

文章编号: 1001-4322(2002)04-0508-03

光学元件低频位相噪声的空间尺度

邓青华^{1,2}, 张小民², 景 峰², 刘兰琴², 粟敬钦²

(1. 中国工程物理研究院 研究生部, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 建立求位相分布空间尺度的数学模型并计算了实际钽玻璃放大片所产生位相噪声的空间尺度, 且就空间尺度对焦斑的影响及其在传输过程中的变化进行了数值模拟, 结果表明: 空间尺度对聚焦焦斑影响很小; 在传输过程中, 位相噪声的空间尺度会增大, 而这种增长会增强变形镜等光束质量控制手段的效果。

关键词: 低频位相噪声; 空间尺度; 随机位相屏; RMS 位相梯度

中图分类号: TN 241 **文献标识码:** A

高功率固体激光系统中使用的大口径光学元件会给光束带来位相噪声, 影响光束的焦斑大小和可聚焦功率^[1], 对光学元件产生的低频位相噪声进行分析研究具有重要意义。空间尺度是描述光学元件低频位相噪声的重要参数之一^[2], 它能反映光学元件引起的低频位相噪声横向空间分布, 是建立低频位相误差模型的必需参数^[3]。RMS 位相梯度^[4]已广泛用来描述低频位相误差, 它反映的是位相误差梯度的分布, 大空间尺度和大幅度的位相误差同小空间尺度和小幅度的位相误差可能具有相同的 RMS 位相梯度, 但他们的空间分布却相差甚远, 所以要对低频位相误差进行全面了解, 需对 RMS 位相梯度和其空间尺度综合考察。本文的目的在于研究空间尺度对分析低频位相相对光束的影响。

1 理论基础

1.1 空间尺度的数学模型

研究资料^[2]表明: 光学元件产生的低频位相噪声的梯度呈高斯分布, 所以位相噪声的空间尺度与位相噪声的自相关函数有关。由此可得空间尺度的数学模型: 设所测得的光学元件的透射或反射波前为 $\Phi(x_1, y_1)$, $-L_1/2 \leq x_1 \leq L_1/2$, $-L_2/2 \leq y_1 \leq L_2/2$, 那么 $\Phi(x_1, y_1)$ 的自相关分布函数为 $r_{\Phi}(x_2, y_2)$, $r_{\Phi}(x_2, y_2)$ 可由下式求出

$$r_{\Phi}(x_2, y_2) = \iint \Phi(x_1, y_1) \Phi(x_1 + x_2, y_1 + y_2) dx_1 dy_1, \quad (-L_1/2 \leq x_2 \leq L_1/2, -L_2/2 \leq y_2 \leq L_2/2) \quad (1)$$

公式(1)中的积分上下限应根据 x_2 和 y_2 的取值以及使 $\Phi(x_1, y_1)$, $\Phi(x_1 + x_2, y_1 + y_2)$ 在定义区间来定。

对 $r_{\Phi}(x_2, 0)$ 进行高斯拟合, 高斯分布的 $1/e$ 半径就是波前 x 方向的空间尺度 s_x , 同样, 对 $r_{\Phi}(0, y_2)$ 进行高斯拟合, 可得波前分布 y 方向的空间尺度 s_y 。

1.2 低频位相误差模型的建立

光学元件产生的低频位相误差简化为随机位相屏^[3,5,6], 即

$$\Phi(x, y) = \text{random}(-1, 1) * \exp\{-[(x/s_x)^2 + (y/s_y)^2]\} \quad (2)$$

式中的 s_x, s_y 即为位相分布 x 方向和 y 方向的空间尺度; “*” 表示卷积。给式(2)乘上不同的系数, 即可得具有不同 RMS 位相梯度值^[4]的位相分布。

1.3 自由空间传输和聚焦过程

在进行光传输模拟和聚焦模拟时, 均假设入射光束为理想超高斯分布, 归一化强度为

$$I(x, y) = \exp\{-[(x/R_0)^{2n} + (y/R_0)^{2n}]\} \quad (3)$$

计算中取 $n=19, R_0=12.5\text{cm}$ 。

进行光传输模拟时, 不考虑传输过程中光束自聚焦等非线性效应, 也不考虑光学元件间空气湍流等造成的影响, 而把介质间的传输过程看成自由传输过程, 因而可用菲涅耳积分公式描述^[7]。进行聚焦模拟时, 假设所用聚焦透镜为理想透镜(透镜焦距为 2.2m), 透镜对光束的作用用二次位相因子描述^[8]。

收稿日期: 2001-10-25; 修订日期: 2002-01-14
基金项目: 国家 863 惯性约束聚变青年基金资助课题
作者简介: 邓青华(1976-), 女, 硕士, 从事光束质量控制研究; 绵阳 919-988 信箱。

2 计算结果与分析

2.1 空间尺度计算

根据空间尺度的数学模型, 编写了相关程序, 对实际钹玻璃放大片的透射波前(24cm × 24cm)进行了计算, 见图 1(a)。对此波前求自相关函数分布, 再分别对 x 轴和 y 轴上的自相关分布进行高斯拟合, 可得 $s_x = 4.3\text{cm}$, 两曲线相关系数为 0.958 59; $s_y = 9.7\text{cm}$, 两曲线相关系数为 0.996 08。图 1(b, c)是对 x, y 轴上的自相关分布进行高斯拟合的曲线。

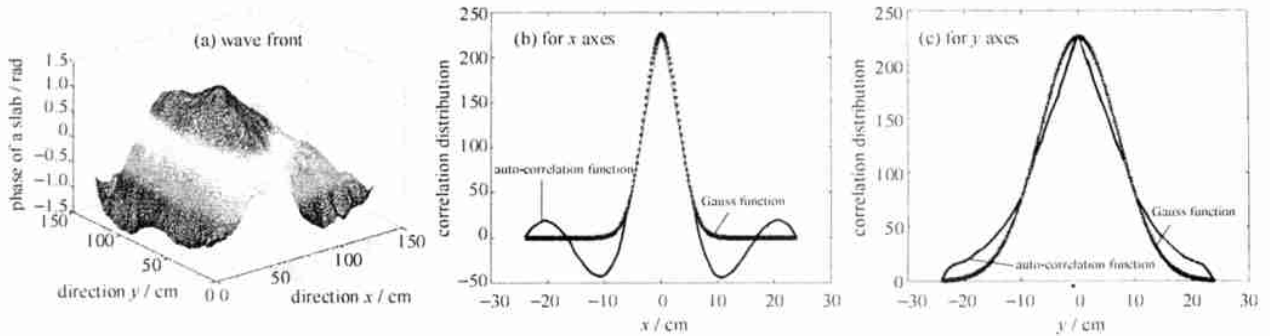


Fig 1 Wave-front of an amplifier and the simulation of auto-correlation distribution on x and y axes with Gauss function

图 1 放大片的透射波前(a)及对 x 轴(b)和 y 轴(c)上自相关分布进行的高斯拟合

从图 1(a)可以看出: 这片放大片透射波前 x 方向起伏的空间周期比 y 方向的小, 这一点从 $s_x = 4.3\text{cm}$ 与 $s_y = 9.7\text{cm}$ 相比也可以得出来。所以, 用这种方法来求矩形口径光学元件低频位相噪声的空间尺度是可行的。

通过对多张钹玻璃放大片的透射波前进行计算处理, 结果表明: 放大片低频位相误差 x 方向的空间尺度大都为 4~5cm, 而 y 方向的空间尺度则相对大一些, 多为 5~7cm。

2.2 空间尺度对焦斑的影响

为了考察位相噪声空间尺度对聚焦焦斑大小的影响, 令式(2)中 $s_x = s_y$, 取从 4 到 12 间的整数值, 并分别乘上不同的系数, 得到一系列模拟低频位相噪声的随机位相屏, 结合式(3)计算所得的强度, 进行聚焦模拟(光束口径为 24cm × 24cm, 聚焦模拟过程参考文献[4]), 结果如图 2 所示, 其中焦斑大小指的是含光束能量 95% 的焦斑发散角。可见, 位相噪声的空间尺度对焦斑大小影响的影响很小, 但焦斑大小随着 RMS 位相梯度的增大而增大。

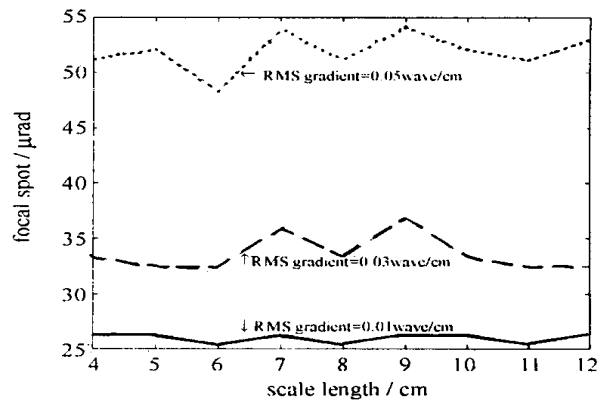


Fig 2 Relation between the scale length and the focal spot size

图 2 空间尺度与焦斑发散角之间的关系

2.3 空间尺度在传输过程中的变化

为了考察低频位相误差空间尺度在传输过程中的变化, 将式(3)所产生的平顶平面波作为光源, 通过模拟一定光路排布的随机位相屏序列进行光传输模拟。

计算中共用到了 8 张随机位相屏(口径为 24cm × 24cm), 这些随机位相屏满足公式(2), 其参数取值为: $s_x = 4.5\text{cm}$, $s_y = 6\text{cm}$ 。用这样的 8 张随机位相屏模拟了四程放大光路, 而最后输出光束的位相分布的空间尺度明显增大了: $s_x = 14.4\text{cm}$, $s_y = 13.7\text{cm}$ 。其中一个原因就是低频位相噪声在传输过程中相干叠加而使空间尺度增大。

计算分析表明位相分布的空间尺度在聚焦时几乎不影响焦斑大小, 但如果光路中加入了变形镜等位相校正系统, 情况就不一样了。变形镜等位相校正系统的校正效果会随着位相噪声空间尺度的增大而增强^[2]。由于光传输过程中位相噪声的空间尺度会增大, 所以可依据这一规律给变形镜系统找到最合适的位置, 得到最佳的位相校正效果。

3 结论

空间尺度是位相噪声的一个重要参数, 通过建立求空间尺度的数学模型, 对实际的钹玻璃放大片产生的位

相噪声进行了计算分析,得到如下结果:放大片低频位相噪声 x 方向的空间尺度大都为4~5cm,而 y 方向的空间尺度则相对大一些,多为5~7cm。通过对具有不同空间尺度的位相分布进行聚焦模拟,有位相分布的空间尺度不会影响聚焦焦斑尺寸的结果。然而位相分布的空间尺度会在传输过程中增大,这对于变形镜等位相校正系统是很有利的,因为这些位相校正系统的校正效果会随着位相分布空间尺度的增大而增强。

参考文献:

- [1] Gomez C H, Collier J L, Hawkes S J, et al Wave-front control of a large-aperture laser system by use of a static phase corrector[J]. *A PPLIED OPTICS*, 2000, **39**(12): 1954—1961.
- [2] Williams W H, Auerbach J M, Henesian M A, et al Modeling characterization of the national ignition facility focal spot[R]. UCRL-JC-127907, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1997.
- [3] Williams W H, Auerbach J M, Hunt J, et al NIF Optics Phase Gradient Specification[R]. UCRL-D_127297, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1997.
- [4] 粟敬钦, 魏晓峰, 马 驰, 等 激光束低频畸变模型的计算模拟[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(s1): 163—166 (Su J Q, Wei X F, Ma C, et al Simulation of the model of low-frequency phase aberration. *High power laser and particle beams*, 2000, **12**(s1): 163—166)
- [5] 邓青华, 张小民, 景 峰, 等 低频位相误差叠加规律研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(1): 81—84 (Deng Q H, Zhang X M, Jing f, et al Research on the law of low-frequency phase aberration adding together. *High power laser and particle beams*, 2001, **14**(1): 81—84)
- [6] 邓青华, 张小民, 景 峰, 等 低频位相误差新校正方法模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2): 283—286 (Deng Q H, Zhang X M, Jing F, et al Simulation on a new method of low-frequency phase aberration correction. *High power laser and particle beams*, 2001, **14**(2): 283—286)
- [7] 吕百达 激光光学(第二版)[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992 2—4 (L B D. Laser Optics(the second edition). Chengdu: Sichuan University Press, 1992 2—4)
- [8] 朱自强, 王仕番, 苏显渝 现代光学教程[M]. 成都: 四川大学出版社, 1990 60—71. (Zhu Z Q, Wang S F, Su X Y. Modern Optics Chengdu: Sichuan University Press 1990 60—71)

Scale length of optics low-frequency phase aberration

DEN G Qing-hua^{1,2}, ZHANG Xiao-min², JING Feng², LU Lan-qin², SU Jing-qin²

(1. Postgraduate Department, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract The scale length is an important parameter of the low-frequency phase aberration. The mathematics model to get the scale lengths of the phase aberration caused by rectangular optics is established and the scale lengths of some Nd-glass amplifiers are calculated. And the characteristic values of slab-amplifiers are got. The relationship between the scale length and the spot size is studied. The change of the scale length in propagation is also analyzed.

Key words: low-frequency phase aberration; scale length; random phase screen; RMS phase gradient