

# 用零相关相位板匀滑散斑的理论研究\*

肖 峻<sup>1), 2)</sup> 吕百达<sup>1)</sup>

1), 四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064  
2), 西南民族学院物理系, 成都 610041

**摘 要** 对零相关相位板匀滑散斑的特性进行了理论分析和数值计算, 结果表明尽管零相关相位板是针对入射场为平面波而设计的, 但在入射场的振幅和相位有一定起伏的情况下, 其远场光斑的散斑对比度明显低于采用随机相位板的情形。因而, 用零相关相位板匀滑散斑是一种更为有效的方法。

**关键词** 零相关相位板, 散斑匀滑, 激光聚变。

## 1 引 言

在激光聚变中, 提高靶面的辐照均匀性是实现球靶对称内爆的关键。随机相位板(RPP)能有效地消除近场光强起伏对靶面辐照的影响<sup>[1]</sup>, 但是, 由于子束间的干涉, 其光斑为高对比度的散斑。在辐照初期, 散斑会烙印在靶面, 引起流体力学不稳定性, 从而破坏球靶的对称压缩。引入偏振控制板(PCP)后, 两光强随机分布散斑叠加的结果可降低散斑的对比度<sup>[2]</sup>。然而, 这种方法最多只能将散斑对比度降低 30%, 要使靶面的辐照均匀性达到球靶内爆的要求, 还必须进一步降低散斑对比度。

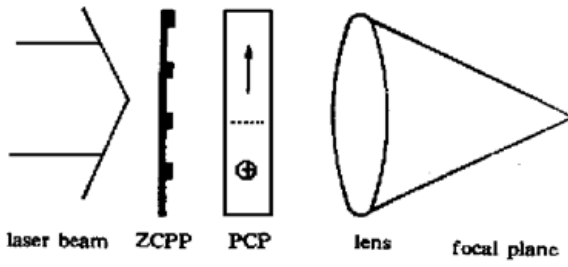
文献[3]提出了一种将相位元有规分布的相位板结合二单元偏振控制板构成零相关相位板(ZCPP), 在理想的平面波入射情况下, 可以使两偏振方向子束产生的散斑在空间相互交错、峰谷相对, 这样两散斑叠加后能将散斑完全匀滑掉。然而, 在激光聚变中, 高功率激光入射场的振幅和相位都有一定起伏, 文献[3]中仅考虑了相位起伏对零相关相位板匀滑散斑特性的影响。本文则同时考虑了入射场的振幅起伏和相位起伏对零相关相位板匀滑散斑特性的影响, 对散斑的对比度进行了数值计算, 并与采用随机相位板的情形进行了比较。

## 2 零相关相位板

用零相关相位板匀滑散斑的光学系统如图 1 所示, 激光通过零相关相位板后被分割成大量子束, 再通过二单元结构的偏振控制板后, 其中一半子束的偏振方向旋转  $\pi/2$ , 偏振方向互相垂直的两类子束分别在远场上产生一组散斑, 两散斑相互交错, 叠加后形成匀滑的光

\* 国家高技术研究发展计划资助课题。

收稿日期: 1999-04-05; 收到修改稿日期: 1999-05-25



斑。其关键是零相关相位板的二值相位元(0 和  $\pi$ ) 按特定的方式排布, 结合二单元结构的偏振控制板, 使相位元分布的自相关为零。由光的衍射理论可说明零相关相位板具有匀滑远场散斑的特性。

设入射场的偏振方向为  $\epsilon_a$ , 偏振控制板(也可位于相位板前面) 将一半子束的偏振方向从  $\epsilon_a$  旋转到与其正交的  $\epsilon_b$  方向, 对正方形相位元结构相位板, 由夫琅禾费公式得焦面光场分布为

Fig. 1 The optical system of ZCPP smoothing speckle

$$E(x, y) = A \operatorname{sinc}(\bar{x}) \operatorname{sinc}(\bar{y}) \times \left\{ \epsilon_a \sum_{k,l}^a U_{kl} \exp [i(-2k\bar{x} - 2l\bar{y} + \Phi_{kl} + \Phi_{kl0})] + \epsilon_b \sum_{k,l}^b U_{kl} \exp [i(-2k\bar{x} - 2l\bar{y} + \Phi_{kl} + \Phi_{kl0})] \right\}, \quad (1)$$

式中,  $A$  为一常数,  $(\bar{x}, \bar{y}) = (x, y)\lambda d/4f\pi$ ,  $(x, y)$  为焦面上的坐标,  $d$  为相位元的边长,  $f$  为聚焦透镜的焦距,  $\lambda$  为光波波长,  $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$ ,  $(k, l)$  对应相位元的空间分布,  $\Phi_{kl}$  为相位元引入的相移,  $U_{kl} \exp(i\Phi_{kl0})$  为入射场的分布, 求和仅限于偏振方向相同的相位元。式中已假设入射场在相位元内变化不大, 聚焦透镜为一理想透镜。

当入射场为平面波(令其振幅为 1)时, 由(1)式可得焦面上的光强分布为

$$I(x, y) = I_0(x, y) \left( \sum_{k,l,k',l'}^a \exp \{i[2\bar{x}(k' - k) + 2\bar{y}(l' - l) + \Phi_{kl} - \Phi_{k'l'}]\} + \sum_{k,l,k',l'}^b \exp \{i[2\bar{x}(k' - k) + 2\bar{y}(l' - l) + \Phi_{kl} - \Phi_{k'l'}]\} \right), \quad (2)$$

式中  $I_0(x, y) = A^2 \operatorname{sinc}^2(\bar{x}) \operatorname{sinc}^2(\bar{y})$ , 对应相位单元远场衍射光场分布。引入变量  $m = k' - k$ ,  $n = l' - l$ , 上式可改写为

$$I(x, y) = NI_0(x, y) \left[ 1 + \sum_{m,l \neq 0} \exp [i(2\bar{x}m + 2\bar{y}n)] (C_{mn}^a + C_{mn}^b) \right], \quad (3)$$

式中  $N$  为相位元总数, 求和中的  $m$  和  $n$  可以分别为零, 但不能同时为零,  $C_{mn}^a$  和  $C_{mn}^b$  分别为两偏振方向相位元分布的自相关系数:

$$\left. \begin{aligned} C_{mn}^a &= \frac{1}{N} \sum_{k,l}^a \exp [i(\Phi_{kl} - \Phi_{k+m, l+n})], \\ C_{mn}^b &= \frac{1}{N} \sum_{k,l}^b \exp [i(\Phi_{kl} - \Phi_{k+m, l+n})]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由(3)式可知远场光斑为一散斑, 其包络  $I_c = NI_0(x, y)$  由单元衍射分布确定。叠加在包络上的光强起伏大小可用散斑对比度来评估。散斑对比度定义为:

$$C = \left[ \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{I(x, y) - I_c(x, y)}{I_c(x, y)} \right]^2 d\bar{x} d\bar{y} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

将(3)式代入上式可得:

$$C = \left[ \sum_{m,l \neq 0} |C_{mn}^a + C_{mn}^b|^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

即散斑对比度的大小决定于相位元空间分布的自相关系数。因此, 要完全消除散斑, 必须有:

$$C_{mn}^a + C_{mn}^b = 0, \quad (7)$$

在没有偏振控制板的情况下, 只有一个偏振方向的子束, 要使所有的相位元分布自相关系数为零较为困难, 只能通过选择相位元的排布来降低自相关系数<sup>[4]</sup>。但是偏振控制板的引

入提供了更大的灵活性, 每个偏振方向的自相关系数可以不为零, 只要两个偏振方向的自相关系数之和 ( $C_{mn}^a + C_{mn}^b$ ) 为零即可。采用特定的算法排布相位元, 可以构造出零相关相位板。

### 3 数值模拟

我们按文献[3]提供的算法设计了一个构造零相关相位板掩膜图样的程序, 该程序可构造  $2^k \times 2^l$  ( $k, l$  为大于 1 的整数) 阵列零相关相位板的掩膜图样。即按这样的掩膜制作的相位板与二单元偏振控制板配合使用, 能使  $(C_{mn}^a + C_{mn}^b)$  为零。在平面波入射的情况下, 由(3)式可得焦面上的光强分布为  $I(x, y) = NI_0(x, y)$ , 光斑的相对光强分布与相位元远场衍射的光强分布一致。

图 2 给出了几种简单零相关相位板的掩膜图(左图)及其与偏振控制板合用时焦斑上两偏振方向子束散斑在  $y$  轴(沿两偏振方向分界线方向)上的一维光强分布(右图)。掩膜图中的虚线代表两偏振方向子束的分界, 黑色单元为零相移相位元, 白色单元为  $\pi$  相移相位元。光强

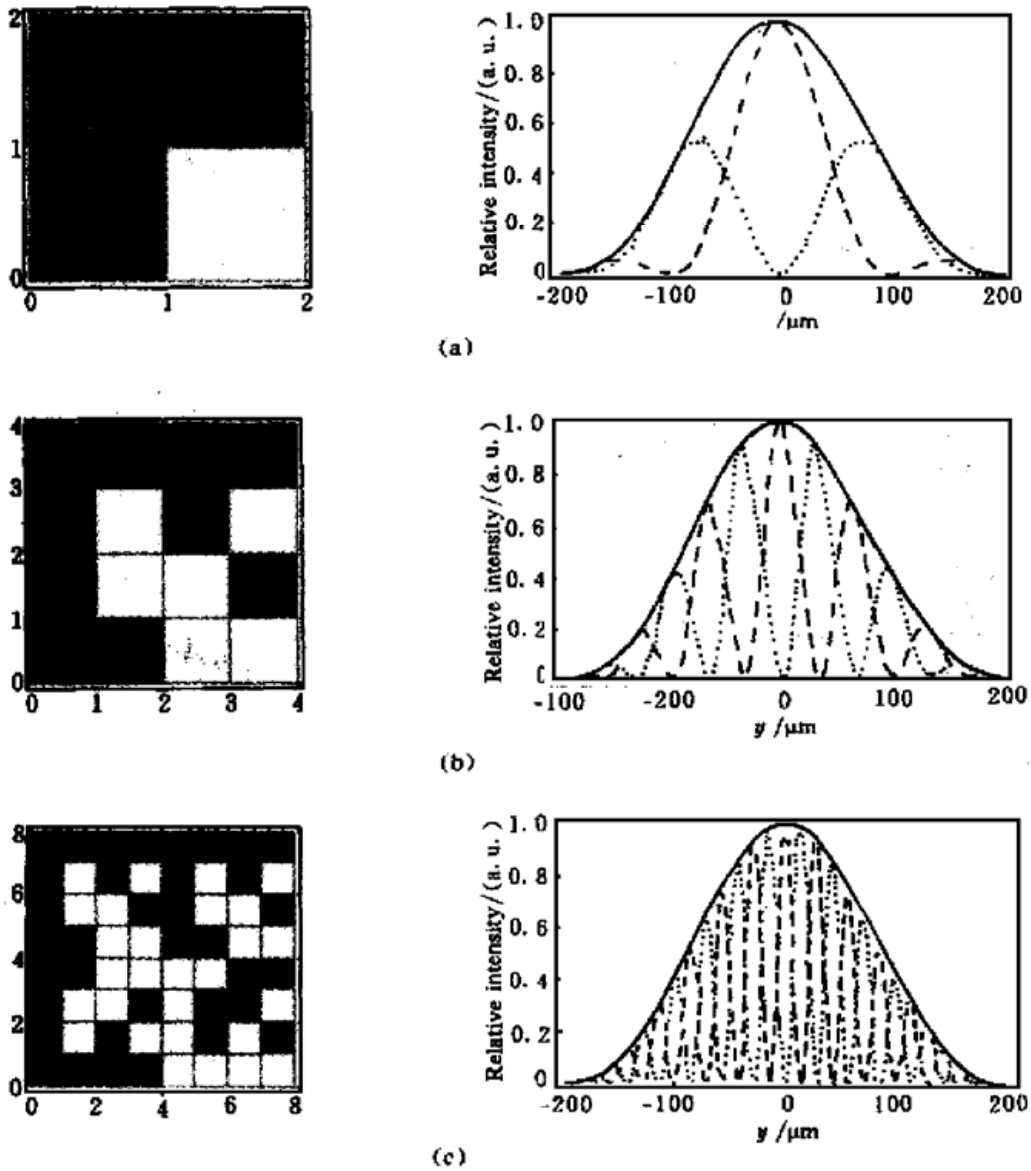


Fig. 2 The mask pattern of a few simple ZCPP and one-dimensional profile of far-field spots. (a)  $2 \times 2$  array, (b)  $4 \times 4$  array, (c)  $8 \times 8$  array

分布图中两种不同的虚线表示为按(2)式中两项分别计算得到的两偏振方向子束散斑的光强分布,可见两散斑的光强分布为互补的,实线为两散斑叠加后的光强分布,与单一相位元远场衍射分布一致,即有 $I_a(x, y) + I_b(x, y) = NI_0(x, y)$ 。焦斑沿 $x$ 轴上,其中一个散斑的光强为零,即为散斑的“谷”,另一散斑的光强分布与单元远场分布一致。计算中取光波波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$ ,相位元边长为 $1.8984\ \text{mm}$ 、聚焦透镜焦距为 $600\ \text{mm}$ ,对应的远场光斑尺度为 $400\ \mu\text{m}$ 。

图3给出了入射场为平面波时,32单元 $\times$ 32单元相位元阵列的随机相位板[图3(a)]和零相关相位板[图3(b)]分别与二单元结构偏振控制板联用时的远场散斑[图3(c)和图3(d)]和一维光强分布[图3(e)和图3(f)],散斑对比度分别为69.30%和0。两种情况下,光斑都是两独立光斑叠加的结果。在采用随机相位板的情况下,两独立散斑的光强是随机分布的;而在采用零相关相位板的情况下,两独立散斑的光强分布是互补的,叠加的结果使散斑完全消除。显然,对于随机相位板,即使入射场为平面波,也不能消除散斑。

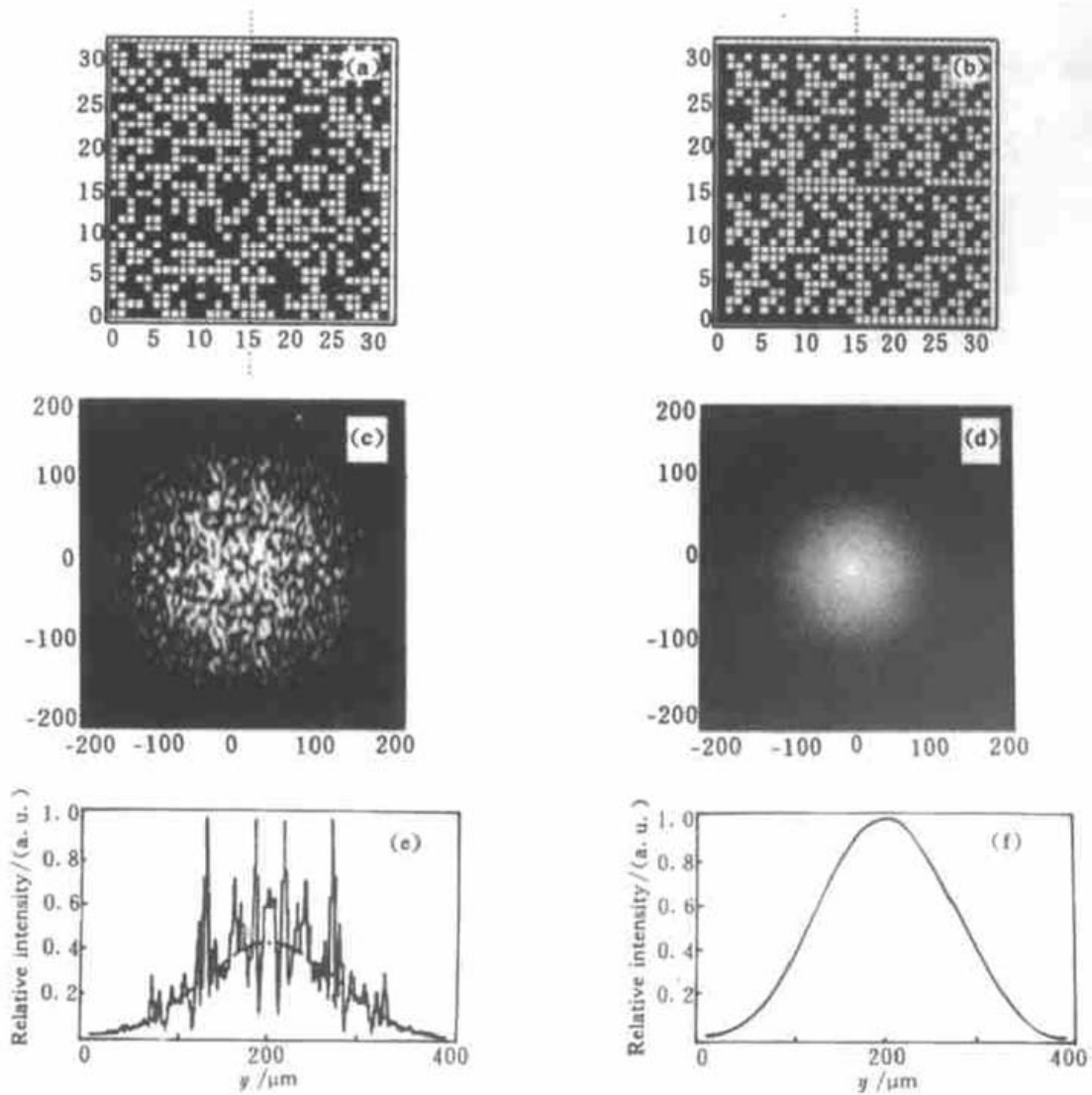


Fig. 3 The far-field spots and one-dimensional profiles when incident field is a plan wave, and RPP+PCP and ZCPP+PCP are used respectively

当入射场为准平面波(相位和振幅有一定起伏)时,两独立散斑的光强分布互补性会降低,光斑为对比度较小的散斑。图4给出了入射场有一定起伏(但在各相位元中入射场变化不

大)时, 随机相位板加二单元偏振控制板(对应左图)和零相关相位板加二单元偏振控制板(对应右图)的远场光斑的一维光强分布。光强分布直接按(1)式的平方计算。对应图 4(a), 入射场有随机振幅起伏( $\pm 10\%$ ), 散斑对比度分别为 69.06% 和 5.60%。对应图 4(b), 入射场有随机相位起伏( $\pm \lambda/20$ ), 散斑对比度分别为 69.51% 和 16.90%。对应图 4(c), 入射场同时有随机振幅起伏( $\pm 10\%$ )和随机相位起伏( $\pm \lambda/20$ ), 散斑对比度分别为 69.32% 和 17.80%。可见, 对于随机相位板, 散斑对比度几乎不随入射场而变化; 对于零相关相位板, 入射场有起伏时, 其散斑对比度增大, 但仍明显低于采用随机相位板的情形。

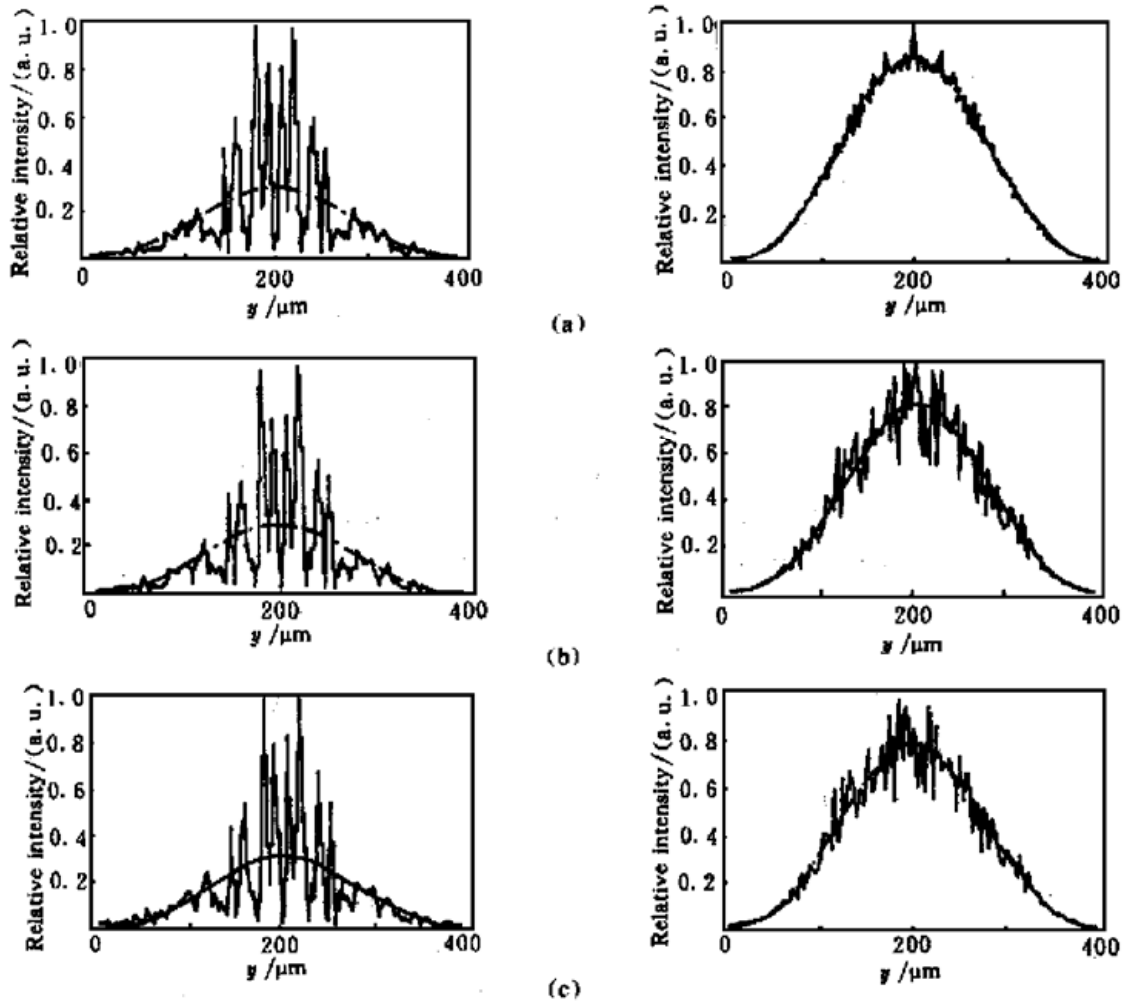


Fig. 4 Far-field spots and one-dimensional profiles when incident field has some spatial variation, and RPP + PCP and ZCPP + PCP are used respectively. (a) Incident field with spatial variation of amplitude ( $\pm 10\%$ ), (b) Incident field with spatial variation of phase ( $\pm \Delta\lambda/20$ ), (c) Incident field with spatial variation of phase ( $\pm \Delta\lambda/20$ ) and amplitude ( $\pm 10\%$ )

**结 论** 理论分析和数值模拟表明: 结合二单元偏振控制板的零相关相位板能使两偏振方向的子束分别在焦面产生光强互补的散斑。在平面波入射的情况下, 两散斑叠加的结果使散斑完全消除; 在入射场的振幅和相位有一定起伏的情况下, 远场散斑仍可得到有效匀滑, 与采用随机相位板的情形相比, 其散斑的对比度显著降低。因而, 尽管零相关相位板是针对入射场为理想的平面波而构造的, 但其对散斑的匀滑作用有实用意义。加之, 这种方法能实时匀

滑散斑, 特别适用于激光辐照靶面初期的光斑匀滑。零相关相位板不同于随机相位板仅在于二值相位元的排布不是随机的, 而是按照使  $(C_{mn}^a + C_{mn}^b)$  为零的特定算法构造的。零相关相位板的制作与随机相位板一样, 都比较简单, 因而, 在激光聚变的光束匀滑中可用零相关相位板取代随机相位板。二单元偏振控制板的制作比较简单, 可将其与零相关相位板制作在一起, 这样使用更为方便。

### 参 考 文 献

- [1] Kao Y, Mima K, Miyanaga N *et al.*. Random phasing of high-power for uniform target acceleration and plasma-instability suppression. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(11) : 1057~ 1060
- [2] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H *et al.*. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate. *Opt. Commun.*, 1992, **91**(1, 2) : 9~ 12
- [3] Skupdky S, Kessier T J. Speckle-free plate (diffuser) for far-field application. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(7) : 4310~ 4316
- [4] Epstein R, Skupsky S. Anticipated improvement in laser uniformity using distributed phase plate with quasirandom patterns. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(3) : 928~ 931

## Theoretic Study of Smoothing Speckles Using Zero-Correlation Phase Plate

Xiao Jun<sup>1), 2)</sup>      Lü Baida<sup>1)</sup>

[ 1), *Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064*  
 [ 2), *Department of Physics, Southwest Nationalities College, Chengdu 610041* ]

(Received 5 April 1999; revised 25 May 1999)

**Abstract** The characteristics of zero-correlation phase plate smoothing interference speckles are analyzed theoretically and simulated numerically. The results show that although the zero-correlation phase plates are designed on the incident laser beam being a plane wave, the speckle contrasts of the far-field spots with these phase plates are much smaller than that with the random phase plates in the case of near-field phase and amplitude having small fluctuations. Therefore the zero-correlation phase plates are more effective than random phase plates for speckles smoothing.

**Key words** zero-correlation phase plate, speckle smoothing, laser fusion.