

提高波带片成像分辨率方法探讨

胡玉禧 郭卫先

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

摘 要 采用波带片组合及加大位相匹配因子的方法,可以进一步提高波带片的成像分辨率。文中对这两种方法的工作原理进行讨论,并以实际计算结果加以验证。

关键词 波带片, 分辨率, 衍射光学。

位相型波带片,继而二元光学元件的出现,大大提高了波带片的衍射效率,从而使波带片在实际中得到越来越广泛的应用。但是,作为衍射成像元件的波带片,特别是X光波带片,目前还远没能达到X光的衍射极限分辨率^[1]。因为波带片的分辨率与最外环带宽度有关,而工艺上能做到的最小带宽是有限的,因而波带片的分辨率也是有限的。本文提出采用波带片组合及加大位相匹配因子两种进一步提高成像分辨率的新方法,论述工作原理,并以实际计算结果加以验证。

1 分辨率与最小环带宽度的关系

波带片相当于几何成像透镜,表征其成像性能的一个重要参量是分辨率。波带片的分辨率用能分辨的最小成像距离来表示。

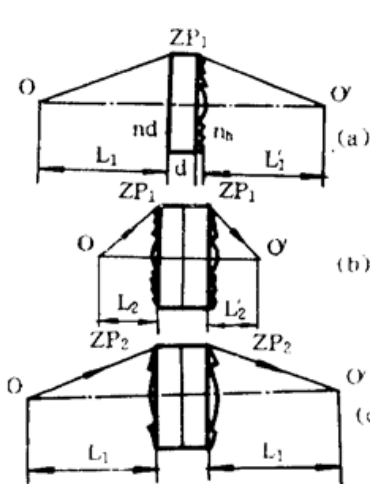


Fig. 1 The geometry of single & double zone plate

图1(a)为单块位相型波带片。 n_d 和 d 为基板折射率和厚度; n_h 和 h 为位相层的折射率和厚度。物点 O 以波长 λ 经波带片成像于 O' 。

设波带片共有 n 个环带,最外环带半径为 r_n ,相邻环带半径为 r_{n-1} 。于是最外环带,即最小环带宽度为 $\delta r_n = r_n - r_{n-1}$,根据波带片焦距公式 $f' = r_n^2 / 2n\lambda$

$$r_n^2 - r_{n-1}^2 = 2n\lambda f' - 2(n-1)\lambda f' = 2\lambda f' \quad (1)$$

所以最外环带宽度为

$$\delta r_n = (r_n^2 - r_{n-1}^2) / (r_n + r_{n-1}) \approx 2\lambda f' / 2r_n = \lambda f' / r_n \quad (2)$$

按瑞利判据,能分辨的最小距离等于圆孔衍射爱里(Airy)斑半径 R ,即

$$\text{分辨距离} = R = 1.22\lambda f' / 2r_n = 0.61\delta r_n \quad (3)$$

因此,波带片的成像分辨率近似与波带片的最小环带宽度相等。

2 波带片组合系统

由几何光学薄透镜理论,当两块焦距相等的单透镜密接时,组合系统的焦距为单块透镜之半。把波带片看作薄透镜,两块相同波带片密接,组合波带片的焦距也应是单波带片的一半。从(3)式可知,当波带片直径 $2r_0$ 和波长 λ 确定后,波带片的分辨距离正比于波带片焦距。显然,组合系统焦距的减小,必然导致分辨率的提高。图 1(b)为保持图 1(a)成像关系的密接双波带片系统的光路。此时,物、像距减小,物、像孔径角加大。

如果让组合系统光路同图 1(a)(见图 1(c)),那么,组合系统中单块波带片 ZP_2 的焦距较 ZP_1 增大,由带宽公式(2),波带片最外环带宽度也相应加大,这对工艺十分有利。

本文按实际光程计算公式^[2],设计了 1:1 成像的位相型双波带片系统。两个波带片参数完全相同: $d = 1000 \mu\text{m}$, $n_d = 1.51$, $n_k = 1.564$, $2r_{\text{max}} = 750 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ 。按物距 $L = -1504 \mu\text{m}$ 时,计算机设计所得的波带片位相层断面形状如图 2(a)所示,最外环带宽度 $5.25 \mu\text{m}$,如果用单块波带片来实现同样光路,该波带片位相层断面形状如图 2(b)所示,最外环带宽度 $2.625 \mu\text{m}$,正好是图 2(a)中的一半。

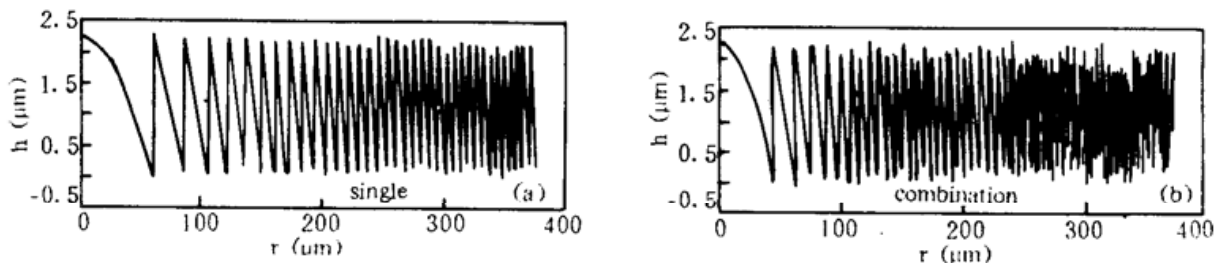


Fig. 2 The profile of zone plate

因此,当采用波带片组合时,若保持成像分辨率不变,可允许环带宽度加大,也就是说,组合波带片系统可以在降低工艺条件下,实现原来的分辨率,或者,在现有工艺条件下,进一步提高成像分辨率。波带片组合系统适用于放大、缩小成像等各种场合。在成像倍率为(-1)倍时,组合系统光路满足物、像分别位在前、后波带片的焦点上。因此,在两波带片之间是平行光路(见图 1),让两波带片基板相对放置,基板厚度的影响可以忽略,且两波带片之间轴向距离的变化也不影响成像性能,并可降低装调精度和满足结构安排上的特殊需要。

3 加大位相匹配因子

众所周知,位相型波带片之所以能成像,是因为由物点发出通过相邻环带后到达同一点的光振动发生相干迭加的结果。因此,到达像点光振动的位相必须匹配,即应该是 2π 的整数倍。假设通过相邻环带到达像点的位相为 ϕ_i, ϕ_{i-1} ,波带片成像必须满足: $\phi_i - \phi_{i-1} = m2\pi$ 。其中 m 为一个大于零的整数,称为位相匹配因子。

若投射到波带片上的是平行光(图 3 示),取 $m = 1$,即从 $i, i-1$ 环带出射到焦点 F_1 光波的位相差 2π ,即光程差 $\Delta = S_i - S_{i-1} = \lambda$ 。因为 $S_i - S_{i-1} = \sqrt{f_1^2 + r_i^2} - \sqrt{f_1^2 + r_{i-1}^2} \approx (r_i^2 - r_{i-1}^2)/2f_1$,所以对 F_1 点满足

$$(r_i^2 - r_{i-1}^2)/2f_1 = \lambda \quad (4)$$

取 $m = 2$,则表示从 $i, i-1$ 环带出射到焦点 F_2 的光波的位相差 4π ,即光程差 $\Delta = S'_i - S'_{i-1} = 2\lambda$ 。因为 $S'_i - S'_{i-1} \approx (r_i^2 -$

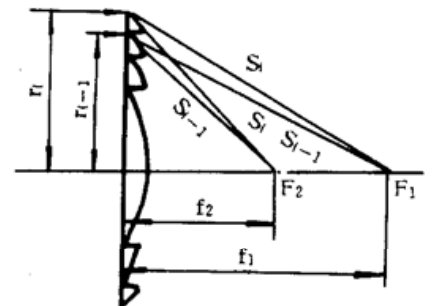


Fig. 3 The effect of match factor

$r_{i-1}^2)/2f_2$,所以对 F_2 点满足

$$(r_i^2 - r_{i-1}^2)/2f_2 = 2\lambda \quad (5)$$

由(4),(5)式可得 $f_2 = f_1/2$,这表明,加大 m 值,使从同一对相邻环带出射到达像点光波的光程差加大,而使波带片焦距相应减小,从而提高成像分辨率。由位相层厚度计算公式^[2]

$$h = (m\lambda - \Delta\text{Mod}m\lambda)/(n_d - 1)$$

显而易见,位相匹配因子 m 加大后,虽然使波带片焦距减小,但环带宽度保持不变,只是位相层厚度有所增加。

作者仍采用前述波带片的 $d, n_d, n_h, 2r_{\max}, \lambda$ 值,按实际光程差算法,计算 $m = 2$ 时无限远物点成像的位相层断面形状,如图 4(a)所示,此时波带片焦距 $f' = 3008 \mu\text{m}$,环带数 $n = 18$,最外环带宽度 $10.5 \mu\text{m}$ 。当 $m = 4$ 时,仍满足无限远物点成像的焦距值减小一倍,但环带数,带宽都不变,只是位相层深度有所加大,如图 4(b)所示。

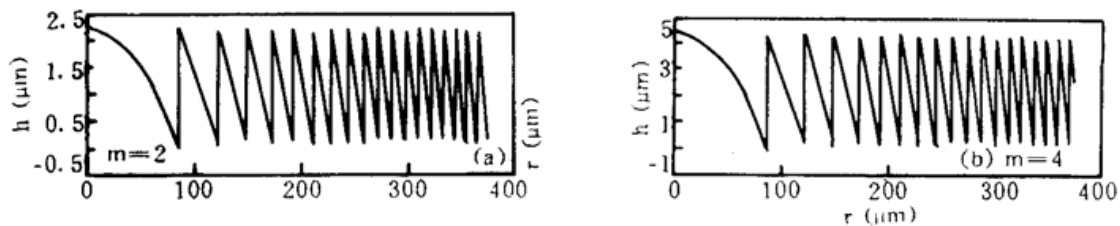


Fig. 4 The profile of zone plate

如果以发光二极管作为照明光源, $\lambda = 0.866 \mu\text{m}$,当 $m = 4$ 时,对应光程差为 $3.46 \mu\text{m}$,小于相干长度 $l_c \approx 10 \mu\text{m}$ ^[3],因此,满足至少是相邻透射波面相干迭加要求。由上述实际计算表明,只要满足相邻通光环带光波之间的光程差小于光源相干长度,并考虑到位相层深度的加工可行性,那么, m 值越大,对提高成像分辨率越有利。

结 论 因为波带片的分辨率与最外环带宽度有关,而工艺上能做到的最小带宽是有限的,因而分辨率也是有限的。若采用迭加多个波带片,有可能加大物、像点对最外环带的孔径角,从而达到较高分辨率。如果选用 $m > 1$ 的位相匹配因子,也有可能在此现有加工工艺条件下提高分辨率。波带片成像分辨率的进一步提高,将更加充分显示波带片的成像优越性。

参 考 文 献

- [1] 王之江, 成像光学, 北京, 科学出版社, 1991年9月
 [2] 沈忙作, 衍射光学透镜的设计, 光学学报, 1994, 14(9): 966~969
 [3] R. E. Kunz, M. Rossi, Phase-matched fresnel elements, *Opt. Commun.*, 1993, 97(1/2): 6~10

Two Measures for Improving the Imaging Resolution of Zone Plate

Hu Yuxi Guo Weixian

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science & Technology of China, Hefei 230026)

(Received 5 May 1995; revised 25 September 1995)

Abstract Two methods are suggested for improving the imaging resolution of zone plate. One is combination of zone plate and another is to increase the match factor. The principle of two measures is discussed and some examples of design results are presented for verification.

Key words zone plate, resolution, diffraction optics.