

制备人工复眼结构的方法

史立芳^{1,2}, 叶玉堂², 邓启凌¹, 董小春¹, 杜春雷³

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

摘要: 提出了一种人工复眼结构的制备技术。人工复眼结构是由类似于昆虫复眼的很多小眼组成。这些小眼分布在球冠基底上以能够像昆虫复眼一样实现大视场探测。通过分析不同制备技术的特点及适用范围, 研究材料的特性以及不同材料之间的关系, 并将各种制作工艺以及材料相融合, 发展了一种可用于制备曲面微阵列元件的制备方法。在该方法中, 利用微加工技术在平面上制备作为子眼的微透镜阵列结构; 然后利用软光刻技术将该微透镜结构进行翻模, 获得分布在柔性基底上的凹透镜阵列结构; 最后利用浇铸复制技术将柔性基底上的结构转移到球冠基底上, 获得所需的人工复眼结构。利用该方法, 开展了相关实验, 在曲面基底上制备出了包含 20 000 多个子眼的人工复眼结构。

关键词: 人工复眼; 微透镜阵列; 曲面成形; PDMS

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2462-05

Method to fabricate artificial compound eye

Shi Lifang^{1,2}, Ye Yutang², Deng Qiling¹, Dong Xiaochun¹, Du Chunlei³

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, China;

2. School of Optoelectronic Information, University, Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610041, China;

3. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Science, Chongqing 401122, China)

Abstract: A method used to fabricate artificial compound eye was presented in this paper. The artificial compound eye is composed of ommatidia like that of an insect's compound eye. By studying the characteristic of different fabrication technique, analyzing the performance of materials and relationship between different materials, and composing the fabrication techniques and materials together, a method to manufacture micro array elements based on curvature substrate was proposed. In this method, microlens patterns used as ommatidia were fabricated by regular micro-fabrication. Soft-lithography was used to manufacture the deformed elastomer membrane to obtain opposite concave microlens patterns. Polymer replication was used to transfer the patterns onto the hemispherical dome substrate. Experiments were carried out and an artificial compound eye contain over 20 thousands ommatidias were fabricated.

Key words: artificial compound eye; microlens array; curvature formation; PDMS

收稿日期: 2013-01-10; 修订日期: 2013-02-25

基金项目: 中国科学院支撑项目(61501040201); 国家自然科学基金(11174281)

作者简介: 史立芳(1980-), 女, 助理员, 博士生, 主要从事微纳结构的设计制备方面的研究。Email: shilifang@ioe.ac.cn

导师简介: 杜春雷(1962-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳光学设计制备与系统集成方面的研究。Email: cldu@cigit.ac.cn

叶玉堂(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事计算机热图象信号处理、单片光电集成回路及光电对抗方面的研究。

Email: ytye@uestc.edu.cn

0 引言

光学成像和探测系统目前被广泛应用于生物、工业和军事应用等领域,这对他们的性能指标也提出了更高的要求。其中视场角作为光学探测系统的一个重要指标,它的性能也急待提高。传统的光学成像系统由于只是在一维光轴方向上开展优化设计,所以使得其视场角的增大受到极大的限制。并且,这种传统的光学成像系统通常采用的镜片数多,体积大,结构复杂,难以实现与各种小型化系统的集成和融合。最近几年,昆虫复眼以其独特的结构特点引起了人们的极大关注,目前,国内外很多研究组开展了仿昆虫复眼结构的人工复眼结构的研究。人工复眼结构是由分布在曲面上的很多个子眼系统组成,每个子眼构成一个独立的成像通道,其光轴指向某个特定的方向并对其视场内的物体成像。所有的子眼共同作用,构成一个多通道的成像系统。将所有小眼所成的像进行融合之后获得大视场空间的像。这种多光轴的成像系统使得设计的自由度得到了极大的提高,通过增加不同方向上子眼的个数及改变其排布方式,可以获得所需的视场分布,并且使得视场角的增大不受约束,是一种极具潜力的新型成像元件。

目前,国内外的很多研究小组都对人工复眼结构进行了广泛的研究,但是这些研究大部分停留在理论和设计方法的研究上^[1-6]。为了将该人工复眼结构真正应用到各成像系统中,必须研究一种可实用的人工复眼结构的成型技术。但是由于该结构是由分布到曲面上的子眼阵列组成,而传统的制备技术都是在平面上进行成型的,这就对其制备提出了很高的挑战。目前国际上有些小组采用六维平移装置结合直写装置来进行人工复眼结构的制备^[7],这种制备方法需要复杂的精密移动调节装置,并且需要配备昂贵的直写头,成本非常高,并且制备效率低,不是一种可广泛推广应用的方法。

文中通过分析人工复眼结构的结构特点,并且针对其特点开发可实用的制备技术,同时通过引入新材料,开发新技术,将微加工、软光刻、复制技术相结合,最终形成了一套独特的曲面微阵列元件制备技术。并通过实验对该成型方法进行了验证,实现了包含超过 20 000 个子眼的人工复眼结构的制备。为

人工复眼结构的实际应用打下了坚实的基础。

1 原理及制备过程

昆虫复眼结构是一种三维立体结构,如图 1 所示,它是由分布在球冠基底上的多个子眼结构组成。通过分析昆虫复眼的结构特点,结合目前各制备工艺的特点,提出了平面加工—柔性模板制备—复制转移为一体的曲面微阵列元件成型技术,该制备技术包含以下三步:(1) 利用微加工技术制备平面微透镜阵列结构作为复眼中的子眼阵列;(2) 利用软光刻技术对上述子眼阵列进行翻模,获得包含子眼阵列结构的柔性模板的制备,该柔性模板可以以任意弯曲度弯折;(3) 利用复制技术实现将柔性模板上的子眼阵列结构转移到球冠基底上。下面将对这三个过程进行详细讨论。

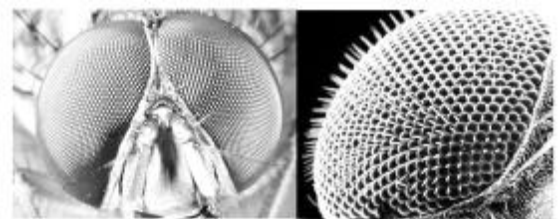


图 1 昆虫复眼结构照片

Fig.1 Photograph of insect compound eye

1.1 微加工技术制备平面微透镜阵列

在上述制备的人工复眼结构中,利用微透镜阵列结构来作为复眼的子眼结构,因此微透镜阵列结构的成型质量对复眼的效果影响较大,这也对微透镜阵列的精确成型提出了很高的要求。针对微透镜阵列的结构特点,发展不同的微加工技术来进行微透镜阵列的制备,本研究组经过十余年的发展,在该方面积累了丰富的经验。

1.1.1 移动掩模法制备微透镜阵列

移动掩模法为笔者所在研究组提出的一种用于制备四边形微透镜阵列的技术^[8-9],该技术原理示意图如图 2 所示,首先根据微透镜阵列结构的目标面形设计并制备掩模结构,利用该掩模结构首先在 x 方向上进行曝光,获得 x 方向上的柱透镜形状的曝光光强分布,然后再在 y 方向上进行曝光,获得 y 方向上的柱透镜形状的曝光光强分布,将两方向上的曝光光强分布进行叠加,再经过后续的显影、刻蚀等

步骤,即可获得所需的微透镜列阵结构。

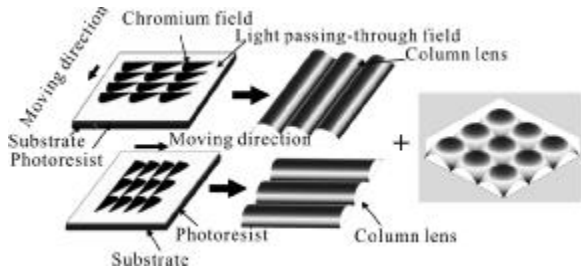


图 2 移动掩模法原理示意图
Fig.2 Principle of the mask-moving method

1.1.2 热熔法制备微透镜列阵

首先利用激光直写技术进行掩模结构的制备,然后利用热熔法实现平面微透镜列阵结构的制备。首先对基片进行清洗,然后利用甩胶机将光刻胶旋涂到基片表面,光刻胶的厚度通过旋涂时间和旋转速度来控制。旋涂完毕之后,对光刻胶进行烘烤使其中的溶剂充分挥发。然后利用制备好的掩模结构对光刻胶进行曝光,如图 3(a)所示,曝光完毕之后,在光刻胶层上形成圆柱形阵列结构如图 3(b)所示。将该圆柱形阵列结构在高温下进行烘烤,圆柱形光刻胶结构融化,形成球形微透镜结构,如图 3(c)所示。

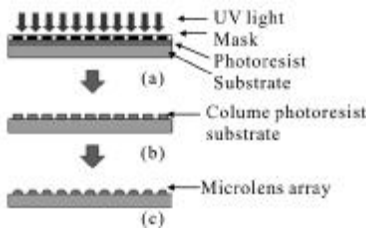


图 3 热熔法制备平面微透镜列阵结构

Fig.3 Fabrication of microlens array by using resist reflow method

在该制备方法中,通过控制光刻胶的厚度以及调整掩模结构即可获得所需的微透镜列阵结构的制备。

1.2 软光刻技术成形柔性模板

为了最终在球冠基底上成型人工复眼结构,需要柔性模板实现将平面结构向曲面结构的转移,因此该柔性模板必须与平面微透镜材料以及最终成型的人工复眼结构材料之间存在比较低的分子力,以便于转移过程中的剥离。基于该要求,通过分析各材料的特性,选择聚二甲基硅氧烷即 PDMS 作为成型柔性模板的材料。模板制备过程如图 4 所示。首先将

PDMS 溶液与其固化剂的混合液一起浇铸到平面微透镜列表面,然后将其放置于烘箱中进行烘烤固化,如图 4(a)所示。然后将该模板放置于一密闭箱封口,PDMS 背面与该封口紧密贴合,如图 4(b)所示。然后利用与密闭箱连接的抽气泵对密闭箱进行抽气,抽气开始的时候,密闭箱内外的气压均为大气压 P_0 ,在抽气过程中,密闭箱内的气压逐渐减小,使得在 PDMS 膜层内外表面形成气压差,该气压差对 PDMS 膜层形成压力,压力的方向为大气压的方向,即垂直于 PDMS 膜层表面,该压力使得 PDMS 层向下弯曲形成凹的携带有凹透镜列阵的柔性模板结构,如图 4(c)所示。在已知密闭箱口径 D 的情况下,通过控制该模板的高度 H ,即可通过公式(1)实现该球面曲率半径的控制。

$$R = \left(\frac{D^2}{4} + H^2 \right) / 2H \quad (1)$$

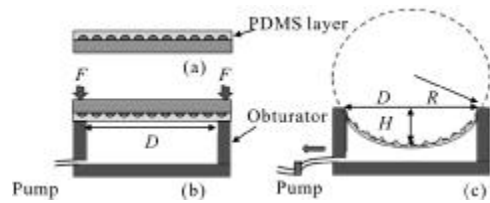


图 4 软光刻技术制备 PDMS 柔性模板
Fig.4 Fabrication process of soft mold by using soft lithograph

在该过程中,由于 PDMS 膜层被从平面结构拉伸成曲面结构,因此对其携带的微透镜列阵的结构参数会造成影响,因此在制备平面微透镜列阵的时候可预先考虑该修正量。

1.3 复制转移技术

在制备完成 PDMS 柔性模板之后,利用紫外固化材料进行图形的复制转移进而完成人工复眼结构的成型,该成型过程如图 5 所示。首先,将固化材料倾倒入凹的 PDMS 柔性模板中,如图 5(a)所示,该固

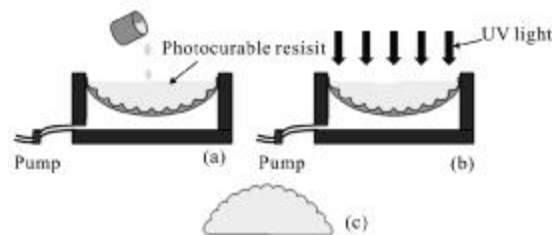


图 5 复制转移技术

Fig.5 Replication transfer technology

化材料需要与 PDMS 柔性模板之间具有较低的分子力,以便于后续结构的成型。然后利用紫外光照射该材料使其充分固化,如图 5(b)所示。在该固化过程中,由于所采用的材料为紫外固化材料,在固化过程中,没有热量的产生,因此,对 PDMS 膜层的形状不造成影响,即其在固化过程中不会产生收缩。固化之后,将 PDMS 层从成型的固化材料表面剥离,即可获得成型的人工复眼结构,如图 5(c)所示。

2 实验

为了验证上述制作方案,笔者开展了相关的制备实验。首先利用微细加工技术完成了各种作为子眼结构的微透镜列阵的制备,如图 6 所示,给出了周期 1 500 μm 、周期 100 μm 、周期 5 μm 的制备结果,分别如图 6(a)~(c)所示。

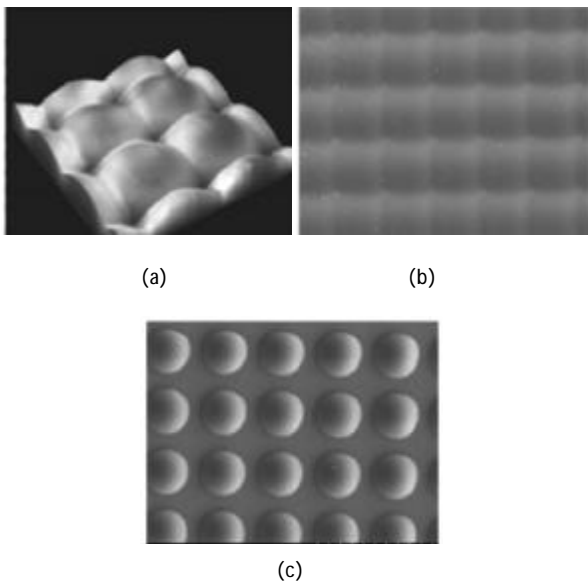
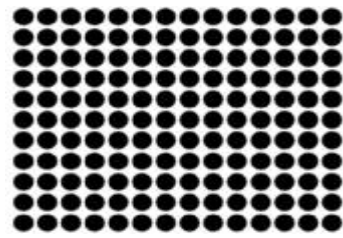


图 6 采用微加工技术制备的各种微透镜列阵

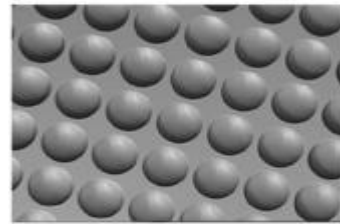
Fig.6 Microlens array fabricated by micro-fabrication technology

由于生物复眼结构的周期约为 40 μm ,因此在人工复眼结构的制备过程中,选择微透镜列阵的周期为 40 μm 的微透镜列阵的制备技术进行具体说明。鉴于该微透镜列阵的结构特点,选择热熔法开展其制备。

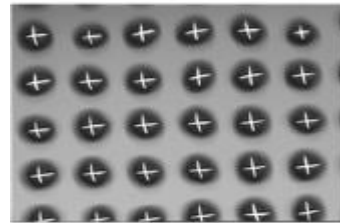
首先利用激光直写技术制备了如图 7(a)所示的掩模结构。该掩模中的黑色圆形部分为非透光部分,其余为透光部分。非透光部分的直径为 35 μm ,周期为 40 μm 。



(a) 掩模图形
(a) Mask pattern



(b) 制备结果
(b) Fabrication result



(c) 成像结果
(c) Imaging performance of the microlens array

图 7 热熔法制备周期为 40 μm 的微透镜列阵
Fig.7 Microlens array with period 40 μm fabricated by resist reflow method

利用稀硝酸浸泡基片,然后利用超纯水对其进行冲洗,之后利用丙酮和乙醇进行清洗,放入 160 $^{\circ}$ 烘箱中烘烤 2 h 后使基片彻底烘干。选择 AZ9260 光刻胶作为图形记录载体。利用甩胶机将光刻胶旋涂在基片表面,旋涂速度为 4 500 转/s,旋涂时间为 25 s。然后将其放入烘箱中进行烘烤,以去除光刻胶中的溶剂和水分,烘烤温度为 80 $^{\circ}$,烘烤时间为 1 h。冷却后测量获得的光刻胶的厚度为 10 μm 。将掩模板放置于光刻胶表面,使其与光刻胶紧密接触,利用波长 365 ns 的汞灯对光刻胶进行曝光,曝光时间为 60 s。曝光完毕之后将基片放入显影液中进行显影,显影时间为 2 min。显影之后对应掩模中透光部分的光刻胶被洗掉,非透光部分的光刻胶被保留,即在基片上形成直径约 35 μm ,高度约 10 μm 的圆柱形光刻胶结构。之后将基片放入烘箱中进行高温热熔,热熔温度

为 115° , 热熔时间为 10 min。热熔后圆柱形的光刻胶结构会转变为所需的球冠形的微透镜列阵结构, 如图 7(b)所示。同时, 为了验证该微透镜列阵的成像效果, 利用“+”作为物体进行成像, 成像结果如图 7(c)所示, 可以看出, 利用该微透镜列阵可以对物体成清晰、完整的像。

通过分析光刻胶材料与各种材料之间的关系, 选择聚二甲基硅氧烷即 PDMS 材料作为成型柔性模板的材料, 这种材料与光刻胶以及石英基片之间有比较低的分子力, 可从光刻胶以及各种基片表面完整剥离。通过分析 PDMS 及其固化剂之间的配比关系, 选择配比 10:1 来配制 PDMS 溶液。该溶液被浇铸到上述成型的微透镜列阵表面, 然后放入烘箱中进行固化, 固化温度为 70° , 固化时间为 1 h。固化后将其从烘箱中取出, 将 PDMS 层从基片表面剥离, 获得携带有凹透镜阵列的柔性模板材料。将该柔性模板置于密闭装置表面, 然后利用抽气泵对其抽气, 使该装置负压, 获得分布在球碗结构表面的凹透镜列阵结构。选择紫外固化材料 NOA68 作为最终成型人工复眼的材料。该材料与 PDMS 之间具有低的分子力, 可以将 PDMS 从其表面完整剥离而不损伤该柔性模板。将 NOA68 溶液倒入 PDMS 球碗中, 在 365 nm 紫外光下固化 30 min(光强 I 为 8 mW/cm^2), 使 NOA68 材料充分交联固化。之后将 PDMS 剥离, 获得如图 8 所示的人工复眼结构。该结构球冠底面直径 2 cm, 高度为 0.5 cm。其中包含了超过 20 000 个子眼结构。

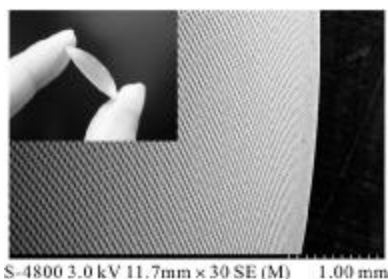


图 8 人工复眼结构照片及其电镜照片

Fig.8 SEM photograph of fabricated compound eye

该成型的人工复眼结构与原平面上的微透镜列阵相比, 其尺寸上的差别是在利用密闭箱对其进行拉伸的过程中造成的, 所以曲面上的子眼结构的尺寸会与平面上的有少许差别, 因此, 在制备时, 需要

考虑该畸变量, 在平面上结构制备时预先作修正, 以保证最终成型结果满足要求。

3 结 论

随着大视场光学成像系统和探测系统在各领域的广泛应用, 仿昆虫复眼结构的人工复眼成像结构也引起了人们的极大关注。鉴于该结构是由分布在曲面上的列阵化镜头结构组成, 而目前的加工技术大部分是基于平面基底的, 这对其制备提出了迫切的需求。文中, 通过创新工艺, 研究新材料, 发展了一种人工复眼结构的制备方法。该方法制备过程简单, 成型过程中不需要复杂昂贵的设备和仪器, 并且制备效率高, 是一种用于制备曲面微列阵元件的有效方法, 为人工复眼结构的实际应用打下了坚实的基础。

参考文献:

- [1] Andrea s Brückner, Jacques Duparré, Robert Leitel, et al. Thin wafer-level camera lenses inspired by insect compound eyes [J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24379-24394.
- [2] Ryoichi Horisaki, Jun Tanida. Compact compound-eye projector using superresolved projection [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (2): 121-123.
- [3] Di Si, Du Ruxu. Optimal design of single-layer spherical compound eye imaging system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(2): 27-31. (in Chinese)
- [4] Tan Xuechun, Wu Zhichao, Liang Zhu. Design and experiment of artificial compound eye receiving system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 992-997. (in Chinese)
- [5] Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Wang Ruiting, et al. Study on curved compound eye imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006,14(3): 346-350.. (in Chinese)
- [6] Cao Zhaolou, Zhan Zhenxian, Wang Keyi. Structural design of spherical compound eye lens for moving object detection, [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (1): 70-73. (in Chinese)
- [7] Li Lei, Yi Allen Y. Development of a 3D artificial compound eye[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 18125-18137.
- [8] Shi Lifang, Du Chunlei, Dong Xiaochun, et al. Effective formation method for an aspherical microlens array based on an aperiodic moving mask during exposure[J]. *Applied Optical*, 2007, 46 (34): 8346-8350.
- [9] Shi Lifang, Deng Qiling, Du Chunlei, et al. Formation for bass-relief microfiles based on an analytic formulation [J]. *Chin Phys Lett*, 2007, 24(10): 2867-2869.