

# 二元位相型菲涅尔透镜列阵器件 的研制及其应用实验

郭 晴 王汝笠 郭中原 陈高峰 傅艳红 王 君

(中国科学院上海技术物理研究所, 青年光电工程研究中心, 上海 200083)

**摘要** 详细介绍了二元位相型菲涅尔透镜列阵器件(BPFLAs)的设计原理、制作过程和测试方法, 研制了  $24 \times 24$  元 8 阶 BPFLAs, 对  $0.84\mu\text{m}$  波长的焦距为  $46.5\text{mm}$ , 单元尺寸为  $1.5 \times 1.5\text{mm}^2$ , 衍射效率达  $77.3\%$ . 有关应用实验表明, 该器件具有平行光分束、多路成像及傅里叶变换功能, 在列阵发光器件的光学准直, 光学相关器等方面有广泛的应用前景.

**关键词** 位相型, 菲涅尔透镜, 列阵.

## 引言

二元位相型菲涅尔透镜列阵器件(BPFLAs)是二元光学研究的重要内容之一. BPFLAs 是根据菲涅尔波带片的近轴衍射原理设计掩模图形, 以制作大规模集成电路的工艺方法经制版、光刻、离子束刻蚀等过程完成器件制作的. 美国 MIT 林肯实验室和 AT&T 贝尔实验室率先开展了该器件的研制工作. 1988 年, 林肯实验室报道了用离子束刻蚀方法在石英基片上制作  $1 \times 7$  元 4 阶位相型菲涅尔透镜线阵, 透镜  $F$  数为  $f/2$ , 衍射效率  $71\%$ ; 1990 年, 该实验室又以同样的方法制作了  $6,000$  元 8 阶 BPFLAs, 透镜  $F$  数为  $f/5$ , 衍射效率  $84\%$ ; 1984 年林肯实验室以薄膜淀积的方法在石英基片上淀积  $\text{SiO}_2$  制作了  $10 \times 10$  元 8 阶 BPFLAs, 透镜  $F$  数为  $f/31$ , 衍射效率  $91\%$ ; 1990 年, 他们分别以离子束刻蚀和薄膜淀积(淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )的方法制作了  $8 \times 8$  元 2 阶 BPFLAs, 透镜  $F$  数为  $f/16.7$ , 衍射效率  $31\%$ . 我们于 1992 年在  $\Phi 51 \times 0.8\text{mm}$  石英基片上以离子束刻蚀的方法研制成功  $24 \times 24$  元 8 阶 BPFLAs, 透镜  $F$  数为  $f/31$ , 衍射效率  $77.3\%$ , 用该器件进行平行光分束、多路成像、傅里叶变换等实验, 效果优良.

## 1 设计原理

### 1.1 FZP 的衍射场分布

二元位相型菲涅尔透镜列阵(BPFLAs)的设计依据是菲涅尔波带片(FZP)的近轴衍射

原理. 菲涅尔波带片是一系列明暗相间的同心圆组成的周期性图形, 当以波长为  $\lambda$  的平面波照射 FZP 时, 将发生衍射并在其中心轴上产生多个会聚点.

假设 FZP 的复振幅透过率为  $g(x, y)$ , 由于径向对称, 有

$$g(x, y) = g(x^2 + y^2) = g(r^2). \quad (1)$$

以傅里叶级数表示式(1), 有

$$g(r^2) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(\pi i n \frac{r^2}{r_1^2}), \quad (2)$$

$$A_n = \frac{1}{2r_1^2} \int_0^{2r_1^2} g(r^2) \exp(-\pi i n \frac{r^2}{r_1^2}) d(r^2). \quad (3)$$

当以波长为  $\lambda$  的平面波照射时, 在 FZP 之后  $Z > 0$  的任意平面上衍射光场分布为

$$U(x', y', z) = \iint g(x, y) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda Z} [(x - x')^2 + (y - y')^2]\right\} dx dy. \quad (4)$$

式(4)略去了次要因子  $\exp(ikz)/ikz$ . 将式(2)代入(4), 得

$$U(x', y', z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z} (x'^2 - y'^2)\right] \iint \exp\left[\pi i \left(\frac{n}{r_1^2} + \frac{1}{\lambda Z}\right) (x^2 + y^2)\right] \\ \cdot \exp\left[-2\pi i \left(\frac{xx' + yy'}{\lambda Z}\right)\right] dx dy. \quad (5)$$

显然,  $\frac{n}{r_1^2} + \frac{1}{\lambda Z} = 0$  时,  $U(x', y', z)$  取极值, 即  $Z = Z_n$  是 FZP 的焦平面, 有

$$Z_n = \frac{-r_1^2}{\lambda n}. \quad (6)$$

焦面平的光场分布为

$$U(x', y', Z_n) = A_n \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z_n} (x'^2 + y'^2)\right] \delta\left(\frac{x'}{\lambda Z_n}, \frac{y'}{\lambda Z_n}\right) + \sum_{m \neq n} B_m. \quad (7)$$

如果 FZP 是边长分别为  $a, b$  的矩形, 那么式(7)可写为

$$U(x', y', Z_n) = A_n \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z_n} (x'^2 + y'^2)\right] \text{sinc}\left(\frac{x'a}{\lambda Z_n}, \frac{y'b}{\lambda Z_n}\right) + \sum_{m \neq n} B_m. \quad (8)$$

式(8)中,  $m \neq n$  的和项代表衍射到其它平面  $Z = Z_m$  上的波函数, 而在  $Z = Z_n$  焦平面上的最大复振幅为  $A_n$ . 由此可见, FZP 的透过率函数  $g(r^2)$  的第  $n$  级傅里叶变换系数  $A_n$  即为第  $n$  级焦点上的复振幅.

## 1.2 衍射效率 $\eta$

FZP 的振幅透过率函数  $g(r^2)$  如图 1 所示. 由

$$g(r^2) = \sum_{m=0}^{M/2} \text{rect}\left(\frac{r^2 - 2mr_1^2 - r_1^2/2}{r_1^2}\right), \quad (9)$$

将  $g(r^2)$  展开为傅里叶级数, 并取归一化周期  $2r_1^2=1$ , 则由式(3)可得

$$A_n = \frac{1 - \cos(n\pi)}{2n\pi}. \quad (10)$$

第一焦点复振幅为  $A_{-1} = \frac{1}{\pi}$ , 衍射效率为  $\eta = |A_{-1}|^2 = 10\%$ .

现在以  $r_1^2 = 2r_1^2$  周期, 对  $g(r^2)$  作  $L$  级次的等位相量化如图 2, 有

$$g(r^2) = \sum_{k=0}^{N(L-1)} \exp\left(\frac{-2\pi ik}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{r^2 - kr_p^2/L - r_p^2/2L}{r_p^2/L}\right); \quad (11)$$

由式(3)计算可得

$$A_n = \exp\left(\frac{i\pi n}{L}\right) \text{sinc}\left(\frac{n}{L}\right) \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \exp\left[\frac{2\pi ik(n+1)}{L}\right], \quad (12)$$

$$A_{-1} = \text{sinc}\left(\frac{1}{L}\right) = \frac{\sin(\pi/L)}{\pi/L}, \quad (13)$$

$$\eta = |A_{-1}|^2 = \left[\frac{\sin(\pi/L)}{\pi/L}\right]^2. \quad (14)$$

式(14)表明, 二元位相型菲涅尔透镜的衍射效率  $\eta$  随量化级次的增加而提高, 如图 3 所示, 显然, 位相型 BPFLAs 较之于振幅型 FZP 的衍射效率要高得多. 综合考虑刻制步骤和衍射效率之关系, 以 8 级位相量化为最佳选择.

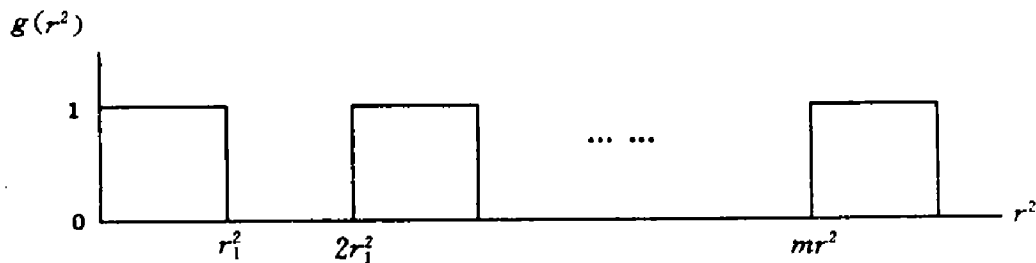


图 1 菲涅尔波带片的透过率函数

Fig. 1 Transmission function of FZP

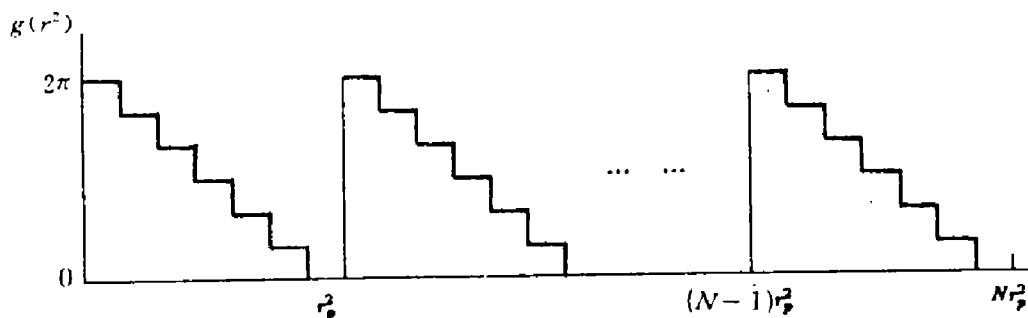


图 2 菲涅尔波带片位相量化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FZP with a quantized phase profile

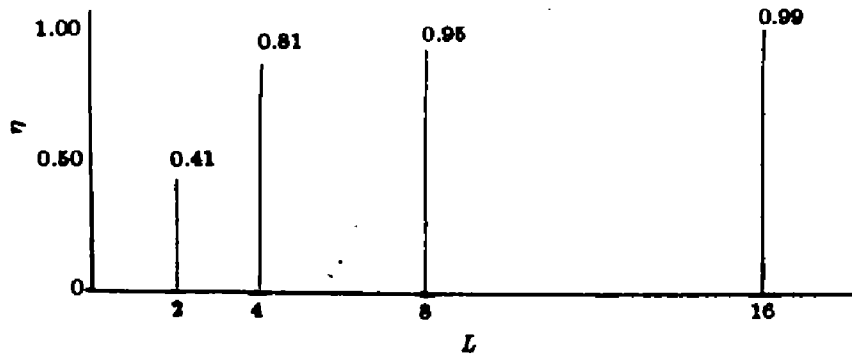


图 3 位相型菲涅尔透镜的衍射效率

Fig. 3 Diffractive efficiency of phase-only Fresnel lens

## 2 制作过程

二元菲涅尔透镜的设计是由计算机完成的. 根据使用波长、焦距、孔径和要求的量化级次, 设计  $K$  个振幅型掩模, 经多次光刻和离子束刻蚀, 最终完成 BPFLAs 制作. 工作流程如图 4.

对于使用波长  $\lambda$ 、焦距为  $f$ 、边长为  $a$  的方形小透镜列阵, 其半径周期为

$$r_p^2 = 2\lambda f. \quad (15)$$

式(15)表明, 对于特定的半径结构, 波长与焦距成反比, 因此衍射透镜与折射透镜的色散性质相反, 在光学系统中适当地使用衍射透镜可有效地改善系统像差. 波带周期数为

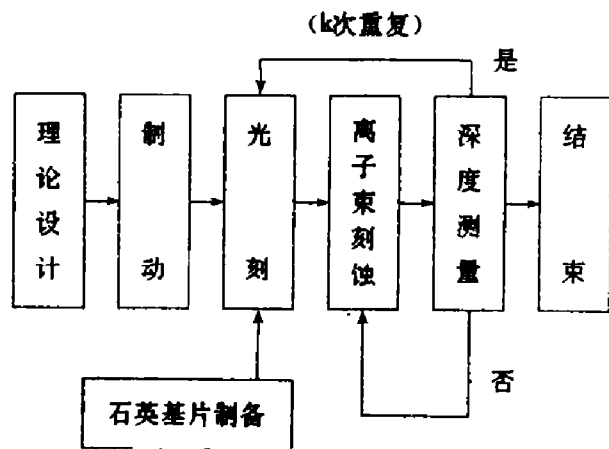


图 4 制作 BPFLAs 的流程图

Fig. 4 Flow chart of making BPFLAs

$$N = \frac{a}{8\lambda f}, \quad (16)$$

最细条纹结构为

$$\omega = \frac{r_p}{2L \sqrt{N}}, \quad (17)$$

定义透镜  $F$  数为焦距与孔径之比, 即

$$F/\# = \frac{r_p^2/2\lambda}{2 \sqrt{N} r_p} = \frac{r_p}{4 \sqrt{N} \lambda}, \quad (18)$$

所以有

$$\omega = \frac{2\lambda F / \#}{L} \quad (19)$$

式(19)表明,波长越短,焦距越短,条纹结构越细. 制作工艺限制了透镜的 F 数,从而限制了 BPFLAs 的各项性能参数. 图 5 为制作 BPFLAs 的掩模图形的局部.

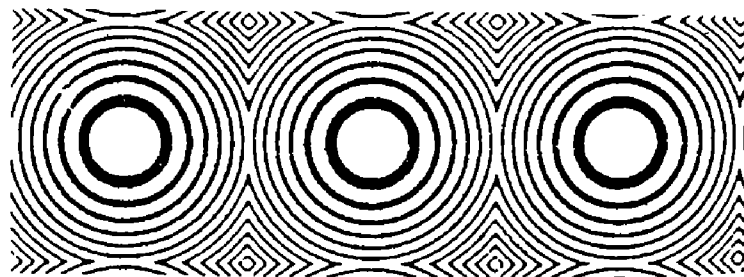


图 5 制作 BPFLAs 的掩模图形之一

Fig. 5 one of the potomask for making BPFLAs

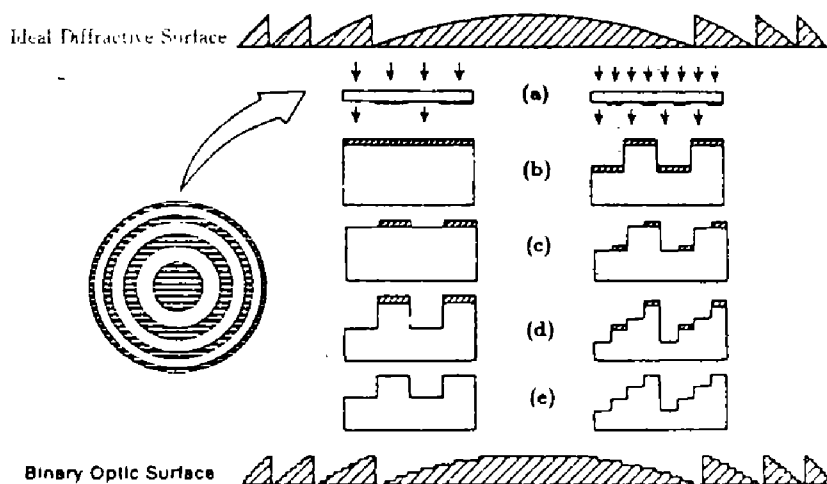


图 6 制作 BPFLAs 的过程示意图

Fig. 6 schematic diagram of producing BPFLAs

制作二元位相型菲涅尔透镜列阵过程如图 6. 首先在石英基片上涂镀光刻胶,以第一块掩模板图形光刻和显影,然后进行离子束刻蚀,深度光程为半波长,最后清除剩余光刻胶,获得 2 阶位相结构. 重复上述步骤,以第二、第三块掩模对准套刻,则可制成 4 阶、8 阶的二元位相型菲涅尔透镜列阵.

以这种方法制作多位相型菲涅尔透镜的特点是,对于  $L = 2^k$  的量化级次,需要进行  $K$  次刻蚀. 位相步长  $2\pi/L$ , 第一次刻蚀深度产生  $\pi$  位相差,以后的深度逐次减半为

$$d_k = \frac{\lambda}{2^k(n-1)} \quad (20)$$

制作多位相级菲涅尔透镜列阵的关键在于多次光刻的精确套准.

我们在 2 英寸石英基片上刻制了  $24 \times 24$  元 8 阶位相型菲涅尔透镜列阵,每一小透镜为  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  矩孔,其局部放大结构如图 7. 经台阶仪测量,刻蚀深度误差约为 12.5%.

### 3 器件测试

#### 3.1 焦面特性

以相干平行光照射二元位相型菲涅尔透镜列阵,可在其后焦面上获得强度均匀的点阵,如图 8.各焦点强度分布如图 9,焦点强度不均匀性约为 1.6%.光学传函仪测出的焦点强度分布曲线如图 10.相对强度大于 50%的点宽度约为  $12\mu\text{m}$ .

#### 3.2 衍射效率

二元位相型菲涅尔透镜列阵衍射效率的测量原理装置如图 11.以单色平面波照射 BPFLAs,测量其后焦面上的衍射强度.首先测得焦点间的背景强度  $I_b$ ,然后移去 BPFLAs,插入相应的石英基片,以补偿反射损失,在原焦面位置测初始强度  $I_a$ ,结果如图 12.

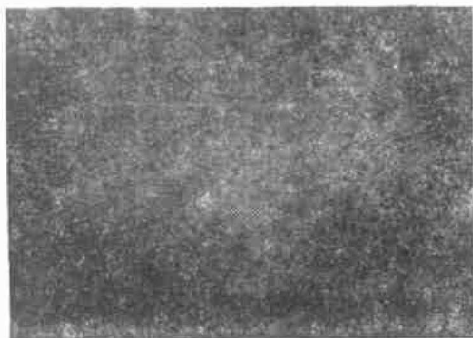


图 7 八阶 BPFLAs 局部

Fig. 7 Part of the BPFLAs with eight discrete phase levels

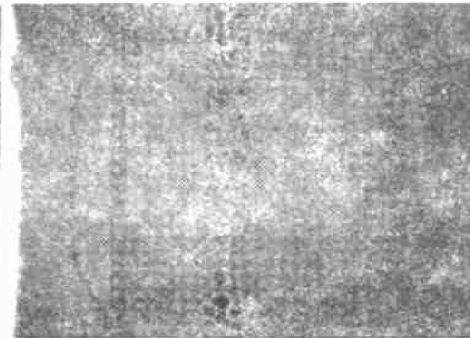


图 8  $24 \times 24$  均匀点阵

Fig. 8  $24 \times 24$  spots arrays



图 9 焦点强度分布图

Fig. 9 Intensity distribution pattern of the focal spot

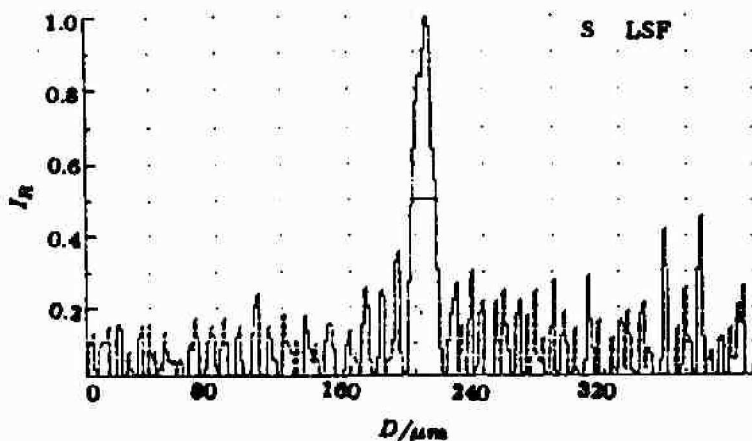


图 10 焦点强度分布曲线

Fig. 10 Intensity distribution function of the focal spot

衍射效率由下式计算:

$$\eta = \frac{I_a - I_b}{I_a} \quad (21)$$

我们研制的 8 阶菲涅尔透镜列阵的实测衍射效率为 77.3%,刻制过程中的套准误差和深度

误差是导致实际衍射效率低于理论值的主要原因。

## 4 应用实验

### 4.1 平行光分束

BPFLAs 可用于单色平行光分束. 当分别以 AlGaAs/GaAs 半导体激光器和发光二极管作为照明光源时, 可在 BPFLAs 后焦面上产生等光强点阵, 如图 13 和 14. 由于发光二极管的发射波段较宽, 形成的焦点有弥散.

### 4.2 多重成像

BPFLAs 可对输入图形实现多重成像, 以发光二极管作为照明光源时的成像效果如图 15. 实验证明, 对于频率不太高的输入图形, BPFLAs 可在较宽波段范围成像.

### 4.3 多路光相关处理

BPFLAs 用于多路光相关处理的实验光路如图 16. 图中  $L_1$  是傅里叶透镜, 输入图形置于  $L_1$  前焦面  $P_1$ , 相应的匹配滤波器 MF 置于  $L_1$  后焦面, BPFLAs 紧贴 MF, 对相关处理后的频谱实现逆傅里叶变换, CCD 在 BPFLAs 后焦面接收相关峰.

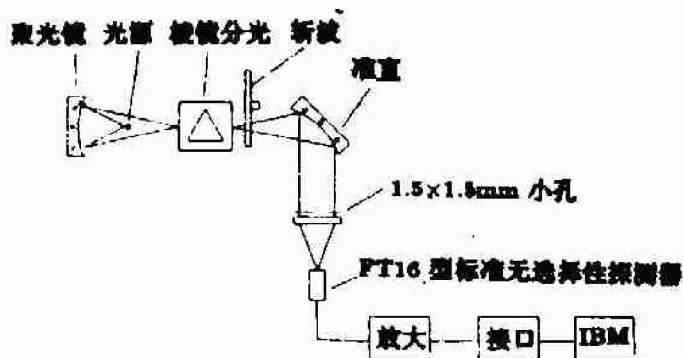


图 11 测量原理图

Fig. 11 Schematic diagram of measurement

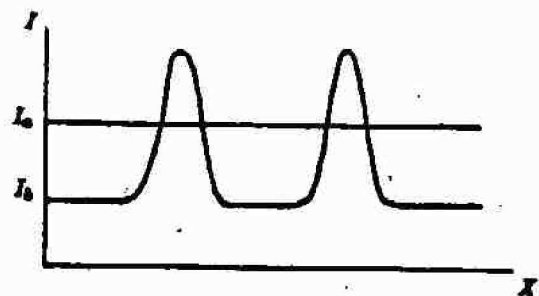


图 12 BPFLAs 焦面衍射强度示意图

Fig. 12 Schematic diagram of diffractive intensity on the BPFLAs focal plane

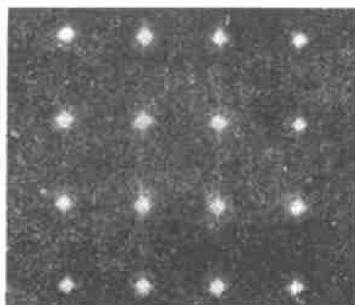


图 13 LD 的点阵

Fig. 13 Spots array of LD

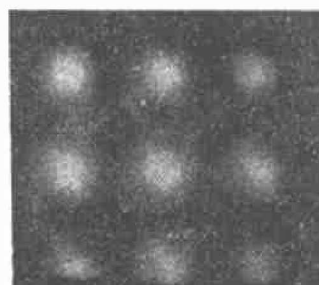


图 14 LED 的点阵

Fig. 14 Spots array of LED

我们选择了其中一路进行光相关实验, 如图 17. 输入 F-16 飞机图形, 频谱面放置相应的位相匹配滤波器, 输出结果如图 18. 图 18 中心为零级衍射与输入相关的结果, 边缘 4 点

为一级衍射与输入的相关峰. 实验表明, BPFLAs 可有效地应用于多路光学相关器系统, 由于其独具的设计与制作优势, 为光学相关器向小体积、大容量发展提供了可能. BPFLAs 的平面性和焦面一致性还为光学调校提供了很大的方便.

### 5 结论

二元位相型菲涅尔透镜列阵器件(BPFLAs)是衍射光学理论与大规模集成电路制造工艺相结合的产物. BPFLAs 是一种新型的微光学器件, 具有体积小、重量轻、设计与制作精确、集成度高的特点, 在平行光分束、多路成像和傅里叶变换等方面有优良的光学性能. 由于色散反常, 该器件还可用于折射光学系统的像差校正, 提高系统分辨率.

BPFLAs 的结构参数及光学性能完全受器件制作工艺的限制, 随着微电子技术的发展, BPFLAs 制作技术将不断提高, 其应用前景也将日益广阔.

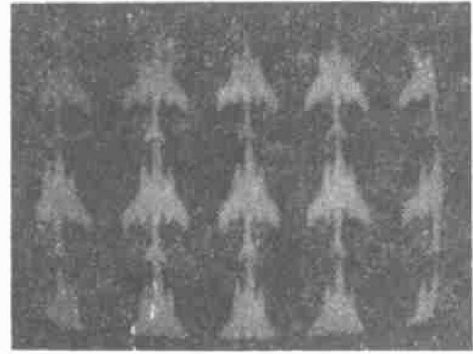


图 15 LED 成像

Fig. 15 Imaging by LED illumination

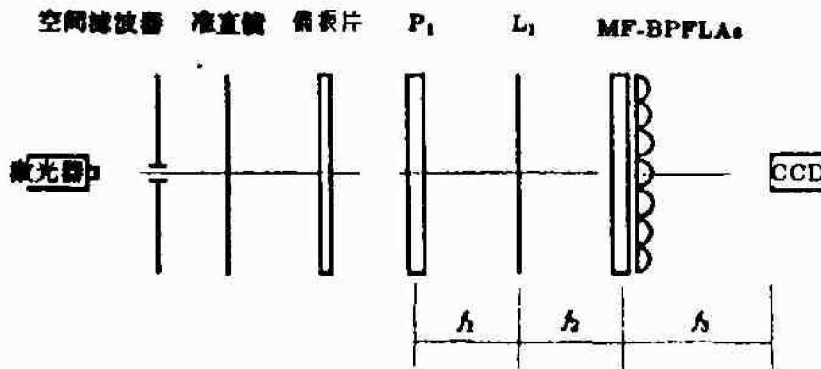


图 16 3f 多路光相关系统

Fig. 16 3f multiple optical correlating system

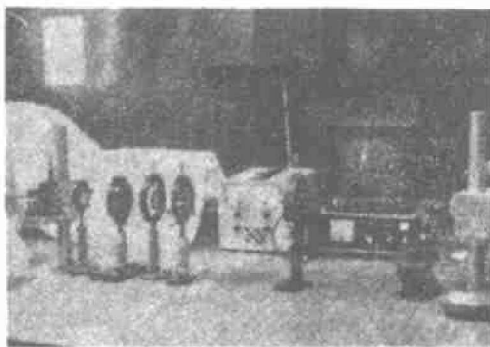


图 17 光相关实验装置

Fig. 17 Experimental device for optical correlation



图 18 输出结果

Fig. 18 Output results



## 参考文献

- 1 James R. Lgegr, Miles L. Scoot. *SPIE*, 1988, **884**:82~89
- 2 William Gołtsos, Michael Holz. *Optical Engineering*, 1990; vol. **29**: 1392~1397
- 3 Jurgen Jahns, Susan J. Walker, *Applied Optics*, 1990, **29**,931~936
- 4 Kasra Rastani, Abdellatif Marrakchi. *Applied Optics*, 1991;**30**,1347~1354

## DEVELOPMENT AND APPLICATION EXPERIMENTS ON BINARY PHASE-ONLY FRESNEL LENS ARRAYS

Guo Qing Wang Ruli Guo Zhongyuan  
Chen Gaofeng Fu Yanhong Wang Jun

(*Optoelectronic engineering Research center, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083,China*)

**Abstract** The design principle, manufacture process and the measurement method for binary phase-only Fresnel lens arrays (BPFLAs) are given. The  $24 \times 24$  array of BPFLAs with eight discrete phase levels has been made. The size of each individual lenslet is  $1.5 \times 1.5 \text{mm}^2$ . For  $0.84 \mu\text{m}$  wavelength, the focal length is 46.5mm and the diffraction efficiency is over 77.3%. The experiments show that this device has the functions of beamsplitter, multiple imaging and multiple Fourier transformation. It has vast application prospects in array collimation and optical correlator.

**Key words** phase-only, Fresnel lens, array.