

# 自聚焦透镜列阵的设计原理与制造

黄伟同 杨瀛海 俞本立 罗祖宁  
(安徽大学物理系, 合肥 230039)

## 提 要

讨论了自聚焦透镜及其列阵成像的规律. 根据所需列阵的共轭距离, 分辨率等确定单根自聚焦透镜的几何尺寸和光学参数, 设计出复印机用的自聚焦透镜列阵. 最后, 对列阵的制造作了初步介绍.

**关键词** 自聚焦透镜, 列阵, 复印机.

## 1 引 言

目前国内使用的复印机大多是常规光学透镜成像光路系统. 80年代初复印机已由自聚焦透镜列阵作为光学成像元件. 与常规光学透镜系统相比, 它的分辨率高、照度分布较均匀, 物与像的共轭距离短, 成像系统简单因而体积小, 结构紧凑. 本文仅就自聚焦透镜列阵的设计原理和制造方法作一些讨论.

## 2 理论与原理

### 2.1 自聚焦透镜列阵的成像规律

众所周知, 自聚焦透镜的径向折射率分布为

$$n(r) = n_0[1 - (Ar^2/2)], \quad (1)$$

式中  $n_0$  为透镜中心轴上有折射率,  $A$  为分布常数. 成像的规律与聚焦透镜的各参数的关系为<sup>[1]</sup>

$$l_1 = \frac{\sin(\sqrt{A}L/n_0 \sqrt{A}) + l_0 \cos(\sqrt{A}L)}{l_0 n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A}L) - \cos \sqrt{A}L}, \quad (2)$$

式中  $l_1, l_0$  分别表示像距与物距,  $L$  为透镜的长度. 当物距等于像距时, 即  $l_1 = l_0 = l$ , (2)式可写为

$$l = -\tan(\sqrt{A}L/2)/n_0 \sqrt{A}. \quad (\pi < \sqrt{A}L < 2\pi) \quad (3)$$

物像共轭距离为

$$TC = 2l + L. \quad (4)$$

入射到透镜的最大场角为

$$\sin\theta = n_0 \sqrt{A} R \sin(\sqrt{A}L/2). \quad (5)$$

最大场高(亦即透镜的半视场宽)为

$$k = R \sec(\sqrt{A}L/2). \quad (6)$$

此时光线入射的孔径角  $\alpha$  为<sup>[2]</sup>

$$\sin\alpha = -n_0 \sqrt{AR} \cos(\sqrt{AL}/2). \quad (7)$$

一根自聚焦透镜的成像特性已如上述,它可获得正像或倒像,放大或缩小像.在透镜列阵中,必须要求各单根透镜产生放大率为 1 的正立实像.只有这样,各透镜产生的像的迭合才是原物的像,此时自聚焦透镜的透光范围(即传像宽)为

$$X = \sqrt{3R + 2k}. \quad (8)$$

至于其它参数如共轭距离,半视场宽,中心折射率等与单根自聚透镜相同.

## 2.2 自聚焦透镜列阵像平面产生的照度分布

光通过透镜列阵在其像面上的照度分布是非均匀的,因为它是由许多通光孔径重迭而成.对单根自聚透镜,其像面上照度分布为一椭球形,其分布规律为

$$\left. \begin{aligned} E(x, y) &= E_0 \{1 - [(x^2 + y^2)/k^2]\}^{1/2}, \\ E_0 &= \pi N T n_0^2 A R^2 / m^2, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中  $N$  为光源的发光度,  $T$  为自聚焦透镜的透过率,  $m$  称透镜的重迭度,定义为  $m = (k/D)$ .复印机使用的是场扫描方式,当光扫描是在  $x$  方向时透镜的光强分布为

$$E_x(y) = (\pi/2) E_0 K [1 - (y/K)^2], \quad (10)$$

一个两列透镜列阵在其像面上产生的照度分布是由许多透镜照射的总合效果.像面上  $y_1$  处的照度是由那些与  $y_1$  的距离小于  $K$  的透镜照射的总合效果,超出此范围的透镜,对  $y_1$  处的照度不起作用.因此,利用(11)式对各有关透镜进行计算,再加以总合,合成的照度为  $I$ . 计算表明,对不同的位置  $y$ ,  $I$  将有不同的值,即  $I = I(y)$ . 因此在像面上将出现  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ . 定义像面照度的非均匀度为

$$\Delta I = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\min}. \quad (11)$$

对于不同的  $m$  值,  $\Delta I$  将不同,在设计中必需加以考虑.  $m$  取不同值时像面照度的分布情况如表 1 所列.

Table 1

$m$	$K(R)$	$E_0(H_0)$	$I_{\max}(H_0, R)$	$I_{\min}(H_0, R)$	$\Delta I(\%)$
1.3	2.6	0.5917	5.4164	5.2478	3.2
1.4	2.8	0.5102	5.3826	5.3064	1.4
1.5	3.0	0.4444	5.4070	5.1732	4.5
1.6	3.2	0.3906	5.3636	5.3176	0.87
1.7	3.4	0.3460	5.3856	5.2776	2
1.75	3.5	0.3265	5.3964	5.2240	3.3
1.8	3.6	0.3086	5.3764	5.2872	1.7
1.9	3.8	0.2770	5.3594	5.3168	0.8
2.0	4.0	0.2500	5.3752	5.2226	2.9
2.1	4.2	0.2268	5.3524	5.3254	0.5
2.2	4.4	0.2066	5.3638	5.3004	1.2
2.25	4.5	0.1975	5.3654	5.2670	1.9
2.3	4.6	0.1890	5.3596	5.3044	1
2.4	4.8	0.1736	5.3488	5.3244	0.46
2.5	5.0	0.1600	5.3600	5.2800	1.5
2.6	5.2	0.1480	5.3480	5.3300	0.34

表中  $E_0$  和  $I$  的单位  $H_0$  是当  $m = 1$  时, (10) 式中的  $E_0$  值, 即  $E_0 = \pi NTn_0^2 AR^2 = H_0$ . 表 1 数据表明, 当  $m$  增大时像面照度分布趋于均匀, 但这种趋势不是单调的. 从均匀度的角度分析,  $m$  值宜取大些. 一般说当  $\Delta I < 2\%$  时, 像面照度分布可看作是均匀.

### 2.3 分辨率

透镜列阵一个很重要的参数是分辨率, 这对复印的质量至关重要. 通常光学透镜的分辨率多使用分辨率板来检验. 而这种方法易受主观因素影响, 本文中透镜列阵的分辨率采用调制传递函数(MTF)来确定. 其定义为

$$\text{MTF} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (12)$$

$I_{\max}$  与  $I_{\min}$  分别是采用矩型调制时像面上的最大与最小光强. 根据衍射效应, 矩型调制的分辨率可表示为<sup>[3]</sup>

$$\left. \begin{aligned} s(f) &= \frac{\pi}{4} \left[ M(f) - \frac{1}{3} M(2f) + \frac{1}{5} M(5f) - \frac{1}{7} M(7f) + \dots \right], \\ M(f) &= (2/\pi) [\phi - \sin\phi \cos\phi], \quad \phi = \cos^{-1}(\lambda f / 2 \sin\alpha), \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中  $f$  为空间频率, 本文采用  $f$  为 2.5, 3.2, 4, 5, 6.3 lp/mm 的光栅进行检验. 由此可知, 为了获得较大的 MTF,  $\sin\alpha$  必须较大. 但从  $\sin\alpha = n_0 \sqrt{A} \cdot (R^2/K)$  分析, 此时  $K$  值要小即  $m$  值要小, 这样像面照度的均匀性差. 考虑到  $\Delta I$  与 MTF 的共同需要, 两者必须兼顾, 一般  $m$  的值在 1.5~2.5 范围内为宜.

### 2.4 共轭距离

自聚焦透镜列阵一个极为重要的参数是共轭距离 ( $TC$ ), 它是物与像之间的距离, 亦即复印机中复印件到感光鼓的距离, 复印机中此距离基本不变.

由(4)式可知,  $TC$  的大小取决于  $l$  和  $L$ . (3)式表明,  $l$  是  $\sqrt{A}$ ,  $L$  和  $n_0$  的函数. 对参数已确定的自聚焦透镜, 当  $L$  减小时  $TC$  增大, 反之则减小. 值得指出的是  $L$  的增减不是任意的. 由(7)式可知,  $L$  的减小使  $\sin\alpha$  变小, 导致像面的照度和分辨率下降. 因此在复印机设计时, 复印件到感光鼓的距离不应过大. 采用  $TC = 64$  mm 或 70 mm, 亦有采用 54 mm 和 74 mm. 此时的  $m$  值在 2.5 以下,  $\sin\alpha$  在 0.022~0.029 之间.

## 3 设计与制造

在自聚焦透镜列阵的制造中可根据两种不同情况进行设计: 一种设计是以现有的自聚焦透镜制成列阵. 此时  $n_0$ ,  $\sqrt{A}$  和  $R$  已确定, 然后根据所要求的  $TC$  值确定透镜的几何尺寸, 以获得最佳性能的透镜列阵; 另一种设计是由所规定的  $TC$  值根据所要求的光学特性确定自聚焦透镜应具有怎样的参数  $n_0$ ,  $\sqrt{A}$  和  $R$ . 无疑, 后一种设计将具有更大的应用价值.

### 3.1 根据现有自聚焦透镜参数设计最佳列阵

现有的自聚焦透镜其基本参数为:  $n_0 = 1.538$ ,  $\sqrt{A} = 0.127 \text{ mm}^{-1}$ ,  $R = 0.535 \text{ mm}$ . 根据(4)式、(6)式和(7)式, 并采用  $f = 6.3 \text{ lp/mm}$  的均匀光栅检测, 得到表 2 所示的结果. 因此, 在设计自聚焦透镜列阵时, 应根据已知的透镜光学参数, 所需的  $TC$  值以及选定的  $m$  值来确定列阵的长度  $L$ .

Table 2

$m$	$K$ (mm)	$L$ (mm)	$l_0$ (mm)	$TC$ (mm)	$\sin \alpha$	$s(f) \%$	$\Delta I \%$
1.5	1.6	30	14.74	59.49	0.0343	98.4	4.5
2.0	2.14	28.72	19.83	68.37	0.0261	95.7	2.9
2.1	2.25	28.52	20.74	70	0.0245	95.4	0.5
2.2	2.35	28.35	21.93	72.22	0.024	95	1.2
2.5	2.68	27.91	25.08	78.16	0.020	93.7	1.5
3.0	3.21	27.31	30.29	87.94	0.0174	91.8	1

值得指出的是理论上所得的 MTF 高达 90% 以上, 实测的 MTF 值则远低于此值, 这是因为我们只考虑衍射效应而没有讨论透镜排列的规则性, 冷加工工艺, 透镜圆度, 直径的均匀度, 色差等因素造成的影响。

### 3.2 根据所需自聚焦透镜列阵的参数, 设计出单根自聚焦透镜, 用以制成自聚焦透镜列阵

上述自聚焦透镜普遍用于复印机中, 从经济效益的角度看, 如能把板宽  $L$  从 28~29 mm 缩短至 20 mm, 这将大大降低成本. 为此需要制造出符合这种要求的玻璃和自聚焦透镜. 由于我们使用的是硅酸盐系锂玻璃, 其折射率在 1.55 左右. 经离子交换后, 自聚焦透镜中心的折射率较此值略低, 这在设计中一定要考虑到的. 设计的考虑如下:

- 1)  $m$  的取值: 如上所述, 当  $\Delta I < 2\%$  时,  $m$  的值小些, 则  $\sin \alpha$  增大, 分辨率较高.
- 2)  $\theta$  的取值: 一般地当  $TC$  要求在 20~30 mm 时,  $\theta$  宜取  $20^\circ$  型.  $TC$  为 30~55 mm 时,  $\theta$  宜取  $9^\circ$  型.  $TC > 55$  时,  $\theta$  宜取  $6^\circ$  型.

3)  $L$  的取值: 为了节省材料, 希望  $L$  能短些, 但  $L$  过短, 则  $l$  增大, 导致分辨率下降, 还必须考虑到(设计复印机的厂家)已确定了自聚焦透镜的共轭距离  $TC$ , 它也与  $L$  有关.

4)  $D$  的取值: 根据离子交换与制排的特点, 一般  $D$  的取值在 1.04~1.08 mm 左右.

据此作者设计了几种自聚焦透镜列阵其参数见表 3. 表 3 中 1# 样品与表 2 中的特性参数相比, 主要是  $L$  较短,  $TC$  较短, 最大场角  $\theta$  大,  $\sin \alpha$  (因而分辨率) 较高. 这正表明当  $TC$  较短时宜取用  $9^\circ$  型自聚焦透镜. 为了满足能在  $TC = 70$  mm 的情况下使用,  $L$  要求较 1# 样品所列的值为短. 采用 2# 样品能满足此要求, 但此时列阵的分辨率不如表 2 所列的分辨率高. 3# 样品设计显示, 采用  $n_0$  较高的玻璃, 自聚焦透镜的分辨率将略有提高.

Table 3

No.	$m$	$\theta^\circ$	$D$ (mm)	$L$ (mm)	$\sqrt{A}$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	$n_0$	$l$ (mm)	$TC$ (mm)	$\sin \alpha$
1	2.1	8.3	1.07	20	0.811	1.5339	14.08	49.37	0.0354
2	3.59	8.46	1.07	18.89	0.1811	1.5339	25.60	70.09	0.0207
3	3.57	8.56	1.07	19.6	0.1746	1.609	25.20	70.02	0.021

应该指出, 表 2 和表 3 所列的一些特性参数必须是离子交换后最佳扩散曲线所对应的特性参数, 否则自聚焦透镜的分辨将大为下降. 利用本系统研制的自聚焦透镜列阵参数测试仪对所制成的样品短排进行测量, 所得的主要参数列于表 4. 自聚焦透镜的基本参数为  $n_0 = 1.548$ ,  $\sqrt{A} = 0.1967 \text{ mm}^{-1}$ ,  $D = 1.07 \text{ mm}$ .

Table 4

No.	$L$ (mm)	$TC$ (mm)	$\theta^\circ$	$n$	$K$ (mm)	$\sin \alpha$	$l$ (mm)	$\Delta I$ %	MTF % 6.3 lp/mm
1	18.8	41.8	9°	1.82	1.95	.045	11.5	2	46
2	17.22	70.4	9.3°	4.08	4.37	.020	26.6	0.2	18

### 3.3 自聚焦透镜列阵的制造

目前研制自聚焦透镜列阵是采用手工排列的办法. 在黑色纤维板上按所需长度以密堆积形式把自聚焦透镜排成两层, 上面再复盖同样的黑色纤维板. 板与自聚焦透镜之间填充以黑色环氧树脂, 经固化后, 按所需要的长度把自聚焦透镜列阵研磨抛光. 这一工序要求严格. 若自聚焦透镜的轴向与端面不垂直而略有偏斜, 则制成的列阵其分辨率不高, 甚至不能成像. 抛光后的列阵还需镀以增透膜以提高透过率减少反射造成的影响, 然后进行特性参数测试. 最后涂以防静电涂层, 以免复印机复印时因列阵高压静电而吸收粉末, 导致自聚焦透镜的透过率和分辨率的下降.

## 4 结论

研究了自聚焦透镜成像特性, 得到了成像规律. 据此, 我们由已知自聚焦透镜特性参数  $n_0$ ,  $\sqrt{A}$ ,  $R$  和  $TC$  确定透镜列阵的尺寸. 也可由所需的自聚焦透镜列阵特性确定自聚焦透镜的特性参数, 从而制成所要求的自聚焦透镜列阵. 最后给出了列阵的特性参数.

### 参 考 文 献

- [1] J. C. Daly, *Fiber Optics*, Florida, CRC Press, Inc. 1984, 200
- [2] James D. Rees, Some radiometric properties of gradient-index fiber lenses, *Appl. Opt.*, 1980, **19**(7):1065~1069
- [3] William Lama, Optical properties of GRIN fiber lens arrays: dependence of fiber length, *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15):2739~2746

## Design and manufacture of selfoc lens arrays

HUANG Weitong      YANG Yinghai      LUO Zuning      YU Benli

(*Fiber Optics Research Laboratory, Department of Physics  
Anhui University, Hefei, Anhui 230039*)

(Received 15 October 1991)

### Abstract

Imaging rule of single selfoc lens and lens arrays is discussed. The optical parameters and size of single selfoc lens can be adjusted to produce required conjugate length and resolution of arrays. Practical arrays used in copying machines have been designed. The manufacture technique of arrays is preliminarily introduced.

**Key words** selfoc lens, array, copying machine.