor beam

7 结 论

以离焦这一低频波前畸变的典型模式作为例子,分析不同程度的离焦对空间滤波过孔效率和输出光束质量的影响。当相位调制的球面相位因子光束通过空间滤波器,利用 Collins 公式解析得到了空间滤波器频谱面和输出面上的强度分布,求得了频谱面的位移。对于等焦距 11.8 m,小孔半径角 200 μrad 的空间滤波器,在临界周期调制空间频率下,分析了发散球面相位因子光束和平行光束在空间滤波器的传输特性。得出了在曲率半径绝对值 $|R| < 3.5$ km 时,球面相位因子会明显影响光束的近场均匀性,即空间滤波器对球面相位因子曲率半径绝对值的容限为 3.5 km。曲率半径绝对值 $|R| < 1.5$ km 时,滤波小孔将会截取主光束,严重影响空间滤波的过孔效率。最后得出了当 $R=3$ km 时,相位调制空间频率小于 1.57 mm^{-1} 时光束

均匀性会迅速下降。建立的模型简单有效,其结果对于空间滤波器的设计可提供一定的参考价值。在此仅以离焦这一简单的低频波前畸变为例进行了详细分析。同样地,其他形式或者更加普通的低频波前失谐也会受到空间滤波器的限制,实际应用中必须加以仔细考虑。

参 考 文 献

- 1 W. W. Simmons, S. Guch, Jr. F. Rainer *et al.*. A high energy spatial filter for removal of small scale beam instabilities in high power solid state lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, **QE-11**(9): 852
- 2 J. T. Hunt, P. A. Renard, W. W. Simmons. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filters[J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(4): 779~782
- 3 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.*, 1977, **17**(13): 2053~2057
- 4 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
- 5 A. K. Potemkin, T. V. Barmashova, A. V. Kirsanov *et al.*. Spatial filters for high-peak-power multistage laser amplifiers[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(20): 4423~4430
- 6 Zhang Bin, Lü Baida. Propagation of laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations through a spatial filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(10): 903~908
张彬,吕百达.有振幅调制和相位畸变激光通过空间滤波器的传输[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(10): 903~908
- 7 Xu Shixiang, Guan Fuyi, Lin Zunqi *et al.*. Design and measurement of focal lengths of lenses of large f-number used in spatial filters in a high power solid-state laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(12): 1077~1080
徐世祥,管富义,林尊琪等.高功率激光系统空间滤波器透镜焦距的选择及其测量[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(12): 1077~1080
- 8 Zhou Kainan, Zhu Qihua, Wang Xiaodong *et al.*. Special design of the lens of spatial filter in an ultra-short laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **A35**(10): 1481~1484
周凯南,朱启华,王晓东等.超短脉冲激光系统中空间滤波器透镜的优化设计[J]. *中国激光*, 2008, **A35**(10): 1481~1484
- 9 Jia Xuemei, Xie Xinglong. Propagation property of Gaussian beams passing through spatial filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1220~1224
贾雪梅,谢兴龙.高斯光束通过空间滤波器的传输特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1220~1224
- 10 K. S. Tang, S. C. Wen, K. M. You *et al.*. Propagation property of high-power laser beam through spatial filter[C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 505~509
- 11 S. C. Burkhardt, E. Bliss, P. Di Nicola *et al.*. National Ignition Facility system alignment[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(8): 1136
- 12 B. Michael. Localised wavefront deformations: propagation in non-linear media (II) (a simple but accurate computational method)[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 480~494
- 13 P. P. Sun, D. A. Liu, Y. L. Zhang *et al.*. Evolution of low-frequency noise passing through a spatial filter in a high power laser system [J]. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 2011, **54**(3): 1~5
- 14 Y. Li. Light beams with flat-topped profiles[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(12): 1007~1009