

激光与光电子学进展

基于电喷墨技术的多焦距曲面微透镜阵列制备

褚金奎*, 刘瑞, 刘建英, 付佳新

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116023

摘要 随着微纳米工艺的发展,微光学元件的制备和应用成为重要研究方向。生物复眼具有视场大、体积小、动态特性好等优点。微透镜阵列是一种常用的仿生复眼的光学元件,具有广泛的应用场景。为此,提出了一种基于电喷墨打印技术制备多焦距的曲面微透镜阵列的工艺,所制备的多焦距微透镜阵列可以解决曲面基底和平面的图像传感器焦距不匹配引起的离焦模糊问题。首先基于电喷印技术制备平面的多焦距微透镜阵列,然后在表面形成抗粘层并倒模,得到微透镜阵列凹模,最后经负压弯曲注胶固化过程,制备了多焦距的曲面微透镜阵列。阵列的整体半径为 6 mm,焦距范围为 4.9~6.23 mm,总方向角大于 60°。

关键词 集成光学器件; 多焦距曲面微透镜阵列; 电喷墨技术

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223368

Multi Focal Length Curved Microlens Array Based on Electric Inkjet Technology

Chu Jinkui*, Liu Rui, Liu Jianying, Fu Jiabin

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China

Abstract With the advancements of micro and nanotechnology, the preparation and application of micro-optical components have become hot research topics. Biological compound eyes have the advantages of a large field of view, small size, and good dynamic characteristics. Hence, a microlens array, which is a commonly used bionic compound eye optical element, has a wide range of applications. Herein, an electroinkjet printing-based process is proposed to prepare a multi focal length curved microlens array to resolve the problem of out-of-focus blur caused by a mismatch between the focal length of the curved substrate and the plane image sensor. A planar multi focal length microlens array was prepared based on electrojet printing, and then the antistick treatment and inverted mold were used to obtain the lens die. Finally, a multi focal length curved microlens array with an overall radius of 6 mm was prepared via negative pressure bending and glue injection. The array has a focus range of 4.9–6.23 mm and the total direction angle is larger than 60°.

Key words integrated optics devices; multi focal length curved microlens array; electric inkjet technology

1 引言

自 20 世纪 90 年代以来,面对光学元件不断增长的小型化、集成化需求,发展了微光学^[1]。微光学元件的特征尺寸通常为毫米级甚至微米级。微透镜阵列作为一种常见的微光学元件可以实现光线的聚焦、均分、扩散等调制作用^[2]。随着微纳米加工技术的不断发展,微透镜阵列的制备工艺也迅速发展,微透镜阵列在成像传感^[3]、照明光源^[4]、显示、光伏^[5]等领域得到了广泛应用,并且在机器人视觉、无人机检测、医疗诊断和偏

振导航等领域具有巨大应用前景^[6]。

微透镜阵列可分为平面微透镜阵列和曲面微透镜阵列。曲面微透镜阵相较于平面微透镜,视场角更大,动态特性更好,是理想的仿生复眼的光学器件。但是曲面基底透镜和平面的图像传感器始终存在着焦距不匹配的问题,越靠近边缘的微透镜聚焦所形成的光斑越大,聚焦效果越差,产生“离焦模糊”。针对该问题,学者们进行了大量的研究给出了不同的方案:2013 年, Floreano 等^[7]通过三层堆叠结构,分别是微透镜阵列、探测器阵列和柔性印刷电路板,实现了柱面的微透

收稿日期: 2022-12-22; 修回日期: 2023-02-15; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(52175265, 51675076, 52275281)、创意研究小组科学基金(51621064)、中央高校基本科研业务费专项基金(DUT21ZD101, DUT21GF308, DUT20LAB303)

通信作者: *chujk@dlut.edu.cn

镜阵列,但柔性电路板的复杂性限制了其使用范围;2014年,中国科技大学王克逸团队设计了可实现目标三维探测的人工复眼系统^[8],由多个微透镜和折转透镜拼接组成。多层拼接的结构实现了平面聚焦的效果,但同时限制了其集成度;2017年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所鱼卫星团队设计了仿生果蝇复眼的相机系统^[9],由半球复眼、光学中继系统和商用图像传感器组成,光学中继系统将曲面的像面变换投射到平面的图像传感器上,多层透镜组成的光学中继系统导致装配难度较高。

单一焦距的曲面微透镜阵列在曲面基底和平面图像传感器的适配上存在明显的问题,采用复杂的曲面图像传感器或是多层光学中继系统都存在一定劣势。若改变不同子眼的焦距,使其适配曲面基底到平面传感器的距离,便能改善该情况。本文提出一种多焦距的曲面微透镜阵列制备工艺,先进行了微透镜阵列的参数设计,进而利用电喷印技术在玻璃基底上打印平面的多焦距微透镜阵列,通过倒模获得透镜阵列的凹模,最后负压弯曲凹模并注入紫外(UV)胶,固化后脱模得到多焦距的曲面微透镜阵列,该微透镜阵列可采集 60° 方向内的特定方向光线,焦距区间为 4.9~6.23 mm。

2 微透镜阵列参数设计及仿真

同焦距的微透镜阵列在曲面上时,由于不同位置的微透镜到平面传感器上的距离不同,曲面的微透镜阵列的非中心通道聚焦效果较差,如图 1 所示,无法真正实现多方向光线采集的目标。

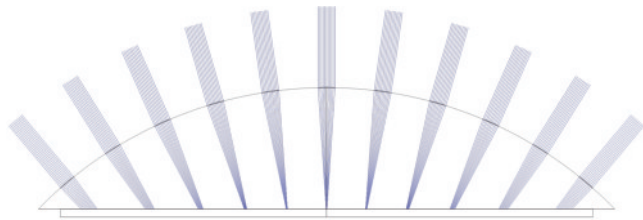


图 1 单焦距曲面微透镜阵列聚焦效果示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the focusing effect of a single focal curved microlens array

曲面微透镜阵列的焦距由微透镜中心位置到图像传感器的光程决定,通过改变微透镜直径来改变微透镜焦距,使不同的微透镜聚焦到同一个成像面上,如图 2 所示。结构的初始设计参数包括:曲面基底外半径 R 、曲面基底底面到球心的高度 H 、底面到像面的距离 X 、微透镜的接触角 α 、相邻微透镜光轴的角度 θ 、透镜材料紫外固化胶的折射率 n 。

阵列中心的微透镜为中心透镜,其焦距 f_0 为

$$f_0 = R - H + X. \quad (1)$$

中心透镜四周有多个环形微透镜阵列,从中心计数第 i 环阵列微透镜的焦距 f_i 为

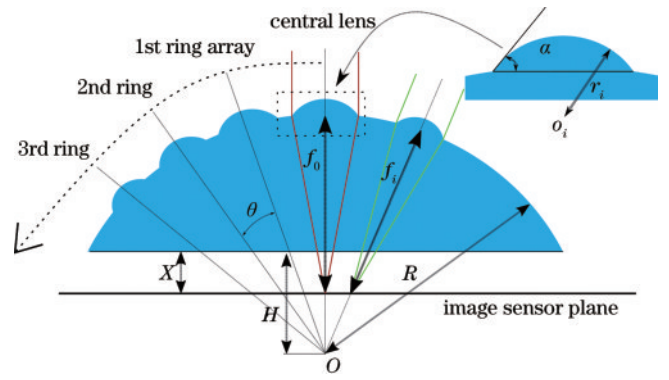


图 2 多焦距曲面微透镜阵列设计示意图

Fig. 2 Design diagram of multi focal length curved microlens array

$$f_i = \frac{R \times \cos(i \times \theta) - H + X}{R \times \cos(i \times \theta)}. \quad (2)$$

第 i 环阵列微透镜的曲率半径 r_i 为

$$r_i = (n - 1) \times f_i / n. \quad (3)$$

第 i 环阵列微透镜中心 o_i 到球心 O 的竖直与水平距离为

$$\begin{cases} x_i = (R - r_i \times \cos \alpha) \times \cos(i \times \theta) \\ z_i = (R - r_i \times \cos \alpha) \times \sin(i \times \theta) \end{cases}. \quad (4)$$

上述公式可以实现由结构的设计参数到各微透镜参数的计算,按照如表 1 所示的初始参数在 COMSOL Multiphysics 射线光学模块中完成光路仿真,如图 3 所示,仿真结果验证了多焦距曲面微透镜阵列可以将不同方向的光线聚焦至同一平面。

表 1 曲面微透镜阵列模型初始参数表

Table 1 Initial parameters of the curved microlens array model

Parameter	Value
Radius of the base R /mm	12
Base floor height H /mm	7
Base image plane distance X /mm	1
Contact angle α /($^\circ$)	10
Adjacent optical axis angle θ /($^\circ$)	10
Refractive index n	1.45

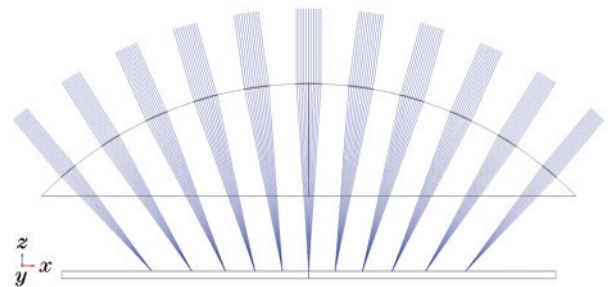


图 3 射线光学光路仿真图

Fig. 3 Ray optical path simulation

3 制备工艺及实验

微透镜阵列的制备方法繁多复杂, 主流的加工工艺包括光刻热熔法^[10]、模压成型法^[11]、超精密加工法^[12]、微液滴喷印法^[13]、飞秒激光刻蚀^[14-15]和双光子聚合法等。其中大多需要复杂的加工过程, 制作成本也较高。电喷墨技术是微液滴喷印工艺的一种, 该技术利用电流体动力效应, 使流体在电场力、表面张力和重力等综合力的作用下, 在喷嘴处形成体积微小的液滴或射流, 可在基底上实现目标结构的直接打印^[13]。电喷墨技术具有材料适用性广、无需掩模和分辨率高等优势, 近年来受到学者的广泛关注。

本文提出一种基于电喷微液滴打印的制备工艺, 首先在玻璃基底上打印出多焦距的平面微透镜阵列, 打印材料为 PDMS (道康宁 DC184), 预聚物和固化剂的比例为 5:1, 微动平台接地, 点胶针头 (30G) 接 3 kV 高压电源, 针头滴出的微小液滴累计得到不同直径的目标液滴, 按微透镜所需直径打印得到的多焦距平面微透镜阵列如图 4 所示。

然后将得到的平面微透镜阵列进行抗粘处理, 以保证在倒模的过程中, 不会损失结构、表面质量及精度, 本文使用一种利用羟丙基甲基纤维素 (HPMC) 成

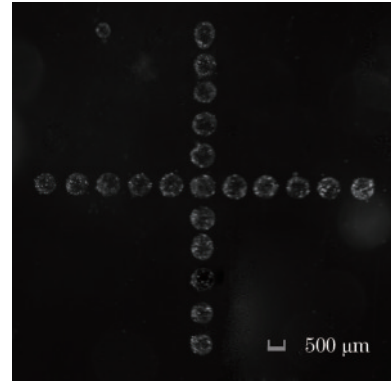


图 4 多焦距平面微透镜阵列实物图

Fig. 4 Picture of multi focal length planar microlens array

膜性自形成抗粘层的处理方式^[16], 在质量分数为 0.1%~0.25% 的 HPMC (上海阿拉丁生化科技股份有限公司) 磷酸盐缓冲溶液 (5 mmol/L, PH3) 中浸泡处理 10 min, 经去离子水冲洗, 然后进行常规倒模操作, 低压放置 30 min 消泡, 涂敷预聚物和固化剂 15:1 的 PDMS 在模板上, 75° 环境下固化 45 min, 脱模即可得到形貌良好的 PDMS 凹模, 如图 5(c) 所示。然后基于自搭建的负压弯曲装置对 PDMS 凹模进行弯曲塑形, 并注入 UV 固化胶 (凯斯密科技有限公司 K2018), 照射紫外线固化, 得到多焦距曲面微透镜阵列。

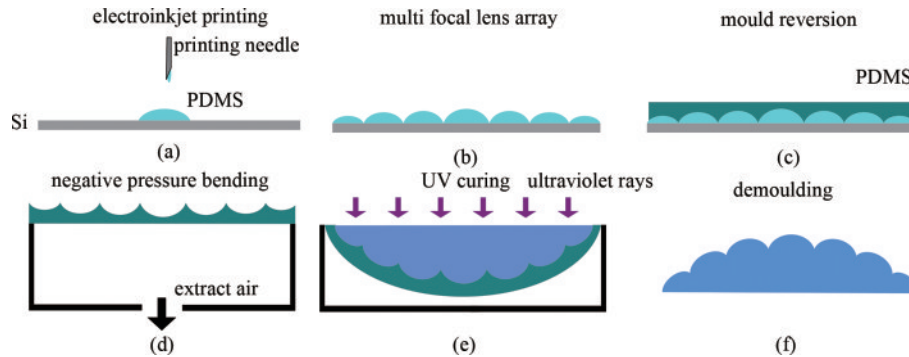


图 5 多焦距平面微透镜阵列工艺简图

Fig. 5 Process diagram of multi focal length planar microlens array

4 透镜阵列的性能测试

微透镜阵列的性能检测分为两类: 几何性能检测和光学性能检测。基于这两种性能检测方式, 分别对微透镜阵列做了以下测试。

4.1 透镜阵列的光学参数测试

焦距参数是多焦距微透镜阵列最重要的光学参数, 焦面位置的一致性决定了结构和工艺的可行性。为测试多焦距曲面微透镜阵列焦面一致性, 搭建了如图 6 所示的多方向光源测试设备。激光光源固定在可绕定点旋转的横臂上, 移动旋臂可模拟多方向的光源, 在 CCD 相机中先后捕捉透镜面及其焦点面, 水平距离为透镜的焦距。旋转光源并捕捉透镜面位置, 激光光源形成的光斑与透镜重合时, 激光光源的角度为透镜

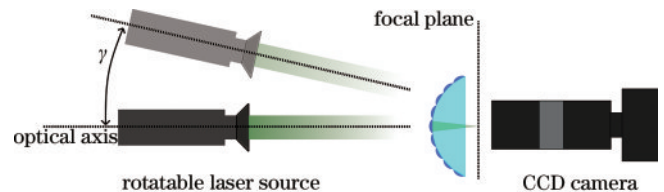


图 6 多焦距微透镜阵列测试原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of multi focal length microlens array testing principle

光轴方向角度。可以测得各微透镜的焦距、光轴方向和焦面位置, 如表 2 所示。

为表征各透镜通道的焦面一致性, 以中心透镜焦面为基准, 测量了其余各通道的焦面位置 p , 采用焦面位置变异系数 V 来表征各微透镜通道焦面的一致性,

表 2 各微透镜通道的光学参数

Table 2 Optical parameters of each lens

Micro lens	Focal length f/mm	Optical axis angle $\gamma/(\text{°})$	Focal plane p/mm
Central lens	6.23	0	0
1st ring array	5.82	12.1	-0.15
2nd ring array	5.21	22.3	-0.37
3rd ring array	4.90	32.8	-0.13

即最大和最小的焦面位置之差与中心透镜的焦距的比值,其计算公式为

$$V = (p_{\max} - p_{\min}) / f_0 \times 100\%, \quad (5)$$

式中: p 为相对中心通道的焦面位置; f_0 为中心透镜的焦距。采用式(5)计算得到 V 为5.9%。

4.2 透镜阵列的成像质量测试

为验证多焦距曲面微透镜阵列的成像质量,进行

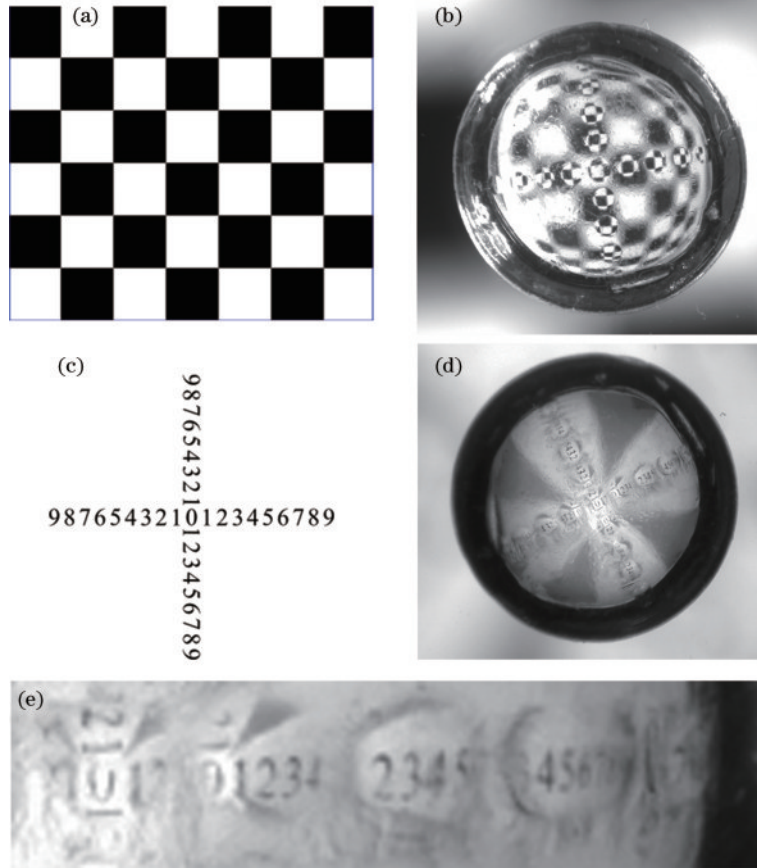


图 8 多焦距测试成像效果图。(a)方格纸成像源;(b)方格纸成像照片;(c)数字成像源;(d)(e)数字成像照片

Fig. 8 Multi focal length test imaging effect picture. (a) Grid paper imaging source; (b) grid paper imaging photo; (c) digital imaging source; (d) (e) digital imaging photo

5 结 论

本文面向日益增长的高集成、多方向的人工复眼应用需求,针对曲面基底和平面 CMOS 传感器的成像(聚焦)冲突,提出一种基于电喷印技术的工艺,制备了多焦距的曲面微透镜阵列,为曲面微透镜阵列的制备

了相应的成像质量测试。在外侧放置方格纸包围微透镜阵列,在自然光源下通过下方的 CCD 相机拍照(图 7),可观察到微透镜阵列的各通道均能捕捉不同方向的目标,并呈现较为清晰的像,如图 8 所示。

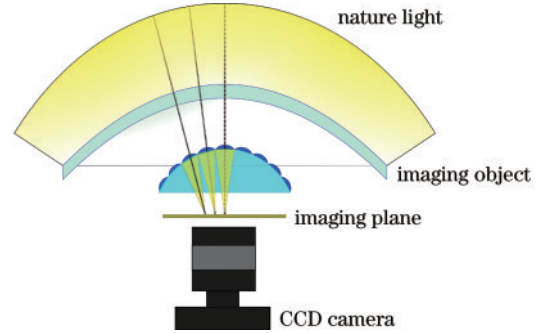
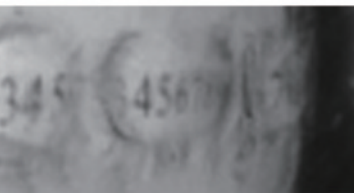
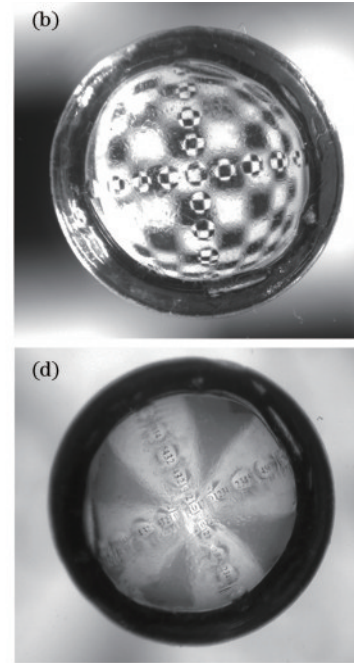


图 7 多焦距测试成像光路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of multi focal length test imaging optical path



提供了一种思路。所制备的多焦距曲面微透镜阵列焦距区间为 4.9~6.23 mm,方向角大于 60°,不同通微透镜道焦面一致性误差达 5.9%。由于缺少配套光阑,成像效果仍有待提高,如果能够在曲面基底的非通道处设计光阑或者改进工艺,将进一步提升透镜的成像效果。

参 考 文 献

- [1] Nishizawa K, Oikawa M. Micro-optics research activities in Japan[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1751: 54-65.
- [2] Suleski T J, Kolste R D T. Fabrication trends for free-space microoptics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(2): 633-646.
- [3] 刘天, 刘志强, 叶茂. 液晶微透镜阵列直接成像[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 1911001.
Liu T, Liu Z Q, Ye M. Direct imaging with liquid crystal microlens array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 1911001.
- [4] Chang S I, Yoon J B, Kim H, et al. Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system[J]. Optics Letters, 2006, 31(20): 3016-3018.
- [5] Moulé A J, Meerholz K. Interference method for the determination of the complex refractive index of thin polymer layers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(6): 061901.
- [6] 李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2100001.
Li J J, Chu C Y, Lu W T, et al. Development of microlens arrays: from fabrication to photonic applications [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2100001.
- [7] Floreano D, Pericet-Camara R, Viollet S, et al. Miniature curved artificial compound eyes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(23): 9267-9272.
- [8] Ma M C, Guo F, Cao Z L, et al. Development of an artificial compound eye system for three-dimensional object detection[J]. Applied Optics, 2014, 53(6): 1166-1172.
- [9] Shi C Y, Wang Y Y, Liu C Y, et al. SCECam: a spherical compound eye camera for fast location and recognition of objects at a large field of view[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32333-32345.
- [10] Marcinkevičius A, Juodkazis S, Watanabe M, et al. Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica[J]. Optics Letters, 2001, 26(5): 277-279.
- [11] 周天丰, 解加庆, 梁志强, 等. 光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望[J]. 中国光学, 2017, 10(5): 603-618, 703.
Zhou T F, Xie J Q, Liang Z Q, et al. Advances and prospects of molding for optical microlens array[J]. Chinese Optics, 2017, 10(5): 603-618, 703.
- [12] Yi A Y, Li L. Design and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo[J]. Optics Letters, 2005, 30(13): 1707-1709.
- [13] Wang L, Luo Y, Liu Z Z, et al. Fabrication of microlens array with controllable high NA and tailored optical characteristics using confined ink-jetting[J]. Applied Surface Science, 2018, 442: 417-422.
- [14] 吴梦楠, 李晓炜, 向志昆, 等. 飞秒激光时空整形电子动态调控加工微光学元件[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002501.
Wu M N, Li X W, Xiang Z K, et al. Machining of micro-optical elements using electrons dynamics controlled temporally/spatially shaped femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002501.
- [15] 杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500005.
Yang X, Sun H L, Yue D M, et al. Research progress of femtosecond laser fabrication of microlens array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500005.
- [16] Wang S X, Feng D, Hu C X, et al. The simple two-step polydimethylsiloxane transferring process for high aspect ratio microstructures[J]. Journal of Semiconductors, 2018, 39(8): 086001.