

减小列阵光学系统小尺度不均匀性的方法研究*

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 应用衍射积分理论, 通过详细的数值计算分析, 讨论了用于减小列阵光学系统小尺度不均匀性的几种技术方法。所得结果与实验相符, 对均匀照明光学系统的设计有参考意义。

关键词: 列阵光学系统 均匀辐照 小尺度不均匀性

Methods for reducing the small-scale non-uniformity of optical array systems

Zhang Bin, L Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Based on the diffraction integral theory and numerical calculations, this paper analyzes the factors of influencing the small-scale non-uniformity of optical array systems, such as angle error of optical wedge, polarization control and regular phase distribution. The results are consistent with the experiments that the effective method is the proper angle error of optical wedge plus polarization control, and useful for design of optical uniform illumination system.

Key words: optical array system uniform irradiation small-scale nonuniformity

引 言

在惯性约束聚变(ICF)和 X 光激光产生等实验研究中, 都要求将入射的高功率激光均匀地辐照在特定的靶面上, 靶面辐照的均匀性是实验成败的关键之一。近十几年来, 提出了多种改善均匀性的技术和方法, 使激光束在靶面上的辐照均匀性大为提高^[1~5]。列阵式聚焦系统是其中一类重要的技术。由于高功率激光器输出激光束的近场光强分布都存在不同程度的随机起伏, 引起靶面光强分布的不均匀。列阵光学系统运用“积分”思想, 将入射激光分割成许多子光束, 每一子光束将在焦面上产生各自的场分布, 而焦面上总的场分布则是各子光束场分布的叠加, 因此, 叠合焦面上的光强分布对入射光强的随机起伏以及入射光强分布的不均匀不敏感, 从而有效地改善了靶面的大尺度不均匀性。然而, 由于列阵光学系统对入射光场进行了分割, 各子孔径出射的光波之间在焦面产生干涉, 形成干涉尖峰, 引起小尺度范围的光强不均匀性, 这对靶面辐照均匀性是不利的。为了能够更有效地发挥列阵光学系统在实现靶面均匀照明的作用, 有必要对减小列阵光学系统小尺度不均匀性的方法进行研究。对此, 我们已作了一些工作^[7,8]。我们以焦斑可控的正交光楔列阵系统^[6]为例, 对用于改善小尺度不均匀性的楔角偏差、有规位相分布、偏振控制和“二合一”等技术进行了详细的计算分析和比较讨论。

1 理论分析方法

在图 1 所示的焦斑可控正交光楔列阵系统中, SW_{A1} , SW_{A2} 为相互正交的两组光楔列阵,

* 国家高技术青年基金和惯性约束聚变项目资助。

SWA₁ 与 SWA₂ 距离 S₁, 焦距为 f 的非球面透镜 L 与 SWA₂ 相距 S₂, SWA₁ 和 SWA₂ 具有相同的单元宽度 d 和单元数 N, 但具有不同的楔角 α_{1m}, α_{2n}

$$\alpha_{1m} = [1/(n-1)] \operatorname{tg}^{-1}(x_m/L_1) \quad (1)$$

$$\alpha_{2n} = [1/(n-1)] \operatorname{tg}^{-1}(y_n/L_2) \quad (2)$$

式中, x_m, y_n 分别为 X 和 Y 方向第 m, n 单元光楔列阵中心到光轴的距离, L₁ 和 L₂ 分别为 SWA₁ 和 SWA₂ 的重叠距离, 且 L₁ = L₂ + S₁ 时两组光楔列阵在同一重叠焦面完全重合, n 为材料的折射率。

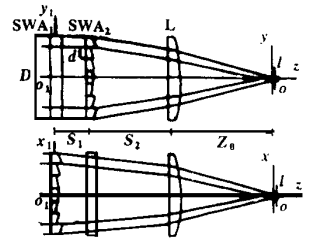


Fig. 1 Schematic illustration of the crossed SWA optical system

由 Collins 公式, 可得到平面波经正交光楔列阵系统产生焦斑的光强分布为

$$I(x, y) = I(x)I(y) = E(x)E^*(x)E(y)E^*(y) \quad (3)$$

式中, I(x), I(y) 分别为 X 和 Y 方向的光强分布, E(x), E(y) 分别为 X, Y 方向的场分布

$$E(p) = \sqrt{\frac{-i}{\lambda(q+1+Z_0/f+Z_0)}} \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \int_{(j-1/2)d}^{(j+1/2)d} \exp\left\{ \frac{ik}{2[q(1-Z_0/f)+Z_0]} \left\{ (1-Z_0/f)p^2 - 2p_1p + (1-q/f)p^2 - 2[Z_0+q(1-Z_0/f)] \frac{jd}{L_v} p_1 + 2q(1-Z_0/f)(1-q/f) \frac{jd}{L_v} p - 2(1-q/f)[Z_0+q(1-Z_0/f)] \frac{jd}{L_v} p \right\} \right\} dp_1 \quad (4)$$

些 式中, p = x, y; v = 1, 2; j = m, n, 当 p = x 时, q = S₁ + S₂ 或当 p = y 时, q = S₂; Z₀ = (L_v - q) / [1 + (L_v - q) / f] 为焦斑距非球面透镜的距离。

1.1 楔角偏差

若在光楔列阵加工时有意留下相对偏差 δ_{vj} = |Δα_{vj} / α_{vj}| (vj = 1m, 2n), 则实际楔角为

$$\alpha'_{vj} = \alpha_{vj} (1 + \delta_{vj}) \quad (5)$$

在小角近似下, 将(4)式中的 (jd/L_v) 变为 (jd/L_v)(1 + δ_{vj}) 得到有楔角偏差的焦斑光强分布。

1.2 偏振控制

通常情况下, 入射光束是线偏振的, 经正交光楔列阵系统后, 出射的各子光束的偏振态相同, 因此, 它们之间是相干的。如果使这些子光束的偏振态相互正交, 则其干涉特性将有所变化。此时, 入射光被分成两组子波, 其中一组的偏振方向与另一组相互正交。每一组内的子波之间由于偏振同向, 将产生一组干涉条纹, 而两组子波之间由于偏振方向是正交的, 因此, 在焦面上的光强分布应是两组干涉条纹光强分布的叠加。计算时, 根据偏振态不同取向, 将相同偏振态的单元按(4)式分别计算得到两组光强分布(公式中的 j 将根据偏振态的分布值), 再将两组光强相加即得焦斑的光强分布。

1.3 有位相分布

由于位相分布对于干涉的影响是很大的, 因此, 可使入射光束经正交光楔列阵系统后出射的各子束存在按某种规律的位相分布, 如位相为 0 或 π, 并按一定规律排列, 可使焦斑的干涉条纹对比度下降。计算时, 在(4)式的位相项中加上 ip_h(vj)π 项, 其中 p_h(vj) 根据位相分布情况取 0 或 1。

2 数值计算与结果分析

数值计算采用上述理论分析方法对七单元正交光楔列阵光学系统进行, 典型数值计算例示于图 2, 3。计算所使用参数: $N = 7$, $d = D/N = 15\text{mm}$, $f = 300\text{mm}$, $S_1 = 50\text{mm}$, $S_2 = 120\text{mm}$, $L_1 = 10970\text{mm}$, $L_2 = 10920\text{mm}$, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ 。为计算方便, 计算中假设 X 和 Y 方向上的楔角偏差、有规位相分布和偏振方向是相同的。图 2 给出焦斑的光强分布。(a) 三维光强分布; (b) $x = 0$ 处沿 Y 方向的光强分布; (c) 图 2b 中心放大的光强分布。图 3 给出采用不同的技术方法后 $x = 0$ 处焦斑沿 Y 方向中心放大的光强分布。(a) 楔角偏差, $\delta_j = 0.41\%$; (b) 有规位相分布, 当 $j = -3, -1, 1, 3$ 时, $ph(v_j) = 1$, 当 $j = -2, 0, 2$ 时, $ph(v_j) = 0$; (c) 偏振控制, $j = -3, -1, 1, 3$ 与 $j = -2, 0, 2$ 的偏振态正交; (d) 楔角偏差加偏振控制, $\delta_j = 0.56\%$, $j = -3, -1, 1, 3$ 与 $j = -2, 0, 2$ 的偏振态正交。

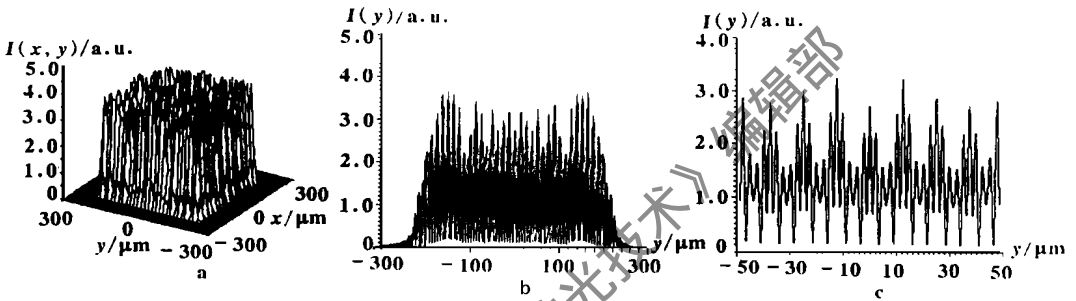


Fig. 2 The intensity distribution at the focus produced by the crossed SWA optical system

a—3D intensity distribution b—the intensity distribution along the Y direction at $x = 0$ c—the amplified intensity distribution at the centre of the Fig. 2b

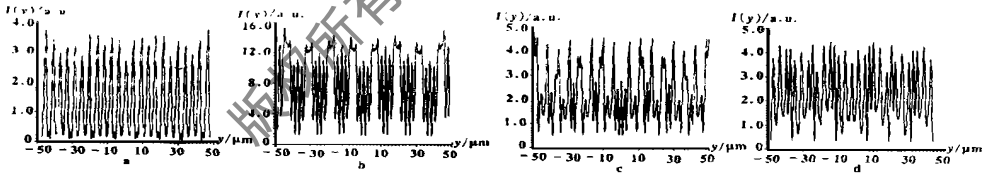


Fig. 3 The amplified intensity distribution at the centre at $x = 0$ with several methods

a—with the derivations of wedge angles b—with regular phase distribution c—with polarization control d—with the derivations of wedge angles and polarization control

减小干涉条纹间隔和降低干涉条纹对比度是减小列阵光学系统小尺度不均匀性的有效途径^[7,9]。分析图 3a 可以看出, 利用加工光楔时有意地留下合理设计的楔角偏差使各子光束所产生的干涉条纹的略微错开, 干涉条纹变密。具体来说, 由图 2c 可得到未采用任何措施时, 干涉条纹间隔为 $14.0\mu\text{m}$ 。若采用与文献[9]一致的局部条纹对比度定义 $\eta = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ (I_{\max} 为图中光强最大值, I_{\min} 为图中光强最小值), 于是, 得到未采用任何措施时的条纹对比度为 94.2% , 值得指出的是, 计算所得的条纹对比度是未对光强分布在一定范围内作平均的结果。由图 3a 得到, 当采用了楔角偏差后, 干涉条纹间隔变为 $4.4\mu\text{m}$, 条纹对比度为 95.1% , 此时, 干涉条纹加密了 2 倍, 小尺度不均匀性得到明显的改善。由图 3b 可知, 光场的位相分布对于干涉光强分布的影响较大, 合理设计的有规位相分布可使干涉条纹次级大强度

增强, 条纹对比度下降, 使小尺度不均匀性减小, 图 3b 中所示的有规位相分布使干涉条纹对比度下降为 83.9%。分析图 3c 知, 利用互相正交的偏振分布在一定程度上破坏了入射光束的空间相干性, 从而使条纹对比度下降为 83.3%, 同时, 由于相互正交的两组干涉条纹非相干叠加, 使条纹间隔减小为 $6.7\mu\text{m}$, 比不采用任何措施时变密了 1 倍。由图 3d 可以看出, 合理设计的楔角偏差使偏振控制所产生的相互正交的两组干涉条纹略微错开一定距离, 亦能使条纹变得更密, 且条纹对比度明显下降, 条纹间距变为 $3.3\mu\text{m}$, 比图 2c 变密了 3 倍, 条纹对比度下降为 85.7%, 此时, 与只有楔角偏差相比, 条纹间距更密且条纹对比度更小, 与只有偏振控制相比, 条纹间距亦更密集。进一步对偏振控制加有规位相分布以及有规位相分布加楔角偏差方案进行数值模拟结果表明, 对于偏振控制加有规位相分布方案, 干涉条纹间隔比未采用任何措施时加密了 1 倍, 条纹对比度降低为 90.4%。合理设计的有规位相分布加楔角偏差亦能使干涉条纹变密 2 倍, 对比度下降为 88.7%。

3 结束语

利用衍射积分理论对楔角偏差、有规位相分布、偏振控制以及它们的“二合一”等改善列阵光学系统小尺度不均匀性的几种典型的技术方法作了详细的数值计算和分析讨论。由结果分析可知, 楔角偏差能有效地减小干涉条纹间隔, 有规位相分布能明显降低干涉条纹对比度, 偏振控制则既能减小条纹间隔又能降低条纹对比度。数值计算表明, 在 X 和 Y 方向上的楔角偏差、有规位相分布和偏振方向相同的情况下, 合理设计的楔角偏差加偏振控制可使焦斑的干涉条纹间隔变密 3 倍, 条纹对比度明显下降, 楔角偏差以及有规位相加楔角偏差可使焦斑的干涉条纹间隔变密 2 倍, 偏振控制以及偏振控制加有规位相分布使干涉条纹间隔变密 1 倍。更为密集的小尺度干涉结构可通过靶面等离子体的横向热传导效应在一定程度上得到均匀化。因此, 这几种方案对减小列阵光学系统小尺度不均匀性都是行之有效的。比较而言, 采用楔角偏差加偏振控制的效果最佳。偏振控制和有规位相分布可使条纹对比度明显减小, 使列阵光学系统的小尺度不均匀性得到明显改善。国内外已有的实验结果也充分证实了采用楔角偏差加偏振控制, 对减小小尺度不均匀性是十分有效的^[9]。我们所使用的理论分析方法, 可推广用于各类光楔列阵系统和柱透镜、透镜列阵系统的情况。该理论分析方法, 亦可推广用于研究多种技术方法组合对减小小尺度不均匀性的作用。

参 考 文 献

- 1 Kato Y, Mima K. *Appl Phys B*, 1982; 29(3): 186
- 2 Lehmberg R H, Obenshain S P. *Opt Commun*, 1983; 46(1): 27
- 3 Skupsky S, Short R W, Kessler T *et al.* *J A P*, 1989; 66(8): 3456
- 4 邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊 *et al.* *中国激光*, 1985; 12(5): 257
- 5 Nakano H, Kanabe T, Yagi K *et al.* *Opt Commun*, 1990; 78(2): 123~ 127
- 6 L B, Zheng J, Cai B *et al.* *Opt Commun*, 1998; 149(1): 19
- 7 刘忠永, 吕百达, 蔡邦维 *et al.* *光学学报*, 1995; 15(12): 1626~ 1632
- 8 L B, Zhang B. *J Mod Opt*, 1995; 42: 1593
- 9 Lwenthal F, Prüg A, Balmer J E. *Opt Commun*, 1997; 135(1): 7

* * *

作者简介: 张 彬, 女, 1969 年 9 月出生。副研究员, 在职博士生。主要研究方向为光束传输变换、高功率激光物理与技术。