

自聚焦透镜的单薄透镜等效系统的应用

寿翔¹ 甘本鑫² 苏红艳²

(¹曹集团公司, 犹他州 盐湖城 84118; ²淮安信息职业技术学院, 江苏 淮安 223001)

摘要 运用矩阵运算方法, 得到一个与自聚焦透镜完全等价的单薄透镜光学系统。这个等价光学系统, 仅由一个正薄透镜和两个完全相同的光学间隔组成。在近轴近似条件下, 它可以替代自聚焦透镜, 从而大大简化包含复杂自聚焦透镜的光电系统的光学分析。利用这个等效光学系统, 对所有节距的自聚焦透镜的成像特性进行了研究, 阐明了各个节距的自聚焦透镜的物像关系。并在此基础上讨论了该等效系统在光纤准直、复印机光学系统以及光纤耦合器里的应用。

关键词 光学器件; 自聚焦透镜; 矩阵光学; 等效光学系统; 成像特性

中图分类号 O436

OCIS 070.2590 080.2730 110.2760

文献标识码 A

Thin Lens Equivalent System for Selfoc Lens and Its Application

Shou Xiang¹ Gan Benxin² Su Hongyan²

(¹Cao Group, Salt Lake City, Utah 84118, USA
²Huaian College of Information Technology, Huaian, Jiangsu 223001, China)

Abstract A simple thin lens optical system fully equal to selfoc lens is got by using the method of matrix optics. This equivalent optical system is composed of a positive thin lens and two same optical intervals. Under the condition of paraxial approximation, the system can substitute a selfoc lens to simplify the optical analysis of an optoelectronic system containing complex selfoc lenses. Imaging properties of a selfoc lens at various lengths are studied and the object-image relation of a selfoc lens at various lengths is presented by using this equivalent optical system. Based on this, the application of the equivalent optical system, such as fiber collimation, optical system of photocopy machine, and fiber optic coupler, is discussed.

Key words optical devices; selfoc lens; matrix optics; equivalent optical system; imaging property

1 引言

自聚焦透镜是指由折射率沿径向连续变化的材料制造而成的透镜, 因此又称为变折射率透镜 (GRIN Lens)^[1~3]。在近轴近似的条件下, 自聚焦透镜等效于一个理想光学系统, 因而具有聚焦、发散、以及成像等光学特性。同时又具有输出输入端面平直、体积较小、光学性质可随其长度变化而调整等优点^[4~6]。自聚焦透镜被广泛地应用于各种光电集成系统和微光学系统, 如医疗内窥镜^[7]、复印机^[8]、传真机、光电扫描仪等等。但是, 自聚焦透镜的光学特性远比普通球透镜复杂。而且一直以来也没有一个简单的光学模型来刻画自聚焦透镜, 这也限制了它的广泛应用。虽然利用矩阵光学来分析自聚焦透镜的光学特性, 并简化其光学模型已有报道^[9,10], 但是这些简化的光学模型还是较为复杂高斯光学模型。特别是对于大于 0.5 节距的自聚焦透镜, 因为其焦平面在主面内侧, 其高斯光学模型相当复杂。到目前为止, 自聚焦透镜的近轴成像关系还没有一个清晰完整的阐述。本文从近轴光学的矩阵运算出发, 推导出一个与自聚焦透镜等效的单薄透镜光学系统。这个单薄透镜系统在近轴近似条件下, 完全等价于自聚焦透镜, 可以用来研究其光学性质。在此基础上, 研究了自聚焦透镜的成像关系, 并且对所有节距的自聚焦透镜, 给出了一个完整的近轴成像关系的阐述。之后将进一步讨论这个简化模型在光纤耦合, 复印件光学系统, 以及光纤扩束耦合器里的应用。

收稿日期: 2010-05-08; 收到修改稿日期: 2010-05-28

作者简介: 寿翔(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光学仪器方面的研究。E-mail: xiangshou@gmail.com

2 自聚焦透镜的单薄透镜等效系统

自聚焦透镜材料的折射率分布可以描述为

$$n^2 = n_0^2 [1 - (\alpha r)^2 + \alpha_2 (\alpha r)^4 + \alpha_3 (\alpha r)^6 + \dots], \quad (1)$$

该折射率分布可近似为

$$n = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} \alpha^2 r^2\right). \quad (2)$$

在近轴近似条件下,自聚焦透镜的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha d) & (1/\alpha) \sin(\alpha d) \\ -\alpha \sin(\alpha d) & \cos(\alpha d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/n_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha d) & (1/n_0 \alpha) \sin(\alpha d) \\ -n_0 \alpha \sin(\alpha d) & \cos(\alpha d) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

显然自聚焦透镜是一个左右对称的系统,下面判断它是否等价于一个最简单左右对称的单薄透镜系统(即一个左右距离为 L , 焦距为 f 的单薄透镜系统), 其传输矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - L\Phi & 2L - L^2\Phi \\ -\Phi & 1 - L\Phi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

假设(3)式与(4)式完全等价,从各式第一列第一项和第二项相等可得

$$\begin{cases} L = \tan(\alpha d/2)/(n_0 \alpha) \\ \Phi = 1/f = n_0 \alpha \sin(\alpha d) \end{cases}, \quad (5)$$

把(5)式代入(4)式的第二行第二项,可得

$$2L - L^2\Phi = \sin(\alpha d)/(n_0 \alpha), \quad (6)$$

以上运算结果说明如图1所示的单薄透镜系统,在近轴近似条件下,完全等价于自聚焦透镜。这个单薄透镜等价系统由一个焦距 $f = 1/[n_0 \alpha \sin(\alpha d)]$ 的薄透镜,以及两个长度 $L = \tan(\alpha d)/(n_0 \alpha)$ 光学间隔组成。这两个光学间隔并无物理意义,其和可以比自聚焦透镜的实际长度短或长。这个等价系统的物理意义在于,复杂的自聚焦透镜被一个简单的单透镜系统代替,对于一个位于自聚焦透镜外的观察者,这个等效系统所形成的物像关系与自聚焦透镜完全等价。

这个等效系统长度并不一定等于自聚焦透镜的长度,用等效系统两边距离 d_1 和 d_2 来刻画物像关系,如图2所示。 d_1 和 d_2 正负是这样定义的: d_1 在等效系统左边界左边为正,右边为负; d_2 在等效系统右边界右边为正,左边为负。

这个单薄透镜系统的等效性是对于处于自聚焦透镜外的观察者而言,像的虚实是这样定义的:用等效系统得到的虚像总是虚像,但是如果用等效系统得到的实像如果在等效系统里($d_2 < 0$),对观察者而言,也是虚像,所以也定义为虚像。在此基础上,仔细研究了各个节距自聚焦透镜的物像关系。

3 不同长度自聚焦透镜的等效单薄透镜系统具体分析

3.1 $0 < \alpha d < \pi/2$ 光学长度小于 0.25 节距的自聚焦透镜

如前所述,在这个光学长度范围内的自聚焦透镜完全等价于一个单薄透镜系统,如图2所示。等价的单透镜焦距 $f = 1/[n_0 \alpha \sin(\alpha d)]$, 其焦距大于零,为凸透镜,焦距 f 和光学间隔之间的距离为 $S = 1/[n_0 \alpha \tan(\alpha d)]$ 。对于小于 0.25 节距的自聚焦透镜, $S > 0$, 即焦点在光学间隔外,从牛顿成像关系可得其成像关系为 $(d_1 - S)(d_2 - S) = f^2$, $\beta = f/(S - d_1)$, 式中 d_1 和 d_2 分别为物和像到自聚焦透镜端面的距离, β 为

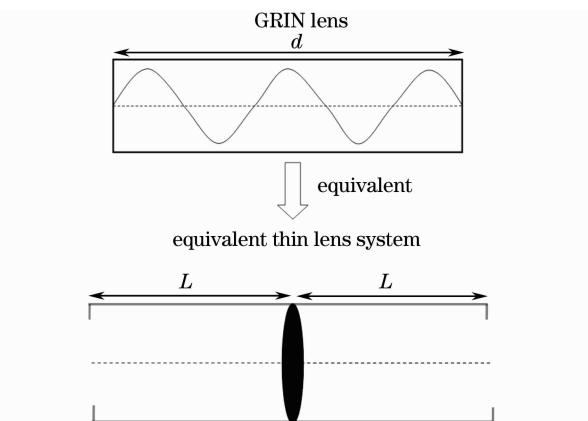


图1 自聚焦透镜的等效单薄透镜系统

Fig. 1 Equivalent thin lens system for selfoc lens

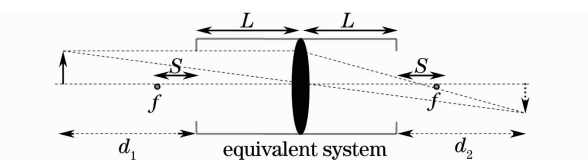


图2 光学长度小于 0.25 节距的自聚焦透镜的等效单薄透镜系统

Fig. 2 Equivalent thin lens system for selfoc lens small than 0.25 pitch

垂轴放大率。其具体物像关系如表 1 所示。

表 1 光学长度小于 0.25 节距的自聚焦透镜成像关系

Table 1 Imaging relation of selfoc lens small than 0.25 pitch

Object		Image	
$L_1 \leq d_1 < +\infty$	Real	$S < d_2 \leq L_1$	Real, Reduced, Reversed
$S \leq d_1 < L_1$	Real	$L_1 < d_2 < +\infty$	Real, Enlarged, Reversed
$0 < d_1 \leq S$	Real	$-\infty < d_2 \leq -L_2$	Imaginary, Enlarged, Erect
$-L < d_1 \leq 0$	Imaginary	$-L_2 < d_2 \leq -L$	Imaginary, Enlarged, Erect
$-L_2 < d_1 \leq -L$	Imaginary	$-L < d_2 \leq 0$	Imaginary, Reduced, Erect
$-\infty < d_1 < -L_2$	Imaginary	$0 < d_2 < S$	Real, Reduced, Erect

$$L_1 = 1/[n_0 \alpha \tan(\alpha d/2)], L_2 = \tan(\alpha d)/(n_0 \alpha)$$

3.2 $\alpha d = \pi/2$ 光学长度等于 0.25 节距的自聚焦透镜

等效于 0.25 节距的自聚焦透镜的单透镜系统如图 3 所示。对于这个光学系统, 等价的单透镜焦距 $f = 1/(n\alpha)$, 其焦距大于零, 为凸透镜, 焦距 f 和光学间隔相等, $L = f = 1/(n_0 \alpha)$, 这时焦点在自聚焦透镜的端面上。其成像关系为 $d_1 d_2 = f^2, \beta = (d_2 + L)/(d_1 + L) = -f/d_1$ 。具体成像关系如表 2 所示。

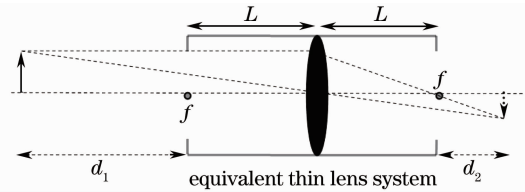


图 3 光学长度为 0.25 节距的自聚焦透镜的等效单薄透镜系统

Fig. 3 Equivalent thin lens system for selfoc lens at 0.25 pitch

表 2 光学长度为 0.25 节距的自聚焦透镜成像关系

Table 2 Imaging relation of selfoc lens small than 0.25 pitch

Object		Image	
$f \leq d_1 < +\infty$	Real	$0 < d_2 \leq f$	Real, Reduced, Reversed
$0 \leq d_1 < f$	Real	$f < d_2 < +\infty$	Real, Enlarged, Reversed
$-L \leq d_1 < 0$	Imaginary	$-\infty < d_2 \leq -L$	Imaginary, Enlarged, Erect
$-\infty < d_1 < -L$	Imaginary	$-L < d_2 < 0$	Imaginary, Reduced, Erect

3.3 $\pi/2 < \alpha d < \pi$ 光学长度在 0.25~0.5 节距的自聚焦透镜

对于这个光学长度范围内的自聚焦透镜, 其等效单透镜系统如图 4 所示。等价的单透镜焦距 $f = 1/[n\alpha \sin(\alpha d)]$, 其焦距大于零, 为凸透镜, 焦距 f 在等效系统里, 和系统边界的距离为 $S = 1/[n_0 \alpha \tan(\alpha d/2)]$ 。

其成像关系为 $(d_1 - S)(d_2 - S) = f^2, \beta = f/(S - d_1)$ 。物像关系如表 3 所示。

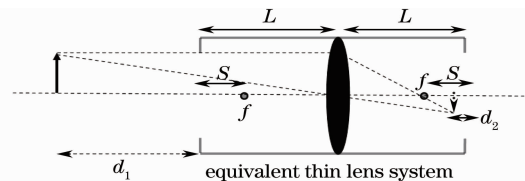


图 4 光学长度为 0.25~0.5 节距的自聚焦透镜的等效单薄透镜系统

Fig. 4 Equivalent thin lens system for selfoc lens at 0.25~0.5 pitch

表 3 光学长度为 0.25~0.5 节距的自聚焦透镜成像关系

Table 3 Imaging relation of selfoc lens at 0.25~0.5 pitch

Object		Image	
$-L_2 < d_1 < +\infty$	Real	$S < d_2 \leq 0$	Imaginary, Reduced, Reversed
$L_1 \leq d_1 < -L_2$	Real	$0 < d_2 \leq L_1$	Real, Reduced, Reversed
$0 \leq d_1 < L_1$	Real	$L_1 < d_2 \leq -L_2$	Real, Enlarged, Reversed
$S \leq d_1 < 0$	Imaginary	$-L_2 < d_2 < +\infty$	Real, Enlarged, Reversed
$-L \leq d_1 < S$	Imaginary	$-\infty < d_2 \leq -L$	Imaginary, Enlarged, Erect
$-\infty < d_1 < -L$	Imaginary	$-L < d_2 \leq S$	Imaginary, Reduced, Erect

$$L_1 = 1/[n_0 \alpha \tan(\alpha d/2)], L_2 = \tan(\alpha d)/(n_0 \alpha)$$

3.4 $\alpha d = \pi$ 光学长度等于 0.5 节距的自聚焦透镜

对于 0.5 节距的自聚焦透镜, 其传播矩阵为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha d) & (1/\alpha)\sin(\alpha d) \\ -\alpha\sin(\alpha d) & \cos(\alpha d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -y_0 \\ -\theta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 + L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -y_0 \\ -\theta_0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

从这个矩阵可以看出,0.5 节距的自聚焦透镜如同一个颠倒器。相当于把物在轴面颠倒 180°,把与轴成 θ 角的光线在轴面顺时针旋转 2θ ,如图 5 示。从图 5 可知,0.5 节距的自聚焦透镜并不聚焦,也不成像,仅仅作为一个颠倒器。

3.5 $\pi < \alpha d < 1.5\pi$ 光学长度在 0.5~0.75 节距的自聚焦透镜

对于在这个光学长度范围内的自聚焦透镜,如果直接套用(5)式,可得 L 为负值,显然无意义。但是从矩阵出发进行推导,发现其还是等效于一个单透镜系统。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \cos(\alpha d) & (1/n_0\alpha)\sin(\alpha d) \\ -n_0\alpha\sin(\alpha d) & \cos(\alpha d) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos(\alpha d) & -(1/n_0\alpha)\sin(\alpha d) \\ n_0\alpha\sin(\alpha d) & -\cos(\alpha d) \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} &\begin{cases} L = -\tan(\alpha d/2)/(n_0\alpha) > 0 \\ \Phi = 1/f = -n_0\alpha\sin(\alpha d) > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

从(8)式看,这时的自聚焦透镜等效于一个颠倒器再加一个焦点在光学间隔内的单正透镜系统。也就是等价于先把物沿轴翻转 180°,再经过一个单正透镜系统,如图 6 所示。这个推导结果也很容易理解,这个光学长度的自聚焦透镜等于一个 0.5 节距的自聚焦透镜和一个小于 0.25 节距的自聚焦透镜的叠加,即一个颠倒器加一个正透镜系统。

等价的单正透镜焦距 $f = -1/[n_0\alpha\sin(\alpha d)]$,焦距 f 和光学间隔之间的距离为 $S = 1/[n_0\alpha\tan(\alpha d)]$,其成像关系为 $(d_1 - S)(d_2 - S) = f^2, \beta = f/(d_1 - S)$ 。物像关系如表 4 所示。

表 4 光学长度为 0.5~0.75 节距的自聚焦透镜成像关系

Table 4 Imaging relation of selfoc lens at 0.5~0.75 pitch

Object		Image	
$L_1 \leq d_1 < +\infty$	Real	$S < d_2 \leq L_1$	Real, Reduced, Erect
$S \leq d_1 < L_1$	Real	$L_1 < d_2 < +\infty$	Real, Enlarged, Erect
$0 \leq d_1 \leq S$	Real	$-\infty < d_2 \leq -L_2$	Imaginary, Enlarged, Reversed
$-L \leq d_1 < 0$	Imaginary	$-L_2 < d_2 \leq -L$	Imaginary, Enlarged, Reversed
$-L_2 \leq d_1 < -L$	Imaginary	$-L < d_2 \leq 0$	Imaginary, Reduced, Reversed
$-\infty < d_1 < -L_2$	Imaginary	$0 < d_2 < S$	Real, Reduced, Reversed

$$L_1 = -\tan(\alpha d/2)/(n_0\alpha), L_2 = \tan(\alpha d)/(n_0\alpha)$$

3.6 $\alpha d = 1.5\pi$ 光学长度等于 0.75 节距的自聚焦透镜

运用与前面同理的推导,可推导出 0.75 节距的自聚焦透镜等效一个颠倒器再加和 0.25 节距自聚焦透镜等价的单正透镜系统,如图 7 所示。

对于这个光学系统,等价的单正透镜焦距 $f = 1/(n_0\alpha)$,焦距 f 和光学间隔相等, $L = f = 1/(n_0\alpha)$,即焦

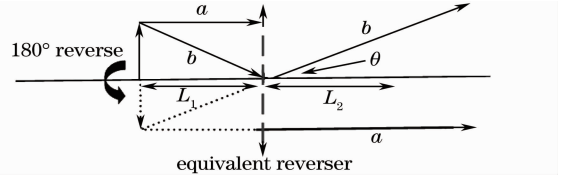


图 5 光学长度为 0.5 节距的自聚焦透镜的等效单薄透镜系统

Fig. 5 Equivalent thin lens system for selfoc lens at 0.5 pitch

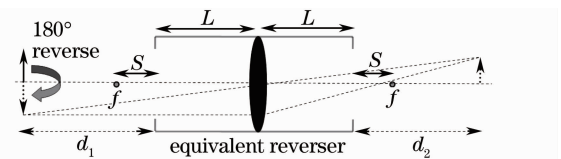


图 6 光学长度为 0.5~0.75 节距的自聚焦透镜的等效单薄透镜系统

Fig. 6 Equivalent thin lens system for selfoc lens at 0.5~0.75 pitch

点在自聚焦透镜的端面上。其成像关系为 $d_1 d_2 = f^2, \beta = f/d_1$ 。物像关系如表 5 所示。

表 5 光学长度为 0.75 节距的自聚焦透镜成像关系

Table 5 Imaging relation of selfoc lens at 0.75 pitch

Object		Image	
$f \leq d_1 < +\infty$	Real	$0 < d_2 \leq f$	Real, Reduced, Erect
$0 \leq d_1 < f$	Real	$f < d_2 < +\infty$	Real, Enlarged, Erect
$-L \leq d_1 < 0$	Imaginary	$-\infty < d_2 \leq -L$	Imaginary, Enlarged, Reversed
$-\infty < d_1 < -L$	Imaginary	$-L < d_2 < 0$	Imaginary, Reduced, Reversed

3.7 $1.5 < \alpha d < 2\pi$ 光学长度在 0.75 节距和 1 节距之间的自聚焦透镜

同上理可推导得这个光学系统等价于一个颠倒器再加一个等效于 0.25 节距和 0.5 节距之间自聚焦透镜的正透镜系统,如图 8 所示。

等价的单正透镜焦距 $f = -1/[n_0 \alpha \sin(\alpha d)]$, 焦距 f 和光学间隔之间的距离为 $S = 1/[n_0 \alpha \tan(\alpha d)]$ 。其成像关系为 $(d_1 - S)(d_2 - S) = f^2, \beta = f/(d_1 - S)$ 。物像关系如表 6 所示。

表 6 光学长度为 0.75~1 节距的自聚焦透镜成像关系

Table 6 Imaging relation of selfoc lens at 0.75~1 pitch

Object		Image	
$-L_2 < d_1 < +\infty$	Real	$S < d_2 \leq 0$	Imaginary, Reduced, Erect
$L_1 \leq d_1 < -L_2$	Real	$0 < d_2 \leq L_1$	Real, Reduced, Erect
$0 \leq d_1 < L_1$	Real	$L_1 < d_2 \leq -L_2$	Real, Enlarged, Erect
$S \leq d_1 < 0$	Imaginary	$-L_2 < d_2 < +\infty$	Real, Enlarged, Erect
$-L \leq d_1 < S$	Imaginary	$-\infty < d_2 \leq -L$	Imaginary, Enlarged, Reversed
$-\infty < d_1 < -L$	Imaginary	$-L < d_2 \leq S$	Imaginary, Reduced, Reversed

$$L_1 = -\tan(\alpha d/2)/(n_0 \alpha), L_2 = \tan(\alpha d)/(n_0 \alpha)$$

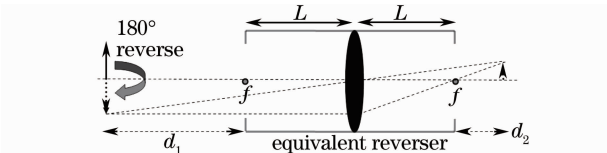


图 7 光学长度为 0.75 节距的自聚焦透镜的等效单薄透镜系统

Fig. 7 Equivalent thin lens system for selfoc lens at 0.75 pitch

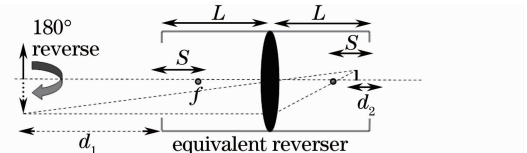


图 8 光学长度为 0.25~1 节距的自聚焦透镜的等效单薄透镜系统

Fig. 8 Equivalent thin lens system for selfoc lens at 0.25~1 pitch

3.8 $\alpha d = 2\pi$ 光学长度等于 1 节距的自聚焦透镜

对于这个光学系统,其传输矩阵 $\begin{bmatrix} \cos(\alpha d) & (1/\alpha)\sin(\alpha d) \\ -\alpha\sin(\alpha d) & \cos(\alpha d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 为一个单元矩阵。可见其不起任何成像或聚焦的作用,只是相当于缩短了透镜长度的光学长度。

4 自聚焦透镜的单薄透镜等效系统在光电子方面的应用

4.1 光纤准直器的应用

光纤准直器^[11,12]是非常重要的光无源器件,其作用是对光纤里的高斯光束进行准直。光纤准直器原理是将光纤输出端面看作一个点,并放在自聚焦透镜的焦点上进行准直。从以上自聚焦透镜的单薄透镜等效系统分析可知,只有介于 0~0.25 节距和 0.5~0.75 节距的自聚焦透镜才能用于光纤准直器,因为只有这些自聚焦透镜的焦点在光学间隔外。为了减少球差,焦点离自聚焦透镜越近越好,显然 0.25 节距和 0.75 节距的自聚焦透镜的焦点都在端面上,所以这两个节距的自聚焦透镜是最佳选择。再考虑到需要减少自聚焦透镜本身引起的像差,自聚焦透镜的节距要越短越好,所以 0.25 节距的自聚焦透镜是最适合用于光纤准直器的。

4.2 在复印机光学系统中的应用

复印机的应用特点要求其光学系统能成和实物对应的 1:1 共轭正立实像,而且要求这个光学系统越短越好。显然,单个透镜对实物无法成正立实像。而多个透镜组成的光学系统虽然可以满足对实物成正立实像的条件,但是通常无法满足很短光学系统的条件。明显,从单透镜等价系统分析得知,0.5~1 节距的自聚焦透镜可以对实物成正立的实像。而且其长度通常才几个毫米,且其焦距也很短,因此构成一个能成正立实像的短焦距短光学系统,能完全满足复印机的光学系统要求。所以,由自聚焦透镜组成的阵列被广泛地应用于复印机系统。

4.3 在扩束光纤耦合器里的应用

近来,扩束光纤耦合器被广泛地应用在恶劣环境下的光纤系统,以及传输大功率激光的光纤系统^[13]。扩束光纤耦合器的原理如图 9 所示,耦合器主要由一个正透镜组成,输入和输出光纤处在共轭物像点上,以达到最佳耦合效率。从该自聚焦透镜的等效系统可知,其等价于一个正透镜,所以除了 0.5 和 1 节距的自聚焦透镜外,其他任何节距的自聚焦透镜都可以用于扩束光纤耦合器。但是考虑到工程实际应用,大部分扩束光纤耦合器都使用 0.23 节距的自聚焦透镜。

对于大部分光纤系统,需要耦合的输入和输出光纤都有一样的直径。因此根据光学里的光线可逆原理^[14],输入和输出光纤的端面应位于离正透镜 $2f$ 的位置上。对于用 0~0.5 节距自聚焦透镜的耦合器,光纤端面应该在距自聚焦透镜 $d = 2f - L = 1/[n_0\alpha \tan(\alpha d/2)]$ 的轴上,而对于用 0.5~1 节距的自聚焦透镜的耦合器,光纤端面应在距自聚焦透镜 $d = 2f - L = -\tan(\alpha d/2)/(n_0\alpha)$ 的轴上,如图 9 所示。

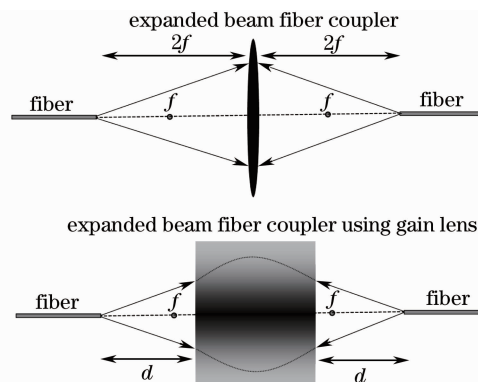


图 9 光束扩展光纤放大器

Fig. 9 Expanded beam fiber couplers

5 结 论

本文提出一个基于矩阵运算的等效于自聚焦透镜的单透镜系统。在近轴近似的条件下,这个光学系统完全等效于自聚焦透镜。由于这个光学系统只有一个单透镜,用其来研究自聚焦透镜光学特性简单明了,简化了自聚焦透镜在光电子应用里的光学分析。

参 考 文 献

- Huang Weitong, Yang Yinghai, Guo Yuanyue *et al.*. Manufacture technique of selfco lens arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(1): 87~90
黄伟同, 杨瀛海, 郭园月 等. 放大/缩小自聚焦透镜阵列的研制[J]. *光学学报*, 1994, **14**(1): 87~90
- Song Qiuming, Huang Feng, Li Ming *et al.*. Graded refractive-index SiO_x infrared rugate filter prepared by reactive magnetron sputtering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2144~2149
宋秋明, 黄 烽, 李 明 等. 反应磁控溅射制备 SiO_x 渐变折射率红外梳状滤光片[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2144~2149
- Dong Miao, Tang Xiongui, Nuermaiti *et al.*. Design and analysis for wide-angle low-loss Y-branch waveguides with graded-index profiles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 97~100
董 森, 唐雄贵, 努尔买买提 等. 大角度、低损耗渐变折射率型 Y 分支波导设计与分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 97~100
- Huang Weitong, Yang Yinghai, Guo Yuanyue *et al.*. Design and manufacture of selfoc lens arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(4): 366~370
黄伟同, 杨瀛海, 俞本立 等. 自聚焦透镜阵列的设计原理与制造[J]. *光学学报*, 1993, **13**(4): 366~370
- Wang Feng, Liu Desen, Jiang Xiaoping *et al.*. Comparative study of two development programs of square GRIN lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 48~52
王 风, 刘德森, 蒋小平 等. 两种方形自聚焦透镜研制方案的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 48~52
- Zhang Yanli, Li Xiaoyan, Zhu Jianqiang. Small-scale self-focusing of divergent beams in gain medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 786~793
张艳丽, 李小燕, 朱健强. 增益介质中发散光束的小尺度自聚焦[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 786~793
- A. M. Rollins, R. Ung-arunyawee, A. Chak *et al.*. Real-time in vivo imaging of human gastrointestinal ultrastructure by use of endoscopic

- optical coherence tomography with a novel efficient interferometer design[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(12): 1358~1360
- 8 M. Kawazu, Y. Ogura. Application of gradient-index fiber arrays to copying machines[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(7): 1105~1112
- 9 Ji Guangming, Pu Zhengcai. Study of the imaging property of plano-convex GRIN lens using matrix optics[J]. *J. Chongq. Teach. Col(Natural Science Edition)*, 1998, **14**(4): 51~56
- 季光明, 蒲政才. 利用矩阵光学研究平凸自聚焦透镜的成像特性[J]. *重庆师范学院学报(自然科学版)*, 1998, **14**(4): 51~56
- 10 Zheng Guangzhao. GRIN lens and analysis of its imaging property[J]. *J. of GD. Mech. Ins.*, 1995, **13**(1): 5~14
- 郑光昭. 自聚焦透镜及其成像分析[J]. *广东机械学院学报*, 1995, **13**(1): 5~14
- 11 R. W. Gilsdorf, J. C. Palais. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses[J]. *Appl. Optics*, 1994, **33**(16): 3440~3445
- 12 Liu Xiaoqin, Wu Yi, Hu Shunxin *et al.*. Design and implementation of automatic alignment system for the lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2341~2345
- 刘小勤, 吴毅, 胡顺星等. 激光雷达光束自动准直系统设计与实现[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2341~2345
- 13 J. C. Baker, D. N. Payne. Expanded beam connector design study[J]. *Appl. Optics*, 1981, **20**(16): 2861~2867
- 14 Born M., Wolf E.. *Principles of Optics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999