

利用衍射光学元件增加出射光束的焦深

陶少华 田永红* 陈培锋 丘军林
(华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)
(* 荆州师专物理系 荆州 434100)

摘要 在入射光束的孔径受限制的情况下,利用衍射光学元件来增加激光束的焦深。首先确定光阑孔径的大小,然后利用 Y-G 算法,在已知入射和出射光波函数的条件下,计算出衍射光学元件的位相分布。计算结果表明焦深可以比未用衍射光学元件时增加一半或更多。

关键词 衍射光学元件 焦深 整形

1 增加焦深的意义

长焦深光束在激光加工中有很重要的应用。在激光切割中,焦深短的光束只适合于切割薄的工件,切割厚断面材料需长焦深光束,在激光打孔中,也同样有这样的问題,较深的孔需要较长焦深的光束进行加工^[1]。选用不同焦距的透镜虽然可以改变焦深,但对光斑的大小又提出了要求,透镜焦距短,其聚焦光斑小,但焦深也较短;透镜焦距长,虽然焦深较长,但聚焦光斑也会变大^[2]。使用衍射光学元件,它不但可以调节激光的焦深,而且可以使输出光束的出射平面的光强分布按预定的设计输出。

2 用衍射光学元件增加焦深的原理

一束发散角为 θ 光束直径为 D 的激光束,经过焦距为 f 的透镜聚焦后,在焦平面上的光点直径 d 以及焦深 Δz 可表示为^[3]:

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi D} = f \theta$$
$$\Delta z = \pm \frac{0.32\pi d^2}{\lambda}$$

此处焦深 Δz 定义为光斑直径变化 5% 两焦斑之间的距离。若使 D 变化为 ηD , $\eta > 1$, 则变化后的焦深 Δz 为:

$$\Delta z = \pm \frac{0.32\pi d^2}{\lambda} = \pm \frac{0.32\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{4\lambda f}{\pi D}\right)^2 = \frac{\Delta z}{\eta^2}$$

焦深的变化量为:

$$\delta z = \left| \frac{\Delta z - \Delta z}{\Delta z} \right| = 1 - \eta^2$$

焦深的变化量是随入射孔径的减小而逐渐增大的, 但在实际的考虑中, 光束能量的有效使用率却很重要, 既要考虑光束通过光阑后的能量损失率不能太多, 又要使光束的焦深达到预定的要求, 衍射光学元件是使同一束高斯光束经许多微小的台阶衍射而整形的。我们可以首先假定光阑的通光率在 0.632~0.865 之间, 实际的效果要进一步的运算来验证。

3 衍射光学元件的焦深

设入射光束的腰斑半径为 ω , 衍射光学元件的孔径为 D , D_0 为入射光束的实际口径大小值, 二者的比例系数为 $\eta = \frac{D_0}{D}$ 。

入射光束和出射光束的分布, 二者之间通过传输函数联系起来:

$$\begin{aligned} u_2(\rho, z) &= \int_0^{R_q} G(\rho, r) u_1(r, z) dr \\ &= \frac{\exp(ikz)}{\sqrt{i\lambda z}} \int_0^{R_q} u(r, z) \exp(iQ) \exp\left[\frac{ik}{2z}(\rho - r)^2\right] dr \end{aligned}$$

$z = f$, f 是从衍射光学元件到出射平面的距离。利用 Y-G 算法^[4]可以求出衍射光学元件表面的位相分布 Q_n 。

现在来看出射光束在预定输出平面附近的光强分布情况:

$$u_2(\rho, z) = \frac{\exp(ikz)}{\sqrt{i\lambda z}} \int_{r_{n-1}}^{r_n} u_1(r, z) \exp(iQ_n) \exp\left[\frac{ik}{2z}(\rho - r)^2\right] dr$$

输出面上的光强分布和光斑大小为:

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{\int_0^{\rho_{02}} |u_2(\rho, z + \Delta z_2)|^2 \rho d\rho}{\int_0^{\rho_{01}} |u_2(\rho, z + \Delta z_2)|^2 \rho d\rho} = \frac{\int_0^{\rho_{02}} |u_2(\rho, z - \Delta z_1)|^2 \rho d\rho}{\int_0^{\rho_{01}} |u_2(\rho, z - \Delta z_1)|^2 \rho d\rho} \quad 0.5$$

$$\frac{\rho_{01}}{\rho_0} = 0.95, \quad \frac{\rho_{02}}{\rho_0} = 0.95$$

$$\delta z = \Delta z_1 + \Delta z_2$$

其中 ρ_0 是预定输出平面上光斑的大小, ρ_{01} 和 ρ_{02} 是偏离预定输出平面 $z + \Delta z_2$ 和 $z - \Delta z_1$ 时的光斑大小, δz 是焦深, 光斑定义为光斑边缘与中心光强大于等于 0.5 的区域。

设衍射光学元件输入和输出平面上函数分布分别为:

$$u_1(r, z) = \exp\left(-\frac{r^2}{w_1^2}\right), \quad r \in (0, D_0)$$

$$u_2(\rho, z) = C, \quad \rho \in (0, w_2)$$

利用 Y-G 算法获得的光强分布和衍射光学元件的位相分布分别为:

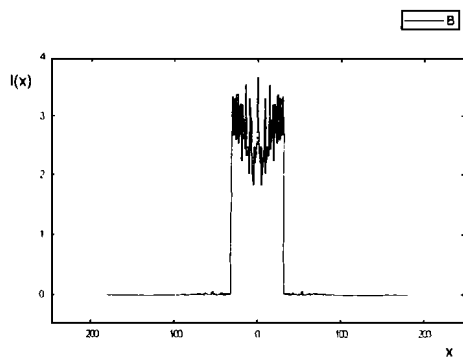


Fig 1 Intensity distribution on the focal plane

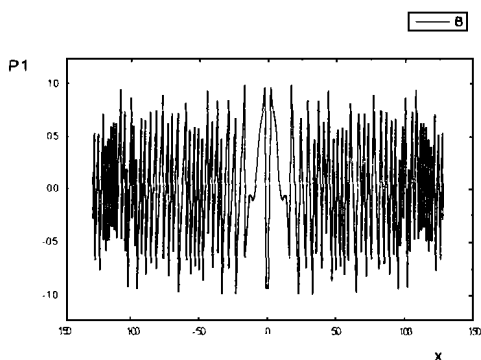


Fig 2 Phase distribution of the DOE

计算中取样点的数目为 256, 总的平方误差 SSE 为 1.79%, 设计的焦距为 10.0mm, 入射光波长为 $10.6\mu\text{m}$, 高斯光束的腰斑半径为 2.5mm。

在入射光口径不同的情况下, 沿光轴传播方向的光强分布分别如下:

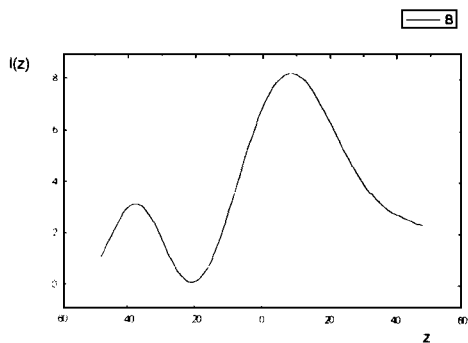


Fig 3 $rd = 2.5\text{mm}$, $x = 0.0\text{mm}$, the axial intensity distribution

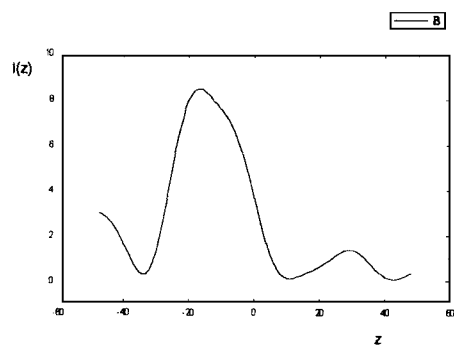


Fig 4 $rd = 3.5\text{mm}$, $x = 0.0\text{mm}$, the axial intensity distribution

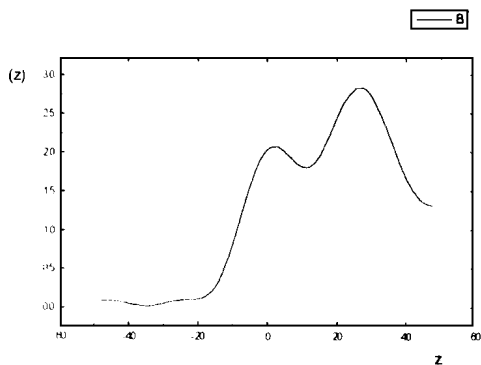


Fig 5 $rd = 2.5\text{mm}$, $x = \frac{\omega}{2}$, the axial intensity distribution

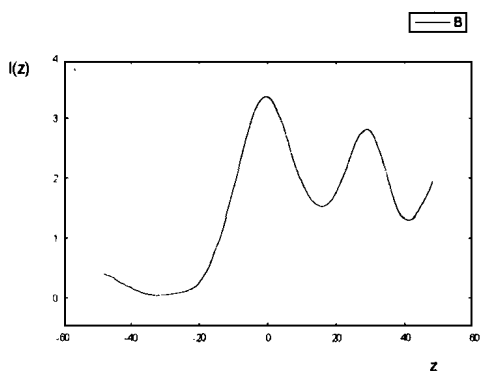


Fig 6 $rd = 3.5\text{mm}$, $x = \frac{\omega}{2}$, the axial intensity distribution

rd 是通光口径的大小, ω 是光会聚的光斑半径, z 轴的取值距离是 9.5mm - 10.5mm。由图可看出, 在通光口径改变的情况下, $rd = 3.5\text{mm}$ 时轴向的光强度减得很快, 与 $rd = 2.5\text{mm}$ 时的光强相比焦面附近的起伏窄了一些, 按前述的焦深的定义, $rd = 2.5\text{mm}$ 时的焦深是 3mm 左右, $rd = 3.5$ 时的焦深是 2mm 左右。

上图所示的光强沿轴的分布曲线, 所用的衍射光学元件由同样焦距的聚焦透镜所代替, 其它条件不变。从图中可以看出, 此时由会聚透镜所得到的焦深远小于 1mm。由此可见, 牺牲部分光能量可以得到较大的焦深, 此时 $\eta = 0.85$ 。

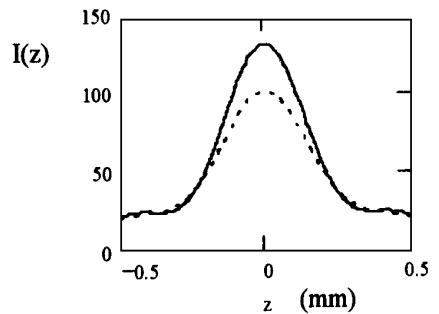


Fig 7 Relative distribution along the axial distance, the solid line presented as $x = 0.0\text{mm}$; the dashed line is $x = \frac{\omega}{2}, rd = 2.5\text{mm}$

参 考 文 献

- 1 蒋志平, 陆启生, 刘泽金 贝塞尔光束与激光打孔 光学技术, 1996, (1): 32~ 35
- 2 王家金主编 激光加工技术 北京: 中国计量出版社, 1992, 441~ 443
- 3 王家金主编 激光加工技术 北京: 中国计量出版社, 1992, 73~ 74
- 4 Yang Guozhen, Gu Benyuan, Tan Xin. Iterative optimization approach for the design of diffractive phase elements simultaneously implementing several optical functions J Opt Soc Am A, 1994, (11): 1632~ 1640

Methods of Improving a Laser Beam's Depth of Focus with Diffractive Optical Elements

TAO Shao-hua, TIAN Yong-Hong*, CHEN Pei-Feng, QIU Jun-Lin

(The State Key Laboratory of Laser Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(* Physics Department, Jingzhou Teachers College, Jingzhou 434100)

Abstract

Placing a diffractive optical element (DOE) on the incident laser beam to improve the depth of focus, the DOE'S aperture is variable. When the radius of the aperture changes, the depth of focus changes too. The DOE'S phase distribution can be determined by the input beam'S and the output beam'S amplitude distributions with a Y-G algorithm. The results of computing show that the depth of focus is much larger than that of without DOE.

Key words: Diffractive optical element (DOE), Depth of focus, Beam shaping

陶少华 男, 1970 年出生, 1992 年毕业于四川大学光电系, 获学士学位, 现在华中理工大学激光研究院攻读硕士学位, 主要从事衍射光学元件及高功率激光器的研究。