

# 基于电润湿驱动的反镜式光导航

李世隆<sup>1</sup>, 田彦婷<sup>1</sup>, 刘超<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

<sup>2</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 设计了一种基于电润湿驱动的反镜式光导航器件。该器件由一个透明的长方体腔体、橡胶环和反射镜组成。同时对腔体内两侧导电液体施加电压时, 两侧导电液体向中间涌动, 中间液体高度发生变化, 反射镜发生倾斜, 从而改变入射光束的偏折方向, 实现了光束导航功能。实验表明, 光束导航角度范围可达  $0^\circ \sim 9^\circ$ , 响应时间约为 90 ms, 该器件在空间光通信和雷达探测等领域具有潜在的应用价值。

**关键词** 几何光学; 光导航; 反射镜; 电润湿

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1123003

## Reflective-Mirror-Based Optical Tracking Actuated by Electrowetting Effect

Li Shilong<sup>1</sup>, Tian Yanting<sup>1</sup>, Liu Chao<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** We develop a reflective-mirror-based optical tracking device actuated by the electrowetting effect. It comprises a transparent rectangular cavity, rubber ring, and mirror. When a voltage is applied to the conductive liquid on both sides of the cavity, the conductive liquid on both sides' surges in the middle. Consequently, the height of the intermediate liquid varies and the mirror forms a tilt angle, thereby changing the deflection direction of the incident light beam, and thus realizing optical tracking. Experimental results that the beam navigation angle can reach  $0^\circ \sim 9^\circ$  with a fast response time (approximately 90 ms). The proposed device has potential applications in space optical communication and radar detection.

**Key words** geometrical optics; optical tracking; mirror reflector; electrowetting

**OCIS codes** 230.3120; 240.3990

## 1 引 言

光导航与探测器件在空间光通信、雷达探测和太阳能电池方面具有广泛应用。常见的光导航器件通过直接控制反射镜或反射薄膜来实现光束导航功能<sup>[1-2]</sup>。这类器件利用机械方式时序地调整反射镜, 机械稳定性高, 但是一般需要外部驱动系统, 因此整个器件系统复杂、功耗高、价格昂贵; 而声光调制器<sup>[3-4]</sup>成本高、可靠性低, 因而实际应用受限。

近年来, 学者们提出利用具有自适应功能的棱

镜<sup>[5-11]</sup>与液晶和光栅组合器件<sup>[12-16]</sup>来实现光束导航功能。具有自适应功能的棱镜主要通过改变棱镜的顶角大小实现光束导航, 该器件的优点是响应速度快、导航探测角度大, 但是棱镜结构会带来散射问题, 即光束通过器件后, 光斑会发生扭曲形变, 从而严重影响器件性能; 而对于液晶和光栅组合的器件, 主流的制作方法是将光学底板安装在具有周期性的光栅结构中, 该器件体积小、操作灵活, 且响应速度快, 但液晶结构的边缘场效应会限制其衍射效率和最大探测角度。因此, 导航角度大、

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-07-03; 录用日期: 2019-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(61805169, 61575139, 11604236)

\* E-mail: chaoliu@buaa.edu.cn

光束形变小、响应速度快的光导航探测器件仍有待进一步探索。

对于反射镜式光束导航的研究也出现了一些可行的设计方案。2006年, Kang等<sup>[17]</sup>提出基于电润湿驱动的光学微型反射镜, 其将反射镜放在4个液滴上, 通过电润湿效应, 分别(或同时)改变液滴的接触角使液滴高度发生变化, 从而使反射镜产生不同方向的倾斜角度, 但此器件的反射镜最大倾斜角度仅为 $3.7^\circ$ , 由于液滴的支撑能力有限, 器件的摆放形态单一, 因此使用场景具有一定的局限性; 2016年, Shahzad等<sup>[18]</sup>提出基于电润湿驱动的光束偏转器件, 该器件在70V的电压下可使反射镜产生 $7.5^\circ$ 的倾斜角, 但其直接将反射镜的一端置于液滴上, 稳定性不高。

本文提出一种基于电润湿驱动的反射镜式光导航器件, 其可以实现光束导航功能。实验结果表明, 该器件的光束导航角度范围为 $0^\circ \sim 9^\circ$ , 响应时间约为90ms, 电润湿驱动液滴移动具有功耗低、制作简单等优点, 在太阳能电池等领域具有广泛应用<sup>[19-23]</sup>。

## 2 器件原理和制备

### 2.1 器件的结构和原理

图1所示为反射镜式光束导航器件结构。如图1(a)所示, 该器件由一个透明的长方体腔体、橡胶环、可转动的反射镜及支架组成。腔体的下基板嵌有2片氧化铟锡(ITO)电极, 上基板和两侧基板中间嵌有3片ITO电极。将橡胶环粘在腔体的下基板中心开孔处, 反射镜置于橡胶环下方, 并置于支架上。

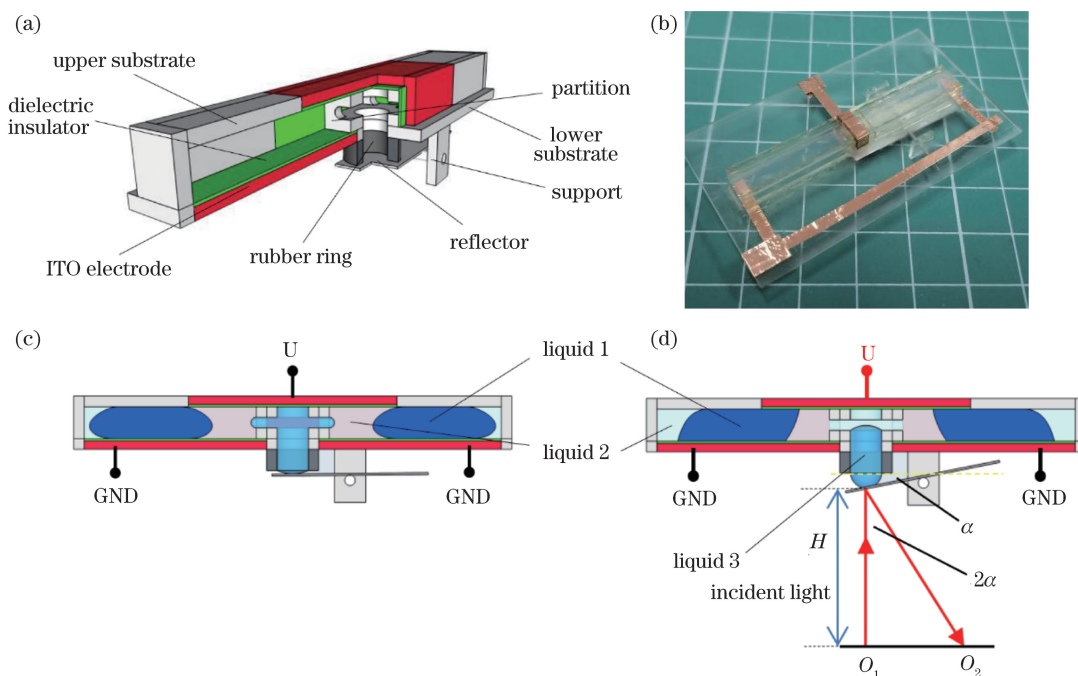


图1 光导航器件原理结构图。(a)器件剖面图; (b)器件实拍图; (c)初始状态; (d)外加电压状态  
Fig. 1 Schematic structure of optical navigation device. (a) Profile of the device; (b) picture of the device; (c) initial state; (d) applying external voltage

腔体内注入液体1和液体2(液体1和液体2分别为导电液体和非导电液体, 且两种液体不相溶), 橡胶环内及上方由液体3填充。介质层分别为疏水层和介电层(Teflon AF-1600和SU-8)。器件的初始状态如图1(c)所示, 当器件中间电极施加电压, 下基板两侧电极接地时, 由于电润湿效应, 液体1与液体2接触面会发生形变, 同时液体1向中间涌动, 挤压液体2和液体3, 液体3向下流动, 使反射镜形成倾斜角, 如图1(d)所示。当光束照射在反射镜上时, 可实现光束导航功能。

### 2.2 器件的理论描述

如图2(a)所示, 给器件腔体中间3块ITO电极施加电压, 当下基板两侧ITO电极接地时, 某一时刻器件内部液体静止并处于平衡状态, 器件内部的液体所受的压力为

$$\Delta P + P_0 - P_y = \rho g (h + \Delta h), \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为表面张力的作用使弯曲液面内外产生的压力差;  $P_0$  为标准大气压强;  $P_y$  为外加电压后驱使导电液体运动的力;  $\rho$  为非导电液体的密度;  $g$  为重力加速度;  $h$  和  $\Delta h$  分别为未加电压初始状态时

非导电液体的高度和外加电压状态时非导电液体变化的高度。根据杨氏-拉普拉斯方程可得

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R}, \quad (2)$$

式中： $\gamma$  为非导电液体的表面张力； $R$  为非导电液体液面曲率半径。

导电液体的接触角发生变化，根据杨氏-李普曼方程，接触角  $\theta$  和外加电压  $U$  的关系可表示为

$$\cos \theta_1 = \cos \theta_0 + \frac{U^2 \epsilon}{2d\gamma_{12}}, \quad (3)$$

$$\gamma_2 + \gamma_{12} \cos \theta_0 = \gamma_1, \quad (4)$$

同时，外加电压会产生使导电液体向中间涌动的力  $F$ ，水平方向上的力  $F_x$  和外加电压之间的关系为

$$F_x = \frac{\epsilon}{2d} U^2, \quad (5)$$

结合流体静力学可知，液体 3 所受竖直方向上的力  $P_y$  在数值上和  $F_x$  相等，则有

$$P_y = \frac{\epsilon}{2d} U^2, \quad (6)$$

式中： $\theta_0$  为没有外加电压时的初始接触角； $\theta_1$  为外加电压时的接触角； $U$  为外加于 ITO 电极上的电压； $d$  为介质层的厚度； $\epsilon$  为介质层的介电常数； $\gamma_{12}$  为导电液体和非导电液体之间的表面张力； $\gamma_1$  为导电液体和介质层之间的表面张力； $\gamma_2$  为非导电液体和介质层之间的表面张力。

液体 3 和反射镜的接触部分如图 2(b) 所示，为了简化计算，根据数学几何知识可知， $R$  和  $\Delta h$  之间的关系为

$$R^2 = (R - \Delta h)^2 + r^2, \quad (7)$$

因为  $\Delta h$  相对于  $R$  和  $r$  极小，故(7)式可简化为

$$R = \frac{r^2}{2\Delta h}. \quad (8)$$

根据(1)、(2)、(6)、(8)式可得

$$\left(\frac{4\gamma}{r^2} - \rho g\right) \Delta h = \frac{\epsilon}{2d} U^2 + \rho g h - P_0. \quad (9)$$

根据(9)式可知，外加电压  $U$  增大时， $\Delta h$  随之增大，且两者之间为二次关系。

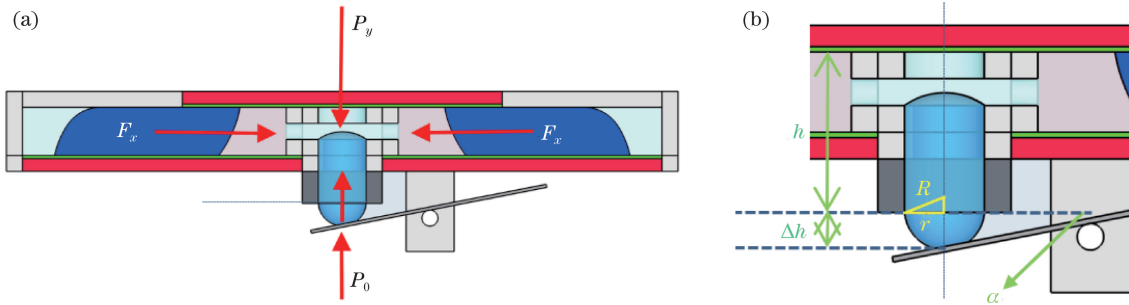


图 2 光导航器件的力平衡分析示意图。(a)外加电压后的平衡状态；(b)液体 3 和反射镜接触部分  
Fig. 2 Analysis of force balance of optical tracking. (a) Equilibrium state when applying external voltage;  
(b) liquid 3 and mirror contact part

### 2.3 器件的制作流程

该器件的具体制作流程如下：将两块 17.7 mm × 5 mm 的 ITO 导电玻璃嵌入中心有开孔的下基板中，下基板的尺寸为 42 mm × 7 mm × 1 mm，中心处有一直径为 3 mm 的圆孔，中间板尺寸为 40 mm × 4 mm × 1 mm，其中间分别嵌有两块 20 mm × 4 mm 的 ITO 导电玻璃，上基板尺寸为 40 mm × 5 mm × 1 mm，其中间嵌入一块 20 mm × 5 mm 的 ITO 导电玻璃；腔体内表面涂覆有 Teflon AF-1600 和 SU-8 的介质层（分别为疏水层和介电层），为了防止液体发生漏液现象，腔体内部和两侧加入挡板，两侧的挡板中心处有直径为 1 mm 的圆孔，方便加入液体；将橡胶环粘于下基板中心开孔处，其内径为 3 mm，厚度为 2 mm，将反射镜置于支架位置；液体 1 和液体 2 分别使用密度为 1.21 g/cm<sup>3</sup> 的氯化钠溶

液和密度为 0.96 g/cm<sup>3</sup> 的二甲基硅油，橡胶环内及隔板内由液体 3 填充，液体 3 为蒸馏水；反射镜为 200 μm 厚的铝质反射镜片，尺寸为 15 mm × 5 mm，并在反射镜与液体接触的一侧涂覆 Teflon AF-1600 作为疏水层。

### 3 实验和讨论

制作完成器件后进行第 1 个实验：将 CCD 相机置于器件前 15 cm 处，腔体中间位置的 3 块 ITO 电极上施加电压  $U$ ，下基板两侧 ITO 电极接地时，腔体内两侧的液体 1 会向中间方向涌动，挤压液体 2 和液体 3，从而使液体 3 向下流动，液体 3 的高度变化如图 3 所示。

实验采用直流电激励器件，电压  $U < 40$  V 时，液体 1 不能被驱动且保持静止状态；电压为  $40$  V ≤

$U \leq 80 \text{ V}$  时,液体 1 在腔体中流动;电压  $U > 80 \text{ V}$  时,腔体内各处压强已经达到平衡状态,液体 1(导电液体)的接触角达到最大值,因此即使继续增加电压,液体 3 的高度也不再会发生变化。

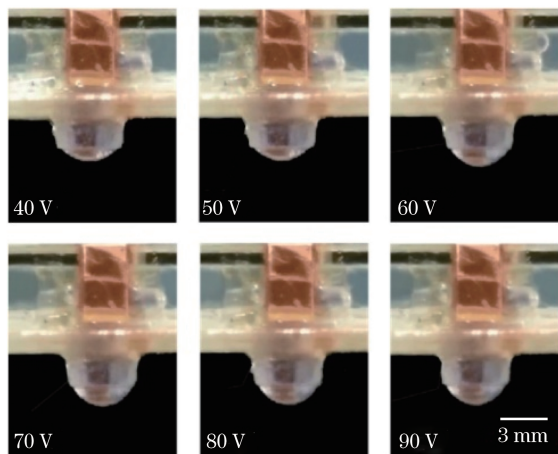


图 3 不同电压下液体 3 的高度变化结果

Fig. 3 Results of height change of the liquid 3 under different voltages

将液体 3 高度定义为液体 3 从初始位置运动到最下端的距离。图 4 所示为在不同电压下液体 3 高度的变化结果,由图 4 可知,液体 3 的高度与外加电压呈二次关系,外加电压达到 80 V 后,液体 3 的高度达到最大值。实验结果表明,通过电润湿效应驱动导电液体,可以使液体 3 的高度发生一定变化。

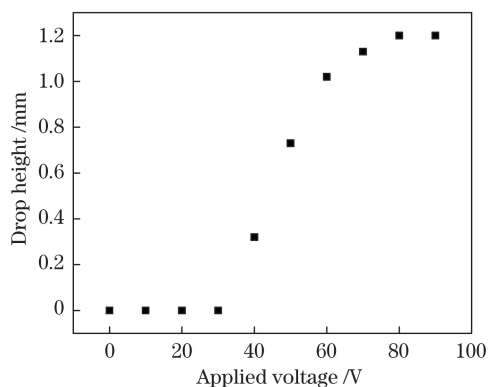


图 4 液体 3 高度随电压变化

Fig. 4 Height of liquid 3 versus voltage

另外,光导航角度是表征光导航性能的重要参数。利用 He-Ne 激光器照射器件来检测器件的实际光学导航性能,实验装置如图 5 所示。He-Ne 激光器光束竖直入射到反射镜表面,反射到荧光屏上,CCD 相机记录入射光束反射情况,He-Ne 激光器光束出射面与荧光屏处于同一水平高度,且两者与光导航器件的反射镜表面的距离为 130 mm,

反射镜的倾斜角度变化和入射光束偏折情况分别如图 6(a)、(b)所示。由图 6(a)、(b)可知,电压  $U < 40 \text{ V}$  时,液体 1 不能被驱动,腔体内的液体保持静止状态,故反射镜的倾斜角度为  $0^\circ$ ,入射光束也未发生偏折;电压为  $40 \text{ V} \leq U \leq 80 \text{ V}$  时,液体 1 可以在腔体中流动,液体 3 高度发生变化;电压  $U = 80 \text{ V}$  时,入射光束偏转角度和反射镜倾斜角度达到最大;电压  $U > 80 \text{ V}$  时,腔体内各处压强已经达到平衡状态,液体 1(导电液体)的接触角达到最大值,再增加电压,液体 3 的高度也不再会发生变化。

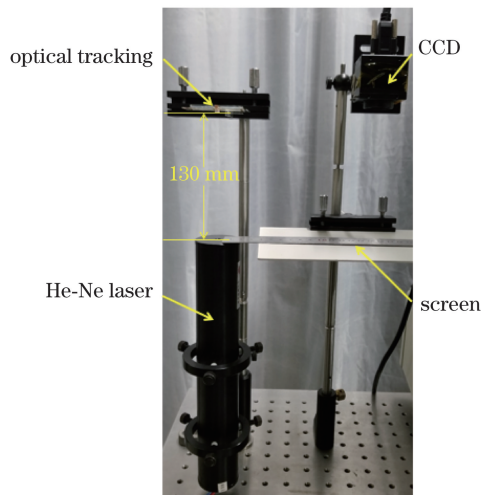


图 5 光导航角度测量实验装置

Fig. 5 Experimental setup of optical tracking angle measurement

当反射镜倾斜角度为  $\alpha$  时,入射光束的偏转角为  $2\alpha$ 。根据几何知识可知,入射光束的偏转角为  $\arctan(2\alpha)$ ,其中  $\tan(2\alpha) = O_1O_2/H$ ,  $O_1O_2$  为光斑从初始位置  $O_1$  到导航角度最大时位置  $O_2$  的距离,  $H$  为入射光束从荧光屏到反射镜的距离。入射光束的偏转角度范围为  $0^\circ \sim 18^\circ$ ,反射镜的倾斜角度范围为  $0^\circ \sim 9^\circ$ 。反射镜的倾斜角度,即光导航角度和外加电压之间的关系如图 6(c)所示;入射光束偏转角度和外加电压的关系如图 6(d)所示。由实验结果可知,外加驱动电压使液体 3 的高度发生变化,作用在反射镜上,使其产生倾斜,器件的反射镜倾斜角度范围为  $0^\circ \sim 9^\circ$ ,响应时间约为 90 ms,当入射光束从下方竖直入射时,可以使光束产生  $0^\circ \sim 18^\circ$  的光束偏转。

所提反射镜式光束导航器件将电润湿驱动原理和液压相结合,有效解决了直接将反射镜置于液滴上带来的器件不可靠性问题。然而,该器件的一些光学性能可以进一步提高。本实验中,注入器件内液体 1 的密度为  $1.21 \text{ g/cm}^3$ ,液体 2 的密

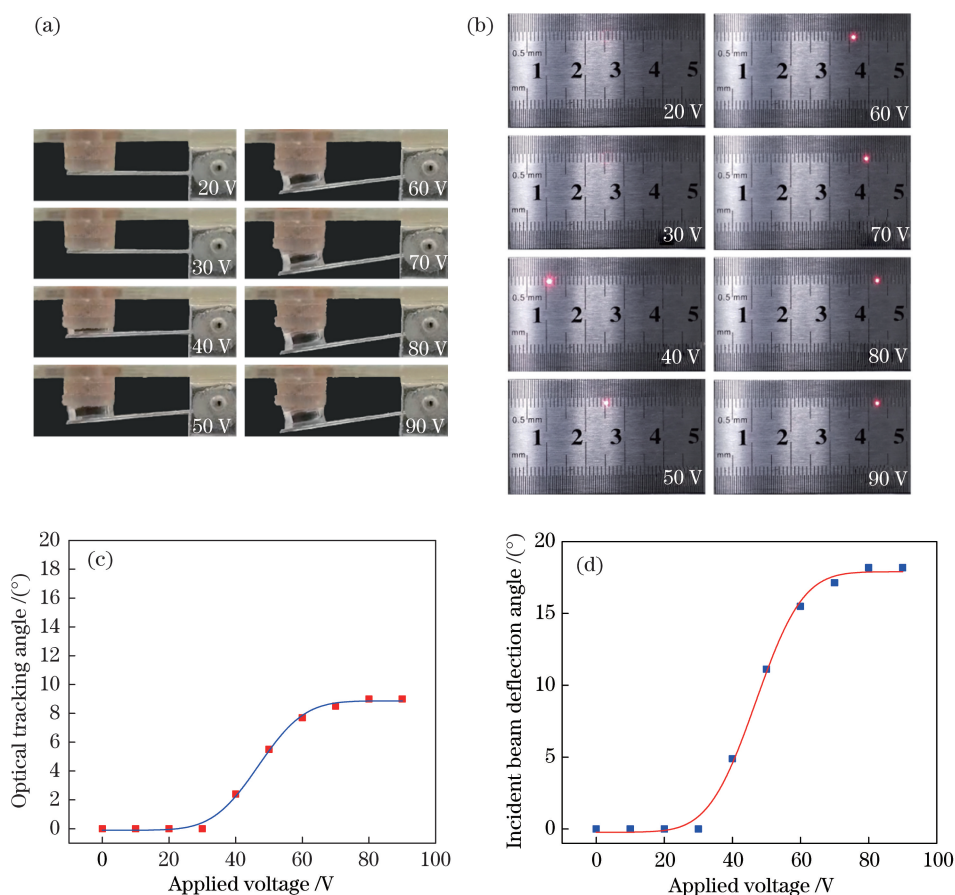


图 6 光导航角度测量实验结果。(a)不同电压下反射镜倾斜角度的变化；(b)不同电压下入射光束偏折结果；(c)光导航角度和外加电压的关系；(d)入射光束偏转角和外加电压的关系

Fig. 6 Experimental results of optical tracking angle measurement. (a) Variation of tilt angle of mirror under different voltages; (b) incident beam deflection under different voltages; (c) relationship between optical tracking angle and applied voltage; (d) relationship between deflection angle of incident beam and applied voltage

度为 $0.96 \text{ g/cm}^3$ ，两种液体的密度不匹配，液体 1 和液体 2 的接触界面凸出明显，如果将器件转动 $90^\circ$ ，器件内液体 1 和液体 2 就会混合，因此，器件的摆放姿态单一，但在器件内注入密度匹配的液体 1 和液体 2 后，即使器件以任意状态摆放，内部液体也不会混合。

## 4 结 论

设计了一种基于电润湿驱动的反射镜式光导航器件。该器件采用电润湿原理驱动器件两侧的导电液体同时向中间涌动，挤压中间非导电液体向下移动，从而使反射镜形成倾斜角，进而实现光束导航功能。实验结果表明，该器件的光导航角度最大可达 $9^\circ$ ，器件响应时间约为 $90 \text{ ms}$ ，将电润湿驱动原理和液压相结合，可有效降低直接将反射镜置于液滴上带来的器件不可靠性，该光导航在空间光通信、雷达探测等领域具有一定的潜在

应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Hornbeck L J.  $128 \times 128$  deformable mirror device[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1983, 30(5): 539-545.
- [2] Hou L, Smith N R, Heikenfeld J. Electrowetting manipulation of any optical film[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(25): 251114.
- [3] Lü T, Duan Y X, Xiang J F, *et al.* Temperature characteristics of 780 nm acousto-optic modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0812001. 吕挺, 段玉雄, 项静峰, 等. 780 nm 声光调制器的温度特性[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0812001.
- [4] Zhang X P, Zhang L B, Liu J, *et al.* Optical system of spatial narrow linewidth laser[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0414003. 张秀萍, 张林波, 刘军, 等. 空间窄线宽激光器光学系统研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0414003.
- [5] Lin Y J, Chen K M, Wu S T. Broadband and

- polarization-independent beam steering using dielectrophoresis-tilted prism [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8651-8656.
- [6] Cheng J T, Chen C L. Adaptive beam tracking and steering via electrowetting-controlled liquid prism[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(19): 191108.
- [7] Smith N R, Abeyasinghe D C, Haus J W, *et al.* Agile wide-angle beam steering with electrowetting micropisms[J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6557-6563.
- [8] Liu C, Li L, Wang Q H. Liquid prism for beam tracking and steering[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(11): 114002.
- [9] Xiong S, Liu A Q, Chin L K, *et al.* An optofluidic prism tuned by two laminar flows[J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11(11): 1864-1869.
- [10] Sun L. Polymeric waveguide prism-based electro-optic beam deflector[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(7): 1217-1222.
- [11] Takei A, Iwase E, Hoshino K, *et al.* Angle-tunable liquid wedge prism driven by electrowetting[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, 16(6): 1537-1542.
- [12] Wang X, Wilson D, Muller R, *et al.* Liquid-crystal blazed-grating beam deflector[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(35): 6545-6555.
- [13] Resler D P, Hobbs D S, Sharp R C, *et al.* High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(9): 689-691.
- [14] Winker B, Mahajan M, Hunwardsen M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications[C] // 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720), March 6-13, 2004, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE, 2004: 1702-1709.
- [15] Apter B, Efron U, Bahat-Treidel E. On the fringing-field effect in liquid-crystal beam-steering devices[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(1): 11-19.
- [16] Löfving B, Hård S. Beam steering with two ferroelectric liquid-crystal spatial light modulators[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(19): 1541-1543.
- [17] Kang H, Kim J. EWOD (electrowetting-on-dielectric) actuated optical micromirror[C] // 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, January 22-26, 2006, Istanbul, Turkey. New York: IEEE, 2006: 742-745.
- [18] Shahzad A, Song J K. Beam deflector and position sensor using electrowetting and mechanical wetting of sandwiched droplets[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(38): 385106.
- [19] Lee J, Kim C J. Surface-tension-driven microactuation based on continuous electrowetting [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(2): 171-180.
- [20] Li L, Liu C, Wang Q H. Optical switch based on tunable aperture[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3306-3308.
- [21] Liu C, Li L, Wang Q H. Bidirectional optical switch based on electrowetting[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(19): 193106.
- [22] Krupenkin T, Yang S, Mach P. Tunable liquid microlens[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(3): 316-318.
- [23] Müller P, Kloss A, Liebetaut P, *et al.* A fully integrated optofluidic attenuator[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(12): 125027.