

# 输入输出距离变化对 BOE 整形环强度的影响分析

李 琦 申作春 董蕴华 高惠德 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐(气体)激光技术国防科技重点实验室 哈尔滨 150001)

**提要** 利用杨-顾相位恢复算法设计了 16 阶光束整形器,用以将 He-Ne 激光基模光束整形为环形光强分布,并进行了实验分析,在实验中,改变输出面距输入面(光束整形器)的距离  $L$ ,测得输出面的衍射光强分布,并与理论模拟相比对。研究结果表明实验结果与理论设计及模拟相吻合。

**关键词** 光束整形器,二元光学,环形光强分布

## 1 引 言

随着激光应用的不断扩大和深入,人们需要将激光光强分布加以转换,即光束整形;如在半导体激光热处理<sup>[1]</sup>、激光熔覆<sup>[2]</sup>、光学材料加工等领域中<sup>[3-5]</sup>,将光束整形成平顶状和环状等。以往多用计算全息法实现环形分布,虽然此法原则上可以设计产生一般透镜或反射镜所不能实现的任意形状的波前,但由于大多都使用离轴的一级衍射光,这不仅限制了视场,而且衍射效率不甚高,因此难于推广应用<sup>[6]</sup>。近年来,人们开始研究同轴的、能充分利用光能且能产生任意形状的光波波前的衍射光学元件——二元光学元件(Binary Optical Element,缩写为 BOE)在光束整形方面的作用。二元光学元件是基于光波的衍射理论,在计算机全息图和全息图研究发展的基础上,利用计算机设计和微电子加工技术研制成的一种高效率的新型光学元件,它具有两个或多个台阶深度的浮雕结构。由于它能灵活控制波前,因此在光束整形方面有着广泛的应用前景<sup>[7]</sup>。

通常,在二元光学元件的衍射特征尺寸大于光波波长时,采用标量衍射理论进行设计。其数值设计的算法已提出一些,如 GS 算法、输入输出算法、杨-顾相位恢复算法、直接二元搜索法、遗传算法等。其中杨-顾相位恢复算法已成功地解决了多种实际问题,是比较实用的算法;而且他们讨论了用这一算法设计均匀光束转换成聚焦环的 32 阶二元光学元件的效果,但未做实验研究<sup>[8]</sup>。总之,在将激光光束转换成环状方面,迄今为止,仅有的几个用于实验的二元整形元件的设计尚未应用杨-顾相位恢复算法。

另外,在利用二元光学元件实现光束整形的过程中,不仅需要符合条件的理论设计和精密制作,还需要将研制的二元光学元件置于所需光学系统中调试,这是最后环节,无疑也是重要环节。因此,在已设计好的二元光学元件后,实验观察并研究与其设计不相匹配的参数对整形效果的影响是非常必要的,具有实用价值。

因此,我们用杨-顾相位恢复算法设计了用于氦氛激光基模光束转化成厚环形输出的二元光学元件,即光束整形器。由于目前制作技术的限制,位相量化阶次为 16。进而做了大量的实验,观察了输出面距光束整形器的距离  $L$  变化对 BOE 整形效果的影响,测得输出面的衍射光强分布,并与数值模拟相对。

## 2 设计及模拟原理

高斯光束整形为环形光束的光学系统如图 1 所示。BOE 放在输入平面处,BOE 与输出平面的间隔为  $L$ ,输入光束最大半径为  $r_{1m}$ ,环的厚度为  $dr_0$ ,环中心距光轴  $z$  的距离为  $r_0$ ,平行光入射。

由于所设计的光学系统呈圆对称性,只与径向有关,因此使问题大大减小。设输入平面的波函数为  $U_1(r_1)$ ,输出平面的波函数为  $U_2(r_2)$ ,则

$$U_1(r_1) = a_1(r_1) \exp[i\phi_1(r_1)] \quad (1)$$

$$U_2(r_2) = a_2(r_2) \exp[i\phi_2(r_2)] \quad (2)$$

其中  $a_1(r_1)$  为输入平面的实振幅,在此即为

$$a_1(r_1) = \exp(-r_1^2/w_0^2) \quad (3)$$

式中  $w_0$  为束腰半径。

因为是平行光入射,  $\phi_1(r_1)$  即为 BOE 的位相。 $a_2(r_2)$  为在输出面上的实振幅,  $\phi_2(r_2)$  为输出面上的位相。

利用菲涅耳衍射公式有

$$U_2(r_2) = \int_0^{r_{1m}} G(r_1, r_2) U_1(r_1) dr_1 \quad (4)$$

$$G(r_1, r_2) = \frac{2\pi r_1}{i\lambda L} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda L}(2L^2 + r_1^2 + r_2^2)\right] J_0(2\pi r_1 r_2 / \lambda L) \quad (5)$$

式中  $G(r_1, r_2)$  为光学系统变换函数,  $J_0(2\pi r_1 r_2 / \lambda L)$  为第一类零阶贝塞尔函数,  $\lambda$  为波长。

由此,光学系统的作用可以看成是一个线性变换  $\hat{G}$ 。从泛函分析的角度,  $U_1(r_1)$  和  $U_2(r_2)$  可以看成是  $L^2$  空间的点或元素,因此该光学系统实现的变换是  $L^2$  空间的线性变换。 $\hat{G}$  可以表示为选定坐标系内的一个无穷维矩阵。(4) 式可以写成

$$U_2(r_2) = \hat{G}U_1(r_1) \quad (6)$$

根据杨-顾相位恢复算法,为找到适当的 BOE 相位  $\phi_1(r_1)$ ,使式(4)成立,引入  $L^2$  空间两点距离  $D$

$$D(\phi_1, \phi_2) = \|U_2(r_2) - \hat{G}U_1(r_1)\| = \sqrt{\int |U_2(r_2) - \hat{G}U_1(r_1)|^2 dr_2} \quad (7)$$

使  $D$  取极值的点即为所求的解。

考虑(1),(2),(4)式的连续函数离散化的取样点近似,并用矩阵和多元函数极值的方法解(7)式,有<sup>[9]</sup>

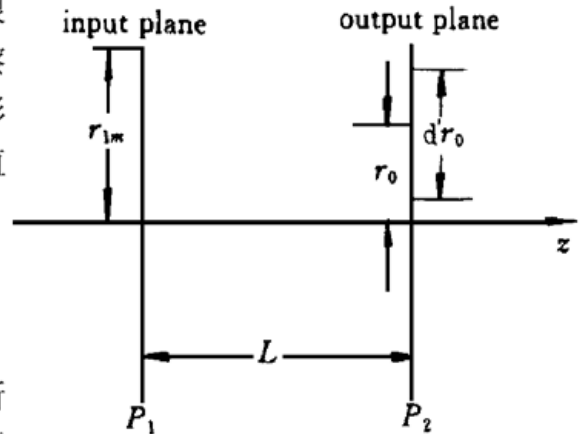


图 1 高斯光束转换成厚环形光束的光学系统示意图

$r_{1m}$ : 输入光束最大半径;  $r_0$ : 环中心距光轴  $z$  的距离;  
 $dr_0$ : 环的厚度;  $L$ : BOE 与输出平面的间隔

Fig. 1 Optical system of laser beam shaping from Gaussian to thick annulus

$r_{1m}$ : radius of the input window;  $r_0$ : central radius of a desired ring;  $dr_0$ : width of a desired ring;  $L$ : distance between the input and the output plane

$$\Phi_k = \arg \left[ \sum_j G_{jk}^* a_{2j} \exp(i\Phi_j) - \sum_{j \neq k} A_{kj} a_{1j} \exp(i\Phi_j) \right] \quad k = 1, 2, 3, \dots, N_1 \quad (8)$$

$$\Phi_k = \arg \left[ \sum_j G_{kj} a_{1j} \exp(i\Phi_j) \right] \quad k = 1, 2, \dots, N_2 \quad (9)$$

其中矩阵

$$A_{kj} = \sum_i G_{ki}^* G_{ij} \quad (10)$$

$\arg$  表示求幅角, \* 表示复数共轭。

在不考虑损耗的情况下, 根据能量守恒原理有

$$\int_0^{1m} a_1^2(r_1) r_1 dr_1 = \int_{0^-}^{0^+} a_{20}^2 r_2 dr_2 \quad (11)$$

得到理想状态下的环形输出常量实振幅  $a_{20}$ , 以便使在数值计算中根据(8), (9) 式求得的  $a_2(r_2)$  通过迭代算法尽可能逼近  $a_{20}$ , 由此求出 BOE 的相位分布(量化值)和此时 BOE 作用下输出面上的振幅分布。

为了研究输出面距光束整形器的距离  $L$  变化对 BOE 整形效果的影响, 我们将不同的  $L$  值代入(4) 式, 此时  $a_1(r_1)$  由(3) 式表示,  $\Phi_1(r_1)$  为设计出的 BOE 位相。

### 3 设计及模拟结果

设计参数如下: 波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 束腰半径  $w = 1.73 \text{ mm}$ , BOE 与输出平面的间隔  $L = 165 \text{ mm}$ , 输入光束最大直径为  $4.3 \text{ mm}$ , 环中心距光轴  $z$  的距离  $r_0 = 1.0 \text{ mm}$ , 环的厚度  $dr_0 = 1.3 \text{ mm}$ 。

光束整形器相位分布图如图 2 所示; 输入、输出面振幅及预期的输出环振幅分布如图 3 所示, 图中虚线  $G$  代表输入面高斯分布, 实线  $O$  代表输出面振幅分布, 点划线  $E$  代表预期的输出环振幅分布。环上均匀性的均方误差  $SE = 1.1\%$ , 其中  $SE$  定义式为

$$SE = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} (a_{2i} - a_{20i})^2}{\sum_{i=1}^{N_2} a_{20i}^2} \quad (12)$$

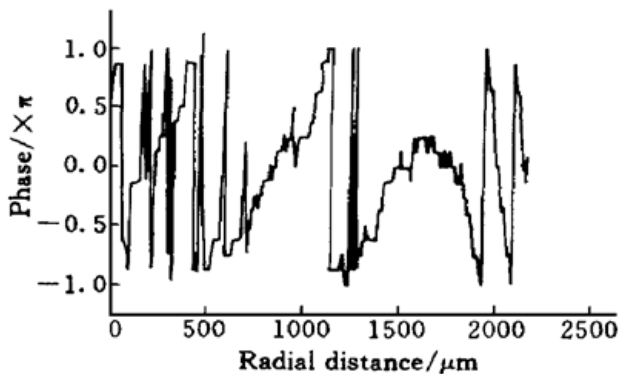


图 2 16 阶 BOE 相位分布

Fig. 2 Phase distribution of the designed BOE with 16 levels

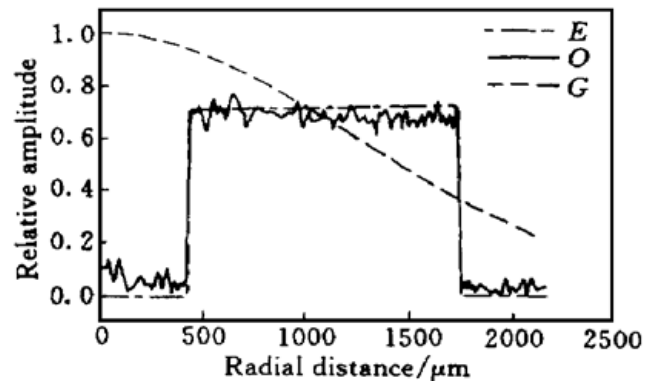


图 3 振幅分布图

Fig. 3 Amplitude profiles

$E$ : amplitude of the desired annular;  $O$ : Calculated amplitude of the annular generated by BOE;  $G$ : Gaussian profile of the incident laser beam

改变 BOE 距输出面距离  $L$  值, 模拟计算不同  $L$  值所对应的振幅分布。由这些振幅分布可得, 当在  $164 \sim 166 \text{ mm}$  之间移动时, 环的尺寸不变, 仅光强稍微有点变化, 环的均匀性不如设计值, 图 4(a) 即为  $L = 164 \text{ mm}$  时的输出振幅, 其环上均匀性的均方误差  $SE = 1.5\%$ ; 随着  $L$

值偏离设计程度的继续加大, 均匀性明显下降; 当  $L = 149 \text{ mm}$ ,  $L = 179 \text{ mm}$  时, 环中心出现亮点, 且环的均匀性很差(见图 4 (b)), 此时环上均匀性的均方误差  $SE = 14\%$ 。

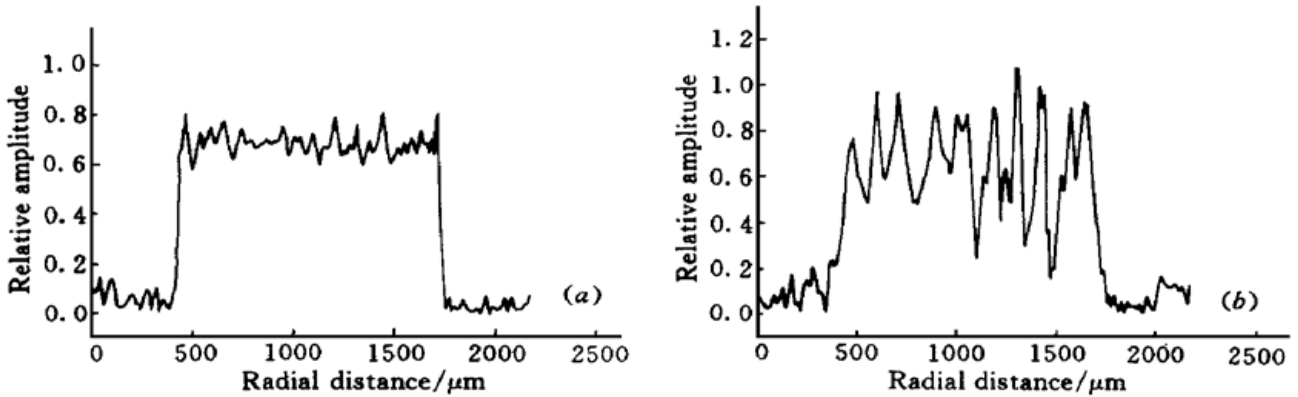


图 4 所设计的 BOE 衍射后输出振幅分布

Fig. 4 Output amplitude distribution generated by the designed BOE

(a)  $L = 164 \text{ mm}$ ; (b)  $L = 179 \text{ mm}$

### 4 实验设置及结果

光束整形器由石英晶体经激光直写及离子反应刻蚀制作而成, 其制作误差小于 5%。实验中, He-Ne 激光管长为 300 mm, 功率为 3.2 mW, 束腰半径为 0.31 mm; 用焦距分别为 50 mm 及 250 mm 的两凸透镜实现激光扩束, 并用 LBA-100A 型光束质量分析仪测得输出面振幅分布。图 5 为实验装置图。He-Ne 光通过扩束系统扩束和 BOE 整形后入射至 CCD, 进而将信号传输到光束质量分析仪。

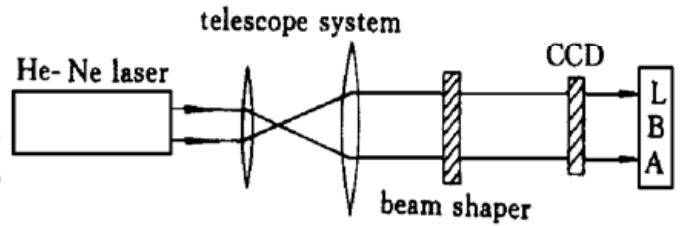


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental set-up

在 BOE 与输出平面的间隔设计值  $L = 165 \text{ mm}$  处, 测得环形光斑如图 6 所示, 环面上的光强分布较均匀, 但比设计的光强均匀性低一点, 另外在设计的环外有细小且强度很低的光圈。这些主要是由于光束整形器台阶式结构、制作及测量误差造成的。

在  $64 \text{ mm} \leq L \leq 66 \text{ mm}$  之间, 环上光强的变化不很大。当  $L$  值远离设计值时, 环面上的光强分布抖动越来越严重。图 7 显示了  $L = 179 \text{ mm}$  时的输出光强分布, 其中心有亮点, 衍射环一

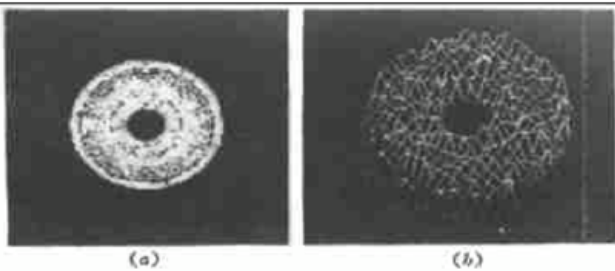


图 6  $L = 165 \text{ mm}$  时实验输出强度分布

Fig. 6 Experimental output intensity distribution

at  $L = 165 \text{ mm}$

(a) 2D case; (b) 3D case

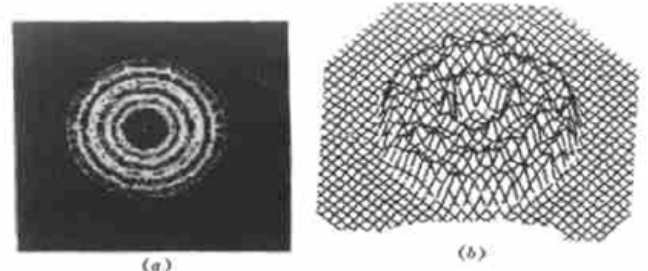


图 7  $L = 179 \text{ mm}$  时实验输出强度分布

Fig. 7 Experimental output intensity distribution

at  $L = 179 \text{ mm}$

(a) 2D case; (b) 3D case

圈套一圈,与数值模拟(图 4 (b)) 相吻合。

## 5 结 论

实验结果表明:我们设计的 16 阶光束整形器(BOE)对光束的整形能力很强。在 BOE 与输出平面间隔  $L$  的设计值处测量,实验值与数值模拟计算值匹配,环面上光强分布较均匀,基本达到设计要求。

在 BOE 与输出平面的间隔设计值  $L = 165 \text{ mm}$  附近  $\pm 1 \text{ mm}$  范围内均可得到较符合设计要求的环分布;随  $L$  值偏差的不断加大,环上光强分布均匀性越来越差,直至环中心出现亮点。上述这些现象均与理论模拟相符。

致谢 感谢中国科学院物理所董碧珍研究员给予的大力支持和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 J. Cordingley. Application of a binary diffractive optic for beam shaping in semiconductor processing by lasers. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2538~ 2542
- 2 Chang-Yuan Han, Yukihiko Ishii, Kazumi Murata. Reshaping collimated laser beams with Gaussian profile to uniform profiles. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(22): 3644~ 3647
- 3 Wai-Hon Lee. Method for converting a Gaussian laser beam into a uniform beam. *Opt. Commun.*, 1981, **36**(6): 469~ 471
- 4 D. Veron, H. Ayrat, C. Gouedard *et al.*. Optical spatial smoothing of Nd-glass laser beam. *Opt. Commun.*, 1988, **65**(1): 42~ 46
- 5 F. S. Roux. Intensity distribution transformation for rotationally symmetric beam shaping. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(5): 529~ 536
- 6 W. J. Hossack, A. M. Darling, A. Dahdouh. Coordinate transformations with multiple computer-generated optical elements. *J. Modern Opt.*, 1987, **34**(9): 1235~ 1250
- 7 W. B. Veldkamp, T. J. McHugh. Binary optics. *Scientific American.*, 1992, (5): 50~ 55
- 8 Guo-qing Zhang, Ben-yuan Gu, Guo-zhen Yang. Design of diffractive phase elements that produce focal annuli: a new method. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(35): 8110~ 8115
- 9 Guo-zhen Yang, Bi-zhen Dong, Ben-yuan Gu *et al.*. Gerchberg-saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2): 209~ 218

## Influence of the Distance between Input and Output Plane on the Ring-shaped Intensity Distribution Produced by BOE

Li Qi Shen Zuochun Dong Yunhua Gao Huide Wang Qi  
(Institute of Opto-Electronic, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** A beam shaper with 16 levels was designed by Y-G amplitude-phase retrieval and iteration algorithm for converting a given single-mode He-Ne laser beam into a ring-shaped intensity distribution. The ring-shaped intensity distribution is investigated experimentally and compared with the results of the computer simulation when the distance between BOE and CCD is changed. The results show a good conformity.

**Key words** binary optical element (BOE), beam shaper, ring-shaped intensity distribution