

微小光学与异形孔径微透镜阵列研究

刘德森 蒋小平

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘要 讨论了微小光学的发展和异形孔径(正方形和六角形)微透镜阵列的制作。自聚焦透镜的制作加速了微小光学的产生,微透镜阵列器件的应用,促使微小光学迅猛发展,异形孔径微透镜阵列的研制,开创了微小光学新的研究领域。重点对异形自聚焦透镜和异形孔径微透镜阵列的理论和实验研究工作进行讨论,给出了有益的结果。

关键词 微小光学;微透镜阵列;异形孔径;光刻离子交换工艺

中图分类号 TN911.72

OCIS 350.3950 220.4000 230.3990

文献标识码 A

Study on Microoptics and Special-Shaped Aperture Microlens Arrays

Liu Desen Jiang Xiaoping

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract The progress in microoptics and the fabrication of special-shaped aperture microlens array are reviewed. Microoptics is produced on the fabrication of gradient-index lens. The rapid progress of microoptics is urged by the application of microlens array. A new domain of microoptics is founded by the fabrication of special-shaped aperture microlens array. The theoretical and experimental researches on special-shaped gradient-index lens and special-shaped aperture microlens array are mainly discussed and useful results are presented.

Key words microoptics; microlens array; special-shaped aperture; photoetching ion-exchange technique

1 引言

微小光学是研究微米量级尺寸光学元件(包括光源、光纤、波导和折射、衍射、反射光学元件——透镜、棱镜、反射镜和光栅等)的光学微加工制作技术及利用该元件以实现光束的发射、聚集、传输、成像、分光、变换和处理等系列功能的理论和技术的学科,是现代光学的分支,是光学与微电子、微机械相互融合、渗透、交叉而形成的前沿学科。它的出现使传统光学技术发生了巨大变化^[1~4]。

从科学技术发展历史来看,1969年自聚焦透镜的研制成功^[5],使微加工技术进入光学领域,出现了用“离子”加工来制作玻璃透镜的新方法。制作透镜的尺寸也从过去的几毫米以上减小到2 mm以下,甚至可以制作0.1 mm以下的透镜,这就是古典宏观光学发展到微小光学的标志。微小光学在国内有不同的叫法,为了不和研究微弱可见光作用的学科(如微光夜视)相矛盾,不称“微光学”,而称为“微小光学”^[2,3]。

随着信息技术的发展,光学元件的微型化、阵列化、集成化、智能化是微小光学发展的必然方向和当今科学技术发展的一个重要特点,也是科学技术向高层次发展的客观需要。在科学技术发展和社会需求的推动下,在微电子和半导体微加工技术基础上,发展了一系列光学微加工工艺,成功地制作出多种折射型和衍射型微透镜阵列,在光纤通信、光信息处理、光计算技术、光传感技术和微光机电一体化技术中发挥了重要作用。

以前研制和使用的微透镜阵列(包括经典透镜),通常都是圆形或球形孔径,形状上是高度对称的,像差小、成像质量好。但在光信息领域的一些应用中,要求微透镜阵列有很高的填充系数,即微透镜阵列的有效

收稿日期: 2009-06-30; **收到修改稿日期:** 2009-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(60578005,60978046)资助课题。

作者简介: 刘德森(1937—),男,教授,主要从事纤维光学、变折射光学和微小光学方面的研究。

E-mail: liuds37@126.com

传光面积与总面积之比值很大,如 98% 以上。在信息传输过程中,信息经透镜元之间空隙泄漏很小,传输的信息失真小,因此,就有很高的分辨率。对圆形或球形孔径微透镜阵列来说,不管微透镜阵列是正方形堆积排列或六角紧密排列,填充系数都不大^[6]。为了解决微透镜阵列高填充系数这一难题,在生物复眼的启示下,首先制作了异形自聚焦透镜及阵列^[7~9]、异形孔径自聚焦平面微透镜阵列^[10,11],还制作了异形孔径树脂微凸透镜阵列。异形孔径微透镜阵列的研制成功,解决了高填充系数微透镜阵列制作和异形透镜的成像问题,这不仅有重要学术意义,也开拓了微透镜阵列的一个新兴研究领域和应用范围,是微小光学的一个重大进展。本文主要从作者的研究工作出发,从折射型微透镜阵列角度来讨论微小光学的发展。

2 自聚焦透镜

费马原理指出,连接两点间有不同的路线,光线将沿着两点之间的光程为极值的路线传播,即

$$\delta \int_a^b n(r) ds = 0. \quad (1)$$

式中 $n(r)$ 为折射率。从(1)式可知,费马原理是光学中的变分原理,是光学工作者设计和制作光学透镜的理论基础和出发点。根据(1)式来设计光学透镜表面的曲率,使在光学玻璃透镜的折射率是常数的情况下,通过光在透镜中路程长度的变化即透镜表面曲率的变化来实现物点与像点间的光程为极值,从而达到光束聚焦、成像的目的。反之,也可以使玻璃透镜两端面曲率相等,即透镜的长度不变,仅使折射率发生变化的情况下,继续研究物点与像点间的光程是否仍为极值。理论分析表明^[12],从光学变分原理出发,不仅可以得到描述光线在变折射率介质中特殊的折射率分布,而且可以得到描述光线轨迹的微分方程——光线方程式。光线方程式是研究变折射率介质的基本方程,求解光线方程式,就可得到折射率满足

$$\begin{aligned} n^2(r) &= n^2(0)(1 - Ar^2), \\ n(r) &= n(0) \left(1 - \frac{1}{2}Ar^2 - \frac{1 \times 1}{2 \times 4}A^2r^4 - \frac{1 \times 1 \times 3}{2 \times 4 \times 6}A^3r^6 - \frac{1 \times 1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6 \times 8}A^4r^8 - \dots \right) \approx \\ & n(0) \left(1 - \frac{1}{2}Ar^2 \right), \end{aligned} \quad (2)$$

分布的变折射率透镜的一系列近轴光学成像特性。(2)式中 $n(0)$ 为透镜中心轴上的折射率, \sqrt{A} 为聚焦常数或折射率分布常数,它表示折射率在透镜中变化的程度。只要介质的折射率分布满足(2)式,虽然其端面为平面,但仍是一种新颖的透镜,必然满足费马原理,物点像点间的光程为极值,这样的介质仍可以聚焦、成像。这一结论,对普通圆形孔径和异形孔径微透镜及阵列都是适用的。

为了使均匀介质变成折射率分布满足(2)式的变折射率介质,1969年,北野一郎等^[5]对特定的均匀玻璃介质,采用离子交换技术首先成功地制作出变折射率透镜,并称为自聚焦透镜。此后,从理论、制作工艺、性能检测、器件和应用等方面对自聚焦透镜进行了广泛、深入的研究,逐步形成了变折射率光学新学科。自聚焦透镜的研制成功,是人们采用新的光学微加工技术——离子交换法,制作出小直径(如 1 mm 以下)的透镜,使光学元件从古典光学进入到微小光学阶段。这方面的研究工作,在刘德森等^[12~16]的著作中有系统的论述。

3 微透镜阵列器件

随着科学技术的发展,光学元件的微型化、轻量化势必使分立元件向阵列元件发展,这就迫切要求发挥光子作为信息载体所具有的高速度、并行性和巨大的互连能力,而且微光机电器件的发展,也要求发展二维和三维光学阵列元件,因而,微透镜阵列器件就得到迅猛发展。

3.1 制作工艺

微透镜阵列器件的发展,很大程度上依赖于光学微加工技术的发展。目前,最有代表意义的是将平面光刻工艺和变折射率离子交换工艺相结合的制作自聚焦平面微透镜阵列的新工艺——光刻离子交换工艺。采用这种工艺制作的平面微透镜阵列具有掩埋式、微型、集成和变折 4 个特点,其单元透镜的尺寸可以小到几个微米。图 1 为采用该工艺制作的圆形孔径自聚焦平面微透镜阵列的成像照片^[17,18]。

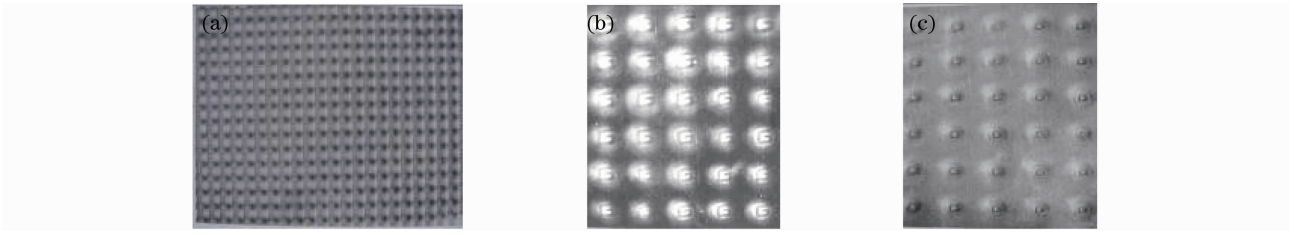


图1 自聚焦平面微透镜阵列的显微成像照片,(a)单透镜直径 $40\ \mu\text{m}$, (b)单透镜直径 $20\ \mu\text{m}$ (c)单透镜直径 $10\ \mu\text{m}$
Fig.1 Micrograph of planar self-focusing microlens arrays. (a) single lens with $40\ \mu\text{m}$ diameter, (b) single lens with $20\ \mu\text{m}$ diameter, (c) single lens with $10\ \mu\text{m}$ diameter

3.2 理论模型

在微小光学领域,不少学者一直采用 K. Iga 等^[19]提出的广义鲁尼伯格(Luneberg)透镜模型^[12]。该模型虽然可以用来描述平面微透镜的特性,但还存在不能处理斜光线的传输和处理非球对称介质时的折射率分布误差过大等缺点。理论分析指出^[18],要使折射率分布呈球对称,透镜的交换时间要很长,交换的深度必须大于窗口半径的 6.3 倍以上。实验证明,当交换时间不很长时,折射率是旋转对称分布,为扁平的半椭球时,仍有很好的成像特性。为此,提出了平面微透镜的旋转对称模型^[12]。根据这一模型,研究了自聚焦平面微透镜阵列的折射率分布^[20,21]和近轴光学特性^[12,22,23]。

3.2.1 折射率分布

当窗口是开孔情况时,在一定边界条件和初始条件下求解扩散方程,最后得到折射率表示式为^[12]

$$n(r, z) = n(0) + [n_1 - n(0)] \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda a}{\lambda} J_0(\lambda a) \left\{ \exp(-\lambda z) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}} - \lambda \sqrt{D\tau} \right) \right] - \exp(\lambda z) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}} + \lambda \sqrt{D\tau} \right) \right] \right\} d\lambda. \quad (3)$$

3.2.2 光线轨迹和物像关系

求解积分形式的光线方程,可以得到自聚焦平面微透镜的光线轨迹方程^[12,22]为

$$r = r_0 \cos F(z) + \frac{p_0}{\sqrt{An(0)}} \sin F(z), \quad p = -n(0)r_0 \sqrt{A} \sin F(z) + p_0 \cos F(z), \quad (4)$$

式中 $F(z) = \frac{1}{\sqrt{|v_{20}|}} \arcsin \frac{n(0) \sqrt{|v_{20}|} \sqrt{Az}}{p_0}$, v_{20} 为折射率分布矩阵的矩阵元。从(4)式可知,自聚焦平面微透镜的光线轨迹公式和自聚焦透镜有相同的形式。利用传输矩阵法可以得到单片自聚焦平面微透镜的近轴成像公式^[12]为

$$l_2 = \frac{l_1 n^2(0) \sqrt{A} \cos F(z) + n_2 \sin F(z)}{n^2(0) \sqrt{A} [l_1 n^2(0) \sqrt{A} \sin F(z) - n_2 \cos F(z)]}, \quad f = \frac{1}{n^2(0) \sqrt{A} \sin F(z)}. \quad (5)$$

3.2.3 微透镜阵列的基本理论

3.2.3.1 阵列光学

微透镜阵列的基本理论是研究光信息在微透镜阵列中的传输、成像和变换等特性的理论,这就是阵列光学的研究内容。在微透镜阵列中,光信息的传输、成像、变换与透镜元不同,这是阵列光学研究的基本问题,主要是^[12,24]:

1) 并行性。对物平面上的一个信息,透镜元具有来自透镜本身固有的成像并行性,微透镜阵列不仅存在透镜元的这种并行性,还存在阵列中各透镜元间的阵列并行性,对每个透镜元还可以分别进行信息传输、成像和变换处理。

2) 线性性。透镜元具有线性不变性,微透镜阵列由于出现各透镜元传输的光信息的交叉、重叠、变换,因此,不再具有线性不变性。

3) 空不变性。透镜元是一个空不变系统,微透镜阵列的空间维数是可变的。

4) 独立性。光信息在透镜元中的传输、变换是并行的、独立的,在微透镜阵列中,由于透镜元传输的信息可以交叉、重叠,不再具有独立性。

3.2.3.2 微透镜阵列的光线理论

如果 $O(x_i, y_i, l_1)$ 和 $I(x_i, y_i, l_2)$ 分别为透镜元 i 对应物面和像面上的光信息, ϕ_i 为透镜元 i 对光信息从物面到像面的变换关系,透镜元 i 的传输矩阵是 $\begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix}$, 则有

$$I(x'_i, y'_i, l_2) = \phi_i [O(x_{i0}, y_{i0}, l_1)] = O(\beta_i x_{i0}, \gamma_i y_{i0}, l_1), \quad (6)$$

式中,放大倍率 $\beta_i = a_i + c_i l_{2i} = \frac{1}{c_i l_{1i} + d_i}$, 其中像距 $l_{2i} = \frac{a_i l_{1i} + b_i}{c_i l_{1i} + d_i}$, 并有 $x_i = \beta_i x_0 + \epsilon_i (1 - \beta_i)$, $y_i = \beta_i y_0 + \gamma_i (1 - \beta_i)$ 。这里, $\epsilon_i, \gamma_i, l_{1i}$ 和 l_{2i} 为透镜元 i 相对于微透镜阵列坐标系的坐标和物距与像距。由(6)式可知,在物面上的输入信息 $O(x_0, y_0)$, 对透镜元 i 在像空间的输出信息是 $I(x_i, y_i)$, 对于一个由 N 个透镜元组成的微透镜阵列系统 ($i=1, 2, \dots, N$), 在像空间就会有 N 个独立的输出信息, $I(x_i, y_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$), 维数扩大了 N 倍, 这就是微透镜阵列的多重像。

对于由参数完全一样的自聚焦透镜组成的自聚焦微透镜阵列, 多重像的像距可以写成

$$l_2 = \frac{1}{n(0) \sqrt{A}} \frac{n(0) \sqrt{A} l_1 \cos(\sqrt{A} z) + \sin(\sqrt{A} z)}{n(0) \sqrt{A} n(0) \sqrt{A} z \sin(\sqrt{A} z) - \cos(\sqrt{A} z)}. \quad (7)$$

在(6)式中, 如果 $\beta_i = \beta_j = 1$, 透镜元 i 和透镜元 j 的像完全重合, 出现像的重叠(简并), 维数减少一次。若微透镜阵列的 N 个透镜元的参数完全一样, 即

$$\begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix}_{i=1,2,\dots,N} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}, \quad (8)$$

这时, $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_i = \dots = \beta_N$, 当物面为平面时, N 个透镜元的像位于同一个像面上, 而且这 N 个像将重合在一起成为重叠像, 这就是综合像。

对自聚焦透镜而言, 当放大倍率为 1 时, 可得到存在综合像的条件是物距必须满足

$$l_1 = -\frac{1}{n(0) \sqrt{A}} \tan\left(\frac{1}{2} \sqrt{A} z\right), \quad (9)$$

从(9)式可知, 自聚焦透镜的长度必须在 $1/2 \sim 3/4$ 周期之间。

从上面分析可知, 由完全相同的透镜组成的阵列, 只有按一定的规律排列时, 才会有综合像, 综合像的位置和放大率(对平面阵列, 放大率恒为 1)总是和透镜元的像相同。对于一般的微透镜阵列, 仅在一对由阵列的排列决定的固定的共轭面上才有综合像。

3.2.3.3 微透镜阵列的衍射理论

微透镜阵列衍射理论^[24,25]分析选取的坐标示意图如图 2 所示。图中, O_1, O_2, O_i, O_i 分别为系统光轴和阵列中第 i 个光学元件的光轴, P_1, P_2 为相距为 l 的系统输入和输出平面, P_{i1}, P_{i2} 为第 i 个光学元件的输入和输出平面, (x_{i1}, y_{i1}) 和 (x_{i2}, y_{i2}) 分别为阵列中第 i 个光学元件的光轴与系统输入和输出平面交点, (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为系统输入和输出平面上考察点的坐标, (ξ_1, η_1) 和 (ξ_2, η_2) 分别为上述考察点在第 i 个光学元件的本地坐标系中的坐标, u, v 分别为物面和观察面到系统输入和输出平面的距离, R_i 为第 i 个光学元件的光轴与系统光轴的交点到输入平面的距离。

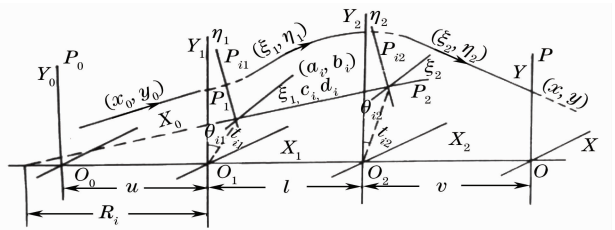


图 2 微透镜阵列衍射理论分析选取的坐标示意图
Fig. 2 Sketch of coordinates in the theoretical analysis of microlens arrays diffraction

当光信息通过由传输矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 表示的微透镜阵列系统(透镜元是 $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$)时, 经典的菲涅耳衍射公式不能直接应用。可以从范滇元^[26]提出的菲涅耳衍射公式出发, 求出微透镜阵列的点扩散函数后, 就可以研究微透镜阵列的光学成像特性。经过一系列运算后, 可以得到经过透镜元 i 在观察面 (x, y) 上的衍射积分

表达式,可写成

$$U_i(x, y) = \frac{\exp[jk(u+l+v)]}{(j\lambda)^3 uob} \iiint \iiint U(x_0, y_0) \exp\left\{\frac{jk}{2u} \left[(x_0 - x_{i1} - \xi_1)^2 - \frac{2ux_{i1}\xi_1}{R_i} \right] + \right. \\ \left. (y_0 - y_{i1} - \eta_1)^2 - \frac{2uy_{i1}\eta_1}{R_i} \right\} \exp\left\{\frac{jk}{2b} [a(\xi_1^2 + \eta_1^2) - 2(\xi_1\xi_2 + \eta_1\eta_2) - d(\xi_2^2 + \eta_2^2)]\right\} \times \\ \exp\left\{\frac{jk}{2v} \left[(x - x_{i2} - \xi_2)^2 + \frac{2ux_{i2}\xi_2}{R_i+l} + (y - y_{i2} - \eta_2)^2 + \frac{2vy_{i2}\eta_2}{R_i+l} \right]\right\} dx_0 dy_0 d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2. \quad (10)$$

点扩散函数可写成

$$h_i(x_0, y_0; x, y) = \frac{1}{(j\lambda)^3 uob} \iiint \iiint \exp\left\{\frac{jk}{2u} \left[(x_0 - x_{i1} - \xi_1)^2 - \frac{2ux_{i1}\xi_1}{R_i} + (y_0 - y_{i1} - \eta_1)^2 - \frac{2uy_{i1}\eta_1}{R_i} \right]\right\} \times \\ \exp\left\{\frac{jk}{2b} [a(\xi_1^2 + \eta_1^2) - 2(\xi_1\xi_2 + \eta_1\eta_2) + d(\xi_2^2 + \eta_2^2)]\right\} \exp\left\{\frac{jk}{2v} \left[(x - x_{i2} - \xi_2)^2 + \frac{2ux_{i2}\xi_2}{R_i+l} + \right. \right. \\ \left. \left. (y - y_{i2} - \eta_2)^2 + \frac{2vy_{i2}\eta_2}{R_i+l} \right]\right\} d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2. \quad (11)$$

在微透镜阵列输出面上的光场,是各透镜元在输出面上光场的叠加,因此,经过微透镜阵列的光波在输出面上引起的场分布和点扩散函数分别为

$$U(x, y) = \sum U_i(x, y), \quad h(x_0, y_0; x, y) = \sum h_i(x_0, y_0; x, y). \quad (12)$$

当透镜元的线度远大于波长时,(12)式的求和可以用积分代替,完成积分后,为求光学传递函数,必须把 h 变换成空间不变形式,变换后可以得到

$$h(x_0, y_0; x, y) = \sum \frac{1}{j\lambda B} \exp\left\{jk \left[\frac{xx_{i2} + yy_{i2}}{R_i+l} - \frac{x_0x_{i1} + y_0y_{i1}}{R_i} \right]\right\} \exp\left\{\frac{jkC}{2A} [(x - g_2x_{i2})^2 + (y - g_2y_{i2})^2]\right\} \times \\ \exp\left\{\frac{jk}{2AB} \{ [A(x_0 - g_1x_{i1}) - (x - g_2x_{i2})]^2 + [A(y_0 - g_1y_{i1}) - (y - g_2y_{i2})]^2 \}\right\}, \quad (13)$$

式中 $g_1 = 1 - \frac{u}{R_i}$, $g_2 = 1 + \frac{v}{(R_i+l)}$; $B = au + b + v(cu + d)$, $A = a + cv$, $D = cu + d$. (13)式表明,一般来说, h 并不是空间不变的,但当研究的是光强分布时,前两个指数项可以忽略,就可以通过坐标变换化为空间不变形式

$$h(x - Ax_0, y - Ay_0) = \sum \frac{1}{j\lambda B} \times \\ \exp\left\{\frac{jk}{2AB} \{ [(x - Ax_0) - (g_2x_{i2} - Ag_1x_{i1})]^2 + [(y - Ay_0) - (g_2y_{i2} - Ag_1y_{i1})]^2 \}\right\}. \quad (14)$$

在成像条件 $B=0$ 下,(14)式变成

$$h(x - Ax_0, y - Ay_0) = \sum \delta [(x - Ax_0) - (g_2x_{i2} - Ag_1x_{i1}), (y - Ay_0) - (g_2y_{i2} - Ag_1y_{i1})]. \quad (15)$$

从(13)和(14)式可知,满足透镜元成像条件时,对于物面上一个信号(光脉冲)输入,在像面上的场强是一系列的尖锐脉冲,脉冲位置在

$$\begin{cases} x = Ax_0 - (g_2x_{i2} - Ag_1x_{i1}) \\ y = Ay_0 - (g_2y_{i2} - Ag_1y_{i1}) \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3 \dots N \quad (16)$$

(16)式表明,对于一个物分布,经过由 N 个透镜元组成的微透镜阵列系统后,一般可以得到 N 个放大率一样,但位置不同的分立像,这就是微透镜阵列的多重像。

一般情况下,微透镜阵列只有多重像,只有满足

$$\frac{x_{i2}}{x_{i1}} = A \frac{g_1}{g_2}, \quad \frac{y_{i2}}{y_{i1}} = A \frac{g_1}{g_2}, \quad i = 1, 2, \dots N \quad (17)$$

各透镜元像的位置只决定于物的位置而与透镜元的位置无关,各透镜元所成像都重叠在一起形成综合像。在极坐标下,(17)式可以改写为

$$\frac{r_{i2} \cos \theta_{i2}}{r_{i1} \cos \theta_{i1}} = A \frac{g_1}{g_2}, \quad \frac{r_{i2} \sin \theta_{i2}}{r_{i1} \sin \theta_{i1}} = A \frac{g_1}{g_2}, \quad i = 1, 2 \dots N \quad (18)$$

(17)和(18)式要想成立,必有

$$\theta_{i1} = \theta_{i2}, \quad \frac{r_{i2}}{r_{i1}} = A \frac{g_1}{g_2}, \quad i = 1, 2 \cdots N \quad (19)$$

如果透镜元 i 的光轴与系统光轴的交点距微透镜阵列输入面的距离为 R_i , 即微透镜阵列的曲率半径, 这时有

$$\frac{r_{i2}}{r_{i1}} = \frac{R_i + l}{R_i}, \quad (20)$$

可得微透镜阵列存在综合像的条件为

$$R = R_i, \quad i = 1, 2, 3 \cdots N \quad (21)$$

物像关系

$$v = -\frac{au + b}{cu + d}, \quad v = \frac{(1-a)R + (1-b)}{cR - (1-d)}. \quad (22)$$

从上面分析,可以得到:

1)存在综合像时,微透镜阵列各透镜元的光轴必相交于一点。

2)综合像的位置和放大率与透镜元相同。 $\beta = a + cv = \frac{1-a+(R+l)c}{cR-(1-d)}$, 放大率 β 可以不为 1。当 R 趋

于无限大时, β 恒为 1, $v = \frac{(1-a)}{c} = l_H$, 综合像发生在一对主平面上。

3)阵列的物方孔径角和透镜元的物方视场角相等,而与透镜元的孔径角无关。

4)阵列的光能利用率比透镜元高,成像的像差比透镜元大,综合像的分辨率比透镜元低。

5)综合像克服了渐晕现象,整个像面上的照度和像质一致性比多重像好。

对于自聚焦平面微透镜阵列,各透镜元的光学性能完全一致,这时透镜元的传输矩阵有

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

这时,(6)式可以改写成

$$I(x, y) = \sum_{i,j} O[\beta x_0 + ib(1-\beta), \beta y_0 + lb(1-\beta)], \quad x = \beta x_0 + ib(1-\beta), \quad (24)$$

$$y = \beta y_0 + lb(1-\beta), \quad \beta = \frac{1}{1-u/f}, \quad v = \frac{f}{1-f/u},$$

这里, O 表示物, I 表示像。对每一对 (il) 就对应一个透镜元,在像面上可以得到由每个透镜元像组成的多重像,各单元像位于同一像面上,大小相等,相邻二单元像的中心距为

$$b_d = b(1-\beta) = \frac{b}{1-f/u}. \quad (25)$$

如果自聚焦平面微透镜阵列存在综合像,则必有 x, y 与 i, l 无关。可知,只有让 $\beta=1$, 有 $u=0$, 相应 $v=0$, 这是不可能的。因此,对一片自聚焦平面微透镜阵列,不存在有意义的综合像。对自聚焦平面微透镜阵列来说,通过计算可知,单片平面微透镜阵列没有综合像^[12],对两片同样参数的自聚焦平面微透镜阵列耦合后,经过计算,其综合像满足

$$l_2 = \frac{1 - \cos(2F) + \frac{n^2(0) \sqrt{A} z}{2n_1} \sin(2F)}{\frac{n^4(0) A z}{n_0 n_1} \sin^2 F - \frac{n^2(0) \sqrt{A} z}{n_0} \sin(2F)}. \quad (26)$$

4 异形孔径微透镜阵列

在微透镜阵列的许多应用中,不仅要求有好的成像质量,而且要求传输的信息不丢失、图像不失真。这就要求微透镜阵列的填充系数很高,达到 98% 以上,一般的平面微透镜阵列根本达不到这一要求。理论计算表明^[6],圆形孔径透镜阵列有两种排列方式,正方形堆积排列,填充系数最大不超过 78.8%;六角紧密堆积排列,填充系数最大也不超过 90.7%。因此,为了实现高填充系数的微透镜阵列,必须改进微透镜阵列的

结构,研制新结构微透镜阵列。

众所周知,一些生物的复眼都是六角孔径紧密堆积排列的微透镜阵列。如苍蝇复眼就是由若干正六角形小眼(透镜)构成的曲面微透镜阵列,透镜间几乎没有空隙,如图3所示。在生物复眼的启示下,只有制作异形孔径(正方形或正六角形)微透镜阵列才能使填充系数达到98%以上。通过研究,采用了两种办法来制作异形孔径微透镜阵列。

4.1 方形、六角形自聚焦透镜的制作及光学性能

4.1.1 3种制作工艺

1)先成形后交换工艺^[7,8]。采用机械研磨方法先制作对边距为1.4 mm左右的方形玻璃丝,然后在(540±15)℃的硝酸盐中进行离子交换60~80 h以改变折射率分布,再将交换好的玻璃丝按确定尺寸加工成自聚焦透镜,然后再将单个方形自聚焦透镜在模具中精确排列成阵列,最后对样品的主要光学特性进行测量。图4为方形自聚焦透镜的成像照片,图5为3×3方形自聚焦透镜阵列的多重像和综合像照片。在阵列中,每个透镜元都对目标单独成像,这就是方形自聚焦透镜的多重像,在一定条件下(自聚焦透镜一定长度),自聚焦透镜阵列中的每个透镜对目标所成像相互叠加,形成一个叠加像,这就是方形自聚焦透镜阵列的综合像。

2)先交换后成形^[27]。就是先对圆形丝进行离子交换工艺以形成确定的折射率分布,然后再加工成方形,最后再对其主要光学特性进行研究。图6是采用此工艺制作的方形自聚焦透镜的成像照片。

3)先制作异形玻璃预制棒,拉成玻璃丝后,再通过离子交换工艺制作异形孔径自聚焦透镜阵列。图7为深圳市昊谷光电有限公司采用该方法制作的六角形孔径自聚焦透镜阵列的外形和多重像照片。

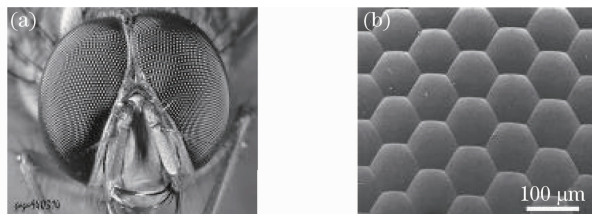


图3 苍蝇的复眼显微照片。(a)苍蝇复眼外形照片, (b)放大250倍的照片

Fig. 3 Micrograph of fly compound eyes. (a) fly compound eyes, (b) compound eyes photo magnified 250 times

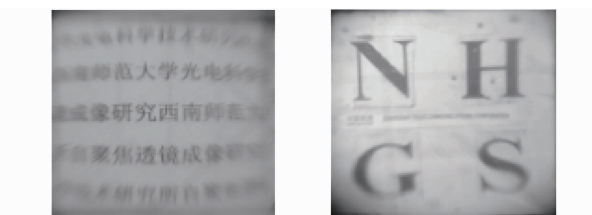


图4 方形自聚焦透镜的成像照片

Fig. 4 Images of square self-focusing lens

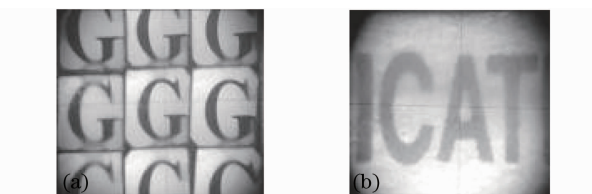


图5 方形孔径自聚焦透镜阵列对目标的多重像(a)和综合像(b)

Fig. 5 Multiple image (a) and synthetic image (b) to the objects with square self-focusing lens arrays

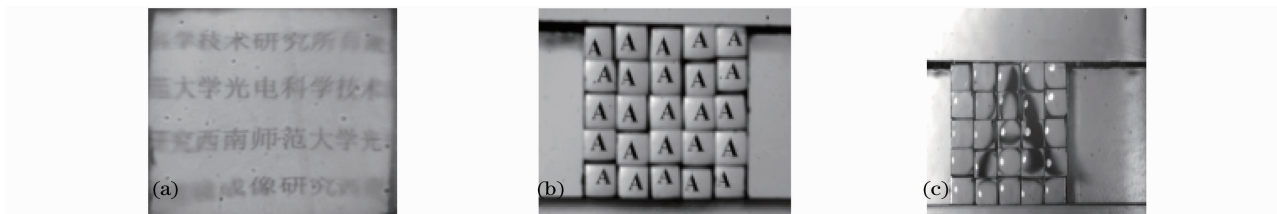


图6 自聚焦透镜的单元成像照片(a),多重像照片(b)和综合像照片(c)

Fig. 6 Image of a single lens (a), multiple image (b) and synthetic image (c) of a 5×5 square self-focusing lens array

从图5~7可以知道,第1,2种方法由于单丝直径很小(1.8 mm),通过机械研磨方法加工成正方形,很难保证几何尺寸的精度和均匀性,第3种方法尺寸的精度和均匀性就很好。第2种方法是对交换好的丝进行加工,很难保证透镜中心和几何中心一致,因而成像有的是倾斜的,从成像情况来看,一般中心较好,四周特别是4个角上的像差较大,像质较差。

4.1.2 方形自聚焦透镜的折射率分布

在确定的边界条件和初始条件下求解扩散方程^[28]

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \theta^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (27)$$

可以得到折射率分布表达式

$$n(r, \theta, t) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_{kj} \exp(-\alpha_j Dt) J_{k/2}(\alpha_j r) \cos\left(\frac{k}{2}\theta\right) + \sum_{k=0}^{\infty} c_k r^{k/2} \cos\left(\frac{k}{2}\theta\right), \quad (28)$$

在定态,忽略高阶项后,(28)式变为

$$n(r, \theta) = a + br^{3/2} + cr^{1/2} \cos\left(\frac{1}{2}\theta\right) + d\left[r \cos \theta + r^{3/2} \cos\left(\frac{3}{2}\theta\right)\right], \quad (29)$$

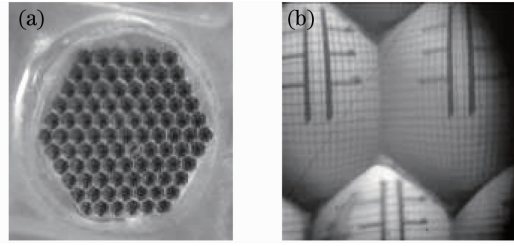


图7 外形照片(a)和多重成像照片(b)

Fig. 7 Profile (a) and multiple imaging (b) of a hexagonal self-focusing lens array

折射率分布不仅与径向坐标 r 有关,而且还与方位坐标 θ 有关。采用薄片干涉方法可以得到方形自聚焦透镜的干涉照片,如图8所示^[28]。利用图8可以得到在不同方向、不同位置的折射率数值和相应的折射率分布曲线,如图9所示。

从表1和图9可知,方形自聚焦透镜的折射率分布不仅与 r 有关,还与 θ 有关。在 r 不大的中心区域,折射率与 θ 的关系不明显,干涉条纹仍呈圆形,在 r 很大的周边区域,折射率受 θ 影响很大,干涉条纹呈方形分布。对方形自聚焦透镜的主要光学性能进行了测量,结果如表2所示^[6,28]。

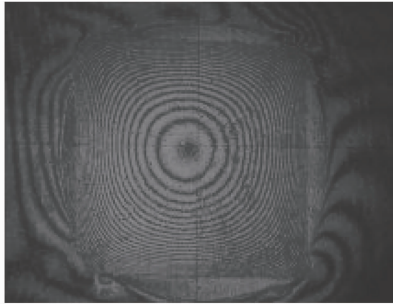


图8 方形自聚焦透镜的干涉照片

Fig. 8 Interference photo of the square self-focusing lens

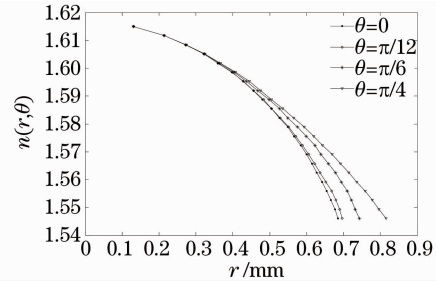


图9 方形自聚焦透镜不同方位的折射率分布曲线

Fig. 9 Curves of refractive index distribution of a square self-focusing lens in different directions

表1 不同方向、不同位置的折射率实验值

Table 1 Measuring values of refractive index in different directions and sites

Azimuth interference level	$\theta=0$		$\theta=15^\circ$		$\theta=30^\circ$		$\theta=45^\circ$	
	r_k	$n(r)$	r_k	$n(r)$	r_k	$n(r)$	r_k	$n(r)$
1	0.131	1.614	0.131	1.614	0.131	1.614	0.131	1.614
5	0.352	1.601	0.352	1.601	0.353	1.601	0.354	1.601
9	0.499	1.587	0.499	1.587	0.512	1.587	0.520	1.587
13	0.600	1.574	0.602	1.574	0.630	1.574	0.649	1.574
15	0.639	1.568	0.644	1.568	0.681	1.568	0.704	1.568
17	0.673	1.561	0.680	1.561	0.721	1.561	0.757	1.561
19	0.702	1.555	0.713	1.555	0.759	1.555	0.806	1.555

表2 方形自聚焦透镜的主要性能参数

Table 2 Main characteristic parameters of the square selfoc lenses

No.	Square side /mm	Cycle length /mm	Focusing constant /mm ⁻¹	NA	Distortion /%
01	1.32	16.908	0.391	0.409	9.0
02	1.32	16.852	0.373	0.416	13.2
03	1.32	16.612	0.375	0.414	13.8
04	1.32	16.968	0.370	0.398	11.4
05	1.32	16.900	0.372	0.410	9.0

4.1.3 方形自聚焦透镜折射率分布的计算机模拟

陈凯等^[29]对方形玻璃丝离子交换后的折射率分布表达式的扩散方程利用 Matlab 偏微分方程工具箱 (PDE) 编制了计算程序, 得到了折射率分布的数值解, 如图 10 所示。从图 10 可知, 数值解与折射率分布的实验结果图 8 符合得很好, 最大误差为 0.3%^[29]。

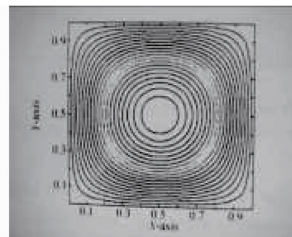


图 10 折射率分布的理论计算值

Fig. 10 Theoretical refractive index distribution of the square self-focusing lens

4.1.4 六角形自聚焦透镜折射率分布的计算机模拟

六角形自聚焦透镜的折射率分布^[30]为

$$n(x, y, t) = n_1 + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} S_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{\sqrt{3}a}y\right) \sin\left\{\frac{n\pi}{\sqrt{3}a}\left[x\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) + y\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) + \frac{\sqrt{3}}{4}a\right]\right\} \times \sin\left\{\frac{p\pi}{\sqrt{3}a}\left[x\sin\left(-\frac{\pi}{3}\right) + y\cos\left(-\frac{\pi}{3}\right) + \frac{\sqrt{3}}{4}a\right]\right\} \exp\left[-\left(\frac{m^2 + n^2 + p^2}{3a^2}\right)\pi^2 Dt\right], \quad (30)$$

式中

$$S_{mn} = (n_0 - n_1) \frac{-2[\cos(m\pi) - 1]}{m\pi} \times \frac{-2[\cos(n\pi) - 1]}{n\pi} \times \frac{-2[\cos(p\pi) - 1]}{p\pi}.$$

用数学软件 Matlab 编制了计算程序, 得到了六角形自聚焦透镜折射率分布的数值解, 如图 11 所示。

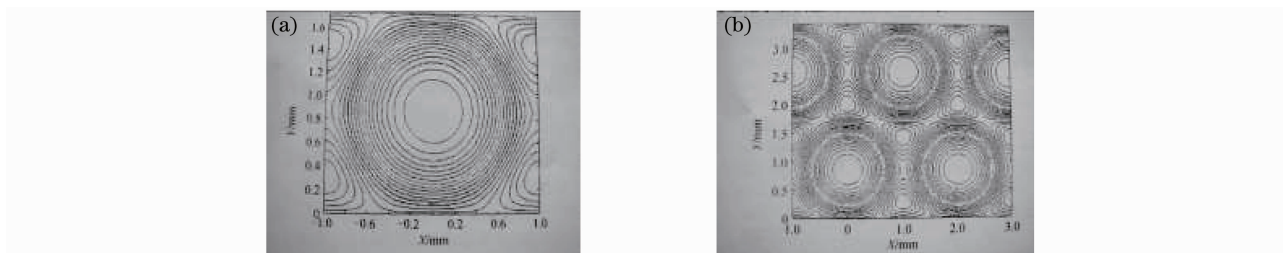


图 11 六角形自聚焦透镜折射率分布的数值解。(a)单透镜,(b)阵列的局部

Fig. 11 Theoretical refractive index distributions of a hexagonal self-focusing lens (a) and part of an array (b)

4.1.5 异形自聚焦透镜的像差

从异形自聚焦透镜折射率分布的理论分析和成像照片可以看出, 异形自聚焦透镜存在较大像差, 在边部特别是在 4 个(或 6 个)角上, 干涉条纹和中部明显不同, 不再是圆形, 因而像差大, 成像质量差。为此, 对异形自聚焦透镜像差产生原因和改善办法进行了研究。

4.1.5.1 像差产生原因

从哈密顿像差理论^[31]出发, 研究了自聚焦透镜的像差, 得到了自聚焦透镜三级和五级像差均为零的理想折射率分布的表达式为

$$n(r) = n(0) \left[1 - \frac{1}{2}(\sqrt{Ar})^2 + \frac{5}{24}(\sqrt{Ar})^4 - \frac{61}{720}(\sqrt{Ar})^6 + \dots \right],$$

或

$$n^2(r) = n^2(0) \left[1 - \frac{1}{2}(\sqrt{Ar})^2 + \frac{2}{3}(\sqrt{Ar})^4 - \frac{17}{45}(\sqrt{Ar})^6 + \dots \right]. \quad (31)$$

异形自聚焦透镜折射率分布的高阶项系数一般都严重地偏离(31)式, 像差总是存在的。因此, 异形自聚焦透镜折射率分布的高阶项系数对理想折射率分布的偏离是产生像差的主要原因。改善异形自聚焦透镜的像差, 就是要采用有效的工艺, 修正折射率分布, 使高阶项系数非常接近理想折射率分布。从这一思路出发, 提出了二次离子交换工艺^[32,33]和热处理工艺^[34]两种改善自聚焦透镜像差的方法。

4.1.5.2 改善异形自聚焦透镜像差的两种工艺

1) 二次离子交换工艺

在初始条件和边界条件下 $C_2(a, t) = 0, C_2(r_0, 0) = C$, 求解扩散方程, 结果为

$$n_2(r) = n(a) + [n(0) - n(a)] \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{\beta_i}{a}\right)r}{\beta_i J_1(\beta_i)} \exp[-D_2 \beta_i^2 (T_1 + T_2)], \quad (32)$$

式中 C_1 和 C_2 分别是第一次离子交换和第二次离子交换 Tl^+ 离子的浓度, a 为变折射率透镜的半径, D_2 为第二次离子交换 Tl^+ 的扩散系数, β_i 为零阶贝塞尔函数的第 i 个根, T_1 和 T_2 为两次离子交换的扩散常量(即归一化离子交换时间)。二次离子交换采用的是 KNO_3 和 $NaNO_3$ 混合盐, 交换温度为 $500 \sim 540$ °C, 交换时间为数小时^[33]。我们对一次和二次离子交换样品, 采用薄片干涉法测量了折射率分布, 得到了折射率分布曲线并计算了相应的理想折射率分布, 为了便于比较, 将这 3 条曲线绘制在图 12 中。对样品的球差和畸变进行了测量^[32], 测量结果见表 3。

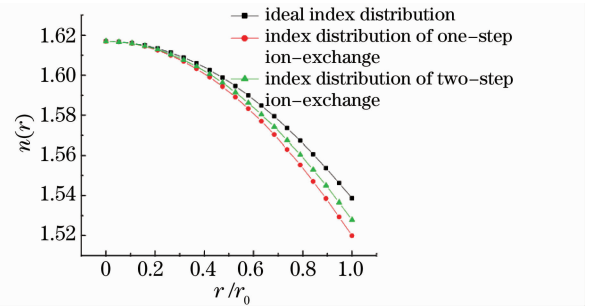


图 12 二次离子交换对自聚焦透镜折射率分布的改进
Fig. 12 Improvement of the refractive index distribution for self-focusing lens by two-step ion-exchange

表 3 二次离子交换工艺对自聚焦透镜像差的改善

Table 3 Improvement of the refractive index distribution of self-focusing lens by two-step ion-exchange

Samples	$n(0)$	g / mm^{-1}	$h_4 (2/3)$	$h_6 (-17/45)$	Spherical aberration	Distortion / %	NA
Ideal refractive index distribution	1.617	0.31	0.667	-0.377	0	0	0.43
One-step ion-exchange	1.617	0.32	0.5262	-7.8271	0.30	13.1	0.45
Two-step ion-exchange	1.617	0.34	0.5750	-11.213	0.20	6.5	0.435

从图 12 可知, 二次离子交换后的折射率分布比一次离子交换更接近理想折射率分布。从表 3 的实验数据可知, 二次离子交换工艺明显地改善了自聚焦透镜的像差特性。

2) 热处理工艺

热处理工艺可以改善玻璃应力。采用该工艺来改善自聚焦透镜的折射率分布, 可以使折射率分布中的四阶项和六阶项系数同时优化, 从而可以有效地改善自聚焦透镜的像差。热处理过程, 实际上是自聚焦透镜中离子在确定温度下的无源扩散过程。在一定边界条件和初始条件下求解扩散方程, 就能得到热处理后自聚焦透镜的折射率分布^[35]

$$n_h(r, t) = 2 \left[\int_0^1 \rho f(\rho) d\rho + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_{1i}/ar)}{J_0^2(\beta_{1i})} \exp(-\beta_{1i}^2 T_3) \int_0^1 \rho f(\rho) J_0(\beta_{1i}\rho) d\rho \right]. \quad (33)$$

式中 $f(\rho)$ 为初始折射率分布, $\rho = r/a$, a 为自聚焦透镜半径, β_{1i} 为一阶贝塞尔函数的第 i 个根, T_3 为热处理过程的扩散常量(即归一化热处理时间)。将(33)式与(31)式比较, 可以得到自聚焦透镜折射率分布的各阶系数的表示式为

$$g = \frac{\sqrt{-2I_2(T_3)}}{\sqrt{\frac{n(0)}{n(0) - n(a)}}}, \quad (34)$$

$$H_{2k} = \frac{I_{2k}(T_3)}{\left[\frac{n(0) - n(a)}{n(0)} \right]^{k-1}}, \quad (k = 2, 3) \quad (35)$$

$$I_{2k}(T_3) = \frac{(-1)^k}{2^{2k}(k!)^2} \left[\sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\beta_{1i}^2 k \exp(-\beta_{1i}^2 T_3)}{J_0^2(\beta_{1i})} \int_0^1 f(\rho) J_0(\beta_{1i}\rho) d\rho \right]. \quad (36)$$

利用(12)~(13)式就可以通过热处理工艺同时使自聚焦透镜折射率分布的四阶项和六阶项系数同时优化。在自制的离子交换炉中,对通过离子交换工艺研制的自聚焦透镜按确定的工艺进行了热处理。并对热处理后自聚焦透镜的折射率分布和像差特性进行了研究,图13给出了自聚焦透镜在热处理前后的折射率分布曲线和相应的理想折射率分布曲线比较图,表4给出了热处理工艺对自聚焦透镜像差改善的实验数据^[34]。

从图13和表4可知,热处理工艺可以使自聚焦透镜的折射率分布更接近理想折射率分布,使球差和畸变明显减小。

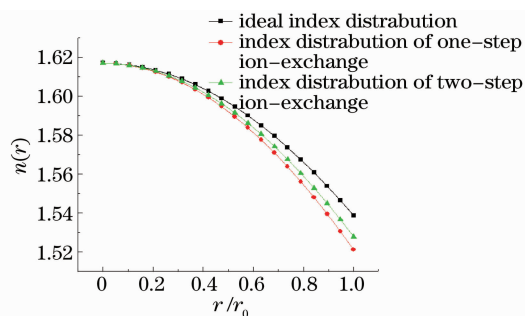


图13 热处理工艺对自聚焦透镜折射率分布的改进
Fig. 13 Improvement of the refractive index distribution of self-focusing lens by heat treatment

表4 热处理工艺对自聚焦透镜像差的改善

Table 4 Improvement of the refractive index distribution of self-focusing lens by heat treatment

Samples	$n(0)$	g / mm^{-1}	$h_4(2/3)$	$h_6(-17/45)$	Spherical aberration	Distortion / %	NA
Ideal refractive index distribution	1.617	0.31	0.667	0.377	0	0	0.43
One-step ion-exchange	1.617	0.32	0.5262	-7.8271	0.30	13.1	0.45
Heat treatment	1.617	0.34	0.588	-10.881	0.20	4.9	0.435

4.2 异形孔径自聚焦平面微透镜阵列的制作

4.2.1 平面型异形孔径自聚焦平面微透镜阵列

采用光刻离子交换工艺制作异形(方形和六角形)孔径平面微透镜阵列^[10]。图14给出了制作工艺流程图。从图14可知,首先制作异形孔径微透镜阵列母板,然后将母板图形光刻在镀有钛膜的玻璃基片上,再将玻璃基片放入(430±15)℃的硫酸盐熔盐中进行离子交换40~70 h,就可以得到掩埋在玻璃基片表面下、窗口表面凸起的变折射率半球阵列,这就是半球形平面微透镜。

图15是制作的方形和六角形平面微透镜阵列成像照片。对六角形孔径平面微透镜阵列样品的主要光学性能进行了测量,结果见表5。采用这种方法制作的平面微透镜阵列,主要的特点是掩埋式、变折型。就是半球透镜是变折射率型,而且掩埋在玻璃基片内部,表面可以制作其他光学元件,或其他元件耦合。

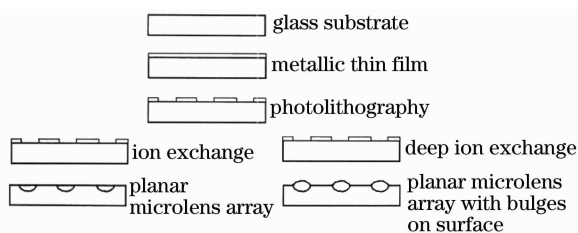


图14 自聚焦平面微透镜阵列制作工艺流程图
Fig. 14 Fabrication process of planar self-focusing lens array

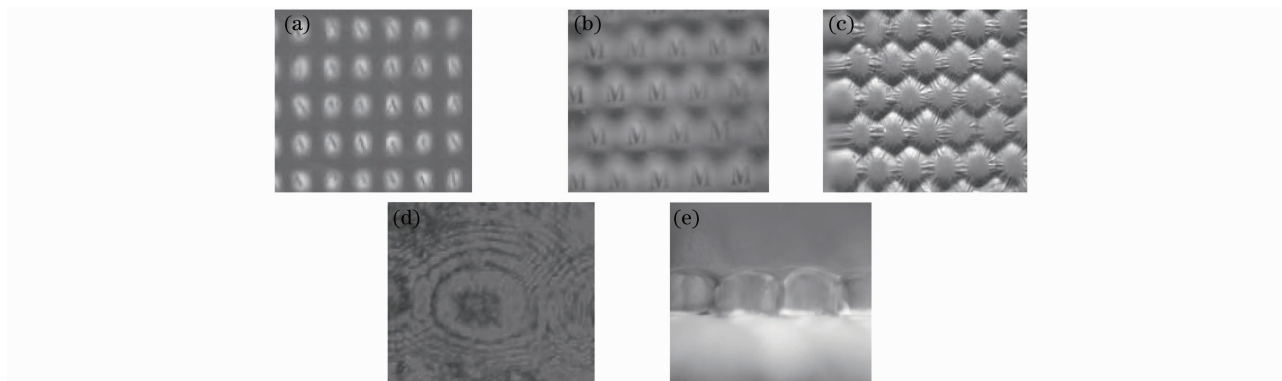


图15 异形孔径平面微透镜阵列照片。(a)方形孔径;(b)六角形孔径;(c)表面形貌;(d)干涉条纹;(e)横截面
Fig. 15 Special-shaped aperture planar microlens array photos. (a) square; (b) hexagonal; (c) surface of the array; (d) interference fringe, (e) the cross section

表5 六角孔径平面微透镜阵列主要性能参数测试值
Table 5 Main measuring value of the hexagonal planar microlens array

No.	Anterior intercept /mm	Posterior intercept /mm	NA	Distortion /%
01	1.991	2.578	0.1421	4.76
02	2.072	2.484	0.1465	4.76
03	2.324	2.425	0.1465	4.50

4.2.2 曲面型六角形孔径 GRIN 平面微透镜阵列

在一些应用中,如仿生物复眼研究中,为了扩大视场,满足获得不同倍率像的需要,要求基片不是平面,而是有一定曲率的球面。为此,采用光刻离子交换工艺,在弯曲玻璃基片上,研制出曲面型六角形孔径渐变折射率(GRIN)平面微透镜阵列。

阵列基片采用 Na_2O 含量较高的玻璃,做成球面曲率半径为 500 mm 的球缺。将光刻后的基片放入以一定比例混合的 Ti_2SO_4 和 ZnSO_4 熔融盐中进行离子交换。交换温度为 450~500 °C,交换时间为 30~50 h。制作的曲面型六角形孔径 GRIN 平面微透镜阵列外形如图 16 所示,基片直径 25 mm,有效微透镜元数为 2052,阵列排列整齐、均匀。表 6 为阵列部分光学特性参数测量值。

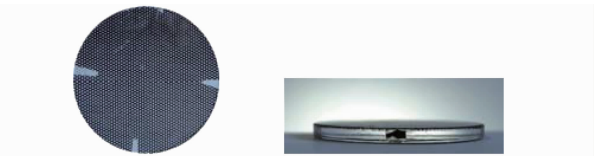


图 16 曲面型六角形孔径 GRIN 平面微透镜阵列外形
Fig. 16 Profile of a spherical hexagonal aperture

表 6 阵列部分光学特性参数测量值

Table 6 Some of the array's optical characteristic parameters

Ion exchange depth /mm	Intercept /mm	NA	Distortion
0.198	2.241	0.100	0.077

图 17 为该阵列对物“A”和方格子图的成像及畸变情况。根据表 6 的测试数据及图 17 可知,阵列成像质量和一致性较好,畸变较小。

图 18 为该阵列横截面结构照片,图中的显微照片明显看出离子交换后的变折射率(半球透镜)区域三维形貌。当离子扩散至一定深度时,相邻透镜元的离子扩散区域将开始重叠。

测量和计算指出,离子纵向扩散最大深度高 0.198 mm,横向(自六角形窗口边界算起)最大宽度为 0.142 mm,重叠区域最大宽度为 0.042 mm,填充系数可达 98%。

4.3 树脂微凸透镜阵列

4.3.1 光学设计

采用光刻热熔工艺制作的微透镜阵列,就是在玻璃基片上形成排列整齐的树脂微凸透镜阵列,如图 19 所示。折射率为 n 的树脂经光刻和热处理形成的微凸透镜的焦距为

$$f = \frac{R}{n-1}, \quad (37)$$

假定形成的微凸透镜是高为 h 的半球形,很容易得到:

$$h = R - (R^2 - r^2)^{1/2}. \quad (38)$$

在热处理前,光刻后圆柱状树脂的体积是: $T\pi r^2$, 这里, T 为制作高为 h 的微凸透镜所需的圆柱体高度。在热处理后,微凸透镜的体积是 $\frac{\pi h}{6}(3r^2 + h^2)$, 显然,热处理前后树脂的体积应当相等,由此可以得到热处理前树脂圆柱体的高度为

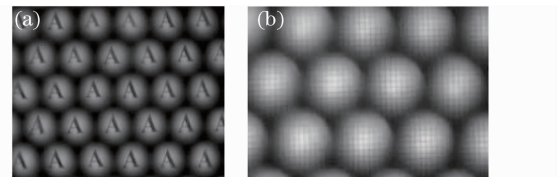


图 17 物“A”的多重像(a)及方格子成像畸变(b)
Fig. 17 Imaging of object "A" (a) and distortion of square grids (b) through the array

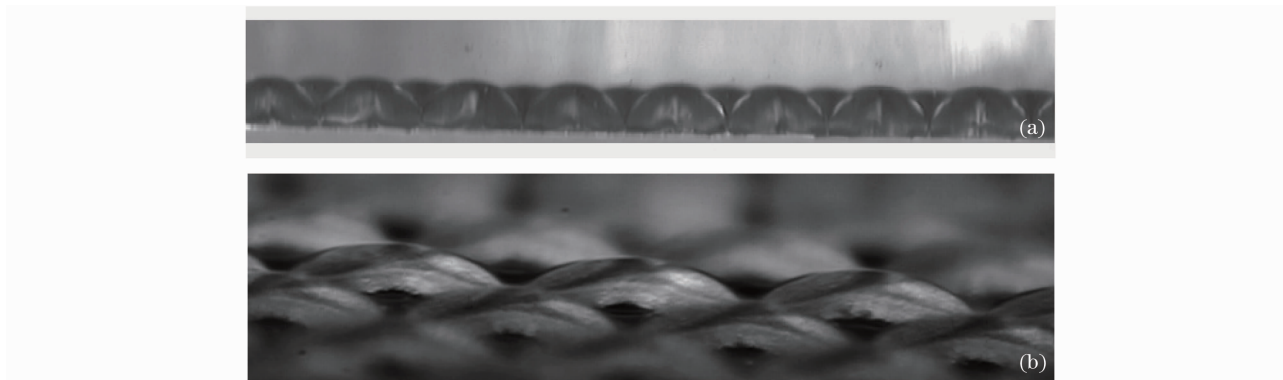


图 18 阵列切口位置。(a)离子交换区域纵剖面;(b)三维离子交换区域侧俯视图

Fig. 18 Incision location. (a) section of ion-exchange region; (b) lateral view of three-dimensional ion-exchange region of the array

$$T = \frac{h}{6} \left(3 + \frac{h^2}{r^2} \right), \quad (39)$$

T 也即树脂层的厚度。例如,要制作半径为 0.05 mm,高为 0.04 mm 的微凸透镜阵列,树脂层的厚度应为 0.0244 mm。

4.3.2 制作工艺

在玻璃基片上通过匀胶工艺沉积厚度为 T 的树脂,再通过已制作好的母板在紫外光照射下进行光刻,经过显影后在玻璃基片上形成圆柱状树脂阵列,最后通过热处理过程,在表面张力作用下,圆状体变成半球形,成为树脂微凸透镜阵列,其工艺流程如图 20 所示。

4.3.3 树脂微凸透镜阵列的主要光学特性

1) 采用成像法研究了树脂微凸透镜的成像特性。图 21 为圆形孔径、六角形孔径和正方形孔径树脂微凸透镜成像照片,透镜半径为 250 μm 。

2) 异形孔径树脂微凸透镜阵列的出射光斑照片如图 22 所示。

3) 异形孔径树脂微凸透镜阵列的外貌照片如图 23 所示。

4) 测试数据。对样品的主要光学特性进行了测试,得到:

- 焦距:采用扫描近场光学显微镜和成像法测量,结果是 $f=0.362 \text{ mm}$ 。
- 出射光斑:采用近场光学显微镜测量,结果是 $1.844 \mu\text{m}$;
- 畸变:采用方格成像法测量,结果是 22.5%;
- 数值孔径:采用数值孔径仪测量,结果是 $NA=0.157$;
- 成像分辨率:采用分辨率测量仪测量,结果是 169 lp/mm。

4.4 三种不同孔径的树脂微凸透镜阵列性能比较

从图 21 可以清楚看出 3 种不同孔径的微透镜阵列在光学性能上的差异。它们都由光刻树脂热熔工艺制作,圆形孔径单透镜对称性高,干涉条纹为圆环状,像差小,成像质量很好,填充系数小,最高不超过 90%,但是信息泄露大;六角形孔径单透镜对称性中等,干涉条纹中心呈圆环状,边部呈六角形状,中部像差小边缘较大,成像质量中部好边缘较好 6 个角上较差,填充系数大,可以达到 98% 以上,信息泄露很小;方形孔径单透镜对称性低,干涉条纹中心呈圆环状边部呈方形,像差中部小边缘大 4 个角上很大,成像质量中部好边缘

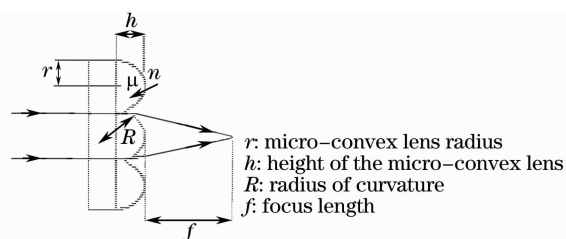


图 19 采用光刻热熔工艺制作的树脂微凸透镜阵列结构示意图

Fig. 19 Sketch of micro-convex resin lens array by melting photoresist

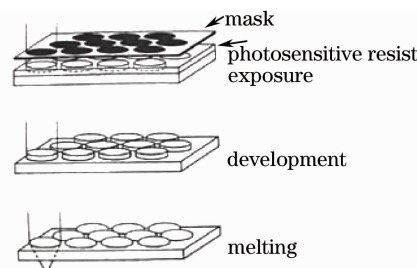


图 20 光刻热熔工艺制作树脂微凸透镜阵列工艺流程图

Fig. 20 Process of fabricating a micro-convex resin lens array by melting photoresist

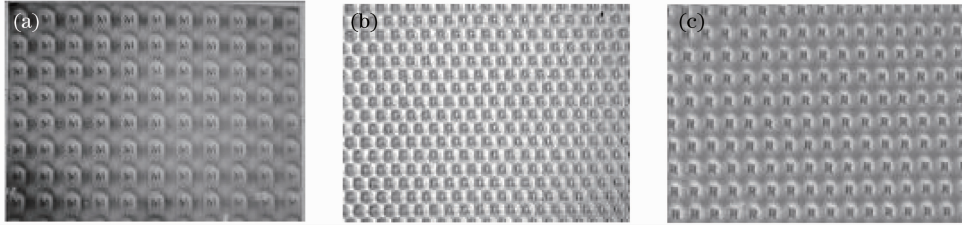


图 21 圆形和异形孔径树脂微凸透镜阵列的成像照片。(a)圆形孔径,透镜半径 $250\ \mu\text{m}$,中心距 $300\ \mu\text{m}$,基片尺寸 $35\ \text{mm}\times 35\ \text{mm}$;(b)六角形孔径,透镜半径 $250\ \mu\text{m}$,中心距 $350\ \mu\text{m}$,基片尺寸 $25\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$;(c)正方形孔径,透镜半径 $250\ \mu\text{m}$,中心距 $350\ \mu\text{m}$,基片尺寸 $25\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$

Fig. 21 Images of circular and special-shaped aperture micro-convex resin lens arrays. (a) circular aperture lenses with a radius of $250\ \mu\text{m}$, a center distance of $300\ \mu\text{m}$ and a substrate size of $35\ \text{mm}\times 35\ \text{mm}$; (b) hexagonal aperture lenses with a radius of $250\ \mu\text{m}$, a center distance of $350\ \mu\text{m}$ and a substrate size of $25\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$; (c) square aperture lenses with a radius of $250\ \mu\text{m}$, a center distance of $350\ \mu\text{m}$ and a substrate size of $25\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$

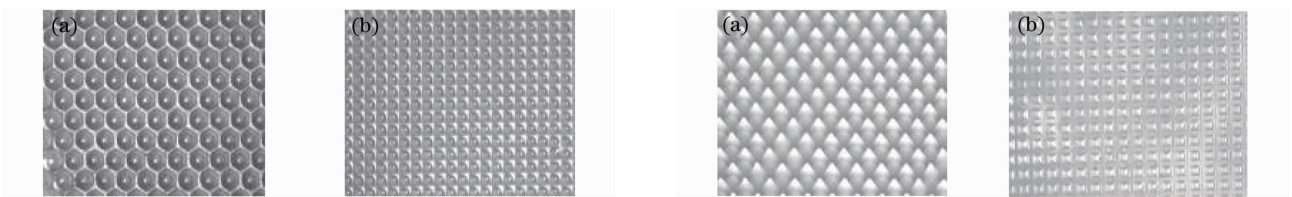


图 22 六角孔径(a)和方形孔径(b)树脂微凸透镜阵列出射光斑照片

Fig. 22 Emergent faculae of hexagonal (a) and square (b) aperture micro-convex resin lens arrays

图 23 六角孔径(a)和方形孔径(b)树脂微凸透镜阵列的外貌照片

Fig. 23 Profile of hexagonal (a) and square (b) aperture micro-convex resin lens arrays

较差 4 个角上很差,填充系数大,可达 98%以上,信息泄露很小。

5 发展趋势

微小光学是有重要理论和应用背景的新兴学科,发展很快。总的来说,它今后发展趋势是:进一步实现光学元件的微型化和同类光学元件的集成,发展微光子集成器件;进一步实现不同类光电子元件的集成化和智能化,发展光电子集成器件;大力促进微小光学和其他科技领域的结合,特别是光信息、光电子器件、光纤传感、光学设计、光学成像、微光机电器件、自适应光学、仿生学和国防科技等领域,发展新型光子器件。目前,作为微小光学阵列器件的理论基础——阵列光学还处于开始研究阶段,还有很多工作要做。

微小光学研究的对象是微米量级光学元件,制作工艺是光学微加工技术。随着科技的进一步发展,需要发展光学微纳加工技术,研制纳米光学元件。众所周知,当光学元件尺寸减小到纳米量级时,会出现非常明显的表面效应、尺寸效应和量子效应等,光学元件的物理、化学性能将有明显的变化。因此,纳米尺寸光学元件将是什么样的结构,怎样来制作,有什么新的特性,理论基础是什么,这一系列新问题都需要人们去深入探索。

6 结 论

以作者所做工作为基础,对微小光学的发展进行了讨论。1969年,自聚焦透镜研制成功,开创了变折射率光学新兴学科领域,同时也促进了微小光学的产生与发展。微透镜阵列的制作与应用,使微小光学有了迅猛发展。为了解决微透镜阵列高填充系数这一难题,在生物复眼的启发下,一方面研制异形(正方形和正六角形)自聚焦透镜和阵列,另一方面研制异形孔径自聚焦平面微透镜阵列,同时还采用光刻树脂热熔工艺制作异形孔径微凸透镜阵列,并对其折射率分布和主要光学特性进行了研究,得到了一些重要结果。最后,对微小光学今后的发展趋势进行了评述。

致谢 本文所介绍的自聚焦透镜和圆形孔径微透镜阵列方面的工作是在中国科学院西安光学精密机械研究所完成的,异形孔径微透镜阵列方面的工作是在西南大学完成的。对引文中的作者,如高应俊、朱传贵、阎国安、韩艳玲、张玉、周自刚、王凤等表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 K. Iga. Micro-optics[J]. *Appl. Phys.*, 1986, **55**(7): 611
- 2 Liu Desen. The recent progress of micro-optics[J]. *Physics*, 1994, **23**(6): 321~328
刘德森. 微小光学的研究现状[J]. *物理*, 1994, **23**(6): 321~328
- 3 Liu Desen. Microlens arrays and microoptics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1994, **23**(z2): 67~76
刘德森. 微透镜阵列与微小光学[J]. *光子学报*, 1994, **23**(z2): 67~76
- 4 Liu Desen, Gao Yingjun. Microoptics and micro-photon devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(z1): 21~27
刘德森, 高应俊. 微小光学与微小光子器件[J]. *光子学报*, 1997, **26**(Z1): 21~27
- 5 I. Kitano, K. Koizumi, H. Matsumura *et al.*. Light focusing fiber guide prepared by ion-exchange techniques[J]. *Jan. Soc. Appl. Phys.*, 1970, **39**: 83
- 6 Fiber Optics Editorial Group. *Fiber Optics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1974
纤维光学编写组. *纤维光学*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1974
- 7 Han Yanling, Liu Desen, Li Jingyan *et al.*. Research on manufacture of square gradient-index lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 1301~1304
韩艳玲, 刘德森, 李景艳 等. 方形自聚焦透镜的研制[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 1301~1304
- 8 Han Yanling, Liu Desen, Jiang Xiaoping. Square self-focusing lens array and its image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 221~223
韩艳玲, 刘德森, 蒋小平. 方形自聚焦透镜元阵列及其成像[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 221~223
- 9 Qin Xianming, Wang Feng, Liu Desen *et al.*. Research on manufacture of square gradient-index lens and testing it's the optical characteristic [J]. *Laser J.*, 2006, **27**(6): 53~55
秦先明, 王 风, 刘德森 等. 方形自聚焦透镜的研制及光学特性测试[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(6): 53~55
- 10 Zhang Yu, Liu Desen, Jiang Xiaoping *et al.*. The manufacture of hexagon aperture plane micro-lens array[J]. *Sci. Res. Monthly*, 2007, **3**: 90~93
张 玉, 刘德森, 蒋小平 等. 六角形孔径平面微透镜阵列的研制[J]. *科学研究月刊*, 2007, **3**: 90~93
- 11 Zhang Yu, Liu Desen. Manufacture of hexagon aperture plane micro-lens array and its basic characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1639~1642
张 玉, 刘德森. 六角形孔径平面微透镜阵列的制作及基本特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1639~1642
- 12 Liu Desen. *Theories and Technologies of Gradient Refractive Index Medium*[M]. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2005
刘德森. *变折射率介质理论及其技术实践*[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2005
- 13 Liu Desen, Gao Yingjun. *Physical Principles of Gradient Refractive Index Medium*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991
刘德森, 高应俊. *变折射率介质的物理基础*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991
- 14 Qiao Yatian. *Gradient Refractive Index Optics*[M]. Beijing: Science Press, 1988
乔亚天. *梯度折射率光学*[M]. 北京: 科学出版社, 1988
- 15 E. W. Marchand. *Gradient Index Optics*[M]. New York: Academic Press, 1978
- 16 M. S. Sodha, A. K. Ghatak. *Inhomogeneous Optics Waveguides*[M]. New York: Plenum Press, 1977
- 17 Zhu Chuangui, Liu Desen, Xue Mingqiu *et al.*. Fabricating of high-density ultra-microlens array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1992, **21**(4): 310~315
朱传贵, 刘德森, 薛鸣球 等. 高密度微小透镜面列阵研制[J]. *光子学报*, 1992, **21**(4): 310~315
- 18 Liu Desen, Gao Yingjun, Qin Yali *et al.*. A study on self-focusing planar microlens array with large NA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1990, **19**(3): 209~217
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]. *光子学报*, 1990, **19**(3): 209~217
- 19 K. Iga, S. Misawa. Distributed-index planar microlens and stacked planar optics: a review of progress[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(19): 3388~3396
- 20 Gao Yingjun, Qin Yali. Two gradient-index microlenses made by ion exchange method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(1): 60~66
高应俊, 覃亚丽. 两种离子交换型微变折射率透镜[J]. *光学学报*, 1990, **10**(1): 60~66
- 21 Y. Gao, Y. Qing. Two ion-exchanged microlens arrays[C]. *SPIE*, 1990, **1230**: 66
- 22 Mei Suohai, Liu Desen. The imaging property 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 Zhu Chuangui, Xue Mingqiu, Liu Desen *et al.*. The refractive index distribution and imaging characteristic of planar microlens array[J]. *Laser Technique*, 1992, **16**(4): 48
朱传贵, 薛鸣球, 刘德森 等. 平面微透镜阵列的折射率分布和成像特性[J]. *激光技术*, 1992, **16**(4): 48
- 24 Fan Dianyuan. Diffraction integration of optical systems and its applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 1980, **7**(8): 26~33

- 范滇元. 光学系统的衍射积分及其应用[J]. 中国激光, 1980, **7**(8): 26~33
- 25 Zhu Chuangui. Study on the Gradient Index Planar Microlens Array and its Optical Characteristic[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 1992
- 朱传贵. 自聚焦平面微透镜阵列及其光学性质研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1992
- 26 Fan Dianyuan. Optical transfer function in matrix optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, **1**(5): 395
- 范滇元. 在矩阵光学元件中的光学传递函数[J]. 光学学报, 1981, **1**(5): 395
- 27 Wang Feng, Liu Desen, Jiang Xiaoping *et al.*. Imaging properties of 5×5 array composed of square GRIN lens[J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(4): 518~521
- 王 风, 刘德森, 蒋小平 等. 方形自聚焦透镜 5×5 阵列的成像特性[J]. 应用光学, 2008, **29**(4): 518~521
- 28 Han Yanling. Theoretical Analysis and Manufacture Craft of Square Self-focusing Lenses and It's Array[D]. Chongqing: Southwest University, 2006
- 韩艳玲. 方形自聚焦透镜及阵列的理论分析和制作工艺[D]. 重庆: 西南大学, 2006
- 29 Chen Kai, Han Yanling, Zhou Zigang. Analysis of refractive-index distribution of square gradient lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 648~651
- 陈 凯, 韩艳玲, 周自刚. 方形自聚焦透镜折射率分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(4): 648~651
- 30 Zhang Ren, Zhou Zigang, Hu Cong. Analytic solution of refractive-index distribution in regular hexagon selfoc lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1346~1350
- 张 韧, 周自刚, 胡 聪. 正六边形自聚焦透镜折射率分布研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(7): 1346~1350
- 31 A. K. Gupta, K. Thyagajan. Contemporary Optics[M]. New York: Plenum Press, 1977
- 32 Lang Xianli, Liu Desen, Lü Tao *et al.*. Improvement of index distributions for GRIN lens by two-step Ion-exchanging method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1141~1144
- 郎贤礼, 刘德森, 吕 涛 等. 二次离子交换法改进自聚焦透镜折射率分布[J]. 光子学报, 2005, **34**(8): 1141~1144
- 33 K. Iga. Theory for gradient-index imaging[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(7): 1039~1043
- 34 Xianli Lang, Desen Liu, Tao Lü *et al.*. Aberration improvement of gradient index rod lens[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3): 152~153
- 35 Y. Hsiharg, C. Chingkong, W. Maukuo. High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2004, **14**: 1197~1204