

文章编号: 0258-7025(2005)06-0743-06

平面交叉型微透镜阵列的制作及成像特性研究

刘德森¹, 胡建明², 刘 炜³, 蒋小平¹

¹西南师范大学物理学院, 重庆 400715
²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
³深圳市欣然电子有限公司, 广东 深圳 518032

摘要 介绍了采用光刻离子交换工艺制作平面交叉型微透镜阵列的方法。利用积分形式的光线方程式讨论了平面交叉型微透镜的近轴光学特性,研究了微透镜的光线轨迹方程式和一些重要的近轴成像特性,利用 ABCD 定理得到了平面交叉型微透镜像距、焦距、像高、横向放大率和主平面位置的数学表达式,焦距的理论计算结果和实验数据吻合得很好。

关键词 导波光学; 光波导; 轨迹方程式; 微透镜阵列

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A

Studies on the Optical Properties of Planar Intersect Microlens Arrays

LIU De-sen¹, HU Jian-ming², LIU Wei³, JIANG Xiao-ping¹

¹ Department of Physics, South-West China Normal University, Chongqing 400715, China
² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
³ Shenzhen Xinran Electric Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518032, China

Abstract In the paper, ion-exchange technique fabrication method of planar intersect microlens arrays is given. Using ray equations in integral form, paraxial optical properties of microlens arrays are studied. The ray trajectory equation and imaging of microlens arrays are presented. Mathematics expressions of images distance, focal length, image height lateral magnification and plane by ABCD law are obtained. Theoretical calculated results of focusing length are in good agreement with the experimental data.

Key words guided wave optics; planar intersect waveguide; ray trajectory equation; microlens arrays

1 引言

光学元件的微型化、轻量化、集成化是微小光学元件的发展方向^[1,2]。1981年, K. Iga等^[3]首先研制出分布型折射率平面微透镜阵列即自聚焦平面微透镜阵列,并用理想的鲁尼伯格(Luneberg)模型对平面微透镜阵列的近轴光学特性特别是焦距特性进行了讨论。从此以后,微透镜从分立元件发展到阵列元件,利用微透镜阵列制作了光互连耦合器^[4]、图像多重变换和识别器^[5,6]、光无源器件阵列等,对光信息处理、光纤通信和集成光子器件等科学与技术的发展起了重要作用。对微透镜阵列的研究引起了人们的很大兴趣^[7,8],发展很快。目前,制作微透

镜阵列的方法很多,主要有光刻离子交换^[7~12]、光敏热处理^[13~15]、光刻热成形^[16]、离子束刻蚀^[17,18]等。这些方法各有自己的特点,使用最多的首推光刻离子交换和光刻热成形工艺。

采用光刻离子交换工艺,在特定的光学玻璃基片上,制作了掩埋式、平面交叉型变折射率半球形微透镜阵列。和其他工艺比较,其主要特点是微透镜在垂直交叉的两个方向的折射率分布可以通过改变两方向窗口直径大小进行调节。本文不考虑光信息在构成透镜阵列的波导中的传输特性,仅讨论平面交叉型微透镜阵列的制作工艺。理论分析与实验^[8,19]证明,鲁尼伯格模型仅在理想球对称状态

收稿日期: 2004-02-23; 收到修改稿日期: 2005-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(60277017)和重庆市攻关课题(2000-6505)资助项目。

作者简介: 刘德森(1937—),男,陕西南郑人,西南师范大学教授,博士生导师,主要从事纤维光学、变折射率光学、微小光学和微光子集成器件的研究。E-mail: liuds@swnu.edu.cn

下有效,实际研制的平面微透镜阵列的折射率分布很难是理想的球对称,通常是旋转对称,这种微透镜也有很好的成像能力。

2 制作工艺

制作微透镜阵列采用的光刻离子交换工艺如图 1 所示。为了得到聚焦性能好、数值孔径大的微透镜,制作工艺要求采用极化率差大的交换离子对、扩散系数较大的一价正离子,理论分析和实验证明,交换离子对最好是 Na^+ , Tl^+ 离子。为了得到正透镜,玻璃基片应是一种碱金属 (Na_2O) 含量较高的特种光学玻璃 PS-1,熔盐是化学性能较稳定的 Tl_2SO_4 , 由于 Tl_2SO_4 的熔化温度比基片玻璃高,为了降低熔盐的熔化温度,采用 Tl_2SO_4 (40% ~ 60%) + ZnSO_4 (60% ~ 40%) 的混合盐。

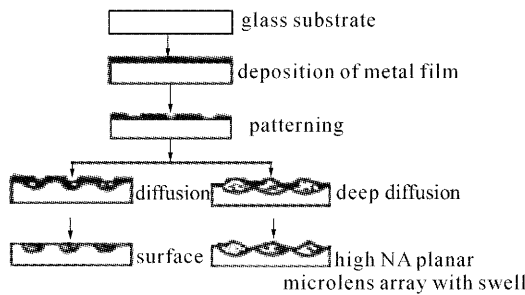


图 1 平面交叉型微透镜阵列工艺图

Fig. 1 Process drawing of planar intersect microlens arrays

窗口的大小和形状对离子交换结果有很大影响。采用的窗口是通过光刻工艺制作在玻璃基片的黑色钛膜上纵横交叉波导的交点,波导宽度为 0.1 ~ 0.2 mm,相邻波导中心距为 1 mm。根据文献 [18],要得到理想的半球透镜,离子交换深度应远大于窗口的半径。当离子交换深度大于窗口半径的 6.3 倍时,其折射率分布区域接近半球形,如图 2 所示。由于 Tl^+ 的扩散系数很小,在 500 °C 时,要得到

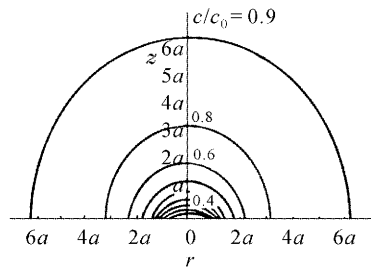


图 2 离子交换深度、窗口大小与折射率剖面的关系

Fig. 2 Relationship among the depth of ion-exchange, window radius and refractive index profile

足够大的交换深度往往很困难。因此,实验采用的窗口直径很小,为 0.1 mm,得到的折射率剖面比较接近于半球形。如果窗口半径较大,虽然 Tl^+ 的扩散系数很小,只要使交换时间延长,虽得到的折射率剖面不是理想的球对称分布而是旋转对称分布,也可以很好地成像。因此,旋转对称的折射率分布是平面微透镜阵列折射率分布的一般情况,球对称折射率分布仅是一种理想的特例。

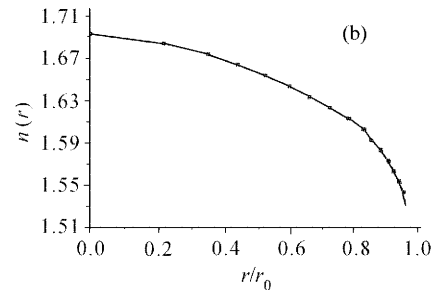
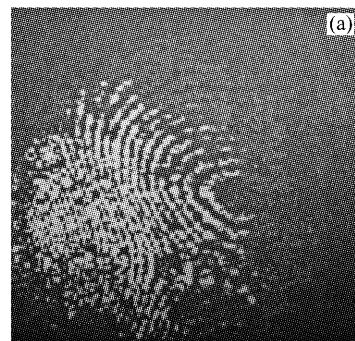


图 3 平面交叉微透镜折射率剖面的干涉图(a)和折射率分布曲线(b)

Fig. 3 Interference figure of refractive index profile (a) and refractive index distribution (b) of planar intersect microlens

离子交换温度由玻璃基片的软化温度确定。对 PS-1 型光学玻璃,离子交换温度是 480 ~ 510 °C。离子交换时间决定于离子交换深度大于窗口半径的 6.3 倍所需的时间,采用的最佳交换时间是 65 ~ 75 h。根据离子交换工艺制作的平面交叉型微透镜的折射率剖面干涉照片见图 3(a),折射率分布曲线见

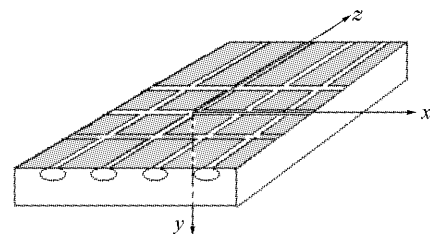


图 4 平面交叉型微透镜阵列示意图

Fig. 4 Schematic of planar intersect microlens arrays

图 3(b)。

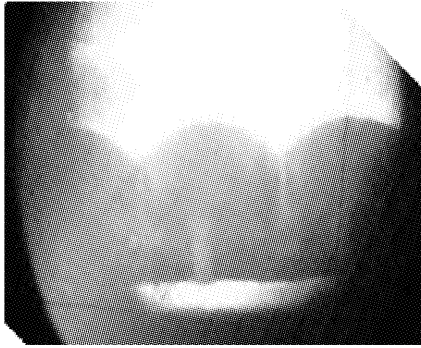


图 5 平面交叉型微透镜阵列截面照片

Fig. 5 Photograph of planar intersect microlens arrays

3 近轴光学特性

从图 4 和图 5 可知,制作的平面交叉玻璃波导,具有掩埋式、变折射率型的特点;波导的交叉点掩埋在玻璃基片的表面之下。很明显,由这些均匀分布的交叉点构成了变折射型平面微透镜阵列。为了简单起见,仅讨论两个方向上的波导直径相同的正方形窗口情况。由于这些交叉点的直径小(边长 0.1 mm 的正方形),离子交换后,以这些交叉点为中心形成了一个近似于鲁尼伯尔格^[20]的旋转对称分布。只要交叉点的直径很小,折射率剖面区域就具有很好的旋转对称性,其外形就接近于半球形^[19,21,22]。如直径较大,折射率剖面仍具有很好的旋转对称分布,这种微透镜也具有很好的成像特性。在旋转对称模型下,离子交换过程近似认为是点源扩散过程,窗口越小,近似程度就越好。这时,折射率分布不仅与径向坐标 r 有关,而且与轴向坐标 z 有关,可以简单写成

$$n^2(r, z) = n^2(0, 0)[R(r) + Z(z)], \quad (1)$$

式中 $n(0, 0)$ 为球中心折射率, r 为到 z 轴的距离,如图 6 所示。折射率分布具有旋转对称的鲁尼伯尔格分布^[20,23] 情况下,在近轴近似下,讨论光线传播所采用的积分光线方程式为

$$\int_0^r \frac{dr}{\sqrt{R(r) - C_z^2 R(r_0)}} = \pm \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{Z(z) + C_z^2 R(r_0)}}, \quad (2)$$

式中 C_z 是对 z 轴的方向余弦。在近轴近似下,多项式 $R(r)$ 和 $Z(z)$ 仅取到平方项,有

$$R(r) = 1 - (gr)^2, \quad Z(z) = -\gamma_{20}(gz)^2, \quad (3)$$

式中 g 为折射率分布常数, γ_{20} 是折射率矩阵的矩阵元。将(3)式代入(1)式,半球形微透镜的折射率分布可以写成

$$n^2(r, z) = n^2(0, 0)[1 - (gr)^2 - \gamma_{20}(gz)^2]. \quad (4)$$

从(2)式和图 6 可知,(2)式右端取“+”号时对应 $dr/dz > 0$,即图 6 中 Z_m 点以前的情况,斜率为正;取“-”号时对应 $dr/dz < 0$,即图中 Z_m 点以后光线开始会聚情况,斜率为负;在 Z_m 点, $dr/dz = 0$,斜率为零,称为转向点。在转向点前,即 $dr/dz > 0$,将(4)式代入(2)式,完成两端积分,结果是

$$r = r_0 \cos F(z) + \frac{\sqrt{1 + (gr_0)^2 - C_z^2 [n(r_0)/n(0)]^2}}{g} \sin F(z), \quad (5)$$

(5)式已引入

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{|\gamma_{20}|}} \arcsin \left[\frac{n(0) \sqrt{|\gamma_{20}|} gz}{l_0} \right], \quad (6)$$

C_r, C_θ 和 C_z 分别是第一、第二和第三方向余弦, $p_0 = n(r_0)C_r, q_0 = n(r_0)C_\theta$ 和 $l_0 = n(r_0)C_z$ 分别为第一、第二和第三光学方向余弦。考虑到初始条件: $C_r^2 + C_\theta^2 + C_z^2 = 1$, (5)式可重新写成

$$r = r_0 \cos F(z) + \frac{p_0}{gn(0)} \sin F(z), \quad (7)$$

(7)式对 z 微分,可得光线的斜率(即方向余弦)

$$\frac{dr}{dz} = -r_0 \sin F(z) \frac{dF(z)}{dz} + \frac{p_0}{gn(0)} \cos F(z) \frac{dF(z)}{dz}, \quad (8)$$

在近轴近似下,对于子午光线有 $l_0^2 = n^2(r_0) - p_0^2$, (7)式对 z 的微分为

$$\frac{dF(z)}{dz} = \frac{n(0)g}{\sqrt{n^2(r_0) - p_0^2 - n^2(0)g^2 z^2}} = \frac{n(0)g}{\sqrt{n^2(r, z) - p^2}} = \frac{n(0)g}{l}, \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式结果是

$$\frac{dr}{dz} = -r_0 \frac{n(0)g}{l} \sin F(z) + \frac{p_0}{l} \cos F(z), \quad (10)$$

于是,第一光学方向余弦可以写成

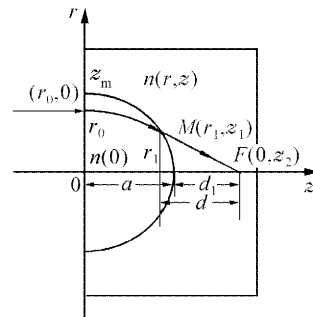


图 6 平面交叉型微透镜的光线轨迹和成像特性

Fig. 6 Ray trajectory and imaging properties of planar intersect microlens arrays

$$p = n(r, z) \frac{dr}{ds} = n(r, z) \frac{dr}{dz} \frac{dz}{dz} = l \frac{dr}{dz} = -n(0)r_0 g \sin F(z) + p_0 \cos F(z), \quad (11)$$

在转向点 z_M , 有 $dr/dz = 0$, 第一光学方向余弦为

零。从(11) 式可得:

$$\tan F(z) = p_0/[n(0)r_0 g], \quad (12)$$

求解(12)式可得

$$z_M = \frac{l_0}{g \sqrt{|\gamma_{20}|}} \sin \left\{ \sqrt{|\gamma_{20}|} \arctan \left[\frac{p_0}{n(0)r_0 g} \right] \right\}, \quad (13)$$

于是, 光线方程(2)可重新写成

$$\int_0^r \frac{dr}{\sqrt{R(r) - C_z^2 R(r_0)}} = \int_0^{z_M} \frac{dz}{\sqrt{Z(z) + C_z^2 R(r_0)}} - \int_{z_M}^z \frac{dz}{\sqrt{Z(z) + C_z^2 R(r_0)}}, \quad (14)$$

(14)式两端完成积分后有

$$\arcsin \frac{gr}{\sqrt{1 - [l_0/n(0)]^2}} = \arcsin \frac{gr_0}{\sqrt{1 - [l_0/n(0)]^2}} + \frac{2}{\sqrt{|\gamma_{20}|}} \arcsin \frac{n(0) \sqrt{|\gamma_{20}|} g z_M}{l_0} - \frac{1}{\sqrt{|\gamma_{20}|}} \arcsin \frac{n(0) \sqrt{|\gamma_{20}|} g z}{l_0}$$

利用上面同样的推导, 并引入关系(6)式, 很容易得到

$$r = r_0 \cos[2F(z_M) - F(z)] + \frac{p_0}{n(0)g} \sin[2F(z_M) - F(z)], \quad (15)$$

$$p = \frac{dr}{dz} = -n(0)r_0 \sin[2F(z_M) - F(z)] - p_0 \cos[2F(z_M) - F(z)]. \quad (16)$$

(15), (16) 式就是平面交叉型微透镜阵列中描述光线传输的轨迹方程式。

可以证明, (7) 式和(11) 式对斜率 dr/dz 变号时也成立。因此, 通常把(7) 式和(9) 式称为光线轨迹方程式, 并可写成如下矩阵形式

$$\begin{vmatrix} r \\ p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos F(z) & \frac{1}{n(0)g} \sin F(z) \\ -n(0)g \sin F(z) & \cos F(z) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_0 \\ p_0 \end{vmatrix}. \quad (17)$$

4 近轴光学成像特性

(19)

如图 6 所示, 平面交叉型微透镜阵列中单元透镜的成像可分解为五个连续的不同过程: 1) 光线在长为 l_1 , 折射率 $n_0 = 1$ 的空气中传播, 光线矩阵是 M_{12} ; 2) 光线在微透镜前平面上的折射, 光线矩阵是 M_{23} ; 3) 光线在微透镜中的传输, 光线矩阵是 M_{34} ; 4) 光线在微透镜后平面上的折射, 光线矩阵是 M_{45} ; 5) 光线在长为 l_2 , 折射率为 n_2 的基片中的传播, 光线矩阵是 M_{56} 。于是, 经微透镜系统的成像过程可写为

$$\begin{vmatrix} r \\ p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_0 \\ p_0 \end{vmatrix}, \quad (18)$$

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = M_{56} M_{45} M_{34} M_{23} M_{12},$$

根据文献[24]有

$$M_{12} = \begin{vmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad M_{23} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_0/n(0) \end{vmatrix},$$

$$M_{56} = \begin{vmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad M_{45} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n(0)/n_2 \end{vmatrix},$$

从(17) 式可得

$$M_{34} = \begin{vmatrix} \cos F(z) & \frac{1}{n(0)g} \sin F(z) \\ -n(0)g \sin F(z) & \cos F(z) \end{vmatrix}, \quad (20)$$

将(19)式和(20)式代入(18)式, 结果为

$$A = \cos F(z) - l_2 \frac{n^2(0)}{n_2} g \sin F(z),$$

$$B = l_1 \cos F(z) + \frac{n_0}{n^2(0)g} \sin F(z) + l_2 \left[\frac{n_0}{n_2} \cos F(z) - \frac{n^2(0)gl_1}{n_2} \sin F(z) \right], \quad (21)$$

$$C = -\frac{n^2(0)g}{n_2} \sin F(z),$$

$$D = \frac{n_0}{n_2} \cos F(z) - l_1 \frac{n^2(0)g}{n_2} \sin F(z).$$

从上面讨论的结果很容易得到平面交叉型微透镜阵列的如下近轴光学成像特性

1) 像距。成像的必要条件是从一点出发的入射角不同的所有光线都能聚集于一点,即 $B = 0$ 。因此有

$$l_2 = \frac{n_2}{n^2(0)g} \frac{n^2(0)gl_1 \cos F(z) + n_0 \sin F(z)}{n^2(0)gl_1 \sin F(z) - n_0 \cos F(z)} \quad (22)$$

2) 焦距。当 $l_1 \rightarrow \infty$ 时的像距定义为焦距。从(22)式可得后焦距为

$$f = l_2 |_{l_1 \rightarrow \infty} = \frac{n_2}{n^2(0)g \tan F(z)}, \quad (23)$$

前焦距为

$$f'' = -f = \frac{n_2}{n^2(0)g \tan F(z)} \circ$$

3) 像高。从(18)式可知:

$$r = Ar_0 = \left[\cos F(z) - l_2 \frac{n^2(0)g}{n_2} \sin F(z) \right] r_0 = \frac{-r_0}{n^2(0)gl_1 \sin F(z) - n_0 \cos F(z)} \quad (24)$$

4) 横向放大率。

$$M = \frac{r}{r_0} = \cos F(z) - l_2 \frac{n^2(0)g}{n_2} \sin F(z) = -\frac{1}{n^2(0)gl_1 \sin F(z) - n_0 \cos F(z)} \quad (25)$$

5) 主平面位置。主平面的特点是横向放大率 $|M| = 1$ 。从(25)式可得后主平面的位置为

$$h = l_2 |_{|M|=1} = \frac{1 - \cos F(z)}{n^2(0)g \sin F(z)} n_2 = \frac{n_2}{n^2(0)g} \tan \left[\frac{F(z)}{2} \right], \quad (26)$$

前主平面位置为:

$$h^* = -h = -\frac{n_2}{n^2(0)g} \tan \left[\frac{F(z)}{2} \right] \circ$$

5 理论与实验对比

利用初始条件、测量数据和(23)式,对实验样品的焦距进行了计算。以样品 TWL-1-1 为例,微透镜的半径 $a = 0.59$ mm,离子交换深度 $b = 0.55$ mm,基片玻璃折射率 $n(r, z) = 1.5262$,利用薄片干涉法测量得到透镜中心折射率 $n(0) = 1.6960$,从初始条件可以得到

$$n(r, z) |_{r=a, z=0} = n(r, z) |_{r=0, z=b} = 1.5262 \circ$$

从(4)式可得: $g = 0.7392, \gamma_{20} = 1.1506, l_1 \rightarrow \infty$ 时的平行光入射条件下, $C_z = 1$,第三光学方向余弦 $l_0 = n(r, 0) = 1.5262$,再将 g, γ_{20}, l_0 的数值代入(16)式,可得 $F(z) = 27.04290$ 。最后从(23)式可以求出焦距: $f = 1.4050$ mm。其他样品的计算值与实验值的比较见表 1。从表 1 可知,理论计算结果和实验值符合得很好。

表 1 焦距的理论计算值与实验数据比较

Table 1 Test and theoretical focus

Samples	Value of test				theoretical value		
	a /mm	b /mm	f /mm	g /mm ^{-1/2}	γ_{20}	$F(z)$	f /mm
TWL-1-1	0.59	0.55	1.4	0.7396	1.1504	27.0429	1.4050
TWL-1-2	0.64	0.60	1.5	0.6818	1.1377	27.1957	1.5139
TWL-1-3	0.68	0.64	1.6	0.6417	1.1289	27.3041	1.6014
TWL-2-1	0.81	0.76	1.9	0.5387	1.1359	27.2168	1.9145
TWL-2-2	0.89	0.84	2.1	0.4903	1.1225	27.3808	2.0889
TWL-2-3	0.94	0.89	2.2	0.4642	1.1155	27.4658	2.1984

6 结 论

采用光刻离子交换工艺制作了平面交叉型微透镜阵列,介绍了最佳制作工艺参量的确定原则。同时,将理想状态下平面微透镜阵列采用的鲁尼伯格模型推广到一般情况下平面微透镜阵列常用的旋转对称模型。在旋转对称模型基础上,讨论了一一般情况下微透镜阵列的近轴光线轨迹方程式和微透镜的近轴成像关系,对制作的一些样品的焦距进行了测量,测量结果很接近于理论计算数据,这一结果说

明我们在旋转对称模型基础上进行的理论分析是正确的。

参 考 文 献

- 1 H. O. Sankur, M. E. Motamedi. Microoptics development in the past decade [C] *SPIE*, 2000, **4179**: 30~55
- 2 W. B. Veldkamp. Over view of microoptics: past, present and future [C]. *SPIE*, 1991, **1554**: 2187~2191
- 3 K. Iga, S. Misawa. Distributed-index planar microlens and stacked planar optics: a review of progress [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(19): 3388~3396
- 4 M. Oikawa, H. Nemoto, K. Hamanaka *et al.*. Light coupling

- characteristics of planar microlens [C]. *SPIE*, 1991, **1544**: 226~237
- 5 Kenjiro Hamanaka, Hiroyuki Nemoto, Masahiro Oikawa *et al.*. Multiple imaging and multiple Fourier transformation using planar microlens array [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(28): 4064~4070
 - 6 Masahiro Agu, Atsushi Akiba, Teruhisa Mochizuki *et al.*. Multimatched filtering using a microlens array for an optical-neural pattern recognition system [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(28): 4087~4091
 - 7 M. Oikawa, K. Iga. Distributed-index planar microlens [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(6): 1052~1056
 - 8 Liu Desen, Gao Yingjun, Zhu Chuangui *et al.*. Fabrication and characterization of gradient index planar microlens array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(z1): 21~28
刘德森, 高应俊, 朱传贵 等. 变折射率平面微透镜阵列的制作和基本特性 [J]. *光子学报*, 1995, **24**(z1): 21~28
 - 9 Liu Desen, Mei Suohai. A study on spherical self-focusing planar microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(6): 533~539
刘德森, 梅锁海. 球形自聚焦平面微透镜阵列研究 [J]. *光学学报*, 1992, **12**(6): 533~539
 - 10 Zigang Zhou, Desen Liu. 1×4 buried optical power splitter fabricated by $\text{Ti}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 651~654
 - 11 Zhou Zigang, Liu Desen. Refractive index profiles of two-step ion-exchange glass power splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 694~696
周自刚, 刘德森. 两步离子交换玻璃光功分器的折射率分布 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 694~696
 - 12 Zhou Zigang, Liu Desen. Two-step ion-exchanged waveguides splitter with low-loss [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 665~668
周自刚, 刘德森. 两步离子交换低损耗光波导功分器的研制 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 665~668
 - 13 N. F. Borrelli, D. L. Morse. Microlens array produced by a photolytic technique [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(3): 476~483
 - 14 R. H. Bellman, N. F. Borrelli, L. G. Mann *et al.*. Fabrication and performance of a one-to-one erect imaging microlens array for fax [C]. *SPIE*, 1991, **1544**: 210~217
 - 15 Liu Dandong, Liu Desen, Yan Guoan. The imaging characteristic of microlens array formed in photosensitive glass [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(z1): 393~397
刘丹丹, 刘德森, 阎国安. 用光敏法制作的微透镜阵列的成像特性 [J]. *光子学报*, 1995, **24**(z1): 393~397
 - 16 Gao Yingjun, Liu Desen, Yan Guoan *et al.*. Fabrication of high quality photoresist microlens array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(10): 909~913
高应俊, 刘德森, 阎国安 等. 高质量光刻胶微透镜阵列的研制 [J]. *光子学报*, 1996, **25**(10): 909~913
 - 17 Jack L. Jewell, S. L. McCall, Y. H. Lee *et al.*. Optical computing and related microoptic devices [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34): 5050~5053
 - 18 Dong Xiaochun, Du Chunlei. The developing threshold method for profile control of microlens array with high numerical aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 870~872
董小春, 杜春雷. 精确控制大数值孔径微透镜阵列面形的显影阈值方法 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 870~872
 - 19 Liu Desen, Gao Yingjun, Qing Yali *et al.*. A study on self-focusing planar microlens array with large NA [J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1991, **19**(3): 209~215
刘德森, 高应俊, 覃亚丽 等. 大数值孔径自聚焦平面微透镜阵列研究 [J]. *高速摄影与光子学*, 1991, **19**(3): 209~215
 - 20 J. R. Flores, J. Sochacki, M. Sochacka *et al.*. Quasi-analytical ray tracing through the generalized Luneburg lens [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(25): 5167~5170
 - 21 K. Iga, Y. Kokubun, M. Oikawa. Fundamentals on Microoptics [M]. Tokyo, Osaka, Kyoto: Academic, Press. INC, 1984
 - 22 Mei Suohai, Liu Desen. The imaging characteristics of self-focusing planar microlens array [J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1991, **20**(3): 233~241
梅锁海, 刘德森. 自聚焦平面微透镜阵列的成像矩阵 [J]. *高速摄影与光子学*, 1991, **20**(3): 233~241
 - 23 R. Luneburg. Mathematical Theory of Optics [M]. California: University of California, 1964
 - 24 A. Yariv, P. Yeh, Yu Rongjin, Jin Feng transl.. Optical Waves in Crystals-Propagation and Control of Laser Radiation [M]. Beijing: Science Press, 1991
A. 亚里夫, P. 叶, 于荣金, 金 锋 译. 晶体中的光波-激光的传播与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1991