

# 无规位相板在实现靶面均匀辐照方面的性能分析\*

刘增水 王润文 路敦武 黄惠杰

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 数值分析的结果表明: 尽管实际辐照靶面的激光光束其振幅和位相是涨落变化的, 但是, 使用无规位相板同样能改善光束辐照靶面的均匀化程度; 无规位相板取不同的无规位相分布对靶面辐照均匀化的影响较小。还讨论了靶面离焦时其光强分布的变化情况。

**关键词** 无规位相板, 均匀辐照, 光强分布, 复杂波面。

## 1 引 言

实现靶面均匀辐照是惯性约束核聚变实验必不可少的条件<sup>[1, 2]</sup>; 目前, 人们已提出了多种实现靶面均匀辐照的技术方案<sup>[3- 6]</sup>, 但迄今为止, 仍没有一种能完全满足高功率激光核聚变物理实验的所有要求。

自从无规位相板光束平滑方法<sup>[6- 9]</sup>被提出来之后, 由于该方法具有对靶面焦斑形状和大小易于控制、无规位相板制作简便及容易使用等许多特点, 立即引起了人们的注意; 自 80 年代以来, 国外广泛开展了与此有关的研究工作, 尽管人们多年来作了很多努力, 得到了一些重要的结果, 但是有许多问题仍需要进一步进行研究和分析。本文着重于用数值分析的方法, 详细分析和讨论无规位相板在光束均匀化方面的一些性能, 以便对用无规位相板光束平滑方法实现靶面均匀辐照的惯性约束核聚变实验提供更多有益的指导。

## 2 理论基础

用于实现靶面均匀辐照的典型无规位相板如图 1 所示, 无规位相板是由许多按列阵形式排列的小位相单元组成, 每个小位相单元随机地被选择对入射的激光光束引入 0 或  $\pi$ (2 阶) 的位相延迟, 在图中以黑、白色图形区分引入 0 或  $\pi$  相移的位相单元, 图中每个小位相单元的形状是尺寸相同的正方形。

用无规位相板实现靶面辐照均匀化的典型光学系统如图 2 所示。无规位相板上的列阵位相单元把入射光束波面分割成许多大小相同的子光束, 并对各个子光束无规则选择产生 0 或

\* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1997-11-07; 收到修改稿日期: 1998-02-06

$\pi$  的相移, 经聚焦透镜后分别传递到同一靶面 C(即透镜焦平面), 靶面光强分布则由各个子光束衍射图样随机相干叠加所确定, 从而可达到改善靶面辐照均匀化的效果。



Fig. 1 Two-level random phase plate

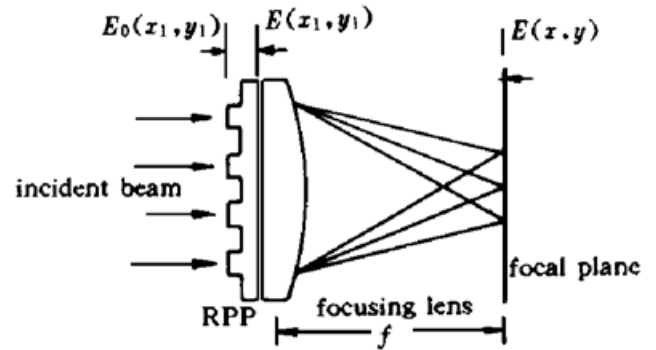


Fig. 2 Configuration of the RPP optical system

图 2 中  $E_0(x_1, y_1)$  表示无规位相板入射平面上入射光束的光场分布,  $E(x_1, y_1)$  表示位相板后表面上光场分布,  $E(x, y)$  则为透镜焦面上的光场分布,  $E(x, y)$  光场分布可写成是光场  $E(x_1, y_1)$  的傅里叶变换<sup>[10]</sup>:

$$E(x, y) = \frac{\exp [ik(x^2 + y^2)/2f]}{i\mathcal{N}} \iint_{\text{aperture}} E(x_1, y_1) \exp [- ik(\frac{x}{f}x_1 + \frac{y}{f}y_1)] dx_1 dy_1 \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为光波长,  $f$  为透镜焦距,  $k$  为波数  $k = 2\pi/\lambda$ 。假定无规位相板的透射函数为  $t(x_1, y_1)$ , 则  $E(x_1, y_1)$  可以表示成:

$$E(x_1, y_1) = E_0(x_1, y_1)t(x_1, y_1).$$

如果假设入射光束是均匀平面波, 即  $E_0(x_1, y_1) = A$ ,  $A$  为一实常数。由于  $t(x_1, y_1)$  在小位相单元区域内取复常数值, 因此, (1) 式可以表示成每个小位相单元区域内的积分求和形式, 并对坐标进行平移变换, 即令  $x_1 = x'_1 + x_j$ ,  $y_1 = y'_1 + y_j$ ,  $x_j, y_j$  是第  $j$  个小位相单元中心点坐标值, 在每个积分中为一定值, 经简单的运算可得:

$$E(x, y) = A \exp [ik(\frac{x^2 + y^2}{2f})] Q(x, y) \sum_{\text{element}_j} t_j(x_j, y_j) \exp [- ik(\frac{x}{f}x_j + \frac{y}{f}y_j)] \quad (2)$$

$$Q(x, y) = \frac{1}{i\mathcal{N}} \iint_{\text{central element}} \exp [- ik(\frac{x}{f}x_1 + \frac{y}{f}y_1)] dx_1 dy_1,$$

式中  $Q(x, y)$  表示的是位于位相板中心的一个位相单元的远场衍射图样。

透镜焦面光强分布则为:

$$I(x, y) = E(x, y)E^*(x, y)$$

从(2)式的表示形式可知: 透镜焦面上光强分布实际是无规位相板上的单个小位相单元衍射光强分布图样受到各个小位相单元衍射光束之间相互干涉所调制的结果, 是衍射和干涉二个因素共同作用的结果; 由此也可以进一步得出: 位相板位相单元的形状确定了透镜焦面焦斑(光强分布)的形状, 位相板位相单元的大小确定了焦面焦斑的大小, 通过改变位相单元的形状或大小\*, 可以达到控制透镜焦面焦斑形状或大小的目的。

\* 位相单元的形状一般可以取为任意形状, 诸如: 正方形, 矩形或正六边形等, 在此文中只讨论位相单元形状是正方形的情况。

### 3 无规位相板在实现靶面均匀辐照方面的性能分析

#### 3.1 具有复杂波面的光束入射时无规位相板对靶面辐照的均匀化效果

理论上说, 激光光源产生的激光光束是振幅呈高斯型分布的平面波, 但事实上在核聚变整个实验装置中, 由于激光传输和放大等许多系统存在着对激光光束波面产生畸变的因素, 并且引起畸变的有些因素随时间而改变, 所以, 最终到达无规位相板入射面的光束  $E_0(x_1, y_1)$  波面实际是随时间而变化的复杂波面, 因此有必要进行一些计算分析, 以了解无规位相板在具有复杂波面的光束入射时对靶面光强分布均匀化改善的效果。

为了简化计算, 按一维的情况进行分析; 忽略不影响有关光强计算的位相因子, 根据(1)式, 写出透镜焦面光场分布  $E(x)$  的计算式:

$$E(x) = C \int_{\text{aperture}} E_0(x_1) t(x_1) \exp[-ik(\frac{x}{f}x_1)] dx_1 \quad (3)$$

式中  $C = 1/i\lambda f$ 。靶面光强分布为:  $I(x) = E(x)E^*(x)$ 。

假设入射光束光场分布可表示为:  $E_0(x_1) = M(x_1) \exp[-ip(x_1)]$ ,  $M(x_1)$  表示入射光束在无规位相板入射平面上振幅分布函数,  $p(x_1)$  表示相应的位相分布函数; 根据(3)式, 透镜焦面上光场分布  $E(x)$  可写为:

$$E(x) = C \int_{\text{aperture}} M(x_1) \exp[-ip(x_1)] t(x_1) \exp[-ik(\frac{x}{f}x_1)] dx_1$$

当沿  $x_1$  方向无规位相板位相单元数目为  $m$  个时, 把上式写成分段积分求和的形式:

$$E(x) = C \sum_{i=1}^m \int_{\text{element aperture}} M(x_1) \exp[-ip(x_1)] t(x_1) \exp[-ik(\frac{x}{f}x_1)] dx_1 \quad (4)$$

在以下的分析计算中, 采用的计算参数为: 波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ , 透镜焦距  $f = 100 \text{ mm}$ , 位相板尺寸  $D = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 小位相单元尺寸  $\delta = 0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 。计算时, 选择坐标系原点位于位相板中心。根据前面已作的分析可知: 透镜焦面中央焦斑的大小就是单个位相单元衍射图样中央焦斑的大小, 其值约为:  $w \approx 2\lambda f / \delta \approx 316 \mu\text{m}$ 。

在具体计算之前, 先引进一个随机信号, 即  $f_{\text{perturb}} = \text{random}(x_1)$ 。在实际的数值计算分析中, 随机信号在不同  $x_1$  处所对应的函数值的全体符合高斯型概率分布函数统计规律, 所有函数值的平均值为零, 标准偏差值为 1; 并对随机信号函数值进行归一化处理, 使得函数值变化范围为 1。随机信号函数的自变量  $x_1$  在入射平面均匀取值, 间隔为  $0.02 \text{ mm}$ , 通过特定的随机数产生器得到的一个满足所述要求的随机信号, 其图形如图 3 所示; 随机信号  $f_{\text{perturb}} = \text{random}(x_1)$  和高斯函数  $\text{Gauss}(x_1/a) = \exp[-\pi(x_1/15)^2]$  相加的图形如图 4 所示; 单独对  $f_{\text{perturb}}$  随机信号进行频谱分析, 得出的频谱分布如图 5 所示; 为了更清晰了解每个图形的变化情况, 都只画出了相应的部分区间图形。

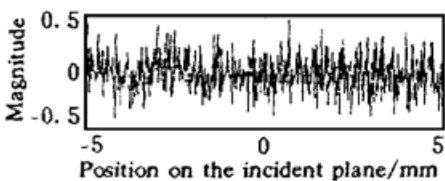


Fig. 3 Graphical representation of the stochastic signal

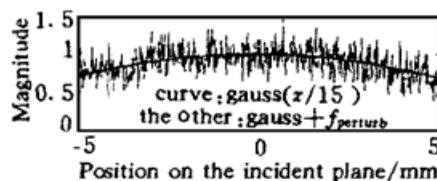


Fig. 4 Signal of  $\text{Gauss}(x/a) = \exp[-\pi(x/15)^2]$  superimposed by the stochastic signal in Fig. 3

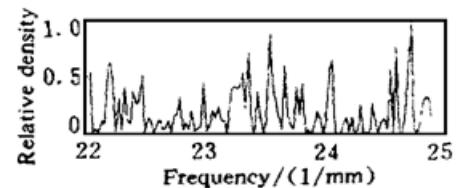


Fig. 5 Power spectral density of the stochastic signal in Fig. 3

正如前面所说，在复杂的光学系统中，由于各种原因，实际入射在位相板上的激光光束引入了畸变，入射光束具有复杂的波面形状，而并非平面波；为了能较充分说明无规位相板对具有复杂波面的入射激光光束仍然能实现靶面辐照的均匀化，在  $M(x_1)$  或  $p(x_1)$  中引入  $f_{\text{perturb}}$  随机信号，不失一般性，求得的透镜焦面光强分布能较充分说明无规位相板对实际入射光束在靶面上的均匀化效果。

图 6 中示出了仅当  $M(x_1)$  或  $p(x_1)$  取不同函数时根据(4)式求得的透镜焦面光强分布。从图 6 可以看出：使用无规位相板的空间域平滑方法确实能在靶面上得到一种宽而近似平顶型光强分布，这种光强分布是单个位相单元衍射图样受到各个子光束相互之间干涉所调制的结果，这种细密的起伏光强分布很容易被惯性约束核聚变时的热传导作用所平滑，最终达到光束能量均匀吸收的目的；

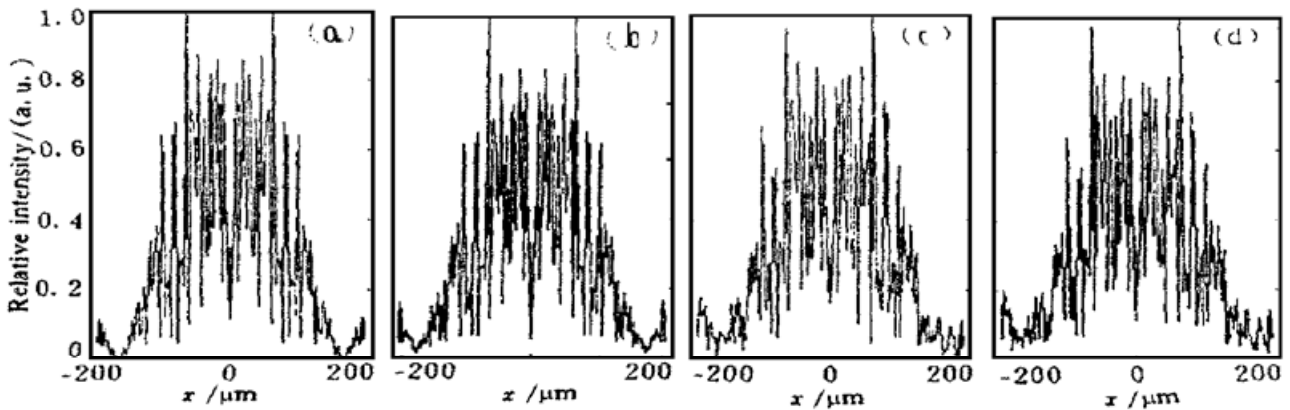


Fig. 6 Intensity distributions of the focal plane computed with respect to four different incident laser beams while other conditions are the same. (a)  $M(x_1) = \text{Gauss}(x_1/15)$ ,  $p(x_1) = 0$ , (b)  $M(x_1) = \text{Gauss}(x_1/15) + \text{random}(x_1)$ ,  $p(x_1) = 0$ , (c)  $p(x_1) = \exp[-i\pi \text{random}(x_1)]$ ,  $M(x_1) = \text{Gauss}(x_1/15)$ , (d)  $p(x_1) = \exp[-i\pi \text{random}(x_1)]$ ,  $M(x_1) = \text{Gauss}(x_1/15) + \text{random}(x_1)$

比较图 6 四种情况下的图形形状变化，得知：入射光束位相的起伏变化对靶面光强整体分布的影响比振幅起伏变化来得大，但是靶面宽而近似平顶型整体光强分布形状保持不变。为了进一步了解图 6 中光强整体分布变化的情况，求出透镜焦面中心  $220 \mu\text{m}$  范围内光强的标准偏差值  $\sigma$ ，其值分别为：0.2308、0.2220、0.2216、0.2143，可见  $\sigma$  值变化较小，这反映各种情况下光强整体分布没有显著的变化。

综上所述得出一个结论：入射光束即使存在复杂的无规则振幅与位相起伏，通过包含无规位相板的光学系统都能在靶面上获得极为相似的均匀化的光强分布，起到了靶面均匀辐照的作用。

### 3.2 无规位相板取不同的随机位相分布时靶面辐照均匀化的分析与计算

假定无规位相板位相单元个数为  $N$  个， $0$  和  $\pi$  相移的单元个数分别为  $N_0$ 、 $N_\pi$ 。不失一般性，分析和计算时假设入射的激光光束是均匀平面波  $E_0(x_1, y_1) = A$ ， $A$  为常数，则根据(2)式可得透镜焦面上的光场分布为：

$$E(x, y) = A \exp\left[ik\left(\frac{x^2 + y^2}{2f}\right)\right] Q(x, y) \sum_{\text{element}_j} t_j(x_j, y_j) \exp\left[-ik\left(\frac{x}{f}x_j + \frac{y}{f}y_j\right)\right]$$

考虑到  $t_j(x_j, y_j)$  对单个位相单元来说，取值为  $e^{i0}$  或  $e^{i\pi}$ ，则上式可以改写为：

$$E(x, y) = A \exp \left[ ik \left( \frac{x^2 + y^2}{2f} \right) \right] Q(x, y) \times \left[ \sum_{\text{element}_j=1}^{N_0} \exp \left[ - ik \left( \frac{x}{f} x_j + \frac{y}{f} y_j \right) \right] - \sum_{\text{element}_k=1}^{N_\pi} \exp \left[ - ik \left( \frac{x}{f} x_k + \frac{y}{f} y_k \right) \right] \right] \quad (5)$$

式中  $x_j$ 、 $y_j$ 、 $x_k$ 、 $y_k$  对应的是各个位相单元中心点的坐标值。从(5)式中的求和项可知, 各个位相单元对靶面光场分布总的贡献实质表现在随机变化的许多相互无关因子  $\exp \left[ - ik \left( \frac{x}{f} x_j + \frac{y}{f} y_j \right) \right]$  值的求和, 因此, 可以推知: 当产生位相板无规位相分布的产生器其产生相同位相分布的周期足够大, 以致于使得由求和项中各因子值组成的序列自相关系数较小时(或者说, 相移为 0 或  $\pi$  位相单元在位相板上位置的排布无序程度很高时), 无规位相板取不同的无规位相分布对靶面上光强的整体分布影响较小。

为了验证上述推断, 使用一种周期为  $2^{31}$  的随机数产生器, 产生得到 15 种相互独立的无规位相分布, 根据(5)式, 分别计算求出透镜焦面上中央  $220 \mu\text{m} \times 220 \mu\text{m}$  区域光强的标准偏差值  $\sigma$ , 其结果如图 7 所示。图 7 中的图线变化缓慢, 近似一条水平直线, 这说明位相板取不同的无规则 0、 $\pi$  位相分布对焦面整体光强分布不会产生明显的改变。

另外, 在某些情况下, 可以对 0 或  $\pi$  相移在位相板上的位置加以选择, 使得(5)式中求和项各因子值组成的序列自相关系数变得更小, 最终可期望得到均匀化程度更好的焦面光强分布<sup>[11, 12]</sup>。

尽管使用无规位相板时透镜焦面上整体光强分布较为均匀, 但不排除在焦面局部会出现较强的光强度峰值, 例如: 焦面  $x = y = 0$  处, 当  $N_0 \neq N_\pi$  时, 且  $N_0$  与  $N_\pi$  相差较大时, 从(5)式知, 将会出现较大的  $E(0, 0) = A(N_0 - N_\pi)Q(0, 0)$  峰值, 因此, 产生随机位相分布的产生器其结果最好能满足  $N_0 \approx N_\pi$  的要求;

综上所述, 用无规位相板实现靶面辐照均匀化时, 一般情况下, 当产生位相板无规位相分布的产生器其产生相同位相分布的周期足够大, 取不同的无规位相分布对靶面辐照均匀化的影响较小。

### 3.3 使用无规位相板时透镜后焦面附近平面上光强度分布的计算与分析

参见图 2, 靶面离焦情况下其光场分布可以看作是  $E(x_1, y_1) t_{\text{lens}}(x_1, y_1)$  光场的菲涅耳衍射的结果, 其中  $E(x_1, y_1)$  为位相板后表面光场分布,  $t_{\text{lens}}(x_1, y_1) = \exp \left[ - ik \left( \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f} \right) \right]$  为透镜的透射函数, 离焦光场计算公式以直接推导的方式容易导出<sup>[13]</sup>:

$$E(x, y) = \frac{\exp \{ ik \left[ \frac{(f + \Delta)}{2} + \frac{(x^2 + y^2)}{2(f + \Delta)} \right] \}}{i\lambda(f + \Delta)} \iint E(x_1, y_1) t_{\text{lens}}(x_1, y_1) \times \exp \left[ - ik \left( \frac{1}{2f} - \frac{1}{2(f + \Delta)} \right) (x_1^2 + y_1^2) \right] \exp \left( - ik \frac{x x_1 + y y_1}{f + \Delta} \right) dx_1 dy_1 \quad (6)$$

图 6 中所示的光强度分布已呈现出宽平顶型分布形状, 多次计算表明: 在离开透镜后焦面 0~ 250  $\mu\text{m}$  不同距离  $\Delta$  的平面上, 光强度分布形状相同, 光强度整体分布仍然较为均匀平

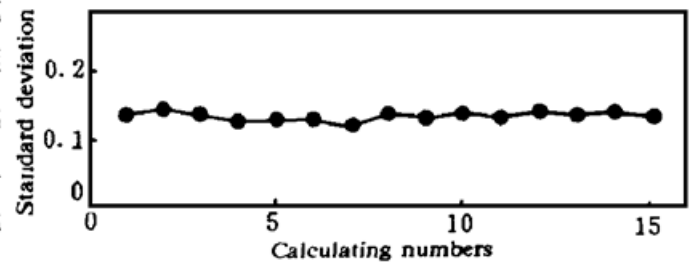


Fig. 7 Computational result demonstrates the effects on optical intensity distribution of the focal plane due to different random layout of 0 or  $\pi$  phase among phase elements of RPP

坦, 这说明使用无规位相板实现靶面均匀辐照的光学系统, 靶面相对于透镜后焦面的位置可以在较大范围内调整, 这无疑对激光核聚变实验装置的调整非常有利。这一结论也可以通过(6)式中积分号内位相因子、在 $\Delta$ 取不同值时对 $E(x, y)$ 贡献的大小得到说明。

为了更清楚说明无规位相板上特点, 在图8中, 给出了两条在一维情况下计算得出的图线, 它们是靶面 $-80\ \mu\text{m} \sim 80\ \mu\text{m}$ 范围内所有光强度计算点的平均值 $I$ 和相应的标准偏差 $\sigma$ 与靶面离开透镜后焦面的距离 $\Delta$ 之间的关系; 在这里需要指出的是: 图8中表示的每个点所对应的无规位相板阵列位相单元的位相分布是不同的, 图中的结果也可以进一步说明位相板随机位相分布对靶面光强分布均匀化所起的调制作用。

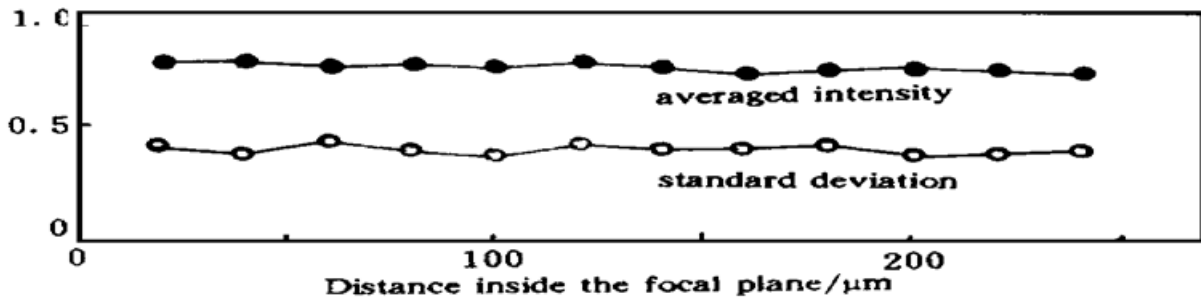


Fig. 8 The  $\sigma$  and  $I$  of the intensity distribution versus the shift of the target plane

**结束语** 本文论述了改变无规位相板位相单元的形状和大小即可改变靶面光强分布的形状和大小, 这是无规位相板平滑方法比较突出的特点; 在详细分析和计算的基础上, 得出了以下结论: 无规位相板对变化起伏的入射光束在靶面上的光强分布具有较好的均匀化效果; 位相板取不同的无规位相分布对靶面光强整体分布的影响较小; 当靶面相对透镜后焦面有一定位移时, 靶面光强整体分布仍然较为均匀平坦。

### 参 考 文 献

- [1] D. G. Colombant, A. J. Schmitt, Illumination uniformity of spherical targets using Kilojoule-scale lasers with optical smoothing. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(5) : 2303~ 2309
- [2] Stanley Skupsky, Kotik Lee, Uniformity of energy deposition for laser driven fusion. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(7) : 3662~ 3671
- [3] R. H. Lehberg, S. P. Obenschain, Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets. *Opt. Commun.*, 1983, **46**(1) : 27~ 31
- [4] S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessier *et al.*, Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8) : 3456~ 3462
- [5] X. Deng, X. Liang, Z. Chen *et al.*, Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3) : 377~ 381
- [6] Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga *et al.*, Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma instability suppression. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(11) : 1057~ 1060
- [7] S. N. Dixit, I. M. Thomas, B. W. Woods *et al.*, Random phase plates for beam smoothing on the Nova Laser. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14) : 2543~ 2554
- [8] R. Epstein, S. Skupsky, Anticipated improvement in laser beam uniformity using distributed phase plates with quasirandom patterns. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(3) : 924~ 931
- [9] D. A. Pepler, C. N. Danson, R. Bann *et al.*, Focal spot smoothing and tailoring for high-power laser application. *Proc. SPIE*, 1993, **1870** : 76~ 87

- [10] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optical*. New York: McGraw-Hill, 1968. Chap. 5, 85~ 90
- [11] R. Epstein, S. Skupsky, Anticipated improvement in laser beam uniformity using distributed phase plates with quasirandom patterns. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(3) : 924~ 931
- [12] Stanley Skupsky, Terrance J. Kessler, Strategies for ultra-high laser uniformity using zero-correlation phase masks. *Proc. SPIE*, 1993, **1870** : 112~ 119
- [13] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, 6th Edition, New York: Pergamon Press, 1980, Chap. 8

## Analysis on Performances of Random Phase Plate in Realization of Uniform Irradiation on Target Plane

Liu Zengshui    Wang Renwen    Lu Dunwu    Huang Huijie

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

(Received 7 November 1997; revised 6 February 1998)

**Abstract** The results of numerical analysis show that the uniformity of illumination of laser fusion target can be improved by using a random phase plate (RPP), though the magnitude and phase of laser beams irradiating the target plane are practically fluctuated. Any random phase distribution of the random phase plate has less effects on the uniformity of laser irradiation on the target plane. Besides, the intensity distributions of the target plane defocused are discussed.

**Key words** random phase plate, uniform irradiation, intensity distribution, complicated wave-front.