

文章编号: 0258-7025(2003)02-0129-05

“神光- II”装置靶面均匀辐照系统的优化设计

傅思祖, 孙玉琴, 黄秀光, 吴 江, 周关林, 顾 援
(中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 利用小透镜列阵均匀化技术, 针对“神光- II”出射光束近场光强特殊分布(有大面积光强为零的区域)的情况, 通过对主聚焦透镜及小透镜列阵组合系统的优化设计, 实现了靶面光强的大光斑均匀辐照, 并利用其驱动平面铝靶, 获得了具有大范围良好平面性的冲击波发光信号。

关键词 惯性约束聚变技术; 近场分布; 列阵透镜; 大光斑均匀辐照; 平面冲击波

中图分类号 O 439; TL 632⁺. 1 **文献标识码** A

Optimizing Design for Uniform Irradiation System on Target Surface of “Shenguang- II” Facility

FU Si zu, SUN Yu-qin, HUANG Xiu-guang, WU Jiang, ZHOU Guan-lin, GU Yuan
(Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, Shanghai 201800, China)

Abstract Being aimed at the condition with ultra-nonuniform of near-field distribution from “Shenguang- II” (with none laser intensity in large area), by use of the uniform technique of lens array and by the optimizing design for the system combined with principal focal lens and small lens array, a large spot uniform irradiation on target surface has been realized, also a shock illuminant signal with good planarity in large region is obtained while it drives an aluminium plane target.

Key words ICF; near-field distribution; lens array; large spot uniform irradiation; plane shock wave

在“神光- II”装置上进行的物理实验中, 诸如直接驱动的惯性约束聚变(ICF)研究^[1,2], 直接驱动激光状态方程研究^[3-6], Rayleigh-Taylor 流体力学界面不稳定性研究^[7,8]等实验课题均提出了靶面均匀辐照的要求, 原先利用列阵透镜技术对近场均匀分布的“神光- I”装置输出激光进行束匀滑改造已取得较为满意的结果^[6,9]。而“神光- II”装置在 $\phi 100$ mm 主空间滤波器注入口加入了挡光屏并在此主空间滤波器内架有滤波小孔支撑杆, 从而导致其近场输出出现极端不均匀(有大面积光强为零的区域)的情况(如图 1 所示)。

针对这一近场分布为一残缺圆斑的情况, 本文通过对涉及束匀滑过程中的各种物理因素全面考虑后提出了一种优化设计方案, 实现了很好的靶面大光斑均匀辐照。

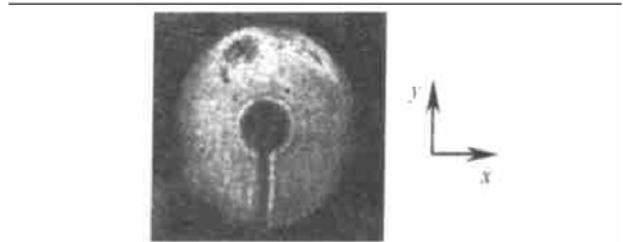


图 1 “神光- II”近场输出光斑

Fig. 1 Near-field distribution from “Shenguang- II”

1 设计原则

透镜列阵均匀照明系统的均匀化原理是利用波面分割与再重叠, 使入射光束在焦面附近实现均匀靶面照明。图 2 是利用主聚焦透镜 A 及小透镜列阵 B 组合系统实现靶面大光斑均匀辐照的原理^[10]。

根据物理实验的要求, 经过透镜列阵均匀化的

收稿日期: 2001-11-15; 收到修改稿日期: 2002-02-21

作者简介: 傅思祖(1965—), 男, 副研究员, 在职博士, 主要从事光学及激光等离子体相互作用研究。E-mail: fusz@mail.shenc.ac.cn

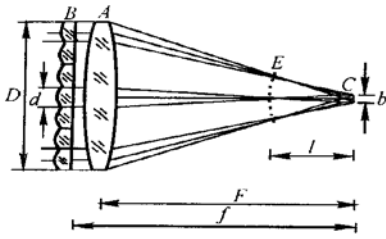


图2 列阵透镜-主透镜均匀照明光路图
Fig. 2 Principle of uniform irradiation with principal focal lens and lens array

焦斑范围应不小于 $1.0 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$, 其中强度分布较均匀的范围应不小于 $0.7 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$, 同时为了保证足够高的焦斑强度, 焦斑的总面积也应受到限制。焦斑尺寸 δ 的计算公式^[10] 为

$$\delta = Fd/f \quad (1)$$

其中, d 为列阵元尺寸(对不等边六角形是指不同方向上的列阵元长度), F 为主聚焦透镜焦距, f 为列阵元焦距。

作为一般的考虑, 列阵元数目 N 越多, 靶面光强分布越均匀。当二维列阵元数目为 $N \times N$ 时, 焦斑的光强均匀性可望提高 N 倍。但是, 还应考虑到光束通过列阵元之后的衍射效应会使焦斑强度产生一定程度的衍射调制, 因此, 在透镜列阵设计中, 还必须考虑衍射效应的影响。当系统的菲涅耳数很大时, 子焦斑的强度分布包络接近入射子光束的近场分布, 焦斑边沿陡峭; 而当系统的菲涅耳数较小时, 子焦斑的强度分布将呈现强烈的衍射调制。准近场照明条件下, 各子光束将在靶面上形成菲涅耳衍射花样, 菲涅耳数 F_n 由下式决定

$$F_n = d\delta/4\lambda F \quad (2)$$

λ 为激光波长。因此在保证足够的列阵元数目 N 的前提下, 希望 F_n 尽量大, 以抑制硬边衍射的影响。同时若将靶面放在一个适当离焦的位置上, 使得各子焦斑不完全重叠, 也将部分消除衍射的影响。

此外, 每个子光束还将在靶面上相互干涉叠加, 对于二维排布的列阵系统, 其焦斑上的干涉条纹呈二维排列。当列阵元为对称六角形排布时, 干涉条纹在六角形列阵元所对应的三个方向上对称成行。根据光栅方程, 干涉条纹主极大间隔

$$\Delta x = \lambda F/d' \quad \text{或} \quad \Delta y = \lambda F/d'' \quad (3)$$

其中, d' 和 d'' 为任一对称方向上的相邻列阵元在 x, y 方向的中心间距(见图3)。当靶面离焦时, 条纹各主极大之间的次极大的强度会迅速增长, 从而使条

纹的细密度增加, 提高了靶面的辐照均匀度。

为了追求尽量大的 F_n 和尽量小的 Δx 和 Δy , 都要求列阵元尺寸 d 要尽量大, 即要求适当降低列阵元数目 N ; 同时, 主聚焦透镜焦距 F 要尽量小; 这与上述利用列阵元波面分割与重叠以实现均匀化的要求是相悖的, 因此需要一个总体的优化设计。

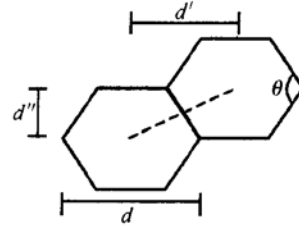


图3 六角形小透镜
Fig. 3 Hexagonal small lens

2 优化设计的考虑因素及相应计算

下面将通过讨论均匀入射光场条件下列阵元数目 N , 主聚焦透镜焦距 F 对焦斑均匀度和干涉条纹周期的定量影响关系、入射光的能量利用率, 并结合实际入射光束的不均匀度和其他条件, 确定满足物理实验要求的列阵透镜设计方案。

2.1 计算设计的初始条件

图1为“神光- II”近场光强分布, 其光束直径 $\sim \phi 230 \text{ mm}$; 中间无光部分的圆孔孔径 $\sim \phi 60 \text{ mm}$ 及槽宽 $\sim 12 \text{ mm}$ 。入射激光波长 $1.053 \mu\text{m}$ 。

为了加工和拼装的方便, 列阵元采用六角形, 列阵元的长宽比 C 定为 $1:0.6 \sim 1:0.7$, 焦斑长轴尺寸 δ 设计值为 1.0 mm 。

假设入射光为均匀平面波, 无光部分的槽置于水平方向(这是对实现靶面均匀照明较有利的置法), 图4示出了计算设计时入射光束到达二维列阵面上被列阵元分割的方式。

2.2 对列阵元尺寸(即列阵元数目 N) 的考虑

利用 Collins 公式可以求得光束经一光学系统

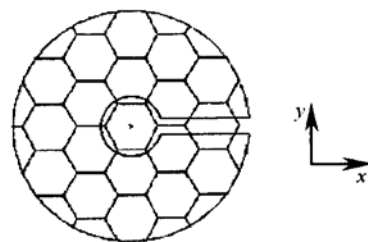


图4 入射光束被列阵元分割的方式
Fig. 4 Laser beam cut apart by lens array

后在靶面上的总光场分布

$$E_t(x_t, y_t) = - \frac{j}{\lambda B} \iint E_i(x, y) \times \exp[jkL(x, y, x_t, y_t)] dx dy \quad (4)$$

其中, $E_i(x, y)$ 为光束经列阵透镜的复振幅; $L(x, y, x_t, y_t)$ 为光学系统的程函数, 可写为^[11]

$$L(x, y, x_t, y_t) = L_0 + \frac{1}{2B}[A(x^2 + y^2) - 2(xx_t + yy_t) + D(x_t^2 + y_t^2)] \quad (5)$$

其中, A, B, D 为光学传输矩阵中的矩阵元且 $A = (l - z/F), B = l(l - z/F), D = (l - l/F), l$ 为列阵透镜与聚焦透镜的间距。靶面上的光强分布

$$I_t(x_t, y_t) \propto E_t(x_t, y_t) \cdot E_t^*(x_t, y_t) \quad (6)$$

利用(4)~(6)式, 通过计算, 可得到这样的结论, 为了实现光斑尺度内的强度分布均匀性优于 5%, 小透镜列阵元被近场光斑(有光区域)完整覆盖的个数应不少于 20 个为准, 这样小透镜尺寸就基本确定了。

2.3 对能量利用率的考虑

大量计算表明, 未被入射光完全覆盖的列阵元, 其子光束叠加会在焦斑上带来很大程度的不均匀性, 从而破坏激光在靶面的均匀照明, 因此实验时应考虑遮住未被入射光完全覆盖的列阵元, 以消除由于不完整子光束叠加所带来的焦斑不均匀性。在此情况下, 作为优化设计应对如何最大程度地提高入射光的能量利用率这一因素加以考虑, 显然, 能量利用率 η 可表示为

$$\eta = \frac{N \times a}{S} \times 100\% \quad (7)$$

其中, N 为被入射光完全覆盖的完整列阵元数目(可由单元尺寸参数决定); a 为列阵单元面积; S 为入射光束近场面积, 由图 1 测量计算约为 37679 mm^2 。

计算时设列阵元长宽比 C 为 1: 0.6 时, 顶角 θ 取 120° ; C 为 1: 0.7 时, 顶角 θ 取 108.9° (见图 3)。改变列阵元尺寸 d (即变化被入射光完全覆盖的完整列阵元数目 N), 获得 $d-N-\eta$ 关系分列于图 5(其中 d 为六角形列阵元的长轴尺度, 见图 3)。

应该注意的是由于六角形列阵单元及近场分布中残缺圆斑的几何形状之间存在着相互匹配, 故被入射光完全覆盖的完整列阵元数目 N 并不是随着 d 单调变化的。

2.4 对主聚焦透镜焦距 F 的选择

(4)~(6)式表明, 靶面上的光强分布与主聚焦透镜焦距 F 有直接的关系; 此外, (3)式也给出了焦

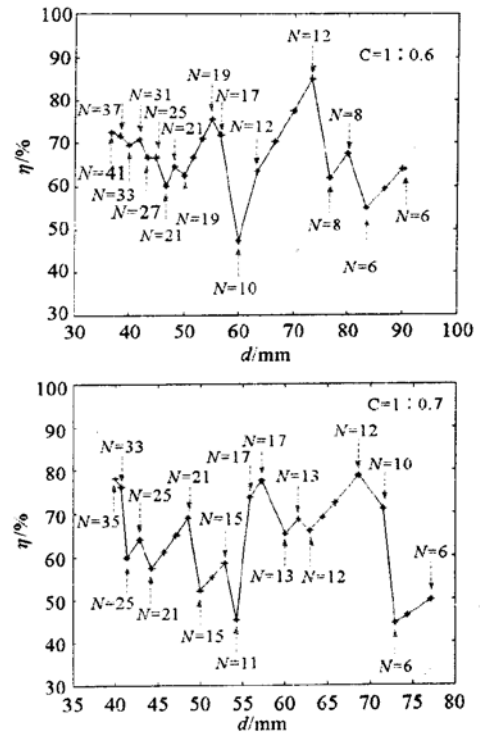


图 5 $d-N-\eta$ 关系

Fig. 5 Relationships of $d-N-\eta$

斑上小尺度内干涉条纹间隔与 F 的关系。令沿焦斑长轴方向(x 方向)约 $500 \mu\text{m}$ 范围内的一维强度起伏为 R_x , 沿焦斑短轴方向(y 方向)约 $300 \mu\text{m}$ 范围内的一维强度起伏为 R_y 。焦斑上 x, y 方向的一维强度分布是在焦斑上分别沿 y, x 方向 $20 \mu\text{m}$ 范围内积分后再沿 x, y 方向 $50 \mu\text{m}$ 范围内进行平滑后得到的。强度起伏 R 由下式表示

$$R = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\% \quad (8)$$

选取单元长宽比 C 为 1: 0.6, $N = 19$ 单元的六角形列阵(η 约 70%) 和 C 为 1: 0.7, $N = 37$ 单元的六角形列阵(η 约 78%), 变化主聚焦透镜的焦距 F , 计算靶面适当离焦情况下的焦斑强度分布, 计算时只考虑被入射光完全覆盖的完整列阵元的贡献。图 6 为焦斑一维强度起伏与主聚焦透镜焦距 F 的关系。

针对上述条件利用(3)式计算得到的焦斑上干涉条纹主极大间隔 Δx (长轴方向), Δy (短轴方向)随 F 的变化示于图 7。当靶面适当离焦时, 条纹各主极大之间的次极大可增长到与主极大相当的强度, 实际上使条纹间距减小了一倍。

图 6, 7 表明, 焦斑上一维强度起伏及干涉条纹

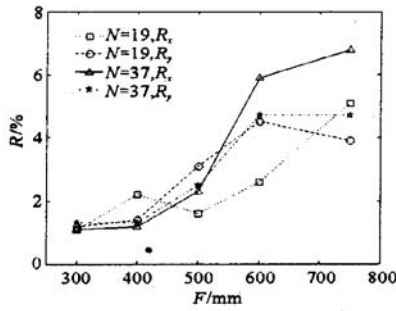


图6 强度起伏与主聚焦透镜焦距 F 的关系
Fig. 6 Intense fluctuation R versus focal length F of major focal lens

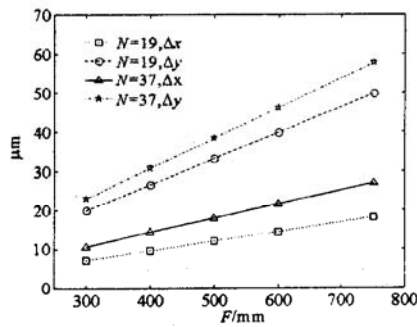


图7 条纹间距随主聚焦透镜焦距 F 的变化
Fig. 7 Streak interval versus focal length F of major focal lens

主极大间隔与主透镜焦距 F 的关系分别呈波浪型及线性的单调变化且变化方向是一致的, 这对选择合适的主透镜焦距 F 是极为有利的。

2.5 设计方案的确立及计算结果

针对“神光- II”特殊的近场光强分布, 通过上述对优化设计中各种因素的考虑并综合了光学加工研制上的可能和便利后, 最终选择的主聚焦透镜及小透镜列阵组合系统的各类参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

Table 1 Design parameters

Small lens-array unit		Major lens
Unit number N	21	
Long axes d /mm	46.62	
Short axes $2d''$ /mm	32.62	
Vertex angle θ /($^\circ$)	108.9	Aspheric lens Diameter ϕ 260 mm Focal length $F = 450$ mm
Thickness/mm	12.0	
Radius R /mm	10642.39	
Focal length f /m	21.0	
Availability of energy η /%	70	

由表 1 中的设计参数并只考虑被束斑完全覆盖的小列阵元的贡献, 计算焦斑上的光强分布, 结果分别见图 8, (a) 为沿焦斑长轴 (x_i) 的一维扫描, (b) 为沿焦斑短轴 (y_i) 的一维扫描, (c), (d) 分别为沿焦斑 y, x 方向 $20 \mu\text{m}$ 范围内积分后再沿 x, y 方向进行 $50 \mu\text{m}$ 范围内平滑后的光强分布。由各图得到的焦斑参数 $R_x, R_y, \Delta x, \Delta y$ 列于表 2 (其中 R_x, R_y 的统计计算范围分别为 $500 \mu\text{m}$ 和 $300 \mu\text{m}$)。

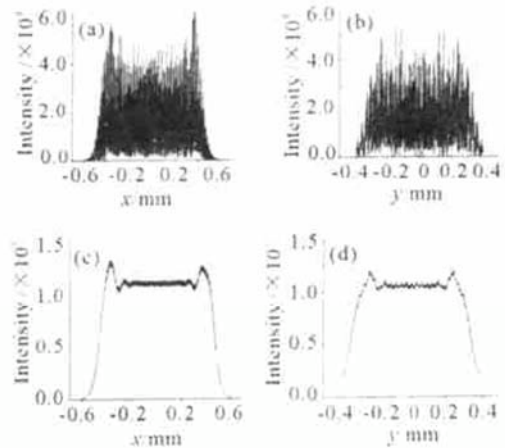


图 8 沿 x, y 方向的一维光强分布
Fig. 8 Intensity distribution along x and y axes

表 2 焦斑参数

Table 2 Characteristics on focal spot

$R_x / \pm \%$	$R_y / \pm \%$	$\Delta x / \mu\text{m}$	$\Delta y / \mu\text{m}$
2.0	2.3	7	9

3 实验结果及分析

利用上述光学设计参数制成的主聚焦透镜及小透镜列阵组合系统对“神光- II”出射光束进行束匀滑, 并运用直接和间接两种方法分别测量了焦斑上的光强分布, 即直接测量小能量辐照下焦斑光强的空间分布和通过测量平面靶箔背后发光信号的平面性^[6]间接测量大能量辐照下焦斑光强的空间分布。

图 9 所示为小能量辐照下用 CCD 拍摄的焦斑照片, 是直接测量的结果。

由测量结果得到焦斑上沿 x, y 方向的光强分布如图 10(a), (b) 所示, 强度坐标轴是归一化后的相对读数, R_x, R_y 分别为 7.7% 和 14%。

比较图 8 和图 10 可以发现, 实验测量的结果较之优化设计的理论计算结果要差, 这是由以下几方面的因素造成的。首先, 理论计算的优化条件是将

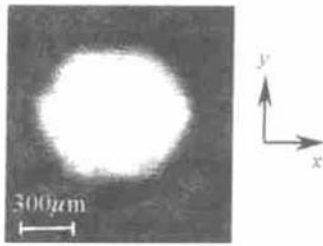
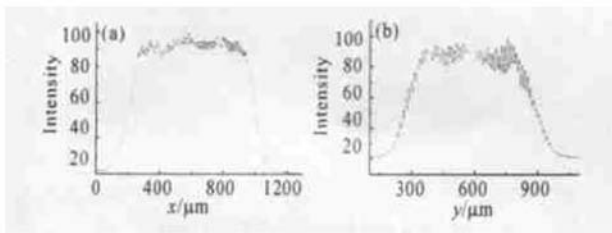


图 9 用 CCD 记录的焦斑照片

Fig. 9 Photograph of focal spot recorded by CCD

图 10 沿 x, y 方向光强分布的测量结果Fig. 10 Measurement results of intensity distribution along x and y axes

“神光- II”近场输出光斑中无光部分的槽置于如图 4 所示的水平方向 (x 轴), 而实验测量时它是沿着如图 1 所示的竖直方向 (y 轴) 放置的, 通过计算可以知道后者确实一定程度上会降低强度分布的均匀性; 其次, 在优化设计的理论计算中只考虑了被光斑完全覆盖的完整小透镜的效应, 而实测的结果却是被光斑覆盖的所有小透镜的总体效应, 显然, 那些只有局部被光斑覆盖的不完整小透镜的贡献会降低焦斑上的强度均匀性; 第三, 理论计算时假设入射光为均匀分布的平面波, 而实际上“神光- II”近场输出是有强度涨落的, 且波面有一定的曲率半径, 只能视为近似平面波, 这将会影响焦斑上的强度均匀性。

但即使在这样的条件下, 根据上述优化设计所制成的主聚焦透镜及小透镜列阵组合均匀化系统已经能较好地适应“神光- II”装置上物理实验的要求。图 11 给出了 ICF 研究项目激光状态方程实验中利用该系统形成的均匀光斑辐照 Al 平面靶后用扫描相机记录下的靶背冲击发光信号^[6]。

图 11 表明通过优化设计后的主聚焦透镜及小透镜列阵束匀滑系统能在焦斑上形成很好的光强均匀分布, 并能在激光状态方程实验中产生良好的平面冲击波。

致谢 对李良钰博士在光学加工设计中的帮助及“神光- II”靶场组和测试组在实验测量中的大力配合表示衷心感谢。

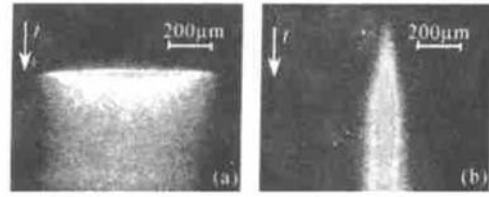


图 11 Al 平面靶背冲击发光信号

纵向 (t) 为时间扫描方向

- (a) 主聚焦透镜及小透镜列阵组合均匀化系统辐照;
(b) 无小透镜列阵的主聚焦透镜点聚焦辐照

Fig. 11 Shock illuminant signals from back surface of Al plane target, t is a direction of time scan

- (a) irradiated by principal focal lens with small lens array;
(b) irradiated by principal focal lens without small lens array

参 考 文 献

- 1 D. K. Bradley, J. A. Deletrez, C. P. Verdon. Measurements of the effect of laser smoothing on direct-drive inertial confinement-fusion capsule implosions [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(18): 2774~ 2777
- 2 M. H. Emery, J. H. Gardner, R. H. Lehmberg *et al.*. Hydrodynamic target response to an induced spatial incoherence-smoothed laser beam [J]. *Phys. Fluids (B)*, 1991, **3**(9): 2640~ 2651
- 3 L. B. DaSilva, P. Celliers, G. W. Collins *et al.*. Absolute equation of state measurements on shocked liquid deuterium up to 200 GPa (2 Mbar) [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(3): 483~ 486
- 4 G. W. Collins, P. Celliers, L. B. DaSilva *et al.*. Equation of state measurements of hydrogen isotopes on Nova [J]. *Phys. Plasmas*, 1998, **5**(5): 1864~ 1869
- 5 D. Batani, A. Balducci, D. Beretta *et al.*. Equation of state data for gold in the pressure range < 10 TPa [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(14) 9287~ 9294
- 6 S. Z. Fu, Y. Gu, J. Wu *et al.*. Laser-driven shock stability in Al and shock compressibilities of Fe up to 0.8 TPa and SiO₂ up to 0.4 TPa [J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(9): 3461~ 3465
- 7 M. Desselberger, T. Afshar-rad, F. Khattak *et al.*. Nonuniformity imprint on the ablation surface of laser-irradiated targets [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(10): 1539~ 1542
- 8 D. H. Kalantar, M. H. Key, L. B. DaSilva *et al.*. Measurement of 0.35 μm laser imprint in a thin Si foil using an X-ray laser backlighter [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(19): 3574~ 3577
- 9 Gu Yuan, Ni Yuanlong, Wang Yonggang *et al.*. Experimental observation of laser-driven shock wave [J]. *Acta Physics Sinica* (物理学报), 1988, **37**(8): 1690~ 1693 (in Chinese)
- 10 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~ 380
- 11 S. A. Collins, Jr.. Lens system diffraction integral written in terms of matrix optics [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(9): 1168~ 1177