

多模激光束通过时间变化相位片变换 的数值分析*

江晓清 林 强 朱精敏 陆璇辉 王绍民
(浙江大学物理系, 杭州 310028)

摘 要 根据衍射积分公式, 对连续多模激光束通过随时间变化相位片的变换特性进行了数值模拟, 详细地讨论了相位片单元尺寸和相位变化频率对多模光束光滑化和能量分布的影响。数值模拟结果很好地解释了实验结果。

关键词 相位片, 多模光束, 光滑化。

1 引 言

在激光淬火、激光涂覆等材料表面处理以及激光核聚变靶场照明等应用中, 要求激光光束有均匀的强度分布。近年来, 人们采用了各种方法来解决多模激光束的光滑化问题, 如采用小透镜列阵^[1]、二元光学方法^[2-4]、随机相位片(RPP)^[5, 6]、色散元件^[7, 8]等。这些方法可归纳为二类。一是空间上的光滑化^[1]-6], 就是将光束分成有限个小单元, 利用这些单元的衍射作用实现空间上的光滑化; 二是时间上的光滑化^[7, 8], 就是利用这些单元在时间上快速变化, 导致光束在时间平均上的光滑化。Armengol 等采用双面振镜法研究了多模激光束的光滑化^[9], 但二镜面之间的缝隙将严重影响光束的光滑性。最近, 作者提出了一种利用旋转随机相位片实现连续多模激光束的光滑化的方法。这是一种空间和时间相结合的方法, 并在 10 W 级低阶模 CO₂ 激光器上取得成功^[10, 11], 但未讨论相位片单元尺寸、变化频率对光束变换结果的影响, 以及变换后光束传输特性等内容。本文根据衍射原理, 对随时间变化随机相位片方法进行了数值分析, 所得结果很好地解释了实验结果, 对随机相位片的设计具有实际指导意义。

2 理论分析

考虑图 1 所示的光束变换系统, 设入射到随机相位片上的激光光束的场强为 $E_1(\mathbf{r}_1)$, 随机相位片的相位分布为 $\phi(\mathbf{r}_1, t)$, 则在观察屏 P 上的场强可由柯林斯衍射积分公式表示为^[12]

$$E_2(\mathbf{r}_2, t) = \frac{-j}{B\lambda} \int E_1(\mathbf{r}_1) \exp[i\phi(\mathbf{r}_1, t)] \exp\left[\frac{-ik}{2B}(A r_1^2 - 2\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2 + D r_2^2)\right] d\mathbf{r}_1 \quad (1)$$

* 浙江省自然科学基金和浙江省留学回国基金资助项目。

收稿日期: 1998-03-23; 收到修改稿日期: 1998-05-08

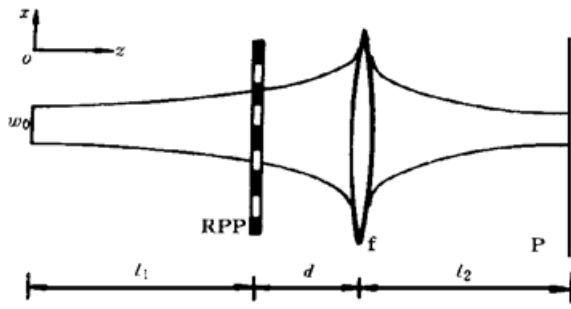


Fig. 1 Beam transformation system. RPP: random phase plate

其中 A 、 B 、 D 为从随机相位片到观察屏的 $ABCD$ 矩阵元。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - l_2/f & l_2 + d - dl_2/f \\ -1/f & 1 - d/f \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于激光探测器的响应时间(或激光与物质相互作用时间)总是有限的,实际探测到的光强分布是探测器响应时间 τ 内的平均值

$$I_2(\mathbf{r}_2) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} E_2(\mathbf{r}_2, t) E_2^*(\mathbf{r}_2, t) dt \quad (3)$$

文献[5, 6]在讨论脉冲激光束通过随机相位片变换时,认为随机相位片是固定的,而且假设它的单元尺寸相对于光束尺寸足够小,可认为单元内的场强相同,远场的变换特性为各随机相位片单元衍射爱里斑的叠加,在空间上实现光滑化。该文献没有讨论单元尺寸对光束能量分布等的影响。对于连续多模激光光束,作者假设图1中随机相位片随时间变化(比如旋转),并且它的变化周期远小于探测器的响应时间,则在观察屏P上将得到一个既能在空间上得到了光滑,又能在时间上得到平均的均匀光滑的光强分布。

为简单起见,仅对一维情况作数值分析。设入射到随机相位片上的光束为第 n 阶厄米-高斯光束,

$$E_1(x_1) = N_0 \frac{w_0}{w(z)} H_n \left[\frac{\sqrt{2} x_1}{w(z)} \right] \exp \left[-\frac{x_1^2}{w^2(z)} \right] \exp \left[-\frac{kx_1^2}{2R(z)} \right] \times \exp \left\{ -i \left[kz - (1+n) \arctan(z/z_r) \right] \right\} \quad (4)$$

其中 $H_n \left[\frac{\sqrt{2} x_1}{w(z)} \right]$ 为第 n 阶厄米多项式, w_0 为基模厄米-高斯光束的束腰半径, N_0 为能量归一化常数, $w(z) = w_0 \sqrt{1 + z^2/z_r^2}$, $R(z) = z(1 + z_r^2/z^2)$, $z_r = \pi w_0^2/\lambda$, 由一维柯林斯衍射积分公式得

$$E_2(x_2, t) = -i \sqrt{\frac{1}{B\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1) \exp[i\Phi(x_1, t)] \exp \left[-i \frac{k}{2B} (Ax_1^2 - 2x_1x_2 + Dx_2^2) \right] dx_1 = -i \sqrt{\frac{1}{B\lambda}} \sum_{j=1}^N \int E_1(x_{1j}) \exp[i\Phi(x_{1j}, t)] \exp \left[-i \frac{k}{2B} (Ax_{1j}^2 - 2x_{1j}x_2 + Dx_2^2) \right] dx_{1j} \quad (5)$$

这里将随机相位片分成 N 个单元,各单元的相位从 $0 \sim \pi$ 之间随机变化。在计算时利用计算机随机产生一组相位分布 $\Phi(s)$ 与某一时刻各单元相位对应。若在探测响应时间内,各相位单元的相位都随机阶跃变化了 M 次(相当于相位变化频率),则在观察屏上探测到的平均光强分布为

$$I_2(x_2) = \langle E_2(x_2, t) E_2^*(x_2, t) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M E_2[x_2, \Phi(s)] E_2^*[x_2, \Phi(s)]. \quad (6)$$

3 数值模拟

在数值分析中,主要讨论连续的多模激光光束经随时间变化随机相位片变换后的远场特性,也就是光束通过随时间变化随机相位片变换后经透镜变换在束腰处的光强分布。图1中

各参数选取为：波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ，基模束腰半径 $w_0 = 2.0 \text{ mm}$ ，透镜焦距 $f = 1.0 \text{ m}$ ，紧靠随机相位片 ($d = 0.0$)， $l_1 = l_2 = 1.0 \text{ m}$ 。图 2 为第 6 阶厄米-高斯光束通过随时间变化随机相位片变换 M 次后 ($M = 100$ ，变化频率) 的光强分布，随机相位片单元尺寸为 w_0 ， w_0 是相对应的基模厄米-高斯光束的束腰半径。可见原光束强度分布得到了有效的光滑化，但等效光束光斑尺寸略有展宽。

3.1 随机相位片单元尺寸的影响

随机相位片的单元尺寸对变换后光束能量分布影响较大。理论分析表明随机相位片的单元越小，均匀光滑效果越好，但由于单元衍射使得光束能量分布相对原光束展开也较大。图 3 为随机相位片的单元尺寸分别

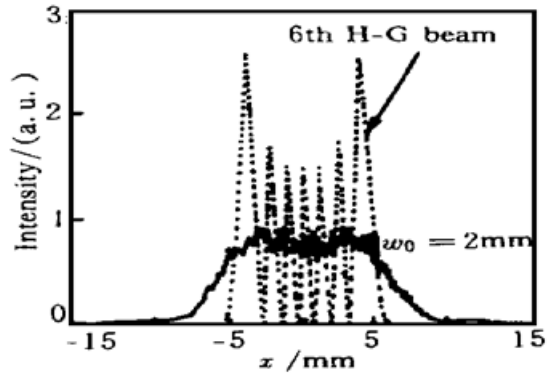


Fig. 2 Intensity distribution for the sixth order Hermite-Gaussian (H-G) beam transformed by time-varying RPP. The size of RPP element is w_0 (2 mm). The changing frequency $M = 100$, dotted line is not transformed

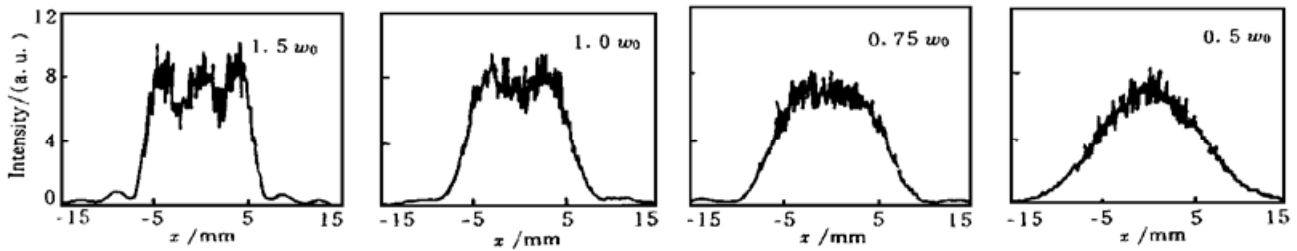


Fig. 3 Intensity distribution transformed by time-varying RPP, when the size of RPP element is $1.5w_0$, $1.0w_0$, $0.75w_0$, $0.5w_0$, respectively

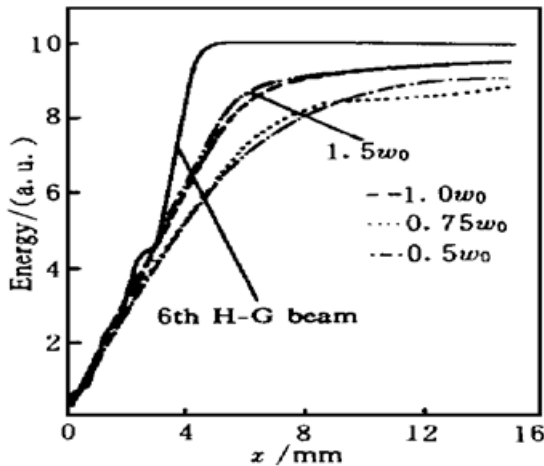


Fig. 4 Energy distribution transformed by time-varying RPP in beam waist, when the size of RPP element is $1.5w_0$, $1.0w_0$, $0.75w_0$, $0.5w_0$, respectively. Solid line is not transformed

等于 $0.5w_0$ 、 $0.75w_0$ 、 $1.0w_0$ 和 $1.5w_0$ 经变换后光束强度分布。图 4 是相对应的归一化能量分布情况。从图中可知，单元尺寸等于 w_0 时，能量下降到 e^{-2} 倍的等效光束半径约展开 0.6 倍，但为 $0.5w_0$ 或 $0.75w_0$ 时，能量分布都展开了一倍以上，单元尺寸等于 $1.5w_0$ 时，能量分布展开相对略小一点，但光束光滑化效果不好，所以相位单元尺寸既不能太小也不能太大，存在一个最佳范围。

3.2 随机相位片变化频率的影响

当随机相位片的单元尺寸较大时，虽然光束通过单次随机相位片变换(即相当于随机相位片固定)光滑化效果并不理想，但通过多次变换(通过随机相位片随时间变化来实现)在空间和时间上得到平均后，最终的光滑化效果是非常好的。图 5 是经过 1、10、50、100 次(相当于变化频率)变换后光强分布的演变过程。一般随

机相位片相位随时间变化几十次(变化频率为几十赫兹)，便可达到良好的效果，在相同时间内，变化频率越快，光滑化效果越好。在实际应用中，相位变化频率取决于该激光光束与物

质相互作用的时间。

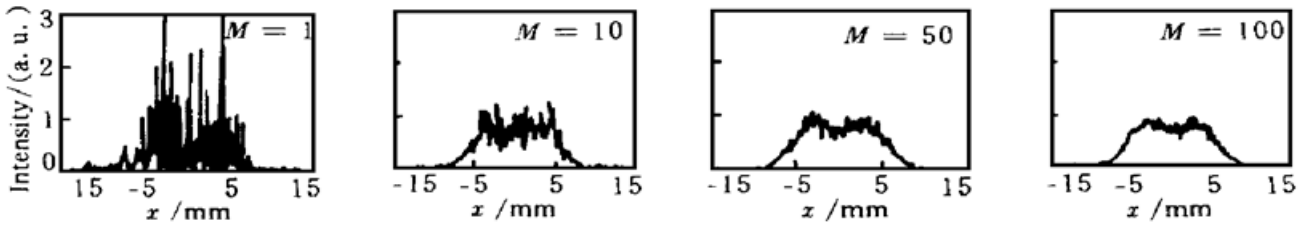


Fig. 5 Intensity distribution transformed by time-varying RPP, when the size of RPP element is w_0 , and the changing frequency $M = 1, 10, 50, 100$, respectively

综合上面的分析,最佳随机相位片单元尺寸宜选择相应的基模厄米-高斯光束束腰半径大小。

3.3 等效光束的传播特性

经过随时间变化的随机相位片变换后的光束,光斑大小和发散角都变大,若将变换后的等效光束能量下降到 $1/e^2$ 的光斑大小定义为其等效光束半径,则可计算出其等效光束半径在原光束腰附近随传输距离 l_2 的变化关系。计算数据采用双曲线回归拟合时,拟合的相关系数是 0.95,说明该等效光束在远场仍近似以双曲线规律传输(图 6)。图 6 的虚线是原光束未经随机相位片变换的等效光束半径(能量下降到 $1/e^2$) 的传输规律。

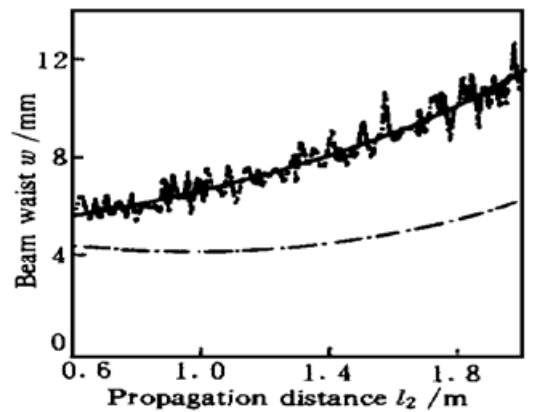


Fig. 6 Equivalent spot radius (energy fall down e^{-2}) of the sixth order Hermite-Gaussian beam transformed by time-varying RPP in near beam waist. Solid line is hyperbolic regression results. The correlation coefficient equals 0.95. Dot-dash line is not transformed

4 结论与讨论

根据以上的数值分析,随时间变化随机相位片可有效地使连续多模激光光束的强度分布光滑化。单从均匀光滑效果来说,随机相位片的单元尺寸越小,光滑化程度越好,但光束能量分布相对原光束展开也较大。在实际应用中,对激光束的要求是既要光滑性好又要有高的功率密度。因此,随机相位片的单元尺寸不宜太小,当它的单元尺寸等于该光束对应的基模光斑半径 w_0 时,即能达到良好的光滑化效果,光束能量展开相对较小。在实际应用中,可通过实验方法来确定随机相位片单元尺寸,即选取实际多模光束光斑中各个凹凸小光斑大小的平均值。随机相位片的单元尺寸较大时,虽然通过不变的随机位相片变换光滑化效果并不理想,但通过随时间变化的随机相位片变换在时间上得到平均后,最终的光滑化效果是非常好的。这个设想在激光的许多应用中也是可行的,如在激光表面处理等应用中激光与物质相互作用的时间一般大于几十毫秒,只要在这段时间随机位相片的相位变化得足够快(比如高速旋转),就可得到平均的光滑化效果。

作者在 GaAs 基片上采用镀膜工艺制作了单元尺寸为 1 mm 的随机相位片,并采用机械旋转方式使该随机相位片快速旋转变换,在 10 W 级低阶模 CO_2 激光器上进行了实验,实验结果与本文的数值分析是一致的^[11]。因此,利用随时间变化的随机相位片实现连续多模激光光束的光滑化是具有实际意义的。

参 考 文 献

- [1] Deng Ximing, Liang Xiangchen, Chen Zezun *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3) : 377~ 381
- [2] 周崇喜, 周宇, 税必继等. 激光淬火中二元光学光束整形器的设计. *应用激光*, 1997, **17**(4) : 164~ 166
- [3] Duparre M, Golub M A, Ludge B *et al.*. Investigation of computer generated diffractive beam shapers for flattening of single-mode CO₂ laser beam. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14) : 2489~ 2497
- [4] 毛文炜, 傅振海, 邬敏贤等. 实现灵活光束转换的二元光学器件及其应用. *中国激光*, 1997, **24**(8) : 693~ 698
- [5] Epstein R, Skupsk S. Anticipated improvement in laser beam uniformity using distributed phase plates with quasi-random patterns. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(3) : 924~ 931
- [6] Dixit S N, Tomas I M, Woods B W *et al.*. Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14) : 2543~ 2554
- [7] Lehmbry R H, S P Obenschain. Use of induced spatial in coherence for uniform illumination of laser fusion targets. *Opt. Commun.*, 1983, **46**(1) : 27~ 31
- [8] Skupsky S, Short R W, Kessler T *et al.*. Improved laser beam uniformity using the angular dispersion of frequency modulated light. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8) : 3456~ 3462
- [9] Armengol J, Vega F, Lupon N *et al.*. Two-facted mirrr for active intergration of coherent high-power laser beams. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3) : 658~ 661
- [10] 林强, 朱精敏, 江晓清等. 旋转式多模激光束变换器. 中国实用新型专利, 97-2-29455.4
- [11] 林强, 江晓清, 朱精敏等. 利用转运位相片实现多模激光束的光滑化. *中国激光*, 1998, **A25**(10) : 901~ 904
- [12] 王绍民, 赵道木. 矩阵光学原理. 杭州: 杭州大学出版社, 1996

Numerical Analysis of CW Multimode Laser Beams Transformed by Time-Varying Random Phase Plates

Jiang Xiaoqing Lin Qiang Zhu Jingmin Lu Xuanhui Wang Shaomin
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310028)

(Received 23 March 1998; revised 8 May 1998)

Abstract Numerical modeling for CW multimode laser beams transformed by time-varying random phase plated is presented. The method is based on diffraction integral formula. The smoothing of multimode laser beams and the energy distribution dependence on the element size and time-varying speed are discussed in detial. The numerical results account for the experimental results satisfactorily.

Key words phase plates, multimode laser beam, smoothing.