

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0355-03

# 用于“神光 II”装置类环形光束整形的 纯位相元件的研究\*

伍源<sup>1</sup> 徐俊中<sup>2</sup> 王伟<sup>2</sup> 傅绍军<sup>1</sup> 李永平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230027)  
(<sup>2</sup> 中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

**摘要** 介绍了用于“神光 II”装置类环形光束输出整形的纯位相元件的设计方法,研究了该元件对于实际系统中非理想波面及位相随机畸变的宽容度等问题,并且计算了不同条件下的光束质量。

**关键词** 纯位相元件, 光束整形, 类环形光束, 自洽迭代, 光束质量

中图分类号 TH74 文献标识码 A

## Study on Large-caliber Pure Phase Elements for Quasi-annular Beam Shaping of “SG II” Laser Driver

WU Yuan<sup>1</sup> XU Jun-zhong<sup>2</sup> WANG Wei<sup>2</sup> FU Shao-jun<sup>1</sup> LI Yong-ping<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> National Synchrotron Radiation Laboratory, Hefei 230027)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**Abstract** A design method used in large-caliber pure phase element for quasi-annular beam shaping of “SG II” laser driver is presented in this paper. The adaptability of the pure phase element in the practical system is studied and the beam qualities in different situations are calculated.

**Key words** pure phase elements, beam shaping, quasi-annular beam, self-consistent iteration, beam quality

连续型纯位相元件(Pure Phase Element, PPE)是当今国际上惯性约束核聚变(ICF)领域用于光束均匀化整形的首选方案。我国的“神光 II”装置为避免输出光束自身类似于自聚焦效应的独特光学性质对激光工作物质的破坏,采用了类环形光束输出,因此研究用于类环形光束整形的纯位相元件具有重要意义。

中,  $d = 0$ , 若入射光场复振幅为  $\tilde{U}_i(x_1, y_1)$ , 则出射光场的复振幅为

$$\tilde{U}_0(x_2, y_2) = \frac{A}{i\lambda f} \iint \tilde{U}_i(x_1, y_1) T(x_1, y_1) \times \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \quad (1)$$

其中  $T(x_1, y_1)$  为 PPE 的复振幅透过率,  $A$  为积分

### 1 理论模型

衍射光学元件设计的详细情况见文献[1~4], 这里结合我们的现有设计简要归纳如下。

#### 1.1 原理和方法

ICF 靶场光束均匀化问题可以等价为一个 Fourier 变换系统。如图 1 所示。在“神光 II”装置

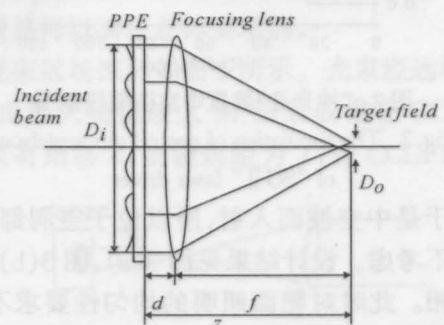


图 1 ICF 系统末级光路示意图,  $d \rightarrow 0$ , 在这里,  $z = f$

Fig.1 Schematic diagram of the ICF's last stage

\* 863-416-2 资助课题。

号前的二次位相因子。通常考虑的是焦面上的强度分布,故  $A$  可忽略。由于 PPE 是整块的,且“神光 II”装置中所采用的光学系统具有圆对称性;同时采用圆对称方案可以在理论上和工艺上大大简化设计,所以我们采用零阶 Hankel 变换代替原有的 Fourier 变换,其中  $J_0$  为零阶 Bessel 函数:

$$\tilde{U}_0(\rho) = -\frac{2\pi i}{\lambda f} \int \tilde{U}_i(r) T(r) J_0\left(\frac{2\pi \rho r}{\lambda f}\right) dr \quad (2)$$

我们采用自洽迭代法来设计 PPE,基本思路是先设定理想超高斯输入光场和输出光场,然后将输入、输出场加入位相因子反复进行正逆 Hankel 变换迭代运算,并结合位相混合算法 (Phase Mixture Algorithm, PMA),直至若干次迭代后 Hankel 变换前后的振幅与位相都趋于稳定,输出我们所要求的出射光强分布,此时的位相数据即为 PPE 的制作数据<sup>[6]</sup>。

## 1.2 类环形中空波面的模拟

我们所要解决的第一个问题是如何模拟“神光 II”装置出射的中空波面。

忽略这个中空波面的不规则性,将其视为一个对称的波面,其外部轮廓称为外波面;其中空部分的内部轮廓,称为内波面。对于“神光 II”装置输出光束的外波面,采用一个直径为  $D$  的 4 阶高斯光束的波面来模拟;由实际出射波面数据可知,中心空洞直径  $d$  与外波面直径  $D$  的关系为  $d/D=0.25$ ,所以从外波面上减去一个直径为  $0.25D$  的 8 阶高斯光束的波面,就得到了一个新的波面,如图 2 所示,我们就利用这个波面来模拟“神光 II”装置的出射波面。

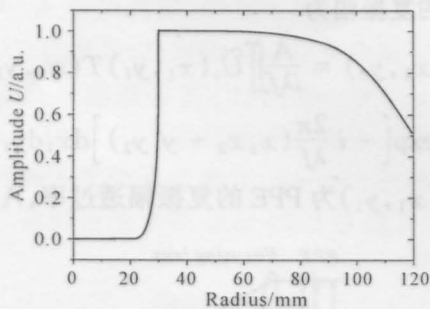


图 2 “神光 II”装置中空波面模拟图

Fig. 2 The simulation of central dip wavefront of “SG II” laser driver

由于是中空波面入射,所以位于空洞部分的位相可以不考虑。设计结果见图 3(a),图 3(b)为连接后的位相。此时对靶面照明的均匀性要求不高,同时顶部的高频调制能够通过热平滑效应加以克服,所以我们未对这个结果作进一步优化,靶面光强分

布见图 3(c)。我们采用顶部波形畸变因子 TPE (Top Profile Error) 和衍射效率 DE (Diffractive Efficiency),对光束质量进行定量评价,在未作优化的情况下,依然获得了很高的光束质量。

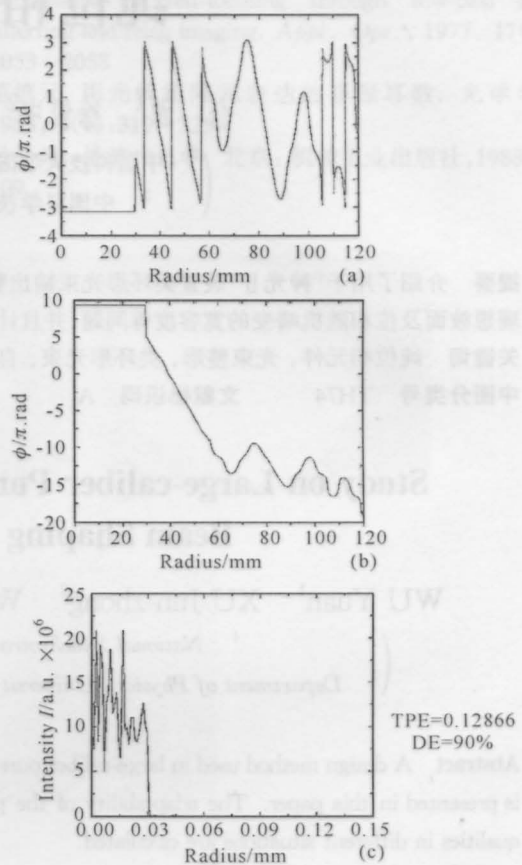


图 3 PPE 位相分布及靶面光强分布

Fig. 3 Phase distribution for PPE and its target intensity distribution

## 3 PPE 对实际系统的宽容度

### 3.1 入射波面的各类畸变对结果的影响

ICF 系统末级出射的光波面并不是均匀的,特别是“神光 II”装置的出射波面是中空波面,其左右外波面不对称,中央空洞也不规则,具有一定的随机性和方向性,这些畸变都会对靶面照明的均匀性产生影响。

注意到 ICF 实际体系末级输出的畸变具有随机性,我们将入射光复振幅  $\tilde{U}_i(r)$  加入 20% 的随机调制带入式(2),计算出射场的光强分布,结果如图 4 所示。从结果可以看出,入射光波面的随机畸变对输出的均匀性影响不大。

由于波面形状可能会变化,我们采用外波面与内波面高斯阶数组合与图 3(c)不同的光波面入射,

同时加入 20% 的随机调制。结果表明,我们设计出位相对波面形状的变化同样具有很大的宽容度,在“神光 II”装置出射波面可能的形状变化范围内均可有效地工作。不同入射波面得到的光束质量见表 1,其中波面形状参数中第一项为外波面的高斯阶数,第二项为内波面的高斯阶数。

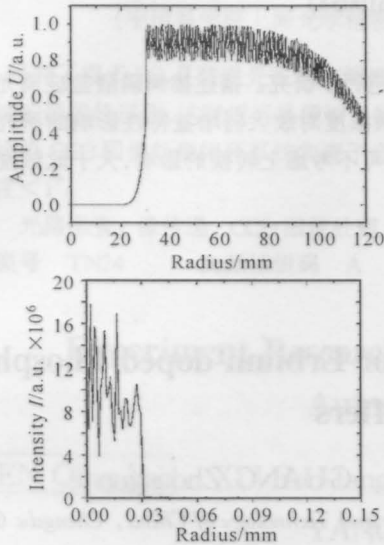


图 4 入射光具有 20% 随机畸变及其靶场光强分布

Fig. 4 Amplitude of incident beam with 20% random undulation and intensity of target field

表 1 不同入射波面得到的光束质量

Table 1. The beam quality of target field with different incident wavefront

Shape of wavefront	2~4	6~12	6~6
TPE	0.18497	0.12767	0.14996
DE	86%	90%	88%

由以上可知,尽管前文对“神光 II”装置出射波面的模拟方案是一个很粗糙的近似,但是由于我们设计的 PPE 对于各种入射波面的各种畸变具有很大的宽容度,这就说明所做的近似是有效和可行的。

## 2.2 位相的随机畸变对结果的影响

文献[7]中认为靶面照明的均匀性对位相的畸变非常敏感,我们的模拟计算得出了同样的结论,但是允许的位相畸变幅度要比文献[7]中小得多。我们认为,这是因为研究的对象是中空光束的均匀化问题,较普通超高斯光束的均匀化问题更为复杂,因此对位相的准确性要求也更高。不同位相畸变程度对光束质量的影响见表 2。

表 2 不同位相随机畸变得到的光束质量

Table 2. The beam quality of target field with different phase random undulations

Random undulations	10%	5%	2%
TPE	1.39177	0.36191	0.15871
DE	43%	75%	88%

## 3 结 论

我们采用的这套基于迭代和位相混合算法的 PPE 设计方法,简洁、有效,而且所给出的结果具有良好的适应性。对实际系统各种工作环境的模拟结果表明,PPE 对于入射波面的随机畸变和波形畸变均表现了不敏感性,其整形能力和光束质量并没有因为工作在非理想条件下而有明显降低。这些结果对于 PPE 的实际应用甚为重要。但是由于实际工作环境的复杂性,对 PPE 在实际系统中适应性的研究还有很多工作需要做,例如能否将波面畸变看作是随机起伏就还有待商酌,这为我们将来的工作提出了新的问题和挑战。

## 参 考 文 献

- Li Yongping, Dong Hui, Yao Kun. Computer simulation method to change the wavefront of lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1988, **8**(11):991~997 (in Chinese)
- 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):573~576 (in Chinese)
- Deng Xuegong, Li Yongping, Qiu Yue *et al.*. Phase mixture algorithm to design of pure phase elements. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **B4** (5): 447~454 (in English)
- Deng Xuegong, Li Yongping, Fan Dianyuan *et al.*. Pure-phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profile generations of extremely high order. *Opt. Lett.*, 1996, **21** (24):1963~1965
- J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. Beijing: Beijing Scientific Press, 1976. 14,97 (in Chinese)
- 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, **A26**(5):395~399 (in Chinese)
- Wang Wei, Pei Min, Li Yongping. Analysis of application properties of diffractive optical elements fabricated by continuous technology. *Chinese J. Laser* (中国激光), 2001, **A28**(1):41~46 (in Chinese)
- Qian Liejia. Design of flat-top beam with a central dip for "SG II" laser driver. *Chinese J. Laser* (中国激光), 1995, **22**(10):747~750 (in Chinese)