

光流体可变光圈的研究现状

吕红艳, 崔建国, 刘盛雄, 孙中杰, 蒲山山, 谢亮

重庆理工大学药学与生物工程学院, 重庆 400054

摘要 光流体可变光圈在图像采集、目标追踪、生物识别和其他便携式电子设备中具有重要的应用潜力。与机械光圈相比,该光圈孔径是近乎完美的可调圆形,且光流体可变光圈具有易于加工、结构紧凑、驱动便捷和功耗低等优点,故已成为当今微纳光学研究领域的热点之一。综述国内外现有光流体可变光圈技术的发展现状,通过总结前人的研究方法,展望未来光流体可变光圈的发展方向。

关键词 光学器件; 介质上电润湿效应; 介电力; 电磁驱动

中图分类号 TN942.2; O435.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.090002

Research Status of Optofluidic Variable Aperture

Lü Hongyan, Cui Jianguo, Liu Shengxiong, Sun Zhongjie, Pu Shanshan, Xie Liang

College of Pharmacy and Bioengineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract Optofluidic variable aperture has important application potential in image acquisition, target tracking, biological recognition and other portable electronic devices. Comparing with the mechanical aperture, the aperture is almost perfectly adjustable circle, and it has some advantages such as easy to process, compact structure, convenient driving and low power consumption, etc. So it has become one of the hot spots in the field of micro-nano optical research at present. This paper summarizes the development status of the existing optofluidic variable aperture technology at home and abroad, and looks forward to the future development direction of optofluidic variable aperture by summarizing the previous research methods.

Key words optical devices; electrowetting effect on dielectric; dielectric force; electromagnetic actuation

OCIS codes 230.0250; 220.4880; 240.3990; 250.6715

1 引言

光圈是控制光通量的装置,常用于相机、摄像头等进行光信号的采集。传统机械光圈一般是由多片金属叶片相互交叠组成的可变孔径光栅,孔径常为多边形^[1]。机械光圈在调节时,因为有传动延迟,所以其具有孔径变化调节不精准、响应速度慢等缺点^[2]。为了更好地解决上述问题,众多研究者们将注意力聚焦到一种新型的光通量调节装置——光流体可变光圈(又称液体光圈)上。液体运用于光学的历史由来已久,如光流体可谐调微透镜(又称液体透镜)就是改变液体界面曲率来实现对物像的放大和缩小,其在变焦、全息色差补偿方面的性能优于普通透镜^[3-6]。与机械光圈相比,光流体可变光圈具有调节速度快、功耗低、调节精度高等优点,常用于开发小型化的光流体组件,来代替笨重的外部光学系统。光流体可变光圈常采用液-液界面或液-气界面作为可变孔径代替机械光圈中的叶片光栅,利用外部驱动改变交界面的位置和形状来精确调节光圈孔径大小,控制光通量,且其光圈大多是近乎完美的可调圆形孔径。光流体可变光圈不仅在光线转换和控

收稿日期: 2017-02-15; **收到修改稿日期:** 2017-04-17

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAI01B14)、重庆理工大学实验技术基金项目(SK201403)、重庆理工大学高等教研研究项目(2015YB27)

作者简介: 吕红艳(1993—),女,硕士研究生,主要从事生物医学微系统方面的研究。E-mail: 731933151@qq.com

导师简介: 崔建国(1974—),男,博士,副教授,主要从事生物医学微系统方面的研究。

E-mail: cjjg998@hotmail.com(通信联系人)

制方面有着较好的应用前景,同时在芯片实验室的光学检测等方面也有着重要的应用潜力^[7]。根据驱动原理不同,光流体可变光圈又可细分为电润湿(EW)驱动^[8-21]、介电力驱动^[22-27]、微量电流控驱动^[28-29]、电磁驱动^[30-33]、气体压力驱动^[34]和液体流速驱动^[35]等类型。

2 电润湿驱动光流体可变光圈

电润湿是指通过改变液滴与绝缘基板间的电压,来改变液滴在基板上的接触角(即改变润湿性),使液滴发生形变或位移的现象^[8]。因在液滴与固体电极间加入一薄层的绝缘疏水介质层后,液滴接触角在外加电压下可得到更大程度的改变,这种加入绝缘介质的效应又称为介质上电润湿效应^[9-13]。电润湿效应可以精确控制液体界面形状。基于电润湿驱动的光流体可变光圈的研究开展时间较早,通常由光圈外壳、导电基底、绝缘涂层和填充液体构成。填充液体一般由两种互不相溶的溶液组成,多采用密度相近的不透明绝缘油和透明导电盐溶液^[14-16]。绝缘涂层一般由疏水层和介电层组成,用于增大初始接触角和防止电击穿^[17]。

Yu等^[18]开展了基于电润湿驱动的光流体可变光圈研究,其结构如图1所示。光圈由两片氧化铟锡(ITO)玻璃组成上下基底,由聚二甲基硅氧烷(PDMS)制成圆柱状外壳。在顶部ITO玻璃上旋涂 $2\ \mu\text{m}$ 厚PDMS薄层作为绝缘层,并对其中心区域(直径约 $4\ \text{mm}$)做亲水处理。在亲水区域滴入透明导电盐溶液后,其余空间用不透明油填充。这样可以保证在后续实验和运用中,亲水区域的液滴处于基底中心区域,不会因ITO玻璃晃动而移位。在实验测试中,随着所施加电压的增大,介质上电润湿效应产生的静电力由小于到接近再到大于盐溶液的内聚力,透明导电盐溶液与顶部ITO玻璃接触区域变大,液滴形状由半球状逐渐变为球台状,光流体可变光圈孔径逐渐增大。电压从 $50\ \text{V}$ 增大到 $200\ \text{V}$,孔径可从 $1.5\ \text{mm}$ 增大到 $3.5\ \text{mm}$,两者成线性关系,移除电压后,盐溶液会很快恢复原状。由于该实验中所用的不透明油是锭子油和炭粉按质量比 $20:1$ 配比而成,电压过高时,炭粉会发生电化学反应,故当电压增大到 $200\ \text{V}$ 及以上时,光圈孔径边缘(盐溶液和不透明油交界处)变得模糊,导致光线扭曲,影响成像质量。当电压增大至 $400\ \text{V}$ 时,PDMS绝缘层被击穿,ITO电极短路。在这种高压条件下,盐溶液会电解产生气泡,不再具有电润湿效应。故此,建议此光圈在驱动电压不高于 $200\ \text{V}$ 的情况下使用。除了驱动电压和光圈孔径这两个参数外,光流体可变光圈还有另外两个重要参数指标——响应时间和功耗,其中响应时间包括动作时间和弛豫(恢复)时间。动作时间主要由介质上电润湿效应生成的静电力决定,弛豫时间主要由驱动电压和材料属性决定。因为电荷容易聚集在电极处,一般情况下弛豫时间会略长于动作时间。研究者用数字示波器检测到:当施加 $200\ \text{V}$ 电压时,光圈孔径由原始状态增大至最大处的动作时间为 $10\ \text{ms}$;移除电压,孔径恢复至初始状态的弛豫时间为 $15\ \text{ms}$ 。该电润湿光流体可变光圈的耗能很低,仅几微瓦,并具有制造成本低、响应时间短、耗能低和可逆性好等优点。

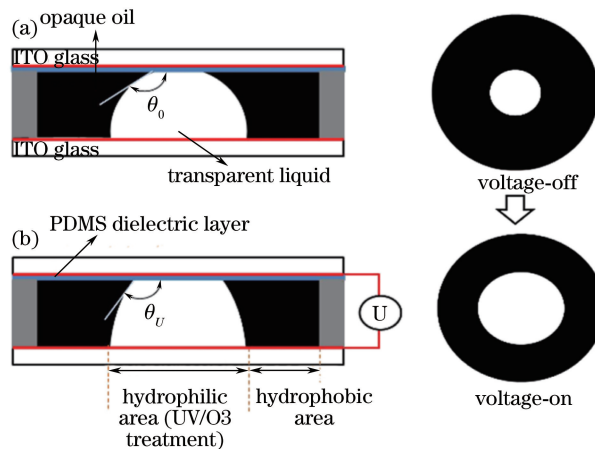


图1 亲水区域处理的电润湿光流体可变光圈^[18]。(a)未施加电压;(b)施加电压
Fig. 1 Electrowetting optofluidic variable aperture with hydrophilic region treatment^[18].

(a) Voltage-off; (b) voltage-on

Li 等^[19]也对电润湿驱动光流体可变光圈开展了一系列研究。如图 2 所示,在光圈基底 ITO 玻璃上旋涂一层 3 μm 厚的特氟龙和 SU8 薄层做疏水层和绝缘层,其侧壁为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料制成的内径约 6 mm 的圆环形外壳。在基底上滴入的染色液滴,因表面张力被吸附在侧壁上呈环状,其中心空余位置用透明硅油填充。初始状态下,该光流体可变光圈孔径为 5.0 mm。当施加电压达到 45 V 时,导电环状液滴开始向光圈中心移动,即光圈孔径开始减小。当电压升至 92 V 时,孔径达到最小值 2.8 mm,再增大电压,孔径反而略有增大。实验测得 92 V 时的动作时间和弛豫时间分别为 97 ms 和 56 ms。

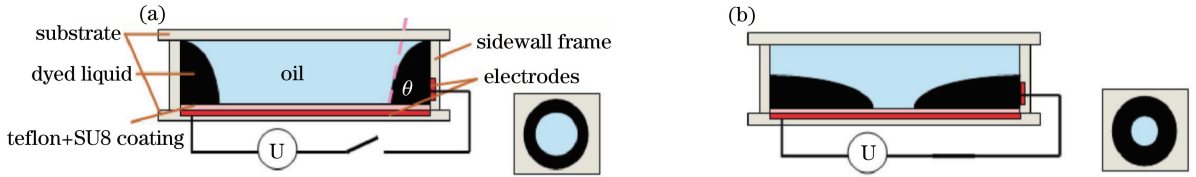


图 2 双重涂层处理的电润湿光流体可变光圈^[19]。(a)未施加电压;(b)施加电压

Fig. 2 Electrowetting optofluidic variable aperture with dual coating treatment^[19]. (a) Voltage-off; (b) voltage-on

因上述两种光流体可变光圈的光圈孔径均不能完全闭合,光线调节率不能达到 100%,所以 Li 等^[20]对光圈结构进行了改进,其结构如图 3 所示。他们将光圈的封装结构改为六棱柱状,侧壁由六块条形 ITO 玻璃组成,其内壁先旋涂一层 1 μm 厚的 C 型聚对二甲苯,然后再旋涂一层薄的特氟龙层(AF1600),光圈顶部的玻璃同样用特氟龙进行处理,并采用 ITO 玻璃作为基底。透明盐溶液填满基底 ITO 玻璃,并与顶部盖板玻璃有部分接触,盐溶液周围空间用不透明硅油(苏丹黑染色)填充,整个装置用 UV311 胶粘合密封。初始状态,盐溶液与顶部玻璃接触的孔径最大尺寸为 6.4 mm。当施加电压增大至 35 V 时,静电力使盐溶液发生纵向变形,与顶部玻璃接触面积逐渐缩小,光圈孔径开始减小。当电压增至 60 V,透明盐溶液与顶部玻璃脱离接触,孔径被不透明油覆盖,完全闭合,光线调节率达到 100%。该光圈的响应时间和弛豫时间分别为 25 ms 和 97 ms,最大电流为 54 μA ,最大功耗为 3.24 μW 。该光流体可变光圈不仅调节范围广,而且响应时间合理,透光率高。

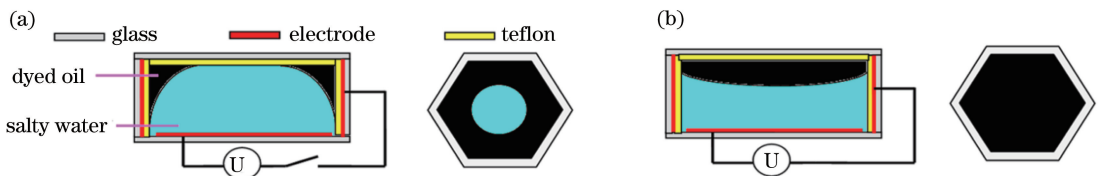
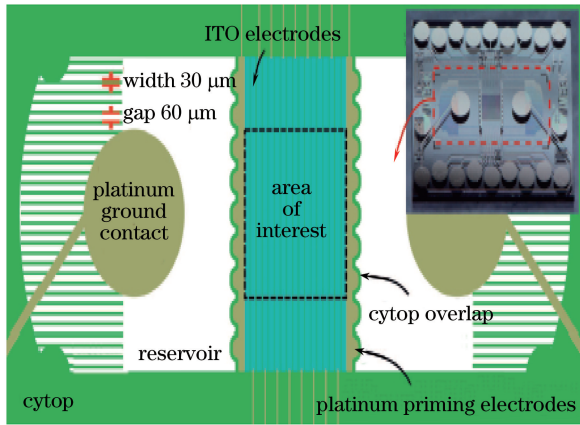
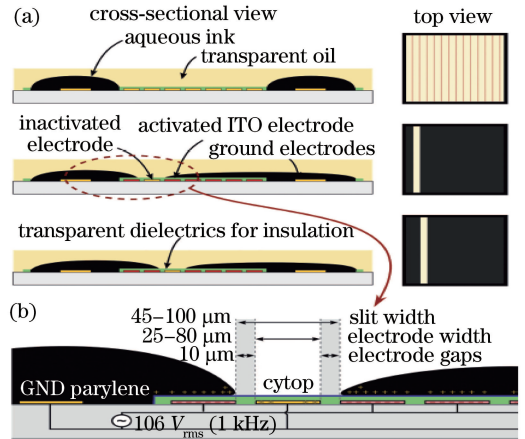


图 3 六棱柱光圈结构和实验结果^[20]。(a)未施加电压;(b)施加电压

Fig. 3 Six prism aperture structure and experimental results^[20]. (a) Voltage-off; (b) voltage-on

Schuhladden 等^[21]利用电润湿效应在达到调节光圈孔径功能的同时,还能移动光圈孔径的位置,其光圈结构如图 4 所示。光圈孔径左右两侧各有一个盛放遮光液体的腔室,腔室与条形铂电极接触,其电极宽度 30 μm ,间隙 60 μm 。腔室中心玻璃处加工有宽 25~80 μm ,间隙 10 μm ,厚 100 nm 的条纹状铂电极,其对应的 ITO 玻璃背面镀有 50 nm 厚的铬,该条纹电极与两侧腔室内的引发电极方向互相垂直,且中心电极区域旋涂 1 μm 全氟树脂做疏水层。施加电压后,两侧腔室液体可独立向中心区域移动,形成狭缝,此狭缝可视为光圈,该光圈最小值取决于中心条纹电极的宽度和间隙。经实验检测,左侧腔室液体向中心区域移动的时间(关闭时间)约为 350 ms,液体退回腔室的时间(打开时间)约为 370 ms;右侧腔室关闭时间约为 325 ms,打开时间约为 350 ms。两腔室液体移动的时间差异是由腔室内储存液体容量不同而造成的,液体量稍多可减少关闭时间,但会阻碍液体退回动作,延长打开时间。一旦通过“关闭”液体获得狭缝孔,就可以通过改变中心电极区域所施加电压的序列来调整狭缝位置,狭缝孔可以 100 μm 的步幅跨越扫描中心区域,切换时间约 120 ms,如图 5 所示。

该光流体可调节狭缝孔径代表了一种独特而高精度、可变宽度、可重新定位的光圈。狭缝最小宽度可由 ITO 条纹电极微结构来调节。该光圈提供了更高灵活性的光流体装置,因狭缝能横向平移,也可用于诸如要选择特定光谱特征的光谱仪。

图 4 光圈结构图^[21]Fig. 4 Aperture structure^[21]图 5 光圈实验结果^[21]。

(a) 光圈大小和位置变化; (b) 中心区域电极放大图

Fig. 5 Aperture experimental results^[21].

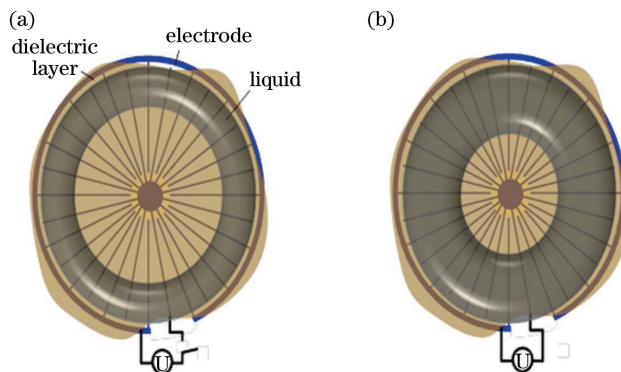
(a) Aperture size and position change;

(b) electrode magnification chart of center area

3 介电力驱动光流体可变光圈

介电力是指中性物质在不均匀电场中因极化引起平移运动的力,也称为开尔文极化力^[22]。介电力用来调节光流体可变光圈的孔径变化,其大小会影响驱动效果,介电力与物质本身的大小、自身及周围介质的电学性质、外加驱动电场的场强以及变化频率等因素有关^[23-25]。

介电力驱动需要一个非均匀电场环境,故需对电极做特殊处理。在 Xu 等^[26]的研究中,用光刻技术将 ITO 电极刻蚀为两组同心圆形状的放射状条纹,其中内圈区域圆心直径为 1 mm,如图 6 所示。均匀分布的放射状条纹共 116 条,其中 58 条连接构成外圆环,58 条连接构成内圆环,条纹宽约 20 μm ,两个相邻条纹最近间隔为 20 μm ,最远间隔为 160 μm 。ITO 电极上旋涂特氟龙薄层(400S1-100-1, DuPont)作为介电层,然后将一个圆环形垫片(壁厚 1.2 mm)固定在电极外侧,垫片与 ITO 电极拥有共同圆心,形成一个盛放光圈液体的腔室,垫片内壁涂有聚酰亚胺薄层。将微量不透明导电液滴(体积约 25.5 mm^3)滴在电极上,因特氟龙涂层有疏水性,液滴被外围垫片内壁吸引,形成均匀分布的圆环状。初始状态时,液滴的表面积和体积比(S_A/V)最小,形状稳定。为了增强光圈的机械稳定性,采用不相溶的硅油填充其余空间,同时整体装置用环氧树脂密封。

图 6 介电力驱动光流体可变光圈结构^[26]。(a) 未施加电压; (b) 施加电压Fig. 6 Structure of the dielectric force-driven optofluidic variable aperture^[26]. (a) Voltage-off; (b) voltage-on

在外界电压驱动下,非等间距 ITO 条纹间形成边缘场,产生介电力。介电力克服不透明液滴与基底间的粘附力,使液滴分子向电场高的方向移动,其宏观表现为液体从边缘向中心移动,故光圈孔径变小。移除

驱动电压后,液滴恢复原状。驱动电压与光圈孔径变化关系如图 7 所示。当电压为 0~20 V 时,液滴呈圆环形,孔径清晰,圆环液滴宽 1.16 mm,光圈孔径为 4.7 mm。随着驱动电压的升高,光圈孔径逐渐减小,当驱动电压上升到 70 V 时,孔径减小至最小孔径 1.2 mm。因为电极内圈中心区域没有边缘场,即使进一步增加驱动电压,液滴也不会再向中心扩展,其孔径调谐比 $[(A_v/A_0) \times 100\%]$,其中 A_v 为施加电压 V 时的孔径面积, A_0 为电压为 0 时的孔径面积]可达到 94%。如欲进一步减小光圈孔径,可行的方法是减小 ITO 电极内圈区域结合点的直径。

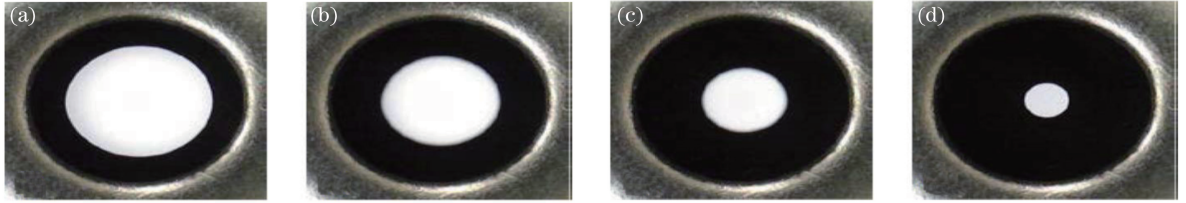


图 7 电压与光圈孔径的变化关系^[26]。(a) $V=0$ V; (b) $V=35$ V; (c) $V=45$ V; (d) $V=70$ V

Fig. 7 Relationship between voltage and aperture size^[26]. (a) $V=0$ V; (b) $V=35$ V; (c) $V=45$ V; (d) $V=70$ V

在 Tsai 等^[27]的实验中,电极被设计为同心圆环状,并在电极上旋涂 SU8 和特氟龙作为介电层和疏水层,如图 8 所示。该光圈的外壳由圆形的 PMMA 壳体环和电极基板胶合粘接在一起构成。在 PMMA 壳体环与顶部覆盖玻璃的接触处制作亲水的约束环结构,用于维持染色液滴(水油墨+异丙醇)的环状初始形状。通过胶合方式将覆盖玻璃与 PMMA 壳体环粘接在一起,使光圈完全密封以避免液体蒸发。该光流体可变光圈的成品形状为四边长 9 mm,厚 3.1 mm 的立方体。光流体可变光圈中的约束环与同心圆环电极采用同轴心设计,用于维持光圈中心轴的稳定。施加驱动电压时,液-油表面极化电荷产生介电力,介电力方向指向光圈中心的低介电常数液体,所以当介电力克服表面张力时,推动具有高介电常数的染色液体向光圈中心移动,光圈孔径减小。在 160 V 的驱动电压作用下,光圈孔径可从初始状态 4 mm 变化至 1.5 mm,孔径调谐比为 62%,其动作时间为 1 s,弛豫时间为 750 ms,功耗为 5.7 mW。

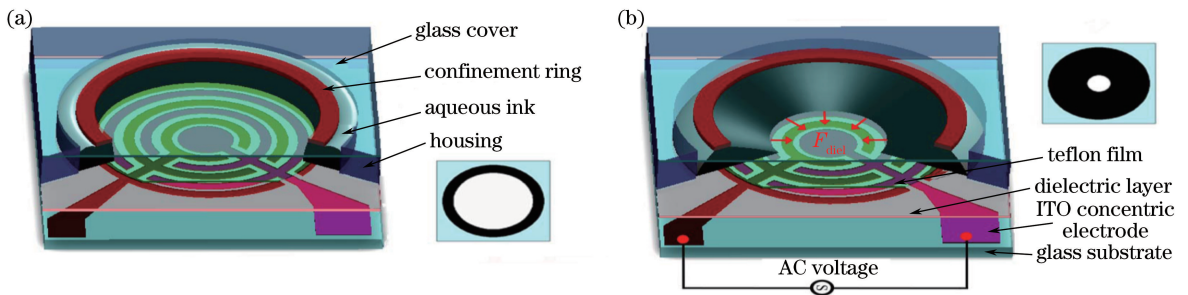


图 8 具有圆环电极的介电力驱动光流体可变光圈^[27]

Fig. 8 Dielectric force-driven optofluidic variable aperture with ring electrode^[27]

介电力驱动光流体可变光圈可以运用于图像和非图像系统中,然而与几乎没有光学损失的机械光圈相比,较低的透射率是介电力驱动光流体可变光圈的主要缺点,而且不易找到在光圈内介电常数差别较大的两种不混合液体。

4 微量电流控光流体可变光圈

微量电流控光流体可变光圈主要是运用毛细作用和电润湿作用驱动液滴流入或流出微通道表面,以此来改变光圈孔径大小。

Chang 等^[28]对微量电流控光流体可变光圈开展了研究,该光圈被设计为三层两腔结构,如图 9 所示。3 个透明板隔出两个腔室,同时也构成了毛细管表面通道。为了便于腔室间的染色液体和空气(或油)流动,在中间透明板的中央和边缘开有通孔和沟槽。底板上加工有同心圆结构的控制电极和参考电极,其中控制电极用于数字化控制第一层通道中间光圈孔径的大小,参考电极用于加强电润湿效应。在光圈的内部结构中

第二层通道略高于第一层通道的高度,这个高度差会使第一层通道内流体表面的毛细作用力增大,驱动效果更加显著。另外,底层透明板的表面上涂有起疏水作用的特氟龙涂层。

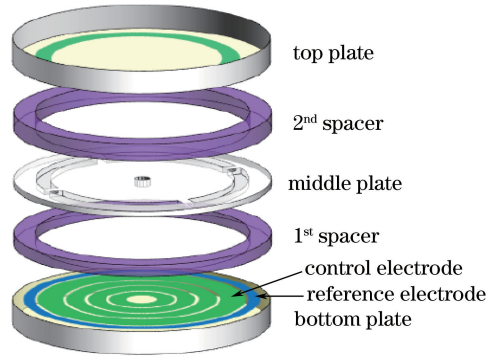


图 9 三层两腔结构的微量电流控光圈^[28]

Fig. 9 Micro-current controlled aperture with three-tier two-cavity structure^[28]

微量电流控的基本驱动力是由毛细作用力和电润湿效应引起的静电力共同产生的。初始状态下,两个通道间的液体在疏水层毛细力的作用下处于平衡状态,不透明染色液滴位于中间板的边缘孔隙处。施加电压时,第一通道里的液体在电润湿效应所产生的静电力作用下,打破平衡状态,两个通道内的压力发生改变,其压力差可以用 Young-Lippmann 方程计算。随着外界施加电压的增大,当电润湿效应产生的静电力大于隔板间毛细通道的毛细作用力时,压力差为正,正压差使第一层通道内的三相接触线(液体、透明板、空气或油接触处)向中心移动,光圈孔径减小。移除控制电极和参考电极电压,压力差为负,使第一层通道的三相接触线后退,孔径增大恢复至初始位置,这便实现了光圈孔径的可控变化,其动作时间为 36 ms,三相接触线移动速度为 48 mm/s,其作用过程如图 10 所示。在其实验装置中,第一层通道高度为 100 μm ,第二层通道高度为 250 μm ,其光圈孔径可从 4.0 mm 减小到 0.6 mm。若在中间板上也制作控制电极,且朝向底板方向,施加电压时会产生双重电润湿效应,其产生的驱动力能使孔径变化速度大大加快,并且正压力差明显增大^[29]。在双电润湿效应的作用下,光圈孔径动作时间仅为 3.8 ms,三相接触线的移动速度可达 450 mm/s。

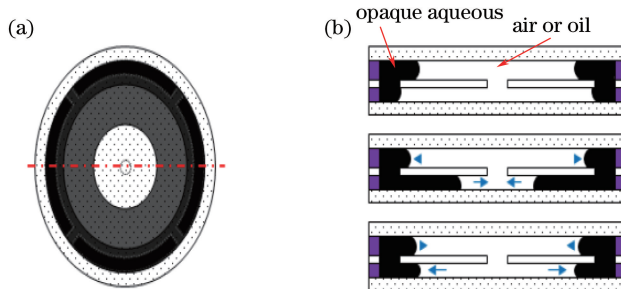


图 10 微量电流控光圈孔径变化原理^[28]。(a)俯视图;(b)截面图

Fig. 10 Change principle of micro-current controlled aperture^[28]. (a) Top view; (b) sectional view

需要注意的是,该光流体可变光圈的孔径不能完全闭合,当孔径减小至 0.5 mm 时,移除电压,毛细作用力不足以使第二层通道里的液体反转恢复原始形状。降低第一层通道的高度可以增大压差,加快光圈动作反应速度,但通道变薄,会导致吸光光路变窄,降低总衰减率。基于双电润湿效应的微量电流控光流体可变光圈的响应时间是目前已有研究中最短的。

5 电磁驱动光流体可变光圈

电磁驱动是通过电磁作用控制磁流体的流动来改变光圈孔径大小的。Seo 等^[31]设计的电磁驱动光流体可变光圈结构与微量电流体的结构相似,都是三层两腔。其区别之处在于两点,其一通路中的液体为磁流体,其二底板上没有控制电极和参考电极,其驱动力是由永磁体或通电线圈产生的磁场来提供的,其结构如

图 11 所示。初始状态时,磁流体位于圆柱腔内第一层通道的疏水涂层一侧,此时光圈孔径最大,光圈孔径为 1.72 mm。当缠绕在圆柱腔外部的线圈有电流流过时,根据法拉第定律,线圈周围产生磁场,驱动磁流体向光圈中心移动,光圈孔径缩小。当电流为 2.6 A 时,光圈孔径可从初始的 1.72 mm 变为最小值 1.09 mm,其动作时间为 250 ms,弛豫时间为 450 ms。该光圈的動作时间和弛豫时间不仅与驱动电流大小有关,而且还与光圈孔径大小和磁流体的初始位置有关。电磁驱动的光流体可变光圈具有装置简洁、尺寸小等优点,而且可以与微电子机械系统结合,这将大大拓宽其使用范围^[32-33]。

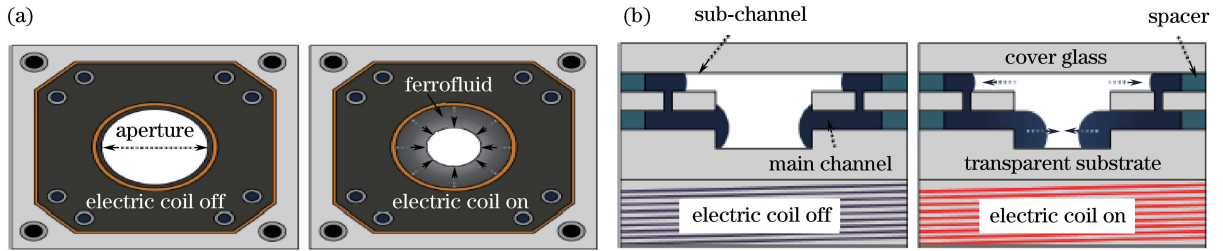


图 11 电磁驱动光流体可变光圈^[31]。(a)俯视图;(b)截面图

Fig. 11 Electromagnetic driven optofluidic variable aperture^[31]. (a) Top view; (b) sectional view

6 气体压力驱动光流体可变光圈

气体压力驱动光流体可变光圈是利用空气压力使薄膜变形与刚性板接触,接触区域即为光圈。Yu 等^[34]就气体压力驱动光流体可变光圈开展了研究,在 4 in(1 in=2.54 cm)的硅晶片上利用 SU-8 光刻胶制作出气压室和微通道,然后利用 PDMS 灌胶和氧等离子体改性键合,制作出气体压力驱动光流体可变光圈。用可编程流体注射系统以恒定的速度(小于 $1 \mu\text{m}/\text{min}$)将空气泵入气压室,空气首先用于填充腔室,之后,随着越来越多的空气注入,空气压力将迫使弹性膜膨胀成球状。随着弹性膜向上形变增加,吸光溶液被不断挤压,直至膜上方触及顶部的刚性 PDMS 层,弹性膜的球状接触区可视为光圈。通过充气、放气可连续动态控制接触面积大小,即控制光圈孔径的大小。实验结果显示,泵入气体为 $350 \mu\text{L}$ 时,弹性膜开始接触 PDMS 刚性层。该光圈可实现 $0 \sim 6.35 \text{ mm}$ 的动态范围变化,其光圈变化过程如图 12 所示。

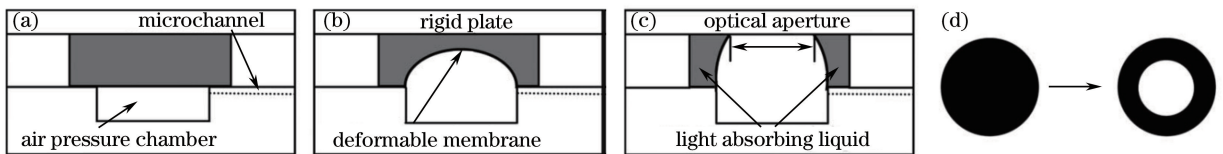


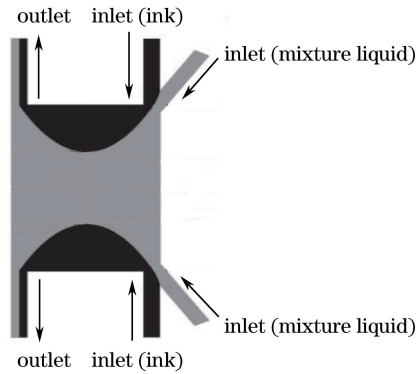
图 12 气体压力驱动光流体可变光圈的变化过程^[34]。(a)初始状态;(b)弹性膜发生形变;
(c)光学传输状态;(d)相应状态俯视图

Fig. 12 Change process of gas pressure driven optofluidic variable aperture^[34]. (a) Initial state;
(b) elastic film deformation; (c) optical transmission state; (d) top view of corresponding state

气体压力驱动光流体可变光圈成本低,易于小型化,可批量生产,具有突出的可调性、可重构性和适应性。但是需要额外的压力源,其 PDMS 弹性膜相对较薄且具有较大的柔韧性,而传统控制方式很难进行变形量的精确控制。同时,各组件的氧等离子体改性键合强度也是该实验的关键,否则将出现漏气漏液现象。

7 液体流速驱动光流体可变光圈

液体流速驱动光流体可变光圈是利用两种液体的流速差来控制光圈孔径大小的。该光圈呈液体包裹层加液心的三明治夹心结构,如图 13 所示^[35]。其中心部位液体是光学透明的,为甘油和水(质量比 6:4)的混合物(粘度 $\mu = 9 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$),其折射率为 $n = 1.412$,与 PDMS 匹配。顶层和底层的黑色染色流体(透光率可忽略,粘度 $\mu = 2 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$)作为包覆层,可以阻止光线通过,其中光线是从水平方向通过光圈的。

图 13 液体流速光流体可变光圈结构^[35]Fig. 13 Liquid flow rate optofluidic variable aperture structure^[35]

在 Song 等^[35]的实验中,中心部位流体的流速固定在 $200 \mu\text{L}/\text{h}$ 。外围包裹流体的流速从 $200 \mu\text{L}/\text{h}$ 到 $2600 \mu\text{L}/\text{h}$ 间变化。由于雷诺数低,矩形腔室内的液体是层流的。所以,一旦流量条件设定,光圈孔径就被固定。根据流体力学传播理论,在低流速比(流速比为包裹层流速除以中心流速)时,包裹层流体的宽度比中心部位流体层宽度窄。因此,可以实现大的光圈孔径。当流量比增加时,包裹层流体挤压中心部位流体,中心部位流体层变狭窄,即光圈孔径减小。实验结果显示,光圈孔径可从 $700 \mu\text{m}$ 变化到 $309 \mu\text{m}$ 。该光圈作为光流体组件,可以容易地集成到微流体系统中,但需要额外的泵作为压力源进行液体流速控制,且精确控制光圈孔径变形量难度较大,同时控制响应时间较长。

除上述类型的光流体可变光圈外,还有液晶偏向力驱动光流体可变光圈^[36-38]。液晶光圈利用偏振旋转效应诱导液晶分子重新排位,能达到光圈孔径完全关闭的效果,但此光圈在克服衍射和偏振膜设置等方面还需开展进一步研究。

8 结 论

光流体可变光圈具有调节范围大,耗能小,结构简单,响应时间合理等优点,将其运用于手机、汽车、自动化机器人和微型间谍飞机的摄像装置上,可使拍照摄像更加智能化。除了在成像方面的运用,光流体可变光圈在光束控制、可变光衰减器、单像素显示和生物芯片等方向均有重要的应用前景,其优越的性能是传统光学系统所无法企及的。

在未来光流体可变光圈的研究中,除了寻找新的驱动方式外,还应在现有驱动方式中开展深入研究,进一步降低功耗,简化结构。目前,将实验室的光流体可变光圈原型样机转化为商业化产品,尚有几个技术挑战需要解决,如填充液体的选择(介电常数、折射指数、溶解度、透射率、密度和表面张力等)、驱动电压有效范围、光圈稳定性等。虽然目前的研究还有一些不足之处,但相信通过国内外研究者的共同努力,一定能将光流体可变光圈技术尽早应用于实际工业生产和生活中。

参 考 文 献

- [1] Tognetto D, Agolini G, Grandi G, *et al.* Iris alteration using mechanical iris retractors[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2001, 27(10): 1703-1705.
- [2] Wang Z Y, Ding H, Lu G J, *et al.* Use of a mechanical iris-based fiber optic probe for spatially offset Raman spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3790-3793.
- [3] Cui Jianguo, Wang Runshi, Yuan Wei, *et al.* Liquid lens research status and prospects[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2016, 30(11): 105-110.
崔建国, 王润诗, 袁 伟, 等. 液体透镜研究现状与展望[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 30(11): 105-110.
- [4] Wang Di, Li Fangzhan, Wang Qionghua, *et al.* A method of holographic chromatic aberration compensation based on a liquid lens[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0509001.

- 王 迪, 李芳转, 王琼华, 等. 一种基于液体透镜的全息色差补偿方法[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0509001.
- [5] Pan Wenqiang, Li Xiangning, Lu Shan, *et al.* Gauss theoretical analysis of liquid crystal lens zoom system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1222003.
潘文强, 李湘宁, 卢 山, 等. 液体透镜变焦系统高斯理论分析[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1222003.
- [6] Calixto S, Sánchez-Morales M E, Sánchez-Marin F J, *et al.* Optofluidic variable focus lenses[J]. Applied Optics, 2009, 48(12): 2308-2314.
- [7] Wang D, Liu C, Li L, *et al.* Adjustable liquid aperture to eliminate undesirable light in holographic projection[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 2098-2105.
- [8] Sun Zhiwen, Xie Erqing, Han Weihua, *et al.* Progress of electrowetting[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2008, 23(3): 387-392.
孙志文, 谢二庆, 韩卫华, 等. 电润湿的研究进展[J]. 液晶与显示, 2008, 23(3): 387-392.
- [9] Tang Biao, Zhao Qing, Zhou Min, *et al.* Research progress in electrowetting dynamics and its instability[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2016, 48(1): 35-41.
唐 彪, 赵 青, 周 敏, 等. 电润湿动力学描述及其非稳态研究进展[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2016, 48(1): 35-41.
- [10] Ling Mingxiang. Research on manipulation and control of droplets based on electrowetting on dielectric[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
凌明祥. 基于介电润湿效应的微液滴操控研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [11] Zhu Xixia. The research on the phenomenon of the EWOD[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(8): 173-175.
朱喜霞. 基于电介质上的电润湿现象研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(8): 173-175.
- [12] Zhao Hui. Design and application of dielectrophoresis and dielectric wetting technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
赵 辉. 介电泳和介电润湿技术装置的设计与应用[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [13] Zhao Rui, Tian Zhiqiang, Liu Qichao, *et al.* Optical prism of dielectric wetting liquid[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1223003.
赵 瑞, 田志强, 刘启超, 等. 介电润湿液体光学棱镜[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1223003.
- [14] Muller P, Feuerstein R, Zappe H. Integrated optofluidic iris[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(5): 1156-1164.
- [15] Müller P, Feuerstein R, Zappe H. A fully integrated optofluidic micro-iris[C]. Micro Electro Mechanical Systems, 2012: 7-10.
- [16] Li L, Liu C, Ren H W, *et al.* Adaptive liquid iris based on electrowetting[J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2336-2338.
- [17] Li Xiange, Bai Pengfei, Shui Lingling, *et al.* The reliability of electrofluidic display devices based on Teflon AF1600 [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 47(2): 17-20.
李显歌, 白鹏飞, 水玲玲, 等. Teflon AF1600 作为电润湿显示器件疏水绝缘层的可靠性研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2015, 47(2): 17-20.
- [18] Yu C C, J Ho J R, John Cheng J W. Tunable liquid iris actuated using electrowetting effect[J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 057106.
- [19] Li L, Liu C, Wang Q H. Electrowetting-based liquid iris[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 989-991.
- [20] Li L, Wang Q H, Liu C, *et al.* Adaptive liquid iris for optical switch[J]. Optical Engineering, 2014, 53(4): 047105.
- [21] Schuhladen S, Banerjee K, Stürmer M, *et al.* Variable optofluidic slit aperture[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(1): e16005.
- [22] Xu S, Ren H W, Wu S T. Dielectrophoretically tunable optofluidic devices[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(48): 483001.
- [23] Yang C C, Yang L, Tsai C G, *et al.* Fully developed contact angle change of a droplet in liquid actuated by dielectric force[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(18): 182903.
- [24] Ren H W, Xu S, Ren D Q, *et al.* Novel optical switch with a reconfigurable dielectric liquid droplet[J]. Optics

- Express, 2011, 19(3): 1985-1990.
- [25] Luo Z Y, Xu S, Gao Y T, *et al.* Quantum dots enhanced liquid displays[J]. Journal Display Technology, 2014, 10(12): 987-990.
- [26] Xu M, Ren H W, Lin Y H. Electrically actuated liquid iris[J]. Optics Letters, 2015, 40(5): 831-834.
- [27] Tsai C G, Yeh J A. Circular dielectric liquid iris[J]. Optics Letters, 2010, 35(14): 2484-2486.
- [28] Chang J H, Jung K D, Lee E, *et al.* Variable aperture controlled by microelectrofluidic iris[J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2919-2922.
- [29] Chang J, Jung K D, Lee E, *et al.* Microelectrofluidic iris for variable aperture[C]. SPIE, 20128252: 82520O.
- [30] Oh S H, Seo J H, Jeon J P, *et al.* Liquid lens based on electromagnetic actuation for high-performance miniature cameras[C]. Anchorage: 2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, 2015: 2077-2080.
- [31] Seo H W, Chae J B, Hong S J, *et al.* Electromagnetically driven liquid iris[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 231: 52-58.
- [32] Jang D, Jeong J W, Lee D Y, *et al.* Electromagnetically driven liquid iris[C]. APS Division of Fluid Dynamics, 2016.
- [33] Seo H W, Chae J B, Hong S J, *et al.* A tunable optical iris based on electromagnetic actuation for a high-performance mini/micro camera[C]. San Francisco: 2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2014: 1147-1150.
- [34] Yu H B, Zhou G Y, Chau F S, *et al.* Optofluidic variable aperture[J]. Optics Letters, 2008, 33(6): 548-550.
- [35] Song C L, Nguyen N T, Asundi A K, *et al.* Tunable optofluidic aperture configured by a liquid-core/liquid-cladding structure[J]. Optics Letters, 2011, 36(10): 1767-1769.
- [36] Schadt M, Helfrich W. Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal[J]. Applied Physics Letters, 1971, 18(4): 127-128.
- [37] Zhou Z W, Ren H W, Nah C W. Adaptive liquid crystal iris[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(9): 092201.
- [38] Muller P, Spengler N, Zappe H, *et al.* An optofluidic concept for a tunable micro-iris [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(6): 1477-1484.