

# 双波长共焦衍射光学元件分析与设计\*

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** 报道二维纯位相环带衍射光学透镜的研究。结果表明, 在确定位置的像平面的光强分布呈现相当理想的光聚焦作用; 同时以  $1.06 \mu\text{m}$  和  $0.6328 \mu\text{m}$  两种波长为例, 对双波长二维成像的环带衍射透镜进行分析计算, 结果表明二种波长的光束都能聚焦于同一像平面。这种元件可方便地用于非可见激光(例如  $1.06 \mu\text{m}$  或  $10.6 \mu\text{m}$ )中的对焦与光路调整。

**关键词** 衍射光学元件, 纯位相, 位相补偿。

## 1 引 言

衍射光学元件(DOE)是近年发展起来的一类薄型纯位相光学元件, 人们对它的物理设计与成形方法进行了多种途径的探索研究<sup>[1~5]</sup>。作者曾对一维纯位相线成像衍射光学元件进行过研究<sup>[6]</sup>, 并设计计算了一块厚度小于  $0.2 \text{ mm}$  单线与多线成像透镜。本文将介绍另一种纯位相型二维成像的等宽圆环带衍射光学元件, 与波带环不同, 后者环宽度随半径平方减小, 因此等宽圆环更有利于加工和应用。并在此基础上, 研究了一种可见光及红外光的双色环带衍射透镜, 以  $0.6328 \mu\text{m}$  和  $1.06 \mu\text{m}$  双波长为例, 计算了一块厚度小于  $0.6 \text{ mm}$  的双色二维成像透镜, 并对聚焦成像作了分析。结果表明, 二种波长的光束都能很好地同时聚焦于同一像面, 并呈理想的中心亮斑。而经典光学消色差透镜设计是不可能完成这样大波长差的色差校正。显然这种元件可以应用于非可见光激光的应用系统中。例如在 YAG 激光(波长  $1.06 \mu\text{m}$ )加工过程中的对焦, 利用这种元件就可以使可见光  $0.6328 \mu\text{m}$  同轴对焦与调整, 当然, 应用这一方法也可设计出  $\text{CO}_2$  激光  $10.6 \mu\text{m}$  波长与可见激光  $0.6328 \mu\text{m}$  消色差的衍射光学元件。

## 2 二维纯位相圆环带衍射透镜的分析与计算

设一平面光波垂直射向待计算的圆环带透镜上, 把这个光学元件等分成若干个单元, 每个单元为等宽度但半径不等的圆环, 光波透过各个圆环后对像面上同一点的振幅贡献各不相同。应用等光程原理各个单元(圆环)引入不同的位相补偿<sup>[7]</sup>, 然后对射入该元件的光束通过

\* 本工作受 1993 年上海市科委自然科学基金支持。

\*\* 中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学开放实验室。

收稿日期: 1994 年 6 月 30 日; 收到修改稿日期: 1994 年 10 月 6 日

各个圆环的光波在像面的衍射迭加后求出像面的光强分布。

如图 1 所示,  $(\zeta, \eta)$  为衍射元件平面,  $(x, y)$  为像面, 设两平面平行, 相距为  $L_0$ 。先讨论光波通过半径为  $r_{n_0}$  的  $Q$  点所在圆周后光振动到达像面上  $P$  点的相干迭加振动  $U_{r_n}(P)$ 。其中  $S_{n_0}$  为  $Q, P$  两点的空间距离,  $S_n$  为  $Q', P$  两点距离,  $Q'$  为  $Q$  圆周上与  $\eta$  轴夹角方向上任意一点。则

$$U_{r_n}(P) = \int_0^{2\pi} \frac{\exp [ik(s_n - S_{n_0})]}{S_n} d\varphi \quad (1)$$

假定  $L_0 \gg r, R$ , 则由几何关系并运算可得:

$$S_{n_0} \approx L_0 + \frac{1}{2} \frac{(r_{n_0}^2 + R^2)}{L_0} - \frac{r_{n_0}R}{L_0} \quad (2)$$

$$S_n \approx S_{n_0} + (r_{n_0}R/L_0)\varphi^2 \quad (3)$$

(3)式减(2)式代入(1)式得:

$$U_{r_n}(P) = \frac{1}{L_0} \int_0^{2\pi} \exp [ik(R/L_0)r_{n_0}\varphi^2] d\varphi = \frac{1}{L_0} \int_0^{2\pi} [R(P) + iI(P)] d\varphi, \quad (4)$$

(4)式实数部分和虚数部分分别为

$$R(P) = \int_0^{2\pi} \cos \left( \frac{kRr_{n_0}}{L_0} \varphi^2 \right) d\varphi, \quad I(P) = \int_0^{2\pi} \sin \left( \frac{kRr_{n_0}}{L_0} \varphi^2 \right) d\varphi, \quad (5)$$

现将物面(即元件平面)以光轴为中心划分  $n$  个等宽度圆环, 设内外半径分别为  $r_{n_1}$  和  $r_{n_2}$  的圆环时, 宽度很小, 即  $\Delta r = r_{n_2} - r_{n_1} \ll r_{n_2}$ , 则可认为窄带上透过光振动对像面上  $P$  点的贡献近似地表示为:

$$\bar{U}_{r_n}(P) = (r_{n_2} - r_{n_1})U_{r_n}(P) = \Delta r U_{r_n}(P) \quad (6)$$

由于各环带对像面任一点的光程不同, 应用文献[7]所提示的等光程原理来补偿位相, 使以光束通过各个圆环后到达焦点的位相差为零, 即

$$L_n = L_0 + \delta_0(n_0 - 1) = L_1 + \delta_1(n_0 - 1) = \dots = L_i + \delta_i(n_0 - 1) \quad (7)$$

式中  $L_n$  为最边缘一个圆环到达轴上焦点的距离,  $\delta_i (i = 0, 1, \dots, n)$  为第  $i$  个环带沿光束方向的厚度补偿,  $L_i$  为第  $i$  个圆环到达轴上焦点的距离。其中

$$\delta_i = \Delta l_i / \cos \theta_i \quad (8)$$

式中  $\Delta l_i$  为该圆环单元的补偿厚度,  $\theta_i$  为第  $i$  个圆环与像面轴上焦点连线与光轴的夹角。 $n_0$  为选用衍射元件的光学材料的折射率。

最后, 光波通过补偿后的衍射光学元件后到达像面上  $P$  点的总振幅应为:

$$\bar{U}(P) = \sum_n \bar{U}_{r_n}(P) \exp [ik\delta_n(n - 1)] \quad (9)$$

注意, 中央带环为一圆盘, 其分振幅贡献为

$$U_{r_0}(P) = 2\pi \quad (10)$$

所以  $P$  点的光强度是:

$$I(P) = |\bar{U}(P)|^2 \quad (11)$$

(9)式及(11)式就是等宽度圆环衍射光学元件计算的基本方程式, 由于采用了等光程原理可

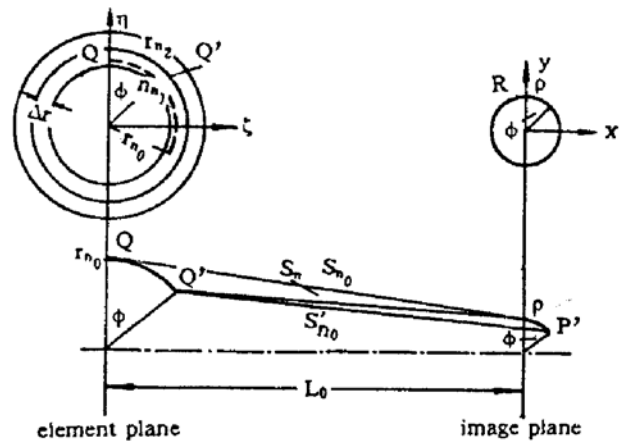


Fig. 1 Schematic diagram

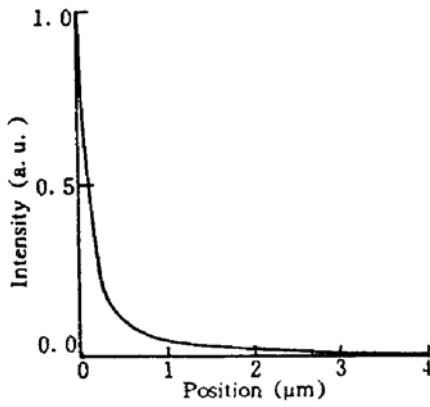


Fig. 2 Light intensity distribution on the focal plane for the single wavelength diffraction optical element with the aperture of 16 mm. It is divided into 16 elements. The focal length is 100 mm

以保证有最优的能量聚焦效果。作为一个使用的例子,取元件材料为  $K_9$  玻璃,对  $0.6328 \mu\text{m}$  波长的折射率为  $1.515$ ,将它分割成 16 个同心圆环,各个圆环宽度都是  $0.5 \text{ mm}$ ,因此光学元件直径为  $\varnothing 16 \text{ mm}$ ,假设焦距为  $100 \text{ mm}$ ,利用(11)式可算得焦平面上的光强分布,如图 2 所示。显然,在确定位置的像平面上的光强分布呈现相当理想的光聚焦作用。若按光强下降到 5% 为中央亮斑,则亮斑半径仅为  $0.5 \mu\text{m}$  左右。光斑边缘几乎没有任何光噪音。这要比同样的经典理想透镜爱里(Airy)盘半径  $4 \mu\text{m}$  小得多,利用这种方法计算的衍射光学元件只有 16 个单元就能达到理想高分辨的效果。

### 3 双波长二维成像圆环带衍射透镜的计算示例

为了计算简化,把圆环只取作较少的环,把直径为  $16 \text{ mm}$  的衍射光学元件分割成等间隔的 16 个圆环,这些圆环再分成两部份,分别对两个不同的波长  $1.06 \mu\text{m}$  和  $0.6328 \mu\text{m}$  进行位相补偿,即到达焦平面轴上点的位相彼此相等。假定仍采用  $K_9$  光学玻璃,对于  $1.06 \mu\text{m}$  和  $0.6328 \mu\text{m}$  光波的折射率分别为  $1.506$  和  $1.515$ ,元件的焦距是  $100 \text{ mm}$ ,应用(8)式计算的元件各个圆环的厚度补偿如表 1 所示。元件中心到边缘由薄变厚,由于双波长交替等光程补偿,因此补偿呈厚薄交替起伏分布,其中最厚的圆环为第 2 个单元,厚度约  $0.58 \text{ mm}$  左右。将已补偿的圆环组通过(11)式的数值计算分别以  $1.06 \mu\text{m}$  和  $0.6328 \mu\text{m}$  波长进行,光强分布的新的曲线示于图 3 中。从而可见,对这两种波长,在同一焦平面上的光强分布都能获得理想的聚焦光点,中心光斑直径都在  $0.5 \mu\text{m}$  以内,边缘光噪音小于 10%。 $1.06 \mu\text{m}$  的光斑似乎略大一些,但边缘光噪音小得多。

Table 1 Thickness compensations for the two-wavelength at  $1.06 \mu\text{m}$  and  $0.6328 \mu\text{m}$  co-focal diffraction optical element

unit No.	thickness compensations ( $\mu\text{m}$ )	unit No.	thickness compensations ( $\mu\text{m}$ )
1	518.1	9	340.0
2	576.8	10	363.0
3	503.2	11	246.2
4	552.4	12	261.1
5	468.6	13	132.8
6	508.7	14	140.1
7	414.2	15	0
8	445.5	16	0

为了观察环带的多少对计算图形的影响,本文也对 160 个环带和 1600 个环带的情况作了计算。结果示于图 4。可看出 16 环带与 160 及 1600 个环带组合情况比较,除在中央主峰外面有起伏误差外,基本走向是相同的。

为了确定焦面是这两种波长的最佳焦面,因此分别对  $1.06 \mu\text{m}$  及  $0.6328 \mu\text{m}$  的波长作了离焦面上的光强分布的计算。图 5 和图 6 分别为  $1.06 \mu\text{m}$  和  $0.6328 \mu\text{m}$  在不同离焦值  $\Delta d$  下

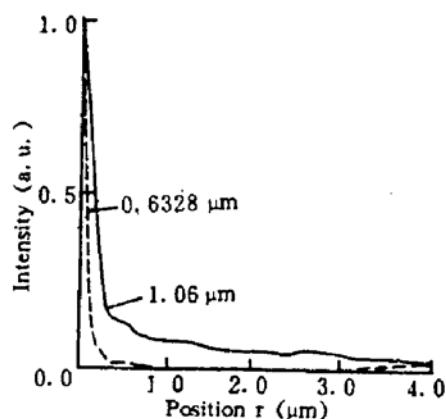


Fig. 3 Light intensity distribution on the focal plane for the two-wavelength at  $1.06 \mu\text{m}$  and  $0.6328 \mu\text{m}$  co-focal diffraction optical element.

(a)  $1.06 \mu\text{m}$  (b)  $0.6328 \mu\text{m}$

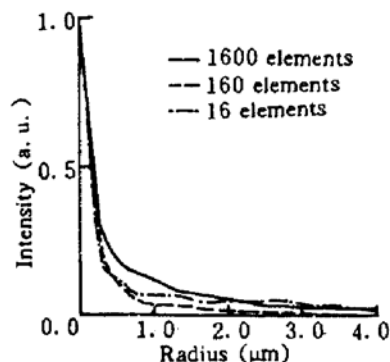


Fig. 4 Light intensity distributions of  $1.06 \mu\text{m}$  for different element number.

(a) 1600 elements; (2) 160 elements; (3) 16 elements

的各离焦面光强分布。对  $1.06 \mu\text{m}$  而言，当成像屏从焦平面向前后移动时，光的会聚作用越来越差，当渐渐离开焦平面时，中央光斑越来越大，边缘部分的噪音晕也越来越强，而且中央光斑中心将逐渐偏离光轴，例如当离开焦平面  $0.17 \text{ mm}$  时，中央光斑已离开光轴约  $0.3 \mu\text{m}$ ，边缘的光晕强度已达到光强的  $80\%$ ，元件的聚光作用消失。对  $0.6328 \mu\text{m}$  来说，离开焦平面  $0.17 \text{ mm}$  时，边缘光晕已强于中央部分的光强。两种波长的焦深大约在  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$  之间。这就表明，设定  $100 \text{ mm}$  焦距的焦面是两种波长的共同焦面。

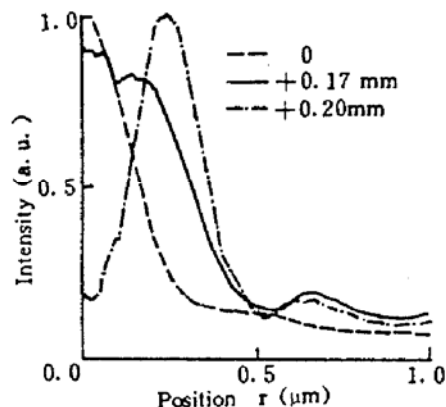


Fig. 5 Light intensity distributions of  $1.06 \mu\text{m}$  on the planes out of focus. Solid lines correspond to that with different distance  $\Delta d$  between the image surface and the focal plane, and dashed line corresponds to that on the focal plane,  $\Delta d = 0$

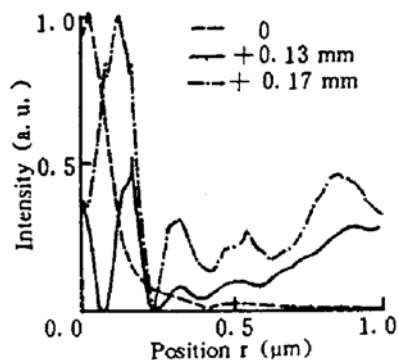


Fig. 6 Light intensity distributions of  $632.8 \text{ nm}$  on the planes out of focus. Solid lines correspond to that with different distance  $\Delta d$  between the image surface and the focal plane, and dashed line corresponds to that on the focal plane,  $\Delta d = 0$

### 参 考 文 献

- [1] Alan Kathman, Eric Hohnson, Binary optics, new diffractive elements for the designer's tool kit. *Photonics Spectra*, 1992, 26(9): 125~132
- [2] Greg Behrmann, John Bowen, A hybrid approach open door for diffractives optics. *Photonics Spectra*, 1993, 27(5): 159~170
- [3] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt. Jr., M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, 220

(4598) : 671~680

- [4] U. Mahlab, J. Shamir, H. J. Caulfield, Genetic algorithm for optical pattern recognition. *Opt. Lett.*, 1991, **16** (12) : 648
- [5] T. Yatagai, M. Geiser, R. Tian *et al.*, CAD system for CGH; and laser beam lithography. *Proc. SPIE*, 1991, **1555** : 8~12
- [6] 王润文, 叶超, 一维纯位相线成像衍射光学元件的计算. *光学学报*, 1994, **14**(9) : 897~902
- [7] Max Born *et al.*, *Principles of Optics*, Fifth edition, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig, Pergamon Press, 1975 : 417

## Analysis and Design of Double Wavelength Co-Focus Diffractive Optical Element

Wang Runwen

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

Ye Chao

(*Laboratory of Quantum Optics*

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

(Received 30 June 1994; revised 6 October 1994)

**Abstract** The study of plane pure-phase equi-width ring diffractive optical lenses is reported. The analysis and design methods of two-dimensional imaging double wavelength co-focus diffractive optical lens are also presented. The light intensity distributions show that it is a new type of ideal focusing optical element. Two light beams at 1.06  $\mu\text{m}$  and 0.6328  $\mu\text{m}$  can be focused on same focal plane by using this optical element. It may be used for focalization and alignment of invisible beam lasers such as 1.06  $\mu\text{m}$  and 10.6  $\mu\text{m}$ .

**Key words** diffractive optical element, pure-phase, phase compensation.