

文章编号: 1001-3806(2003)03-0190-03

“孔雀眼”波带片的长焦深特性研究

杨 静 高 峰 谢世伟 肖 啸 杜惊雷
(四川大学物理科学与技术学院, 成都, 610064)

摘要: 基于能量守恒原理, 利用追迹法、计算机编码设计了用作长焦深元件的“孔雀眼”波带片。对其作为长焦深元件的两个重要参量——轴向光强分布和沿轴向一定范围内聚焦中心光斑大小的变化进行了模拟分析, 得出了沿轴向一定范围内聚焦中心光斑大小基本恒定的结论。进行了实验验证, 为实际应用这种长焦深元件提供了依据。

关键词: “孔雀眼”波带片; 焦线; 长焦深
中图分类号: O439 **文献标识码:** A

Long focal depth characteristics of the “peacock eye” zone plate

Yang Jing, Gao Feng, Xie Shiwei, Xiao Xiao, Du Jinglei
(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Based on the energy conservation principle and the paraxial ray tracing method, the “peacock eye” zone plates are designed and encoded. The plates are used as the elements with long focal depth, whose two important parameters: the axial intensity distribution and the axial variation of the focused central spot size, are simulated and analyzed. At last, the constant central spot size within a finite focal segment is concluded and the corresponding experimental results are also illustrated.

Key words: “peacock eye” zone plate; focal line; long focal depth

引 言

衍射光学元件具有衍射效率高、功能灵活、易于多功能集成等传统光学元件不可比拟的优点, 特别是利用衍射光学元件可实现任意波面变换的特点, 可方便灵活地控制光束以实现多种光学功能, 为解决传统光学不能或很难解决的问题提供了新的方法, 具有广阔的应用前景。然而, 制作衍射光学元件需要利用各种微细加工技术, 如激光束或电子束直写制作掩模等, 其制作工艺复杂, 加工费用昂贵^[1]。

1871 年, 瑞利发明的波带片是一种最早出现的衍射光学元件^[2]。它的制作不像菲涅耳透镜需要使用多次套刻技术, 因此具有制作方便、价格低廉等优点。但是波带片的衍射将形成主焦点和一系列的次焦点, 这种多焦现象使其不能作为一种高质量的聚焦元件去代替普通透镜, 其应用范围受到了很大的限制。

作者简介: 杨 静, 女, 1977 年 12 月出生。硕士研究生。现主要从事分数傅里叶变换滤波方面的工作。

收稿日期: 2002-06-11; 收到修改稿日期: 2002-10-15

1993 年, Jaroszewicz 提出了一种广义波带片^[3]。这种波带片的相位分布不仅仅局限于许多同心圆组成的环带结构, 它还具有双曲型、椭圆型、线型、孔雀眼型等多种结构。通过不同的位相结构去调制入射光场, 可实现菲涅耳波带片无法实现的功能, 例如“孔雀眼”波带片可以将入射平行光聚焦成为轴线上焦线。由于不同结构的广义波带片可以利用计算机直接生成图形, 并经过缩拍制作而成。因此, 不需要采用复杂的光刻技术, 减少了制作难度, 从而可拓宽波带片的应用范围。

在“孔雀眼”波带片特殊聚焦现象的基础上, 作者提出将其作为长焦深元件的思想, 并对其作为长焦深元件的两个重要参量: 轴向光强分布和沿轴向一定范围内聚焦中心光斑大小的变化, 进行了模拟分析, 得出了沿轴向一定范围内聚焦中心光斑大小基本恒定的结论, 为实际应用这种长焦深元件提供了依据。最后, 制作了该波带片, 并在实验中验证了其聚焦特性。

1 “孔雀眼”波带片的位相分布

“孔雀眼”波带片具有非对称的环带相位结构,

类似于“孔雀眼”的形状,其位相分布函数^[3],可以采用基于能量守恒原理的光线追迹法得到^[4]。假设输入平面上沿 x 方向的面元与输出焦线上沿 z 轴的线元一一对应,如图1中 xOy 输入面上宽度为 dx 的阴影区与输出焦线上宽度为 dz 的阴影区就表示了这种对应关系。

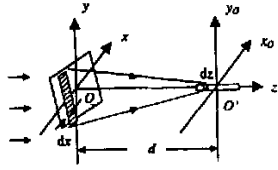


Fig. 1 The geometry of the “peacock eye” plate focusing into the focal segment

设入射平面波光强为 $P_s(x, y) = P_s(\text{常数})$,波带片孔径宽度为 A ,位相分布为 $\varphi(x, y)$,聚焦后形成在 $[d - L/2, d + L/2]$ 范围内的焦线, L 为焦线长度, d 为波带片与焦线中心之间的距离,沿焦线上的轴向光强分布为 $P(z) = P_z(\text{常数})$,则根据能量守恒原理得到:

$$\left. \begin{aligned} \int_{-A/2}^{A/2} P_s A dx &= \int_{d-L/2}^{d+L/2} P_z dz \\ \int_{-A/2}^{A/2} P_s A dx &= \int_{d-L/2}^{z(x)} P_z(z) dz \end{aligned} \right\} \Rightarrow z(x) = Lx/A \quad (1)$$

式中, $z(x)$ 即为 x 的坐标与 z 坐标的映射关系。在远轴近似条件 ($z \gg A/2$) 下,再利用位相函数导数与方向余弦的关系: $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = k \cos \alpha \approx -\frac{kx}{z(x)}$ 和 $\frac{\partial \varphi}{\partial y} =$

$k \cos \beta \approx -\frac{ky}{z(x)}$, 其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为波长。

积分后得到波带片的相位分布函数:

$$\varphi(x, y) = k \left[-\frac{y^2}{2(d + Lx/A)} - xA/L + \frac{dA^2}{L^2} \ln |Lx/A + d| \right] \quad (2)$$

对(2)式进行泰勒展开,当 $Lx \ll dA$ 时,

$$\varphi(x, y) = k \left[-\frac{x^2 + y^2}{2d} + \frac{Lx}{3Ad^2} \left(x^2 + \frac{3}{2}y^2 \right) + \frac{dA^2}{L^2} \ln d \right] \quad (3)$$

上式中第3项为常数项,对波带片的形状不发生影响,可以忽略不计,则得:

$$\varphi(x, y) = k \left[-\frac{x^2 + y^2}{2d} + \frac{Lx}{3Ad^2} \left(x^2 + \frac{3}{2}y^2 \right) \right] \quad (4)$$

从(4)式可以看出,当 L 趋向于0时,即为正弦波带片的相位函数,因此,“孔雀眼”波带片可看成是由于焦线具有一定长度而使正弦波带片相位函数上附加了一个位相因子。

2 计算机模拟分析

为了描述长焦深元件聚焦特性,一般用两个特征量:轴向光强分布和沿轴向一定范围内聚焦中心光斑大小的变化。在实际应用中,通常希望轴向光强分布均匀,且聚焦中心光斑大小在焦线范围内恒定。

在对“孔雀眼”波带片的聚焦特性进行模拟计算中,选择波带片有效孔径宽度 $A = 5\text{mm}$,波带片与焦线中心的距离 $d = 1000\text{mm}$,波带片的抽样点数为 512×512 。

2.1 位相编码生成波带片

将(4)式的位相函数编码^[5]后,利用计算机生成波带片的环带结构,如图2所示。从(4)式可以看出, L 越大,则第2项的影响越大,也就是说,环带结构的旋转对称性越差。设需要编码的复振幅为: $E(x, y) = A(x, y) \cdot \exp[i\varphi(x, y)]$, 则其透过率函数可写为: $t(x, y) = 1/2\{(1 + A(x, y)) \cdot \cos[\varphi(x, y)]\}$, 利用下式编码为2元结构:

$$t_{\text{enc}}(x, y) = \begin{cases} 0 & (0 \leq 1/2\{1 + \cos[\varphi(x, y)]\} \leq b) \\ 1 & (b \leq 1/2\{1 + \cos[\varphi(x, y)]\} \leq 1) \end{cases}$$

其中 $b = (1/\pi) \arcsin[A(x, y)]$ 。

图2a和图2b分别为 $L = 400\text{mm}$ 和 $L = 30\text{mm}$ 时编码后波带片的环带结构。

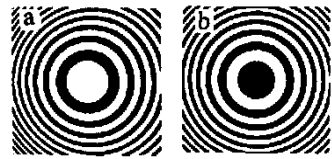


Fig. 2 The “peacock eye” zone plate
a— $d = 1000\text{mm}, L = 400\text{mm}, A = 5\text{mm}$
b— $d = 1000\text{mm}, L = 30\text{mm}, A = 5\text{mm}$

2.2 轴向光强分布

轴向光强分布表征了聚焦后光强的主极大沿轴向的变化情况,模拟中选择焦线长度 $L = 30\text{mm}$,如图3a所示。横坐标为 z 轴,纵坐标表示光轴上的光

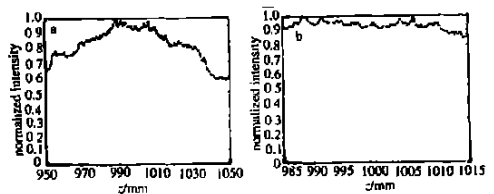


Fig. 3 a—the axial intensity distribution after zone plate focusing
b—the axial intensity distribution on the intensity profile

强大小。由于设计中以 $z = 1000\text{mm}$ 为焦线的中心位置,因此, 1000mm 左右的光强最大;在设计焦线的边缘,即 $z = 985\text{mm}$ 或 $z = 1013\text{mm}$,光强仅下降

了10%。图3b是焦线上的纵向光强分布。可以看出,焦线上的光强分布起伏小于15%。

2.3 横向光强分布

对于一个衍射受限系统,无法将入射光束聚焦到一个理想的点上,因此,在焦面上存在一个横向的光强分布,聚焦后中心焦斑的大小也就成为衡量其聚焦质量的参数。在这里,仍然选取焦线长度 $L = 30\text{mm}$ 进行模拟。图4即为不同距离时的横向光强分布。其中纵坐标表示光强大小,从图中可以直观地看到,在焦线范围内,不同距离处光强的变化很小。不同距离处的中心光斑大小如表1所示。在焦线范围内,光斑直径近似相等,而焦线之外的直径大约是焦线范围内的光斑直径的两倍多。因此,在实际应用中,对于要求精度不是特别高的焦线的设计,可以利用这种易于制作的波带片。

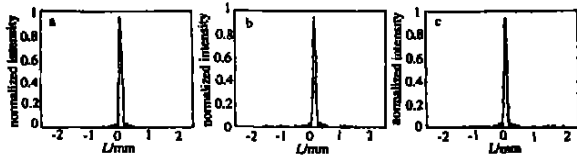


Fig. 4 The traverse intensity distribution at the different distance along z axis

a- $z = 990\text{mm}$ b- $z = 1000\text{mm}$ c- $z = 1010\text{mm}$

Table 1 The spot diameter at different diffraction distance

spot position z / mm	spot diameter d / mm	spot position z / mm	spot diameter d / mm
930	0.880626	1010	0.246575
950	0.479452	1015	0.254403
975	0.469667	1025	0.508806
985	0.292969	1050	0.552838
990	0.254403	1070	0.567515
1000	0.244618		

3 实验及结果

在实际制作“孔雀眼”波带片时,选取参数 $d = 1000\text{mm}$, $A = 5\text{mm}$, 激光波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$, 为了便于拍摄焦线,选取焦线长度 $L = 30\text{mm}$ 。经过计算机编码、打印、初缩、曝光、显影、定影、漂白后得到需要的“孔雀眼”波带片。

3.1 焦斑的拍摄

实验中,利用平面波入射到波带片,将 CCD 置于不同距离 z 处,记录不同聚焦位置的光斑图样。由于焦线的中心位置在 1000mm 左右(即 $d = 1000\text{mm}$),所以在 1000mm 附近取样,得到以下两组图样。如图5可以看出,两副图中心光斑直径差

别不大。

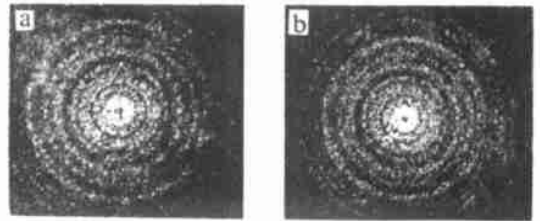


Fig. 5 Traverse intensity distribution after zone plate focusing at the distance of a-985mm b-1000mm

3.2 “孔雀眼”波带片焦线的摄取

为了拍摄聚焦在光轴某一段上的焦线,这里在聚焦光路中设置一烟室,使聚焦后的光通过烟室,利用烟雾对光的散射作用摄取焦线,如图6所示。

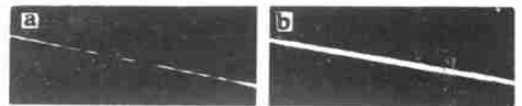


Fig. 6 The experimental intensity profile along the axial segment a-after zone plate focusing b-after rectangle aperture diffracting

由图6a可见平面波经波带片后逐渐聚焦的过程。左端较粗的是尚未完全聚焦的光束,在传播过程中不断变细,形成中间较细的亮线,即焦线。图6b为平面波经过波带片同样大小的矩孔(未经波带片)后,衍射距离 1000mm 左右时光束形状,它没有任何聚焦作用。

3.3 对焦线的分析

图7横坐标表示沿轴向的距离,纵坐标表示归一化后光束的直径。实线是对图6a拟合之后得到的归一化直径沿轴向变化的曲线,虚线是计算机模拟得到的归一化直径沿轴向变化的曲线。可以看出,在设计范围之外,两条曲线差别较大;在设计焦线范围($985\text{mm} \sim 1015\text{mm}$)内,两条曲线基本重合。

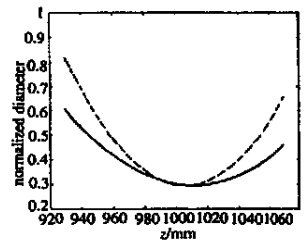


Fig. 7 Traverse normalized diameter along the axial segment

4 结论

在“孔雀眼”波带片这种特殊聚焦现象的基础上,提出将其作为长焦深元件的思想,并对其作为长焦深元件的两个重要参量(即轴向光强分布和沿轴向一定范围内聚焦中心光斑大小的变化)进行了模拟分析,从而得出了沿轴向一定范围内聚焦中心光斑大小基本恒定的结论,这为实际应用这种长焦深元件提供了依据。由于两个台阶的波带片简单易

取间隙宽度为 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm 处的焊缝截面, 如图 7 中各图所示。从图 7 可看出, 除了间隙宽度很小 ($S = 0.1\text{mm}, 0.2\text{mm}$) 的情况外, 通过控制焊接速度可以获得良好的焊缝成形。通过调节焊接速度控制金属填充量焊接变坡口间隙的焊缝全长外观如图 8 所示。



Fig. 8 Appearance of the full weld obtained by controlling welding speed to adapt for variable gap width

2.3 两种方案结果比较及分析

比较图 4 和图 7 可以发现, 当坡口间隙发生变化时, 通过调节送丝速度和焊接速度两种方法均可控制实际的金属填充量, 并在大多数情况下可获得优良的焊缝成形。但坡口间隙过大时 ($S > 0.5\text{mm}$), 调节送丝速度的方法不理想 (见图 4e), 以调节焊接速度控制金属填充量方法相对较好 (见图 7e); 当坡口间隙过小时 ($S < 0.2\text{mm}$), 调节焊接速度不理想 (见图 7a、图 7b), 以调节送丝速度控制金属填充量方法相对较好 (见图 4a、图 4b)。

产生上述现象的原因, 可以做如下分析。

(1) 当坡口间隙较大时, 在焊接速度不变的条件下, 由于填充坡口需要的金属量较大, 因此对应送丝速度较大。国外许多研究都已证明: 填充焊丝对激光束有反射作用, 而且送丝速度越大反射率越高^[1]。送丝速度太大时焊丝对激光反射过大, 会使焊接过程稳定性下降, 恶化焊缝成形。所以, 此时不宜用提高送丝速度的方法来控制金属填充量, 而应在合适的送丝速度下, 通过调整焊接速度来控制金

属填充量。

(2) 当坡口间隙较小时, 在送丝速度不变的条件下, 对应的焊接速度较大, 造成焊接线能量过分减小, 不利于熔池的稳定建立, 影响了焊缝成形。所以, 此时不宜用提高焊接速度的方法来控制金属填充量, 而应在合适的焊接速度下, 通过调整送丝速度来控制金属填充量。

由上可见, 根据检测到的坡口间隙宽度, 选择性地控制送丝速度或焊接速度, 就可保证在变坡口间隙激光填丝焊接中获得全过程良好的焊缝成形。

3 结 论

(1) 设计的以双 80c51 单片机系统为核心的激光填丝焊控制系统具有高精度、高稳定性的特点, 可满足激光填丝焊接中对送丝和焊接速度实时快速、高精度控制的要求。(2) 根据检测到的坡口间隙宽度, 选择性地控制送丝速度或焊接速度, 可保证在变坡口间隙激光填丝焊接中获得全过程良好的焊缝成形: 对接间隙宽度较小时, 调整送丝速度来保证焊缝成形的方法优于调整焊接速度; 对接间隙宽度较大, 所需送丝速度过大时, 调整焊接速度保证焊缝成形的方法优于调整送丝速度。(3) 为了满足焊缝成形的要求, 焊丝填充量应按对接间隙体积再上浮 10% 计算。

参 考 文 献

(上接第 192 页)

制, 价格便宜, 有实际应用价值。

参 考 文 献

[1] 高峰, 朱建华, 黄奇忠 *et al.* 中国激光, 2001, 28(6): 556~558.

[1] Diltner U, Fuest D, Scheller W. *Opti & Quant Electron*, 1995, 27: 1181~ 1191.
[2] 左铁钊主编. 第 4 届全国激光加工学术会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 18~ 22.
[3] 文晓江, 刘 春, 赵 琳 *et al.* 传感器技术, 2001, 20(5): 41~ 43.

[2] 杨国栋, 顾本源. 物理, 1994, 23(4): 200~ 205.

[3] Jaroszewicz Z, Kolodziejczyk A, Mouriz D *et al.* *J Modern Optics*, 1993, 40(4): 601~ 612.

[4] Bryngdahl O. *J O S A*, 1974, 64(8): 1092~ 1099.

[5] 虞祖良, 金国藩. 计算机全息图. 北京: 清华大学出版社, 1984.