

文章编号 : 0258-7025(2001)01-0041-06

连续工艺衍射光学元件的应用特性分析^{*}

王 炜 裴 珉 李永平^{**}

(中国科学技术大学物理系 合肥 230026)

李 涛 洪义麟 傅绍军

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230027)

摘要 研究了连续工艺衍射光学元件在实际系统中的宽容度问题,模拟了非理想入射波、系统非共轴以及焦面定位对均匀照明的影响,提出了系统定位精度的重要性,并为实际工程检测提供了有意义的参数。

关键词 纯位相元件,光场均匀化,波形畸变,非共轴,传输

中图分类号:O 436.1 文献标识码:A

Analysis of Application Properties of Diffractive Optical Elements Fabricated by Continuous Technology

WANG Wei PEI Min LI Yong-ping

(Department of Physics, USTC, Hefei 230026)

LI Tao HONG Yi-lin FU Shao-jun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, USTC, Hefei 230027)

Abstract The adaptability of the diffractive optical elements fabricated by continuous technology in the practical system is studied. The effects of the nonideal incident wave, uncoaxial system and allocation of focal plane on the uniform illumination have been simulated. The result shows that this kind of DOE has huge adaptability, and some helpful parameters have been provided for test of engineering.

Key words pure phase elements, uniform illumination, deformation of wave surface, uncoaxial, propagation

1 引 言

光场均匀化在许多领域都有重要的应用,例如光通讯、材料加工和表面热处理等都需要均匀化的光束。特别是在惯性约束核聚变(ICF: Inertial Confinement Fusion)中对入射到靶面的光束提出了更为苛刻的要求,即平顶、陡边、无旁瓣。为此,各国科研工作者都对此问题提出了不少光束均匀化的研究方案^[1-3]。其中衍射光学连续位相元件是当前国际上首选方案,为此我们也曾基于衍射光学的原理发展了一些设计方法,特别是最近研制的一种基于迭代和优化两种方法混合的算法,设计用于光束均匀化的纯位相元件(PPE: Pure Phase Elements),其光束顶部调制因子为 10^{-6} (定义见下

节),这表明在理论设计方面已经满足均匀化的苛刻要求,并远超过国外同行报道结果。但是通常的理论设计都是考虑理想情况而在工程应用中实际光束具有一定的波面畸变,且等位相面也不可能是平面;同时在实际系统中由于在机械对准方面存在着一定的偏差,可能造成位相片与聚焦透镜非共轴;另外,目前现有各种理论设计方案都是基于光束经位相片和透镜后,在其后焦面处形成均匀照明,该后焦面即位于靶室洞口附近,也就是当该光束均匀化后,还要再传播一段距离才能到达腔壁(间接驱动)或靶丸(直接驱动),在这段距离内光束质量变化的问题也有待研究。为此,研究纯位相元件对实际系统的适应性问题是一项非常有趣,且具有重要实际意义的课题。

2 PPE 设计方法

鉴于该问题的连贯性,我们结合现有的设计

^{*} 863-416 课题资助项目。

^{**} 通信联系人。

收稿日期:1999-08-09;收到修改稿日期:1999-09-30

作简要归纳。靶场均匀化照明问题等价于一个 Fourier 变换系统。若入射光场的复振幅为 $\tilde{U}(x_1, y_1)$, 则出射光场分布可表示为^[4]

$$\tilde{U}_o(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda f} \iint \tilde{U}(x_1, y_1) \mathcal{T}(x_1, y_1) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \quad (1)$$

其中 $\mathcal{T}(x_1, y_1)$ 为 PPE 的复振幅透过率, A 为积分号前的二次位相因子, 它对出射面光强不起影响, 可忽略。由于 PPE 是整块的, 而非原先列阵排列; 且一般的光学系统都具有圆对称性, 同时, 采用圆对称方法可以大大简化设计, 因此采用零阶 Hankel 变换代替原先的 Fourier 变换^[5]

$$\tilde{U}_o(\rho) = \frac{-2\pi i}{\lambda f} \int \tilde{U}(r) \mathcal{T}(r) r J_0\left(\frac{2\pi \rho r}{\lambda f}\right) dr \quad (2)$$

其中 J_0 为零阶 Bessel 函数。

在 PPE 设计过程中, 采用自洽迭代法和优化法相混合的算法^[6]。它的基本思路是先设定理想的超高斯输入光场和输出光场的光强, 将输入输出场加入位相因子后反复进行正逆变换, 在迭代过程中, 加入位相混合算法^[7](PMA: Phase Mixture Algorithm), 即每次迭代前将前次的位相信息保留, 强迫振幅使其成为理想的波形。直至若干次迭代后, 振幅和位相都趋于稳定分布。然后将得到的位相作为优化的初始解, 用模拟退火法反复优化, 直到温度无法降低, 输出理想的出射光强分布, 则此

时入射场的位相数据就是所设计的 PPE 位相分布。

通过上述方法设计出的 PPE 位相分布及靶面光强分布见图 1。图中所示光强分布的顶部畸变为 10^{-6} , 是迄今为止最为理想的一种平顶光场。值得一提的是, 从图 1 看出, 目前位相片的位相分布突变线大大减少, 特别有利于工艺制作。

3 光强和位相的随机畸变对结果的影响

一般来说, ICF 系统末级出射的光波面总是不均匀的, 存在一定的起伏, 并且等相面也非理想的平面。同时, 由于工艺条件的限制, 所制作的位相元件与理论设计的要求总有一些偏差。这些起伏与偏差不带有规律性, 是随机的, 它的效果相当于增加了入射面位相和振幅的畸变。上述各种因素必然对最终靶面均匀照明产生影响。下面分别对光强和位相的畸变作计算机模拟, 并加以分析。

3.1 光强的随机畸变对均匀照明的影响及定量描述

注意到实际体系末端输出光强是具有一种随机性畸变的, 我们将入射光振幅加上 20% 的随机调制来模拟这种现象。这种调制不具有规律性, 将包含这种随机畸变的复振幅代入式(2), 计算出射

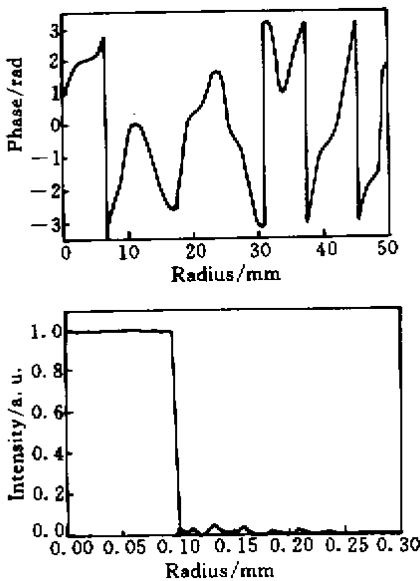


图 1 PPE 位相分布及靶面光强分布

Fig. 1 Phase distribution of PPE and its target intensity distribution

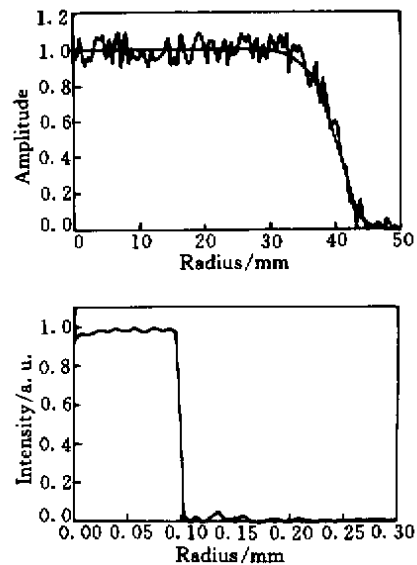


图 2 入射光具有 20% 随机起伏及靶场光强分布

Fig. 2 Amplitude of incident beam with 20% random undulation and its intensity of target field

场的光强分布,结果见图 2 所示。

同时,我们采用顶部波形畸变因子 TPE(Top Profile Error),衍射效率 DE(Diffraction Efficiency)和均方差 MSE(Mean Square Error),对光束质量进行定量评价

$$\text{TPE} = \frac{\sum_i^{\text{top}} |U_{\text{real}}^{(i)} - U_{\text{ideal}}^{(i)}|^2}{\sum_i^{\text{top}} |U_{\text{ideal}}^{(i)}|^2} \quad (3)$$

$U_{\text{real}}^{(i)}$ 代表实际光束 \tilde{U}_0 第 i 个取样点的模, $U_{\text{ideal}}^{(i)}$ 代表理想光束第 i 个取样点的模。则 TPE 表示实际光束与理想光束顶部波形差异的大小。

$$\text{DE} = \frac{\sum_i^{\text{top}} |U_{\text{real}}^{(i)}|^2}{\sum_i^{\text{total}} |U_{\text{real}}^{(i)}|^2} \quad (4)$$

DE 表示实际光束中焦斑主瓣的能量占全场能量的百分比。

$$\text{MSE} = \frac{\sum_i^{\text{total}} |U_{\text{real}}^{(i)} - U_{\text{ideal}}^{(i)}|^2}{\sum_i^{\text{total}} |U_{\text{ideal}}^{(i)}|^2} \quad (5)$$

MSE 表示在全场范围内实际光束的波形与理想波形的差别。

在图 1 所示的理想情况中, $\text{TPE} = 2 \times 10^{-6}$; $\text{DE} = 97.5\%$; $\text{MSE} = 0.0254$; 然而当入射光振幅具有 20% 的随机畸变后,靶场的光束质量变为: $\text{TPE} = 6.4 \times 10^{-5}$; $\text{DE} = 97.4\%$; $\text{MSE} = 0.0262$ 。由此可以看出,入射光强随机畸变对输出均匀性影响不是很大。

3.2 位相的随机畸变对均匀照明的影响

基于同样考虑,我们将图 1 中所设计的位相加入 20% 的随机波动,结果如图 3 所示。此时的光束质量为: $\text{TPE} = 2.1 \times 10^{-4}$; $\text{DE} = 97.3\%$; $\text{MSE} = 0.0272$ 。

同时进一步加大振幅和位相畸变的程度,发现靶场的均匀照明对入射面的振幅畸变不敏感,但对于位相的畸变却较敏感,但仍在允许范围之内。这一点也很好理解,毕竟 PPE 是靠改变位相来实现光场均匀照明的。我们认为对于位相畸变 20% 已经足够,已经超过工程中所能达到的误差范围,所以无需做更大范围畸变的模拟。

通过上述两类情况的模拟可以看出:我们所设计的连续工艺衍射光学元件对光强和位相的畸变有较大的宽容度,能够满足工程中的要求。这种情况在物理上似乎可以理解为:随机畸变的影响等效于一个不太严格定义的随机位相板的效果。由于本文

采用的随机模型仅是开头,比较简单,针对实际体系的随机畸变模式,有待进一步做大量深入的研究。

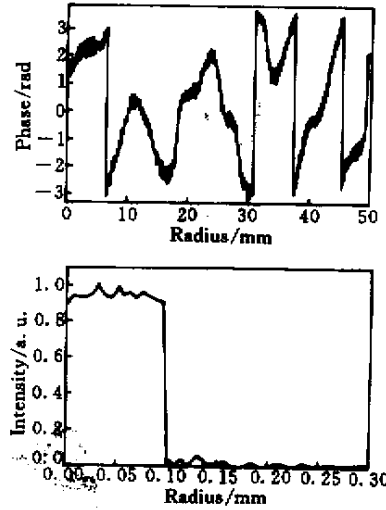


图 3 位相具有 20% 随机起伏及靶场光强分布

Fig.3 Phase of incident beam with 20% random undulation and its intensity of target field

4 非共轴情况的模拟

无论在 PPE 的检测或在实际均匀照明实验中, PPE 后面还存在一个大口径聚焦透镜,这两者都是圆对称结构,因此两者在调节时是否共轴对最终测量结果会起到一定的影响,下面我们将对这一问题作进一步的分析。

如果我们以 PPE 的轴线为基准作为整个系统的光轴的话,那么对于非共轴的情况,式(1)可改写为

$$\begin{aligned} \tilde{U}_d(x_2, y_2) = & \frac{1}{i\lambda f} \iint \tilde{U}_i(x_1, y_1) \mathcal{T}(x_1, y_1) \\ & \exp\left\{-i \frac{\pi}{\lambda f} [(x_1 - \Delta_x)^2 + (y_1 - \Delta_y)^2]\right\} \\ & \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda f} (x_1^2 + y_1^2)\right] \\ & \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \quad (6) \end{aligned}$$

以上非共轴情况之所以采用了二维形式,是因为如果采用一维的 Δr 取代 Δx Δy ,它将不是非共轴模型,而是位相片在工艺制作过程中旋转轴的非同心所引起的刻蚀误差模型,其结果是:非同心旋转轴引起的刻蚀误差会造成对均匀照明的影响,但我们所设计的位相片仍具有较好的宽容性。对于非共轴体系模型,可先将图 1 中的一维位相数据转换为二维数据 $\mathcal{T}(x_1, y_1)$,然后代入上式,其中 Δx Δy 分别

为沿 x 轴和 y 轴的偏移量。模拟结果见图 4。

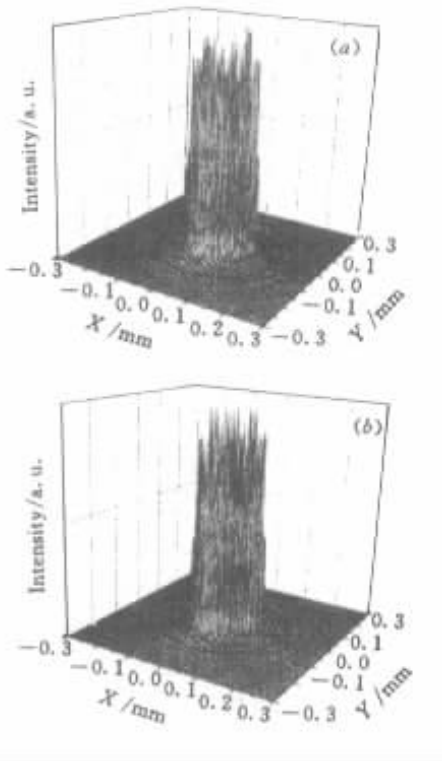


图 4 共轴 (a) 和非共轴 (b) 时靶场光强分布的 3 维图 ($\Delta x, \Delta y = 10 \mu\text{m}$)

Fig.4 Pseudo 3D view of the simulated intensity when the PPE is coaxial (a) and uncoaxial (b) with the lens

图 4 中, 上图代表没有偏转情况下的靶场光强分布, 注意到图中光强仍为任意单位, 该图与图 1 有较大差别, 顶部均匀性变差有高频调制。顶部之所以出现高频调制, 是因为在将一维位相数据图 1 中 $\text{Phase}(r)$ 转换为二维数据 $\mathcal{T}(x_1, y_1)$ 过程中, 对于非 x, y 轴上数据点的取样中, 由于 x_1, y_1, r 的取样间隔相等, 因此无法满足 $\sqrt{x_1^2 + y_1^2} = k\Delta r$ (k 为整数) 这样造成初始位相转换有一系统误差, 这必然会破坏靶场光强均匀化。这个现象正好证明如果位相的最优解被系统“破坏”, 也即真正意义上的调制, 而不是随机起伏, 其结果会大大地影响输出, 也反过来证明了我们设计出的一维连续位相分布最优解的精确性。由于采用的是一种旋转蚀刻方法^[5], 而非传统意义上的套刻方案, 因此不会在工艺中引入这类误差。现在所关心的是偏轴条件对均匀照明的影响, 所以我们这里是横向相对比较图 4 中上下两图, 且特别注意到现在所使用的位相数据已不是原来最优解。图中下图为偏移量 $\Delta x = \Delta y$

$= 10 \mu\text{m}$ 时, 靶场光强的分布。可见, 相对上图而言, 虽然顶部高频调制略有加强, 但整体波形仍然为柱状结构, 其陡边特性也未被破坏。而且这里的调制增加主要是由于模拟中二维数据转换的采样间隔所致, 实际器件可以更小。由以上分析表明, 我们设计的位相元件对非共轴的宽容度仍然是很好的。

5 光束在靶面附近的传输

5.1 传输的理论模型

图 5 为光束传播的原理图, 入射光经过 PPE 整形后, 在空气中传播了一段距离 d , 在透镜后焦面形成均匀照明, 然后再传播一段距离, 整个过程的传播变换矩阵可写为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

III II I

其中, 矩阵 I 代表光波经 PPE 调制后传播一段距离 d 的变换矩阵, II 为透镜的变换矩阵, III 为从透镜出射到 P 平面的变换矩阵。

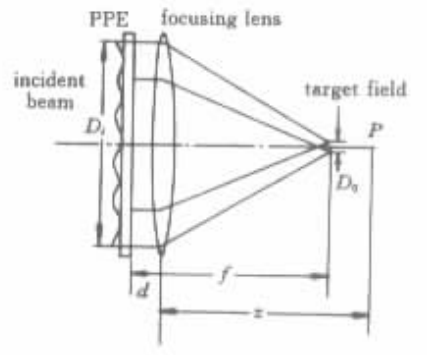


图 5 ICF 系统最后一级示意图

Fig.5 Schematic diagram of the ICF's last stage

运用 Collins 公式^[8], 并转换为极坐标为

$$\tilde{U}_o(\rho) = -\frac{i2\pi}{\lambda B} \int \tilde{U}_i(r) \mathcal{T}(r) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda B} (Ar^2 + D\rho^2)\right] J_0\left(\frac{2\pi\rho r}{\lambda B}\right) r dr \quad (8)$$

$\mathcal{T}(r)$ 即为图 1 中位相分布 $\exp[i\alpha(r)]$, A, B 和 D 为 (7) 中的传输矩阵元, 同时, 由于我们只关心光强的分布, 因此, 在推导中忽略了在积分号前的二次位相因子。

文献 [9] 中研究了理想的超高斯光束和平顶高斯光束的自由传输理论性问题, 且不考虑位相引起

的效应。本文中我们所感兴趣的是在实际工程中，含特种位相分布的超高斯光束传输问题。由式(8)和下面计算可知超高斯光束传输即使有位相参与也还是较规范的。本文的研究具有很强的实际应用价值。

5.2 计算模拟结果

取 $z = f + \Delta$,代入式(8) ,在焦平面附近 模拟得出光强分布随传输距离的变化 ,结果如图 6。图(ad)中 ,光强的中心部分随 Δ 增大而明显增强 ,

这就是所谓的自聚焦现象。由此可以看出一个复杂的波面是如何逐渐形成平顶超高斯光束的。图(fi)的现象类似 ,仅是因为焦面前后的因素有负增长 ,可定义为负自聚焦。这种自聚焦现象并非热效应和非线性因素引起 ,而是由位相元件对传输的敏感性引起 ,区分强光效应和传输效应对实际体系的应用应当是有益的。可见焦平面非常均匀的光束 ,在传播一段距离后 ,均匀性逐渐被破坏。

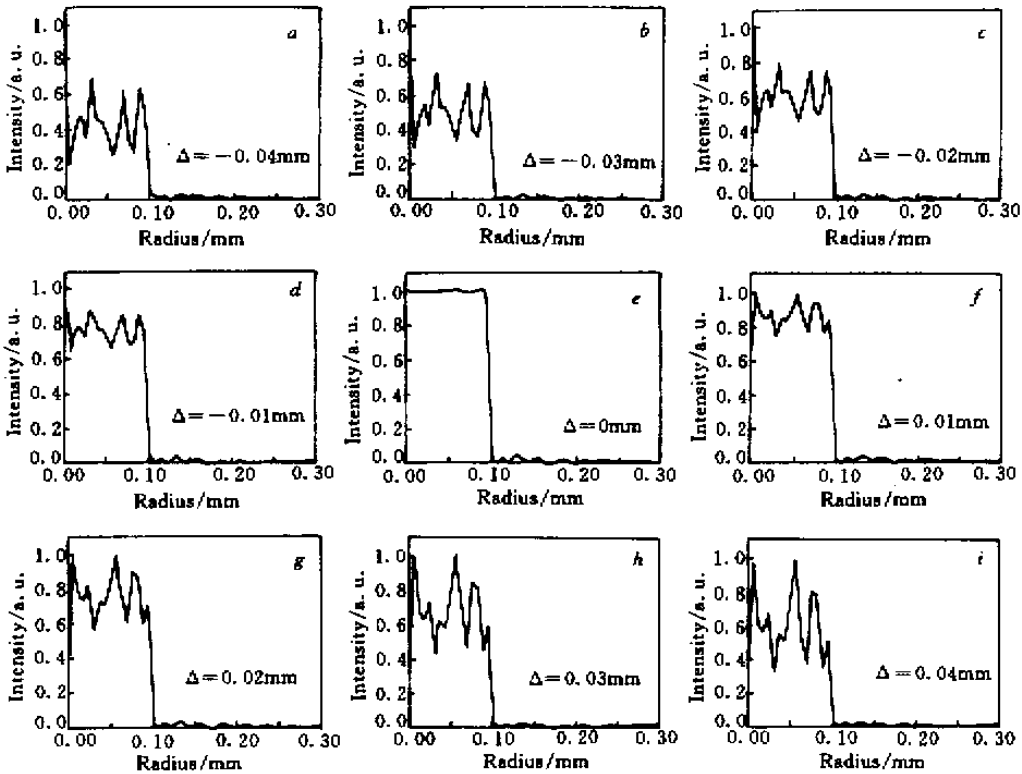


图 6 传播不同距离时光强的分布
Fig.6 Intensity distribution at different distance

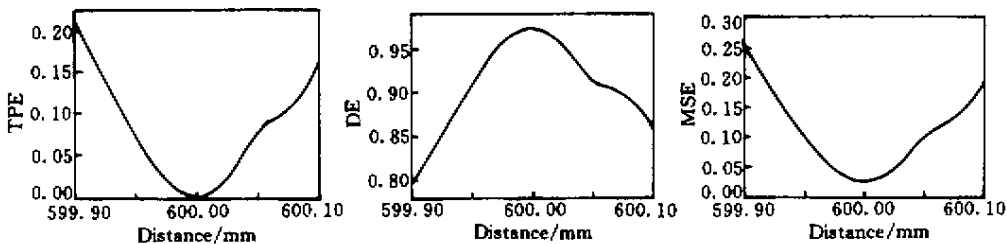


图 7 不同距离下的光束质量
Fig.7 Quality of beam at different distance

5.3 传播中光束质量的评价

为了进一步理解光束质量随传输距离的变化 ,用式(3)(5)对传播不同距离时的光束进行定量评

价 ,其中 TPE ,DE 与 MSE 随距离的变化见图 7。

由图 7 可明显看出 ,在焦平面处达到最佳光束质量 ,而偏离准确的焦面 ± 0.025 mm 范围内光束

衍射效率大于 95% ,顶部波面畸变因子和均方误差小于 0.02 ,在 ± 0.05 范围内衍射效应可达 94% 左右 ,仍可认为具有平顶、陡边无旁瓣的结构 ,但随着离焦面距离的继续加大 ,光束质量明显下降。

6 讨 论

从第 5 节的结果可看出在采用 PPE 对光束均匀化方案中 ,对于靶面的对准精度要求苛刻。这一模拟结果对 ICF 装置中靶场自动调节控制系统、靶瞄准定位控制系统及靶场光路自动准直系统都提出了较高的要求。但欣慰的是 这是我们的设计元件对系统的唯一的比较高的要求 ,对系统入射波面畸变和同轴 ,该位相元件表现了不敏感性。而位相元件对传输的敏感性 ,对一般系统如通讯等 ,可以通过另一块位相补偿片来纠正。但对 ICF 驱动系统 ,补偿片方案是不可能的。一个可能的途径是从时间尺度上的平滑 ,可能会冲淡此种敏感性 ,此原理有待进一步研究。另外值得一提的是 ,本文所论证的 PPE 指标是前所未有的 10^{-6} 平滑度指标 ,所谓的要求苛刻是指对这一极高指标的波面畸变 ,如上节所述 ,在 $50 \mu\text{m}$ 的范围波面畸变因子小于 0.02 ,如果像以前波面畸变因子达 0.2 或更高也被认为可接受 ,那么 ,这种要求可大大放宽。

从另一方面讲 ,如果采用间接驱动方案即光束辐射到靶腔内壁上 ,由于入射光束斜入射到靶壁造成光束与壁的交界面非垂直于光束的光轴而造成传播距离上产生了误差。因此传统的间接驱动方案将需要重新修正 ,即针对光束与靶室交界面处的光均匀化问题 ,而非垂直于光轴的某个面处光场均匀化。这本身又对采用 PPE 均匀化光束的方案提出了较高的要求 ,并丰富了设计的内容。本文设

计的是一种小口径 ,口径为 $200 \mu\text{m}$,因而避免了这个问题。可以预见随着对 ICF 系统研究的深入 ,必然推动衍射光学元件在设计和工艺方面进一步丰富和发展。

致谢 本文作者之一(李)特别感谢与中国科学院上海光机所范滇元院士、林尊琪教授的多次讨论 ,以及联合实验室其他同志对本工作的支持。

参 考 文 献

- 1 Deng Ximing , Liang Xiangchun , Chen Zezun *et al.* . Uniform illumination of large focal targets using a lens array. *Chinese J. Lasers* (中国激光) , 1985 , **12** (5) :257260 (in Chinese)
- 2 Li Yongping , Zhu Jiang. Discrete Hankel transform and its application to laser shaping in high efficiency. *Acta Optica Sinica* (光学学报) , 1989 , **9** (6) :573576 (in Chinese)
- 3 Xuegong Deng , Yongping Li , Dianyuan Fan *et al.* . Pure-phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profile generations of extremely high order. *Opt. Lett.* , 1996 , **21** (24) :19631965
- 4 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. Beijing : Scientific Press , 1976. 97 (Chinese Version)
- 5 Wang Wei , Li Tao , Liu Li *et al.* . Design of Large-caliber phase elements used in ICF. *Chinese J. Lasers* (中国激光) , 1999 , **26** (5) :395399 (in Chinese)
- 6 Wei Wang , Tao Li , Yong-pin Li. A hybrid algorithm for the design of DOE in coniform illumination. *Opt. Comm.* , 2000 , **181** :261265
- 7 Deng Xuegong , Li Yongping , Qiu Yue *et al.* . Phase-mixture algorithm applied to design of pure phase elements. *Chinese J. Lasers* , 1995 , **22** (5) :447454
- 8 Baida Lü. Laser Optics , Laser Beam Propagation and Beam Quality Control. Chengdu : Sichuan Univ. Press , 1992. 54 (in Chinese)
- 9 Luo Shirong , Lü Baida , Zhang Bin. A comparison study on the propagation characteristics of flattened Gaussian beams and super-Gaussian beams. *Acta Physica Sinica* (物理学报) , 1999 , **48** (8) :14461451 (in Chinese)