

文章编号 : 0258-7025(2001)03-0237-05

输入光波长变化对 DPE 厚环输出效果的影响

李 琦 高惠德 董蕴华 申作春 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 在已设计并实验实现了氦氖 632.8 nm 高斯光束输入环输出的 16 阶衍射相位元件(DPE)基础上,模拟了与设计不同的输入光的波长对 DPE 整形效果的影响,利用与设计 DPE 波长不同的半导体激光器(波长为 660 nm)进行了实验研究。结果表明,在 DPE 与输出平面的间隔(L 值)始终为设计值时,当输入光波长处于 630~637 nm 范围内,环上均匀性的均方误差 SE 不大于 1%;当输入波长与 L 值满足 $L = L_0 \times \lambda_0/\lambda'$ 时,波长在 632.8 ± 37(nm) 的范围内,环上均匀性的均方误差 SE 不大于 1%。实验结果与理论模拟基本相吻合。

关键词 衍射相位元件, 环形光强分布, 数值模拟

中图分类号 O 436.1 文献标识码 A

Effect of Wavelength Variation of the Input Beam on Thick Ring-shaped Output Produced by DPE

LI Qi GAO Hui-de DONG Yun-hua SHEN Zuo-chun WANG Qi

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The influence of the wavelength variation of the input beam on the ring-shaped output is numerically simulated in this paper. The semiconductor laser with a wavelength of 660 nm is shaped experimentally. The experiments conform with the simulations.

Key words diffractive phase element(DPE), thick ring-shaped intensity distribution, numeral simulation

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变换,即进行光束整形,如在光计算、半导体激光热处理、激光熔覆、光学材料加工等领域中,将光束整形成平顶状和环状等。由于衍射相位元件(Diffractive Phase Element, DPE)能充分利用光能且能产生任意形状的光波波前,因此,它在光束整形领域倍受青睐^[1~3]。

以往人们多关注于衍射相位元件设计方法和某一特定应用,而对于与设计不相匹配的参数所造成的影响研究甚少。事实上,设计好衍射相位元件后,系统全面的理论研究与设计不相匹配的参数对整形效果的影响是非常必要的,具有很强的实际应用价值。为此,我们在已设计并实验实现了氦氖高斯光束输入环输出的 16 阶 DPE 后^[4],模拟了与设计不同的输入光的波长对 DPE 整形效果的影响,模拟计

算包括两部分:(1) DPE 与输出平面的间隔(L 值)始终为设计值,仅改变波长;(2) 改变输入波长且 L 值也随之改变。最后,利用与设计不同的波长为 660 nm 半导体激光器进行了实验研究。

2 模拟计算原理

在利用杨-顾相位恢复算法思想,设计了用于实现氦氖高斯光束输入环输出的光束整形器(DPE)后^[4~6],我们进行了模拟计算。

由于所模拟的光学系统呈圆对称性,只与径向有关,因此使问题大大简化。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

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

式中 w 为光斑半径。

因为是平行光入射, $\phi_1(r_1)$ 即为 DPE 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

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

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

式中 $\alpha(r_1, r_2)$ 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, λ 为波长, r_{1m} 为输入光束最大半径, L 为 DPE 与输出平面的间隔。

在数值计算中, 将上述连续函数离散化。

表征输出衍射环面的均匀程度的量为环上均匀性的均方误差 SE, 其表达式为

$$SE = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{N_2} (a_{2i} - a_{20i})^2}{\sum_{i=1}^{N_2} a_{20i}^2} & \text{环面上} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中 a_{20i} 代表理想状态下的环形输出常量实振幅。

衍射效率可以由下式估算

$$\eta = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{N_2} [|a_2(r_2)|^2 \Delta S_{2i}(r_2)]}{\sum_{j=1}^{N_1} [|a_1(r_1)|^2 \Delta S_{1j}(r_1)]} & \text{环面上} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\Delta S_{1j}(r_1)$ 代表输入面第 j 个取样间隔内的面积, $\Delta S_{2i}(r_2)$ 代表输出面上的第 i 个取样间隔内的面积。

对于不同输入波长光束对 DPE 整形效果的影响的模拟计算, 不能直接将所设计出的 DPE 位相代入, 因为刻蚀后的 DPE 对于不同波长的输入光, 其位相也不同。

根据多阶衍射相位元件每一级台阶深度表达式^[7]

$$d = \frac{\lambda}{2^N(n-1)} \quad (8)$$

式中, λ 为输入光波长, n 为元件基板折射率, 2^N 为台阶数。将氦氛激光波长值 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 代入(8)式中, 则对于第 k 个台阶, 其深度(单位为 mm)为

$$d_k = \frac{632.8}{16 \times (n-1)} k \quad (9)$$

波长为 λ' (以 nm 为单位) 的输入光束, 第 k 阶的位相差 $\Delta\phi_k'$ 为

$$\Delta\phi_k' = \frac{2\pi(n-1)}{\lambda'} d_k \quad (10)$$

考虑以 $k = 0$ 这一台阶的位相为 $-\pi$, 将(9)式代入(10)式, 并利用 DPE 位相量化公式

$$\bar{\phi}_1 = -\pi + \frac{k\pi}{2^{N-1}}$$

因此, 对于波长为 λ' 的输入光束, 第 k 阶的位相 ϕ_k' 为

$$\phi_k' = -\pi + \frac{632.8}{\lambda'} (\pi + \bar{\phi}_1) \quad (11)$$

将不同波长代入(11)式, 有 $\phi_1(r_1) = \phi_k'$, 由此, 由公式(3)和公式(4)得到与不同波长相对应的输出振幅分布。

3 原 DPE 设计参数

为便于对比, 首先, 给出原 DPE 设计参数如下:

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

4 波长变化的模拟结果

在已设计好的用于氦氛激光高斯光束输入环输出的 DPE 基础上, 我们改变输入波长值, 研究了不同波长对整形效果的影响。

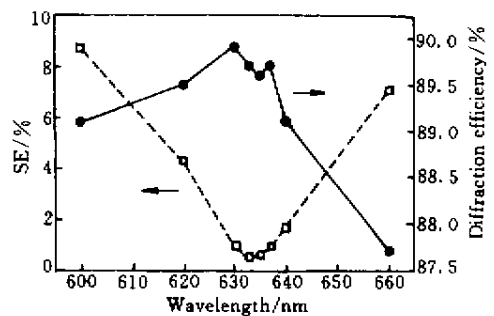


图 1 不同波长值的 SE 值和衍射效率 ($L = 165 \text{ mm}$)

Fig. 1 SE and diffraction efficiency with various wavelength at $L = 165 \text{ mm}$

图 1 显示了在 DPE 与输出平面的间隔 (L) 为设计值时不同波长值的环上均匀性的均方误差 SE 值和衍射效率, 实线代表衍射效率, 虚线代表 SE 值。从图中不难看出, 当 $L = 165 \text{ mm}$ (设计值) 时, 若输入波长在 632.8 nm 的纳米级附近波动, 环上均匀性和衍射效率都比较好。计算结果表明: 当输入

光波长处于 630 ~ 637 nm 的范围内,环上均匀性的均方误差 SE 不大于 1%,衍射效率不低于 89.6%。波长范围再扩大一些,从 620 ~ 660 nm,衍射效率不低于 87.7%。

图 2 是在 $L = 165$ mm 输入波长为 660 nm 的光束经 DPE 衍射后得到的输出振幅;因为系统具有圆对称性,横坐标选为半径,横坐标为 0 的点在光轴上。此输出的环上均匀性的均方误差 $SE = 7.1%$;衍射效率为 87.7%。环面上的振幅比设计的输出振幅抖动大,其环面中心偏外部振幅抖动很大,在环空心部的振幅比设计值略大一些。

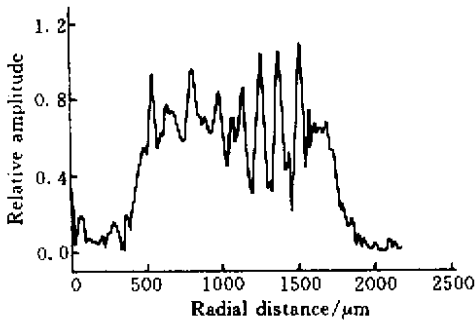


图 2 经 DPE 衍射后输出振幅的分布(输入波长为 660 nm, $L = 165$ mm)

Fig.2 Output amplitude distribution generated by the designed DPE with $\lambda = 660$ nm and $L = 165$ mm

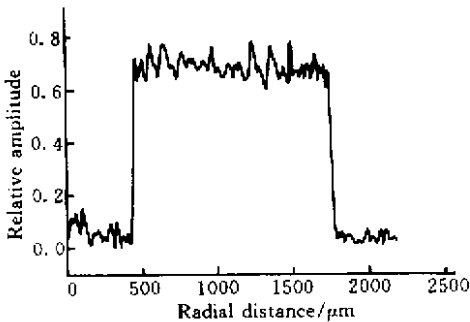


图 3 经 DPE 衍射后输出振幅的分布(输入波长为 635 nm, $L = 165$ mm)

Fig.3 Output amplitude distribution generated by the designed DPE with $\lambda = 635$ nm and $L = 165$ mm

图 3 是 $L = 165$ mm 输入波长为 635 nm 的光束经 DPE 衍射后得到的输出振幅;其环上均匀性的均方

误差 $SE = 0.61%$,衍射效率为 89.6%。与设计模拟结果比较,其环面中心偏外部振幅有抖动,环空心处振幅变化甚微。

由模拟计算可知:随着输入波长偏离设计所需波长值的增加,输出环面内侧和偏外部振幅抖动加大,环空心处振幅变化不大。

同时,我们研究了在 L 值随输入波长的变化而变化的情况下 DPE 的整形效果。选择 L 值与输入波长 λ' 间满足的关系式为

$$L = L_0 \times \lambda_0 / \lambda'$$

其中 L_0 为设计值, λ_0 为设计所需的光波长。

图 4 显示了在 $L = 165 \times 632.8 / \lambda'$ (mm) 对不同波长值的环上均匀性的均方误差 SE 值和衍射效率,实线代表衍射效率,虚线代表 SE 值。从图中不难看出,当改变输入波长且 L 值也随之改变 ($L = L_0 \times \lambda_0 / \lambda'$ (mm)) 时,波长在 632.8 ± 37 (nm) 的范围内波动,环上均匀性的均方误差 SE 不大于 1%,衍射效率不低于 89.4%。

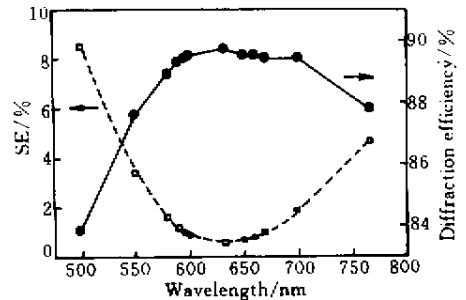


图 4 不同波长值的 SE 值和衍射效率 ($L = 165 \times 632.8 / \lambda'$ (mm))

Fig.4 SE and diffraction efficiency with various wavelength at $L = 165 \times 632.8 / \lambda'$ (mm)

图 5(a)是在 $L = 158$ mm 输入波长为 660 nm 的光束经 DPE 衍射后得到的输出振幅;其环上均匀性的均方误差 $SE = 0.81%$;环面上的振幅比设计的输出振幅抖动大,其环面中心偏外部(图中 A 处)振幅有下陷;在环空心部的振幅比设计值大。

图 5(b)是在 $L = 174$ mm 输入波长为 600 nm 的光束经 DPE 衍射后得到的输出振幅;其环上均匀性的均方误差 $SE = 0.91%$;衍射效率为 89.5%。在环面内侧边缘处,振幅幅值明显突出,环空心处振幅抖动加大。

输出振幅模拟结果表明:针对输入光束波长为 632.8 nm 设计的基模光束整形为环光束的 DPE

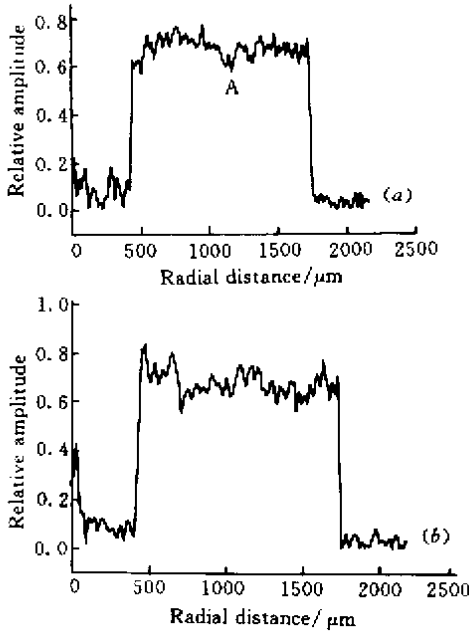


图 5 经 DPE 衍射后的输出振幅分布
 (a) 输入波长为 660 nm ; (b) 输入波长为 600 nm
 Fig.5 Output amplitude distribution generated by the designed DPE with $\lambda = 660$ nm(a) and 600 nm(b)

而言,在当改变输入波长且 L 值也随之改变 ($L = L_0 \times \lambda_0 / \lambda'$ (mm), L_0 为设计值, λ_0 为设计所需的光波长)时,随着波长的增大,输出环面中心偏外部振幅下陷幅度加大,环空心处振幅抖动也加大,但外径大小不变,随着波长的减小,输出环面内侧边缘处振幅幅值上升更突出,环空心处振幅抖动也更大,但内、外径大小不变。这是由于公式(4)中所表达的光学系统变换函数 $\mathcal{Q}(r_1, r_2)$ 引起的。

5 实验装置

为了实验观察不同输入光通过上述光束整形器的衍射效果,同时,实验观察不同的输入光强分布对光束整形器整形效果影响,我们利用 LBA-100A 光束质量分析仪,测量输出强度分布。

实验装置图如图 6 所示,半导体激光器发出的激光束经光阑,被 DPE 衍射,再经 CCD 接收,最后,由 LBA-100A 光束质量分析仪测量半导体激光衍射光强分布。

半导体激光的波长为 660 nm,功率为 0.022mW,光斑半径为 1.93 mm,CCD 探测面积为 6 mm \times 9 mm,像素点总数为 565 \times 350。

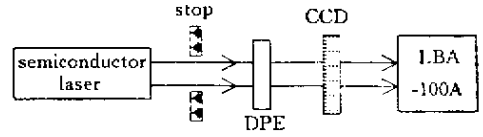


图 6 半导体激光实验装置
 Fig.6 Experimental set-up with semiconductor laser

6 实验结果

在图 6 中无 DPE 时,测得半导体激光的输出强度分布如图 7 所示。高斯拟合的光斑半径为 1.93 mm。

由图 7 可知,其光强分布不如氦氖光均匀,右上方强度较弱。

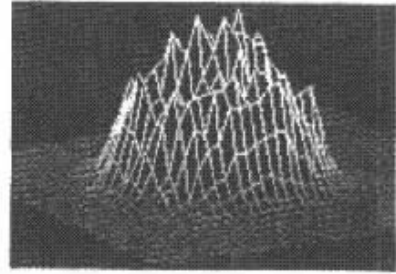


图 7 半导体激光的输出强度分布
 Fig.7 Intensity distribution of semiconductor laser

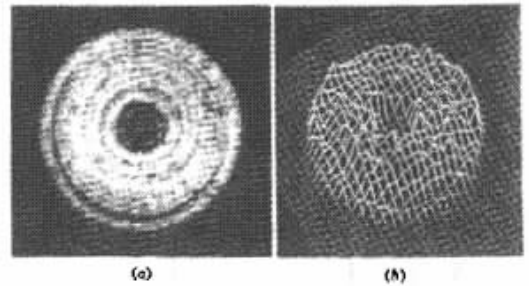


图 8 $L = 165$ mm 处的光强分布
 (a) 强度分布灰度图 (b) 强度分布三维图
 Fig.8 Diffractive intensity distribution at $L = 165$ mm
 (a) gray scale map ; (b) 3D surface

在光束整形器与输出平面的间隔为设计值 ($L = 165$ mm) 处,测得光强分布如图 8 所示。显然,得到了环输出,但均匀性不如氦氖光束环的输出^[4],测得环内径(半径)为 0.459 mm,比氦氖光束环输出内径大 0.027 mm,测得环外径(半径)为 1.728 mm,与氦氖光束环输出外径相同,环面外侧有明显暗圈。上述这些现象,一方面是由于半导体激光波长大于氦氖光波长,另一方面是由于光斑半径略大于设计

值。另外,由图 8 可见,图右上方光强较弱,这是由于上面提及的激光器输出状况造成的。

波长为 660 nm,光斑半径为 1.93 mm 的半导体激光器,通过光束整形器可以得到环状输出,但其内径大于氦氖激光整形所得的内径;与第 4 节的理论模拟基本吻合。

7 结 论

理论模拟结果表明(1)在 L 值始终为设计值时,当输入光波长处于 630 ~ 637 nm 的范围内,环上均匀性的均方误差 SE 不大于 1%,衍射效率不低于 89.6%。(2)当改变输入波长且 L 值也随之改变($L = L_0 \times \lambda_0 / \lambda'$ (mm))时,波长在 632.8 ± 37 (nm) 的范围内波动,环上均匀性的均方误差 SE 不大于 1%,衍射效率不低于 89.4%。

实验结果显示,波长为 660 nm,光斑半径为 1.93 mm 的半导体激光器,通过光束整形器可以得到环状输出,但此内径大于氦氖激光整形所得的内径,环面外侧有明显暗圈,与第 4 节的理论模拟基本相吻合。

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 F. S. Roux. Intensity distribution transformation for rotationally symmetric beam shaping. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(5): 529 ~ 536
- 3 D. Veron, H. Ayrat, C. Gouedard *et al.*. Optical spatial smoothing of Nd-glass laser beam. *Opt. Commun.*, 1988, **65**(1): 42 ~ 46
- 4 Li Qi, Gao Hui-de, Dong Yun-hua *et al.*. Study of ring-shaped intensity produced by BOE with the distance between input and output. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(4): 312 ~ 316 (in Chinese)
- 5 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
- 6 Gao Hui-de, Li Qi, Dong Yun-hua *et al.*. Study on binary optical element for Gaussian beam shaping to thick annulus. *J. Optoelectronics Laser* (光电子·激光), 1998, **9**(3): 184 ~ 186 (in Chinese)
- 7 Fan Zhong-wei. Binary optical elements in optical systems. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 1995, **3**(2): 1 ~ 9 (in Chinese)