

用二元组合光学元件产生多重像*

谈苏庆** 韩良恺 周进 高文琦

(南京大学物理系, 南京 210093)

提要 报道了一种用离轴型二元组合光学元件产生多重像的新方法。此元件集 Fresnel 波带板和二维 Dammann 光栅为一体, 同时具有分束和聚焦功能。应用时无需成像透镜。分束点阵为 9×9 , 焦距为 823 mm。当物的频谱面和二元组合光学元件的平面重合时, 在与物面共轭的像面上产生同一物的 9×9 个多重图像, 排列与分束阵列相同, 图像清晰均匀, 光强相对误差小于 5%。

关键词 多重像, Dammann 光栅, Fresnel 波带板, 二元光学元件

在光计算、光通信、光信息处理及传输、集成电路制作等领域中用光学方法产生高质量的多重像是极有应用前景的研究课题。产生多重像的方法有多种, 如用二元微透镜阵列^[1]或用对剖透镜^[2], 也可用计算全息的方法产生^[3]等^[4,5]。前者工艺要求高, 费用大, 后者必须保证足够多的取样点也提高了成本和增加了工作难度。本文介绍一种用二元组合元件产生多重像的新方法。设计一种将 Fresnel 波带板和二维 Dammann 光栅相组合的新型光学元件, 使其同时具有聚焦和分束功能。根据傅里叶变换的卷积定理, 当物的频谱和二元组合光学元件的平面重合时, 在与物面共轭的像平面上为物函数和点阵函数的卷积, 从而得到多重图像的输出。其中像平面的位置由 Fresnel 波带板焦距及物距决定, 点阵函数由二维 Dammann 光栅给出。

1 原理

众所周知, Dammann 光栅^[6]可以将一束光分成等强度的多束光, 因此在光学系统中常作为分束器使用。根据分束的数目可用计算的方法来确定光栅的位相突变点。突变点相邻的位相分别为 π 和 0。如要将它用于产生多重像, 则在光路中需加透镜才能实现。为使光路结构简单紧凑, 我们利用二元位相 Fresnel 波带板的自聚焦特点, 将 Fresnel 波带板与二维 Dammann 光栅组合, 使其成为同时具有分束和聚焦功能的新型二元光学元件。用它可以直接产生所要求的多重像, 无需成像透镜。下面讨论这种元件的基本原理。

二元位相 Fresnel 波带板的透过函数为:

$$T_{\text{lens}} = \exp[i\theta_{\text{lens}}(x, y)]$$

$$\theta_{\text{lens}} = \pi \cdot \text{Int}\{\text{Mod}_2[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2/r_0^2]\}$$

* 江苏省自然科学基金项目。

** 南京动力高等专科学校访问学者。

收稿日期: 1995年9月29日

式中 θ_{lens} 为 Fresnel 波带板的位相, x_0, y_0 分别为中心原点的坐标, 其大小决定离轴的程度, $x - x_0, y - y_0$ 分别为相对于中心原点距离, r_0 为中心波带板的半径, Mod_2 表示取 2 的模, Int 表示取整。

二元位相型 Dammann 光栅的透过函数为

$$T_{\text{Damm.}} = \exp[i\theta_{\text{Damm.}}(x, y)]$$

因此组合元件的透过函数为

$$T = T_{\text{lens}} \cdot T_{\text{Damm.}} = \exp[i(\theta_{\text{lens}} + \theta_{\text{Damm.}})] = \exp[i\theta(x, y)]$$

由于 θ_{lens} 和 $\theta_{\text{Damm.}}$ 分别只取两个值 $0, \pi$, 在 $\theta_{\text{lens}} + \theta_{\text{Damm.}}$ 的过程中, $0 + \pi = \pi + 0 = \pi, 0 + 0 = 0, \pi + \pi = 2\pi$, 而 2π 与 0 是同相位的, 因此组合元件的位相 θ 也只取 $0, \pi$ 两值, 即 θ 可由下式得到

$$\theta = [(\theta_{\text{lens}}/\pi) \cdot \text{XOR} \cdot (\theta_{\text{Damm.}}/\pi)]\pi$$

其中 XOR 代表异或运算。

又根据傅里叶变换的卷积定理, 设物函数为 $f(x)$, 点阵函数 $h(x)$ 为

$$h(x) = \sum_{n=-x_0/2}^{x_0/2} \delta(x - nd)$$

式中 d 表示点与点间的间隔。 $f(x)$ 和 $h(x)$ 的傅里叶变换分别为 $F(v)$ 和 $H(v)$, 则由傅里叶变换的卷积定理

$$\mathcal{F}\{F(v) \cdot H(v)\} = f(x) * h(x) = \sum_{n=-x_0/2}^{x_0/2} f(x - nd)$$

式中 $*$ 表示卷积。实验中 $H(v)$ 是 Dammann 光栅和 Fresnel 波带板的组合位相, 正是由于 Fresnel 波带板二次位相因子 θ_{lens} 的作用(相当于透镜), 使之可在有限距离处实现傅里叶变换^[7], 即得到物 $f(x)$ 与由 Dammann 光栅产生的点阵的卷积, 从而在有限距离处获得物 $f(x)$ 的多重像。

2 元件的制作

为了产生 9×9 阵列的多重像, 我们设计与制作了此种新型二元光学元件。它由二维 Dammann 光栅和 Fresnel 波带板组合而成。对 Fresnel 波带板, 其焦距 $f = r_0^2/\lambda$ 。为了提高信噪比, 实际设计时, 采用了离轴方式。设定焦距 $f = 823 \text{ mm}$, 则在入射波长 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 的 He-Ne 激光下工作, 要求中心波带半径 $r_0 = 722 \mu\text{m}$, 第 k 个波带的半径 $R_k = \sqrt{k} \cdot r_0$ (k 为正整数)。共做 198 个波带 ($102 \leq k \leq 300$), 整个波带板的面积大小为 $4.96 \times 4.96 \text{ mm}^2$ 。对于 Dammann 光栅, 由九重分束时的计算结果并结合波带板尺寸综合考虑, 取 Dammann 光栅的周期为 $412 \mu\text{m}$, 因此在一个周期中二维 Dammann 光栅图形的间距大小^[6]分别为 $32 \mu\text{m}, 61 \mu\text{m}, 31 \mu\text{m}, 16 \mu\text{m}, 132 \mu\text{m}, 16 \mu\text{m}, 31 \mu\text{m}, 61 \mu\text{m}, 32 \mu\text{m}$ 。间距大小的确定是根据文献[6]给出的数据, 并结合波带板的尺寸放大 4 倍作图, 再精缩 97 倍得到。显然 Dammann 光栅图形的栅条尺寸是不等间距的。为使直接光与再现的多重像分离, 本元件取 $x_0 = 0, y_0 = 7.31 \text{ mm}$ 。

整个元件的制作过程可分为三步: 第一步是用计算机根据设计要求编程控制绘图仪作图。先画出离轴型波带板的半径弧线 ($102 \leq k \leq 300$), 然后分别在竖直方向和水平方向迭加上 Dammann 光栅的不等间距的直线, 各画 12 个周期。再将经绘图仪输出后的图形间隔涂黑

(表示相邻栅条间的位相相反);第二步是通过照相精缩 97 倍得到原设计要求的模板;第三步是用离束刻蚀的技术在玻璃板上制成位相型器件。图 1 是元件模板放大 20 倍后的部分图形。

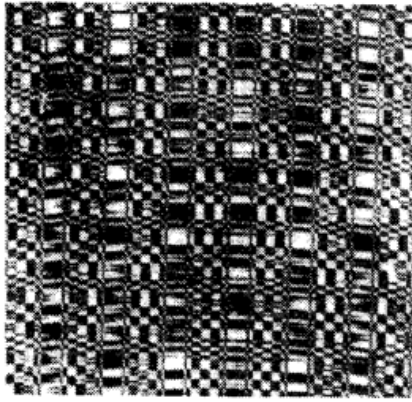


Fig. 1 Pattern of the binary optical element
(part) Magnified 20×

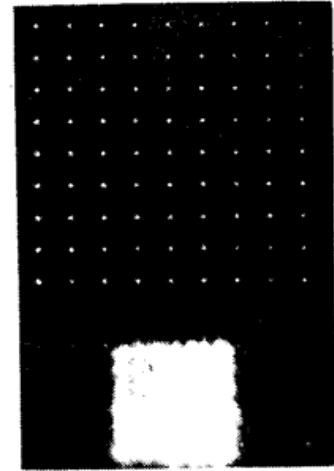


Fig. 2 The photograph showing the
array of axis-off 9×9
(Divergent light illumination)

3 实验及讨论

当平行的 He-Ne 激光光束入射到二元组合元件上时,在波带板的焦距处可见清晰的 9×9 个点的阵列,见图 2。直接入射光被移出点阵之外(图 2 下方的小方块),实现了离轴要求,使得由一级衍射光形成的点阵阵列不受直接光的影响。点阵阵列的大小及束斑之间的距离还可通过入射光的发散性或会聚性来调节。

图 3 是用 x - y 函数记录仪实测点阵中任一行光点的光强分布曲线。经计算分束后各束光光强分布的相对误差小于 5%。

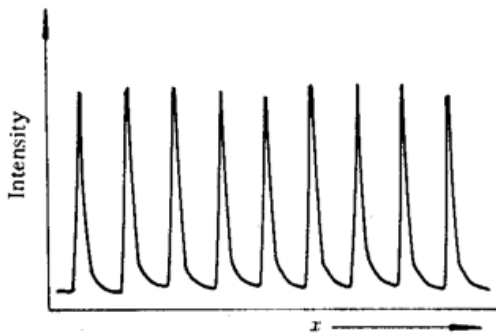


Fig. 3 Intensity distribution of a
split array

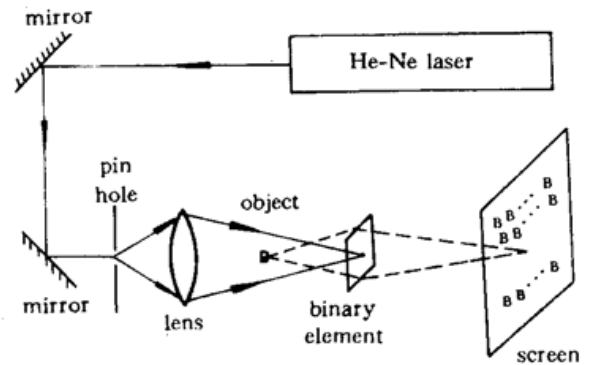


Fig. 4 Schematic diagram of producing multiple imaging
using the binary optical element

图 4 为用二元光学元件产生多重像的光路图。633 nm 激光经针孔滤波器后会聚地照射在物体上(英文字母 B),实验中使物的频谱面落在二元光学元件上(应注意使物的频谱面和元件的平面严格重合)。由于二元光学元件是组合式的,具有自聚焦功能,所以在由组合元件的焦距 f 和物距 u 决定的像平面上,可以实现物函数和点阵函数的卷积,从而获得与点阵相同排列的多重图像的输出,即 9×9 阵列的多重像,实验结果见图 5。

实验中我们发现:(1) 光学元件数值孔径的大小对成像的质量有直接的影响。在焦距 f 一

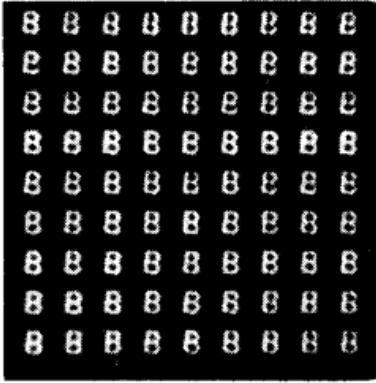


Fig. 5 Multiple imaging of the object "B" (9×9)

定的情况下,元件孔径 D 太小,物的频谱不能都进去,这样就会丢失物的信息,使产生的多重像有残缺; D 大,物的频谱信息丢失的愈少,成像的质量就愈高。这里 D 是整个元件的口径,所以从这一点来看它显然优于微透镜阵列。(2) 实验能成功的关键在于物的频谱面与二元光学元件的平面要严格相重合,否则不能真正实现物函数 $f(x)$ 与点阵函数 $h(x)$ 的卷积。(3) 在同等条件下,位相型二元光学元件的效率大大高于振幅型二元光学元件的效率,经测定光强约高出 4 倍。

我们用英文字母 B 等物做了上述实验,得到了光强均匀分布的 9×9 多重像,图像清晰,达到了设计要求。此种方法新颖实用,成像质量好,可望有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Kenjiro Hamanaka, Hiroyuki Nemoto, Masahiro Oikawa. Multiple imaging and multiple Fourier transformation using planar microlens arrays. *Appl. Opt.*, 1990, 29 : 4064
- 2 A. Senthil Kumar, R. M. Vasu. Multiple imaging and multichannel optical processing with split lenses. *Appl. Opt.*, 1987, 26 : 5345
- 3 高文琦, 叶权书. 利用冗余度性质产生多重针孔像. *中国激光*, 1984, 11(8) : 494
- 4 F. B. McCormick. Generation of large spot arrays from a single laser beam by multiple imaging with binary phase gratings. *Opt. Eng.*, 1989, 28 : 299
- 5 C. M. Choy, L. M. Cheng. High-efficiency cosine-approximated binary Gabor zone plate. *Appl. Opt.*, 1994, 33 : 794
- 6 H. Dammann, E. Klotz. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structure. *Opt. Acta*, 1977, 24 : 505
- 7 J. W. Goodman. *Introduction of Fourier Optics*. San Francisco, McGraw-Hill Book Company, 1968. 83

Multiple Imaging Produced by a Binary Combined Optical Element

Tan Suqing Han Liangkai Zhou Jin Gao Wenqi

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Multiple imaging produced by a binary combined optical element of axis-off type is reported. The element having functions of splitting and focussing is combined with a two-dimensional Damman grating and a Fresnel zone plate. An imaging lens is unnecessarily needed in application. The split arrays are 9×9 and the focus length is 823 mm. When the plane of the frequency spectrum of an object coincides with the plane of the binary combined optical element, we obtain 9×9 multiple images of the object on the imaging plane which conjugates with the object plane. The arrangement of the images is the same as that of the split arrays. The images are clear and uniform. The relative distribution error of the split beam intensity is less than 5%.

Key words multiple imaging, Damman grating, Fresnel zone plate, binary optical element