

一维纯位相线成像衍射光学元件的计算*

王润文 叶超**

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 报道以一维平面阶梯条形纯位相结构, 用等光程补偿的物理概念出发, 计算了单线与双线象的衍射光学元件的多种构形, 获得了与理想衍射线象符合的光强分布; 同时发现双线象时会出现噪音光强小峰, 这在精确成像时仍是要设法避免的.

关键词 衍射光学元件, 线成像.

引 言

衍射光学元件(DOE)是近年发展起来的一类薄型振幅-位相型光学元件. 随着微细加工技术的发展, 越来越受广泛的注意^[1,2]. 这类元件可完成复杂图形成像过滤过程, 因而人们对它的物理设计与成形方法进行多种途径的探索研究^[3~5].

本文主要研究平面阶梯型纯位相元件, 采用等光程纯位相条形结构的概念, 计算了一块厚度小于 0.2 mm 的线成像透镜, 对单线和双线聚焦成像作了详细分析, 结果表明, 象面的光强分布接近理想衍射斑分布, 表明这一方法是十分有效的.

2 一维单线象衍射光学元件计算

当一平面匀振幅分布的光波垂直射向待计算的衍射光学元件上, 若把光学元件等分成上百个单元, 各个单元引入不同的位相补偿, 然后对射入该元件的光束通过各个单元的衍射积分迭加后求出确定的象面位置的光强分布. 计算中假设光学元件口径为 5 mm, 焦距 L_0 为 50 mm, 如图 1 所示. 各条形单元具有不同的厚度补偿, 以调整光通过各个单元后到达焦点 P 的位相差为 2π 的整数倍. 为此, 光通过第 k 个单元后到达 P 点的光程与最边缘点到达 P 点的光程差应为 $\Delta l_k = L_N - [l_k$

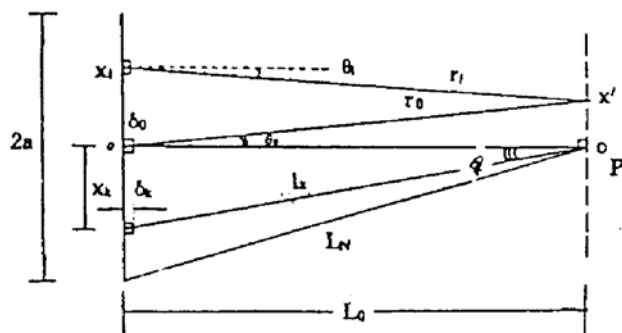


Fig. 1 Schematic diagram. (The caliber of the DOE is 5 mm, which is divided into many elements. The focal length is 50 mm)

* 本工作得到 1993 年上海市科委自然科学基金资助.

** 量子光学实验室.

收稿日期: 1993 年 10 月 19 日; 收到修改稿日期: 1993 年 12 月 7 日

$+(n-1)\delta_k/\cos\theta_k]=0$, 则

$$\delta_k = (L_N - l_k) \cos\theta_k / (n-1) \quad (1)$$

式中 l_k 为未补偿厚度时第 k 个单元与 P 点之间的距离, L_N 为最边缘点与 P 点间距离, δ_k 为第 k 个单元应补偿的厚度, n 取 1.52 为元件材料的折射率, λ 为光波长, 取 632.8 nm, N 为整数.

对于单线成象的情况, 把元件分割成 13 个条形单元, 单元宽度为 403.2 μm , 按(1)式计算出各个单元应补偿厚度 δ_i , 如图 2(a)所示, 图中厚度的数值表示为波长 λ 的倍数. 可以看到, 元件两边较薄, 中心处最大厚度仅为 0.15 mm, 象纸张一般薄. 对于设计的元件, 开始时

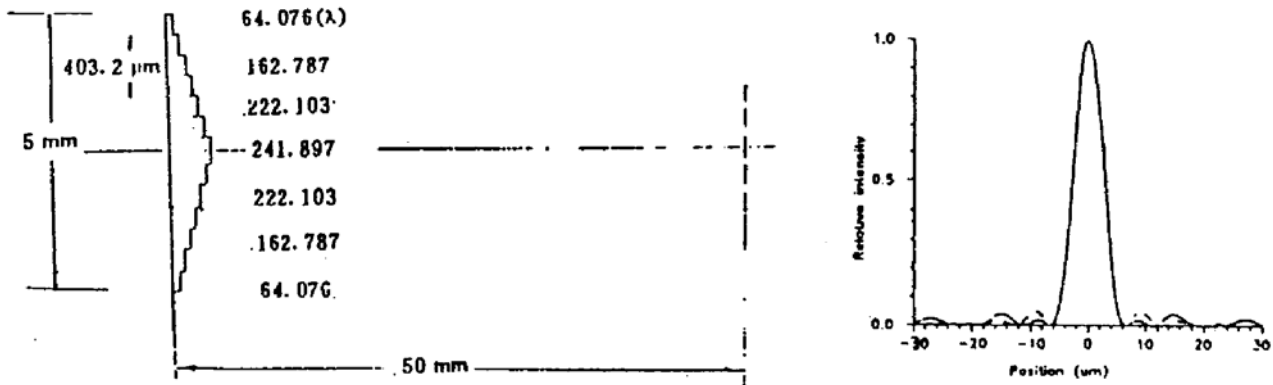


Fig. 2 (a) Thickness compensation for each element. (The DOE is divided into 13 elements, and the width of the element is 403.2 μm . The values of the thickness are indicated as times of the wavelength.

(b) Calculated light intensity distributions on the focal plane. Solid line corresponds to the DOE divided into 13 elements, and dashed line corresponds to that divided into 395 elements with the 12.6 μm of the element width)

进行线成象计算, 如图 1 所示

$$r_0 = \sqrt{L_0^2 + x'^2} + (n-1)\delta_0/\cos\theta_0 \quad (2)$$

$$r_i = \sqrt{L_0^2 + (x_i - x')^2} + (n-1)\delta_i/\cos\theta_i \quad (3)$$

这里, r_0 , r_i 分别为光从中心处 x_0 及 x_i 到达象平面上 x' 点的光程, 那么光通过整个衍射光学元件后到达 x' 点处的振幅 $A(x')$ 应是各单元光振动传播到 x' 点的叠加,

$$A(x') = \sum \exp\{ik[r_i(x') - r_0(x')]\} \quad (4)$$

这里因为各单元为等亮度, 归一化光振幅为 1, 所以, x' 点总的光强度 $I(x')$

$$I(x') = |A(x')|^2 \quad (5)$$

象平面上光强分布的计算结果如图 2(b)所示. 图中实线表示元件分割成 13 个条形单元的情况, 而虚线表示分割成 395 个单元, (单元宽度为 12.6 μm), 显然, 在确定位置的象平面上的光强分布呈衍射图象. 在焦点附近, 二种情况的中央亮斑强度分布完全一样, 表明若成象处理以中央亮斑为主时单元数目可以减少到只有 13 个, 也能达到较理想的效果, 这就更有利于元件的设计及加工制作. 但在中央亮斑外的副极大的强度分布仍然存在较明显的差异.

离焦面上的光强分布, 如图 3 所示. Δd 为离开焦平面的距离. 当成象屏从焦平面向前后移动时, 光的会聚作用越来越差, 离开焦平面越远, 中心光斑越来越大, 边缘部分的噪音光晕也越来越强. 当 $\Delta d \leq 0.18$ mm 时, 中央光斑光晕弥散较小, 仅为 5%, 但当 $\Delta d = 0.21$ mm 时, 弥散仍继续扩大, 弥散率近 10%, 当离焦继续增大到 $\Delta d = 0.30$ mm 时, 元件的聚光作用消失, 中央亮斑边缘变强, 中心点强度下陷, 产生了分裂现象. 所以这一元件有 ± 0.2 mm 的

焦深, 分辨率不致太大的下降.

本文也利用条形复阶梯位相补偿的方法对光学元件进行了设计. 把光学元件分成 395 个单元, 单元宽度为 $12.6 \mu\text{m}$, 元件宽度为 5 mm , 计算焦距仍为 50 mm , 经过计算, 元件的构形如图 4(a)所示的形状, 其中单元厚度数值为光的波长倍数. 各单元的厚度成三阶梯形式交替变化, 最厚处补偿高度仅 $3.65 \mu\text{m}$, 也不出现如图 2 所示的情况, 整个分布如均匀的锯齿状, 并以中轴线为对称, 作者也进行了衍射分布的计算, 焦平面上的光强分布仍然保持规则的衍射图象, 如图 4(b)所示. 和一般透镜的作用一样, 具有理想的光聚焦效果.

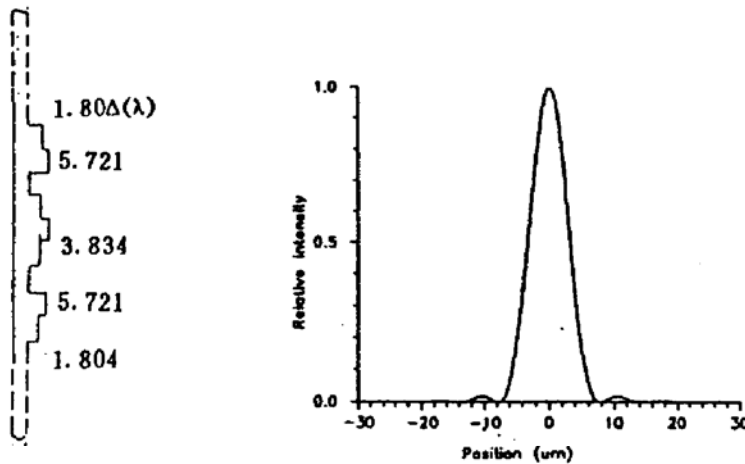


Fig. 4 (a) Thickness compensation designed using the phase compensation method of bar-shaped symmetrical three-ladder-like configuration. The DOE is divided into 395 elements with the $12.6 \mu\text{m}$ of width. The values of thickness for several elements are given as the times of the wavelength
(b) Calculated light intensity distribution on the focal plane

为了比较上面已计算的一维线成象衍射光学元件与理想一维成象的光强度分布, 后者可表示为^[6]

$$I = \sin^2(\pi a \sin \theta / \lambda) / (\pi a \sin \theta / \lambda)^2 \tag{6}$$

式中 a 为缝宽, θ 为中心点到观察点的方向与缝法线的角度. 可以看出, 两者的光强分布非常吻合, 如图 5 所示. 这充分表明, 采用位相补偿计算是十分有效的.

对于圆孔形结构的情况, 作者也计算了一维线象条形元件, 类似以上过程, 只要引入相位条的面积改正因子 $B(x_i)$ 为

$$B(x_i) = \sqrt{R^2 - x_i^2} / R \tag{7}$$

式中 R 为圆孔半径. 线象振幅 $A(x')$ 为:

$$A(x') = \sum_i B(x_i) \exp \{ ik[r_i(x') - r_0(x')] \} \tag{8}$$

线象的光强分布为:

$$I(x') = |A(x')|^2 \tag{9}$$

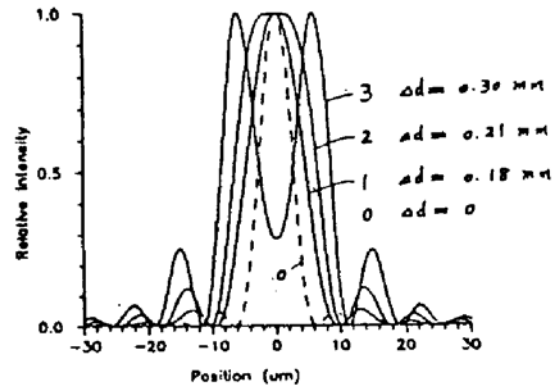


Fig. 3 Light intensity distributions on the plane out of the focal plane, Δd is the distance between the image surface and the focal plane. Curve 1, 2, 3, 4 correspond to the $\Delta d = 0, \pm 0.18 \text{ mm}, \pm 0.21 \text{ mm},$ and $\pm 0.30 \text{ mm}$ respectively

焦平面上的光强度分布的计算结果如图 6 所示. 可见, 圆形元件也达到理想的光聚焦作用.

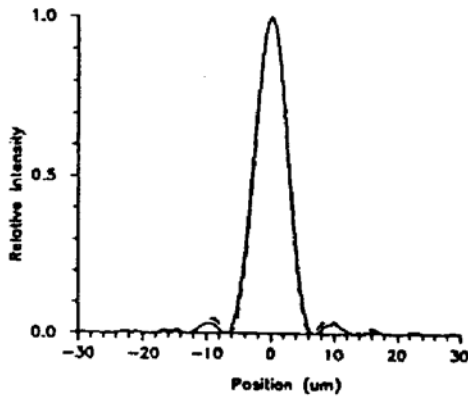


Fig. 5 Comparison of the calculated light intensity distribution on the focal plane for the bar-shaped configuration with what obtained from ideal diffraction disk. Solid line corresponds to the DOE, and dashed line corresponds to the ideal diffraction disk

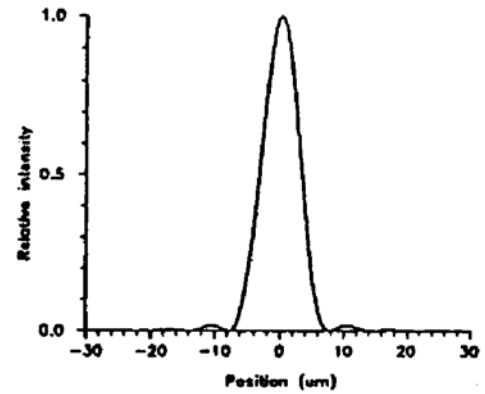


Fig. 6 Light intensity distribution on the focal plane for the circular aperture configuration of DOE

将圆孔与方孔的条形相位衍射的线象作比较, 图 7 分别示出了在焦平面处和离焦情况下的光强分布对比. 这里方孔宽 5 mm, 而圆孔直径为 5 mm. 在焦平面附近(图 7(a)), 圆孔结构的中央光斑弥散更小, 将比方孔元件有更大的焦深. 结果表明, 当离焦 $\Delta d = \pm 0.180$ mm 时两者中心光斑分布仍重合很好, 但离焦增加到 $\Delta d = \pm 0.210$ mm 时, 方孔光斑反而大于圆孔的情况, 而且边缘噪音光强也明显增强如图 7(b)、图 7(c)所示.

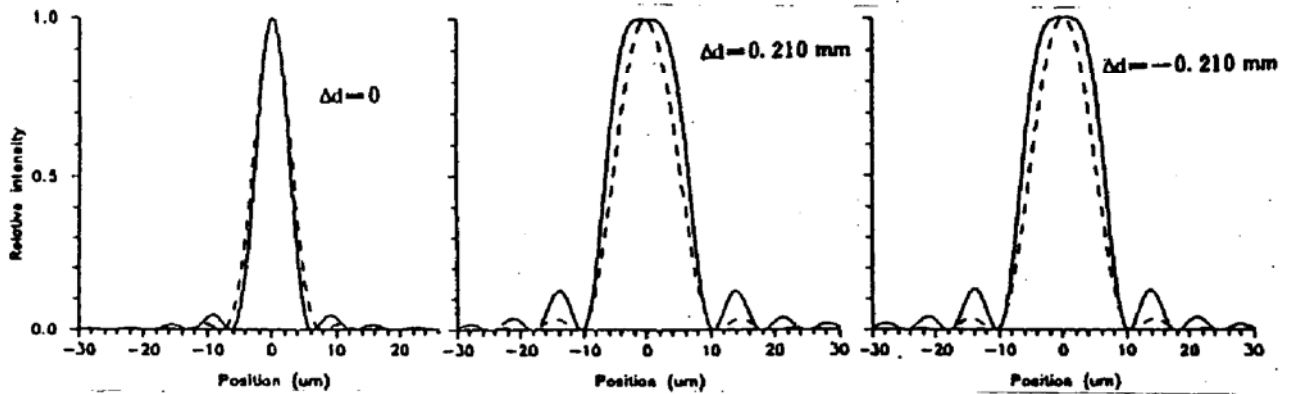


Fig. 7 Comparison of the line image of the bar-shaped phase diffraction DOE between circular aperture and square aperture configuration. The aperture of the circular configuration is 5 mm, and the width of the square aperture configuration is also 5 mm. Solid line corresponds to the square aperture, and the dashed line correspond to the circular aperture. Δd is the distance between the image surface and the focal plane
(a) $\Delta d = 0$ (b) $\Delta d = 0.210$ mm (c) $\Delta d = -0.21$ mm

3 一维双线象衍射光学元件的计算

本文试图计算成双线象的衍射光学元件. 把矩形孔径为 5 mm 的元件分割成 354 个等间距的相位条形单元, 条宽为 $14.08 \mu\text{m}$, 双线象的焦距为 50 mm. 当双线象距 $\Delta d = 394.24 \mu\text{m}$ ($\sim 400 \mu\text{m}$) 时, 设计的各个单元的厚度分布表明, 元件的中心最厚处厚度约为 0.15 mm. 图

8(a)(b)分别示出了双线象距 $\Delta d = 394.24 \mu\text{m}$, 2 mm , 时焦平面上的光强度分布. 当双线象距大约 $400 \mu\text{m}$ 时, 光强分布呈清晰的双线象, 显示了理想的双线聚光作用. 但当双线象距增大时, 双象中间将出现小周期噪音起伏, 双象距越远, 小周期噪音起伏越多.

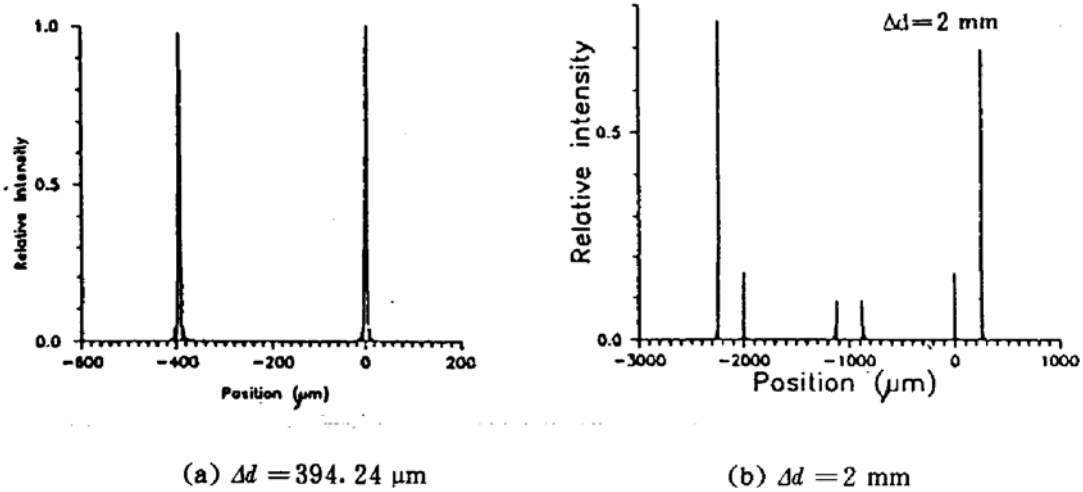


Fig. 8 Light intensity distribution on the focal plane for the double line-image DOE. Δd is the distance between two line images

此外, 也用条件复阶梯位相补偿的方法设计了双线象衍射光学元件. 当双线象间距 $\Delta d = 2 \text{ mm}$ 时, 计算得的光学元件构形示于图 9, 所取线象的等光程条件为:

$$\Delta l_i = L_0 + \delta_0(n - 1) - [l + \delta_i(n - 1)] = N\lambda \tag{10}$$

这里, δ_0 与 δ_i 分别为以元件中心对称的二个单元应补偿的厚度. n 为材料折射率, N 为整数. 图中示出的是双线象距为 2 mm 的部分单元厚度补偿值. 双线象距 Δd 为 $408 \mu\text{m}$ 时焦平面光强并分布的计算结果分别示于图 10 中. 图中也示出了局部的线强度分布, 图中仍可看到, 双线象之间出现一些小周期噪音光起伏, 但双线成像分布还是相当好的. 这种复阶梯法计算双线象衍射光学元件的设计方法较简易, 有可能向多线及二维象元件推广.

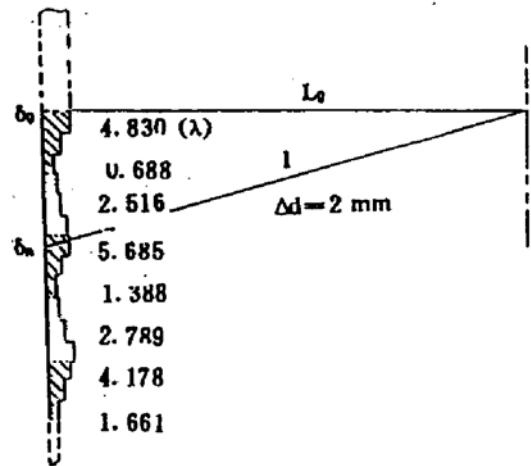


Fig. 9 Diagram of the thickness compensation designed using the phase compensation method of bar-shaped symmetrical three ladder-like configuration for the double line-image DOE. It is divided into 354 elements with $14.08 \mu\text{m}$ of element width. The distance between two line-images is 2 mm . The thickness for several elements are given with times of the wavelength

总之, 本文用条形相位补偿原理计算了单线与双线的成像元件; 单线衍射光学元件用密分格(395个)和粗分格(13个)进行计算, 比起已被应用的自动计算方法^[3]要直观和简单, 本文的结果与理想的夫琅和斐(Fraunhofer)方孔衍射分布作了比较, 结果相当吻合; 在双线象衍射光学元件计算了各种不同的双线象距, 其强度分布在某些间距会出现小周期噪音光强起伏, 产生这一现象的原因可能是等间隔元件周期光栅效应引起的, 作为更复杂元件高精度成像计算, 这是要求设法克服和消除的.

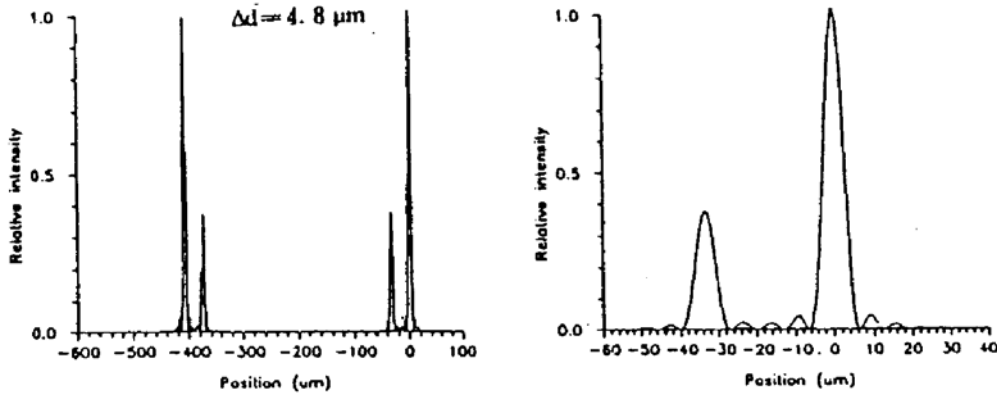


Fig. 10 Light intensity distribution on the focal plane for the double line-image DOE designed using the phase compensation method of symmetrical three-ladder-like configuration. The distance between two line-images, Δd , is $408 \mu\text{m}$

参 考 文 献

- [1] Alan Kathman, Eric Johnson, Binary Optics. New Diffractive Elements for the Designer's Tool Kit, *Photonics Spectra*, 1992, Sept. 125~132
- [2] Greg Behrmann, John Bowen, A Hybrid Approach Open Door for Diffractives Optics, *Photonics Spectra*, 1993, May, 159~170
- [3] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr, M. P. Vecchi; Optimization by simulated annealing, *Science*, 1983, **220**(4598) : 671~220
- [4] U. Mahlab, J. Shamir, H. J. Caulfield, Genetic algorithm for optical pattern recognition. *Opt. Lett.*, 1991, **16** (12) : 648
- [5] T. Yalagai, M. Geiser, R. Tian *et al.*, CAD system for CGH; and laser beam lithography. *Proc. SPIE*, 1991, **1555** : 8~12
- [6] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergemon Press, 1959, 39

Calculation of One-Dimensional Pure-Phase Line-Imaging Diffractive Optical Element

Wang Runwen Ye Chao

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 19 October 1993; revised 7 December 1993)

Abstract In this paper, we report the calculation of single line-image and double line-image for various configuration of diffractive optical element (DOE), which were designed as one-dimensional plane configuration of bar-shaped pure-phase from the principle of the optical equal-path compensation. The calculated light intensity distributions are in agreement with which from the ideal diffraction disk. There are some weaker noise-light peaks between the double line-image. It should be improved for high precision imaging.

Key words diffractive optical element (DOE), line-image.