

基于调频法的介电液体透镜研究

吕红艳, 崔建国*

重庆理工大学药学与生物工程学院, 重庆, 400054

摘要 因液体透镜在成像、生物识别、光电和芯片实验室等方面具有广泛的应用前景, 研制出一种基于调频法的介电效应液体透镜, 通过调节输入电源信号频率实现对透镜焦距的控制, 获得了频率、电压、接触角、焦距和透镜孔径间的变化关系。所研制的介电透镜施加的电压频率范围为 0~20 kHz, 其焦距可在 6~8 cm 间变化, 透镜孔径变化范围为 2~3.25 mm, 透镜响应时间约为 375 ms。本透镜具有结构简单、驱动快速、调节精确、能耗小、分辨率良好、动态范围大等优点。

关键词 光学设计; 液体透镜; 介电效应; 调频法; 焦距

中图分类号 TN942.2; O435.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.132201

Dielectrophoresis Liquid Lens Based on Frequency Modulation

Lü Hongyan, Cui Jianguo*

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

Abstract In recent years, the liquid lenses are widely used in imaging, biometrics, optoelectronics, and lab-on-a-chip. A liquid lens is successfully developed herein based on the frequency-modulated dielectrophoresis effect. The focal length of the lens is varied by adjusting the output frequency of the input power. The relationships among the frequency, voltage, contact angle, focal length, and lens aperture are obtained. When the applied voltage frequency of the dielectrophoresis lens is varied within 0-20 kHz, the focal length, lens aperture, and lens response time are 6-8 cm, 2-3.25 mm, and about 375 ms, respectively. The as-prepared lens has the advantages of a simple structure, fast driving, precise adjustment, low energy consumption, high resolution, and large dynamic range.

Key words optical design; liquid lens; dielectrophoresis; frequency modulation method; focal length

OCIS codes 220.4880; 240.3990; 250.6715

1 引言

随着微流体技术的迅速发展和光学技术的广泛应用, 两者有机结合产生的新器件、新设备已经成为科研工作者的研究热点^[1]。微光学和微流体技术的结合产生了光流体学这一新兴交叉学科, 研究学者们开始利用流体性质、流动状态与光之间的相互作用来创建新的功能性光学装置和微流体装置^[2]。液体透镜就是近年来快速发展的基于微流体技术的微型光学器件。

传统机械透镜的聚焦驱动多采用音圈磁致动或

压电定子的超声振动, 以引起多个固体透镜沿光轴的线性运动^[3]。这种使用复合透镜配置和机电一体化来改变焦点的方法必然会增加光学系统的整体尺寸, 难以集成在空间受限的超便携式设备中^[4]。

液体透镜不仅仅是简单的微型化光学器件, 它使用液体替代凹凸状的固体透镜, 通过改变流体状态来改变焦距, 具有体积小、变化范围大、结构简单等诸多优点^[5]。此外, 液体透镜的控制和致动受益于微流体和微电子学的快速发展, 可有效减小驱动和控制系统的体积, 实现精确控制^[2]。

介电效应液体透镜(也称为介电透镜)通过外加

收稿日期: 2018-12-24; **修回日期:** 2019-01-16; **录用日期:** 2019-01-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAI01B14)、重庆市高等教育教学改革研究一般项目(173114)、重庆理工大学研究生教育优质课程项目资助(yyk2017106)、重庆市技术创新与应用示范(社会民生类)一般项目(cstc2018jscx-msyb0290)

* **E-mail:** cjq998@hotmail.com

电压形成不均匀电场,液滴受到介电力改变状态,进而改变液体界面曲率实现变焦,具有结构紧凑、焦距可调性大、响应速度快、寿命长和成像质量好等优点,具有广阔的应用前景,是目前光流体学的研究热点^[6]。与另一种常见的电润湿透镜相比,介电透镜的相同之处是具有类似的透镜结构、电驱动、大的聚焦变化和快速的响应时间;其区别在于所使用的液体特性不同^[7]。在电润湿透镜中,透镜室中使用的2种不混溶液体由导电液体和非导电液体组成,并对电极表面的介电层和绝缘层要求较为苛刻。介电透镜中使用的是2种具有不同介电常数的不混溶液体,当2种液体经历不均匀的电场时,所产生的介电力导致2种液体之间的接触界面变形,进而实现透镜的焦距调控^[8]。同时,介电透镜避免了电润湿透镜可能产生的电解和微气泡问题,降低了对电极表面介电和绝缘涂层的要求^[9]。

与其他液体透镜类似,介电液体透镜也有局限性。在早期研制的液体透镜中,当动态焦点改变时,主要挑战是驱动电压过高,不易实现微型装置升压^[10]。因为介电效应的产生环境是不均匀电场,所以对直流电或交流电没有特殊要求,但在实际运用中,直接改变交/直流电压并不容易,而通过改变频率来间接改变交流电压则较容易实现,故可从调频方面着手解决驱动电压过高和升压不易的问题。本文选择介电透镜作为研究对象,开展了相关研究。用信号发生器驱动一个小型高频变压器,通过调节频率来驱动液体透镜发生状态改变,进而改变透镜的焦距。这种方法比直接调压法更加精确,可有效减小升压装置的体积,并有利于实现后期的微型化及应用。同时调频方式对初始电压要求并不苛刻,这就极大地扩展了本透镜的使用范围。通过研究和测试,所研制的基于调频方法驱动的液体透镜取得了较好的效果。

2 透镜结构设计及驱动原理

2.1 结构设计

当介电液滴放置在不均匀的电场中时,介电力(DEP force)作用会驱使液滴发生形变,改变液滴的界面曲率,如图1(a)所示^[11]。为了产生不均匀的电场,通过软光刻工艺将导电电极图形化为叉指状,如图1(b)所示。2组条纹电极互呈叉指状,并分别连接到2个同心圆环区域,每个电极条纹具有相同的宽度,而相邻电极条纹的间隔从外围到中心线性减小。导电电极选用1 cm×2 cm的氧化钢锡玻璃

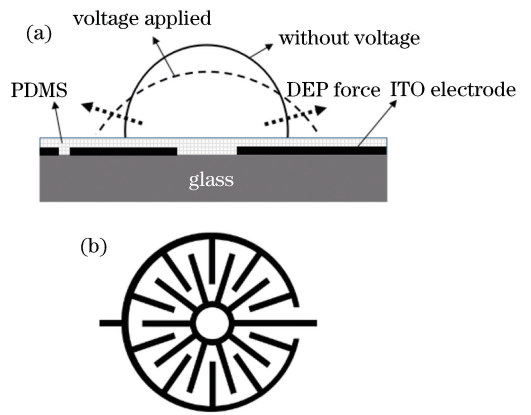


图1 介电液体透镜结构示意图。(a)介电透镜的液滴变形原理示意图;(b)ITO电极图案

Fig. 1 Structural diagram of dielectric liquid lens. (a) Diagram of droplet deformation principle of dielectric lens; (b) ITO electrode pattern

(ITO玻璃,方阻5 Ω)制作,运用自制的数字光刻投影系统进行曝光蚀刻得到所需的电极图形^[12]。中心圆电极直径为650 μm ,外圆直径为7 mm,ITO电极条纹宽为100 μm ,内圈连接条纹长为1700 μm ,外圈连接条纹长为1500 μm ,电极间相距最近处100 μm ,最远处450 μm 。ITO导电玻璃涂层厚度约为0.185 μm ,在ITO电极表面旋涂厚度约5 μm 的聚二甲基硅氧烷(PDMS)介电层。同时,该PDMS涂层因其自身的疏水性,可增大液滴的初始接触角以及后续接触角的变化幅度。

液体透镜中需要选择2种介电常数差距较大的液体作为填充液体,其中碳酸丙烯酯(介电常数 $\epsilon_1=69$,折射率 $n_1=1.42$)位于电极中心,外围用硅油(介电常数 $\epsilon_2=2.8$,折射率 $n_2=1.40$)填充。透镜的封装外壳采用有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯,PMMA)制作,其内径为7 mm、壁厚为1 mm、高为2 mm,顶部为玻璃盖板,底部为ITO导电玻璃。透镜内部的碳酸丙烯酯液滴不接触顶部的封装玻璃盖板,如图2所示。



图2 液体透镜封装效果图

Fig. 2 Liquid lens package renderings

2.2 驱动原理

在两电极上施加驱动电压,相邻的ITO条纹之

间产生电场。由于电极间存在扇形缝隙,电场强度朝向中心逐渐增强;由于电场呈圆对称分布,介电力作用于中心区域的碳酸丙烯酯液滴,使接触角变小,从而使其曲率发生变化,进而改变透镜焦距,此时液滴拥有了透镜特征^[13]。当电压消除时介电力消失,液滴由于界面张力恢复到原始形状^[14]。介电驱动力可表示为

$$\mathbf{F} = \frac{\epsilon_0}{2} \nabla [(\epsilon_1 - \epsilon_2) \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}] - \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \nabla(\epsilon_1 - \epsilon_2), \quad (1)$$

式中: ϵ_0 、 ϵ_1 和 ϵ_2 分别是真空环境、中心液滴和填充液体的介电常数; \mathbf{E} 为跨越电极缝隙的电场。等式包含两部分,因为 ϵ_1 和 ϵ_2 都是标量,第 2 项可忽略不计或视为零。因此,电场梯度对介电力起着关键作用。当 $\epsilon_1 = \epsilon_2$ 时,介电力为零。此外,介电力 F 根据中心液滴的介电常数是大于还是小于周围液体的介电常数而改变符号。如果 $\epsilon_1 < \epsilon_2$,介电力将推动中心液滴向具有较高电场的区域移动^[15];如果 $\epsilon_1 > \epsilon_2$,介电力将推动介电常数低的液体向电场较弱区域收缩,本研究所用介电透镜即为此种情况,随着施加电压的增大,外围硅油收缩,中心碳酸丙烯酯液滴逐渐扩展摊平。

2.3 频率调节

变压器是电源电路中的常用器件,常用于改变交流电压、电流和阻抗的大小。当变压器的初级线圈中有交变电流流过时,连接初次级线圈的磁芯中将出现交变的磁通,并在次级线圈中感应出交变的电流,进而产生感应电压。考虑到后期集成及微型化,选择频率高于 10 kHz 的高频变压器用于介电透镜的驱动。

与早期介电透镜直接升压的驱动方式不同,这里采用调频法来调节驱动电压。在电路中接入的变压器可以将这个电路简化为一个振荡电路,通过调节频率可以改变输出电压幅值,这不但简化了直接升压的繁琐电路设计,而且有利于后期应用时减小透镜的外围电路体积。

3 实验结果与数据

3.1 电压与频率的关系

因为介电透镜中液滴状态改变所需的介电效应仅与电场电压有关,所消耗电流非常小,故将函数信号发生器(RIGOL DG1062)输出的正弦波电压信号直接接入高频变压器的输入端,变压器的输出端连接透镜的 2 个电极端,其中信号发生器的输出电压为 20 V。在此后实验中,保持信号发生器电压幅值

不变,调节其正弦波输出频率,可以得到频率与输出电压的关系,如图 3 所示。由图 3 可知,正弦信号的频率在 0~25 kHz 间与电压呈抛物线关系。0~8 kHz 时,电压随频率缓慢增加,在 8~13.8 kHz 间迅速提高,在频率为 13.8 kHz 时电压达到最大值,其电压的峰峰值最高为 278 V。其后随着频率增加电压迅速减小,后期实验也证明在 8~13.8 kHz 频率段透镜中液滴状态变化显著。

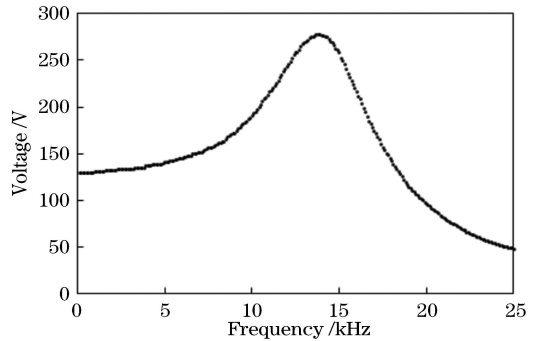


图 3 电压与频率的关系

Fig. 3 Relationship between voltage and frequency

3.2 接触角与频率的关系

液滴形变引起界面变化的最直观表现就是接触角的变化,借助 NYJP-360 接触角测量仪(北京金盛鑫)对液滴接触角进行了测量。对比测试了在空气介质和硅油两种环境下透镜中心液滴的接触角变化,测试结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,硅油环境中碳酸丙烯酯的初始接触角为 86.707° ,随着驱动正弦波频率的增加,接触角先减小,其最小值在 11 kHz 驱动频率时为 49.486° ,变化范围达到 37.221° 。随着频率的进一步增大(驱动电压的峰峰值下降),接触角出现反向增大,在 20 kHz 时,接触角恢复到 88.592° (与初始接触角的微弱差别可能是由测量误差引起的)。频率从 20 kHz 逐渐减小至 0(即反向变化),接触角先减小后增大,与正向驱动曲线基本重合。这说明本介电透镜具有良好的可重复性和回复性。空气介质环境的测试中正反向驱动的 2 条曲线具有相似的变化规律,不过初始接触角和接触角变化范围与硅油环境相比,均大幅减小。这可能是因为碳酸丙烯酯具有吸湿性,会吸收空气中的水分,导致初始接触角变小。上述对比体现了硅油封装的优势,既隔绝了空气中的水分,润滑了底面,也增大了接触角的变化范围。上述 2 种环境测试中接触角最小值对应的驱动电压频率均比理论值(图 3 中最大电压值对应的频率为 13.8 kHz)小,这一现象可能是由于接触角饱和所导致的^[16]。

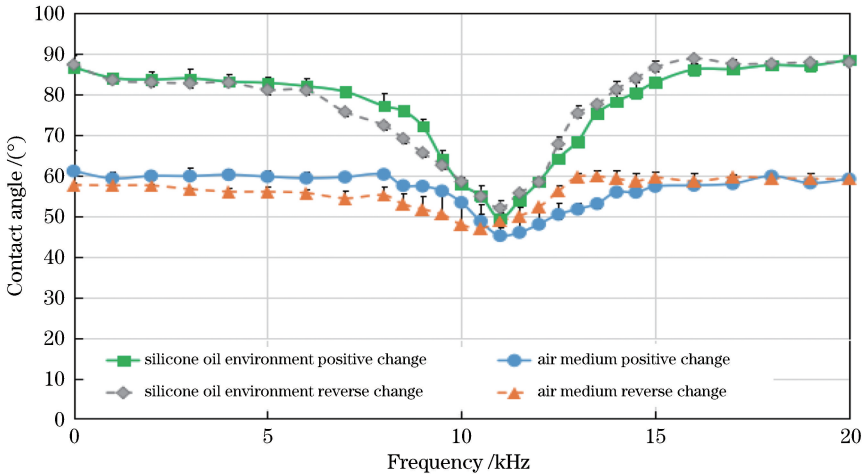


图4 接触角与频率的关系

Fig. 4 Relationship between contact angle and frequency

3.3 焦距、孔径与频率的关系

根据文献[17], 接触角与透镜焦距的函数关系为

$$f^3 = \frac{3V}{\pi(1 - \cos \theta)(2 - \cos^2 \theta - \cos \theta)(n_1 - n_2)^3}, \quad (2)$$

式中: V 为液滴的体积, θ 为接触角。利用平行激光束照射介电透镜, 最小最亮光斑与透镜的距离即为

透镜的焦距, 测得的数据如图5所示^[18]。透镜初始焦距为 6.0 cm, 随着驱动信号频率增大, 焦距增大; 在 11 kHz 时焦距为 8.0 cm, 频率进一步增大, 焦距减小。实验值与由(2)式计算得出的理论值具有相同的趋势, 但是数值略有差异, 这可能是由测量时识别光斑大小的人为观测误差所引起的。介电透镜的孔径也与频率有关, 其初始孔径为 2.0 mm, 在 11 kHz 驱动频率时透镜孔径最大为 3.25 mm。

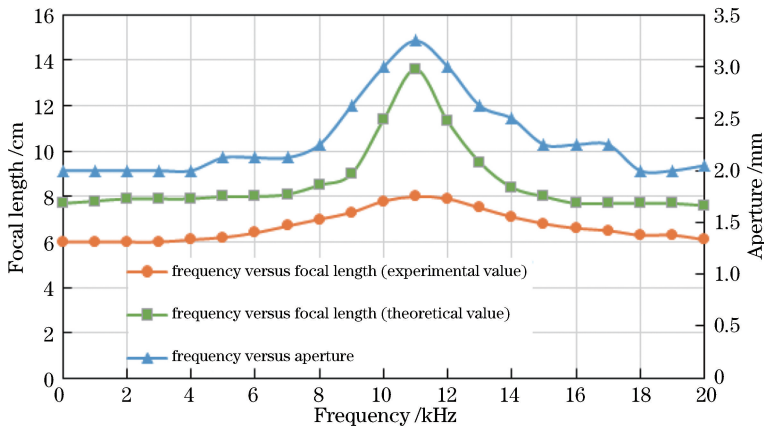


图5 焦距、孔径与频率的关系

Fig. 5 Relationship among focal length, aperture and frequency

3.4 介电透镜变焦效果和响应时间测试

将印有字母“test”(Times New Roman, 八号)的纸张置于介电透镜下方 2.9 cm 处, 摄像头位于介电透镜上方 5.6 cm 处。初始时调整字母图像为清晰状态, 如图 6(a)所示; 随着驱动信号频率的增大, 图像开始变小并变模糊, 当驱动信号频率为 11 kHz 时, 图像愈加变小且模糊, 如图 6(b)所示; 此时将纸片下调 1.2 cm, 可得到变小且清晰的字母, 如图 6(c)所示。需要注意的是, 因为图像较小, 在透镜边缘出现球形像差和扭曲现

象^[19]。为了进一步检测透镜变焦效果, 从透镜侧面对液滴的形变过程进行了记录, 如图 7 所示。

为了测量介电透镜的动作响应时间, 借助 CCD 相机录制捕捉液滴形变的视频, 利用视频帧数来计算其响应时间。当施加频率为 11 kHz 时(电压的峰峰值为 216 V), 介电透镜的动作响应时间约为 375 ms, 回复时间为 500 ms, 电流为 116 μ A, 其驱动功率约为 17.7 mW, 这体现了介电透镜具有驱动快速、调节精确、能耗小的优势。

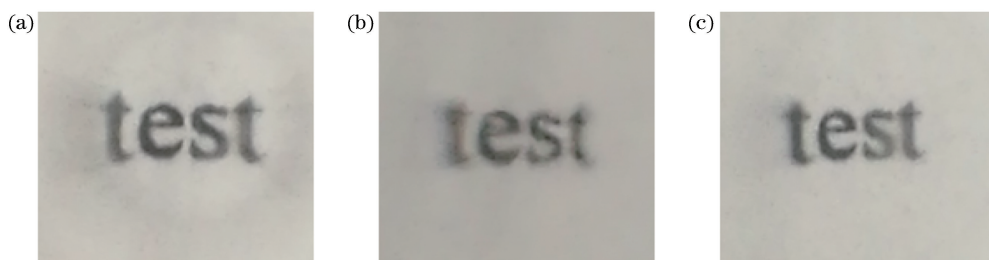


图6 介电透镜变焦。(a)初始图像;(b)变焦后图像;(c)调整距离后的变焦图像

Fig. 6 Dielectric lens zooming. (a) Initial image; (b) image after zooming; (c) zooming image after adjustment

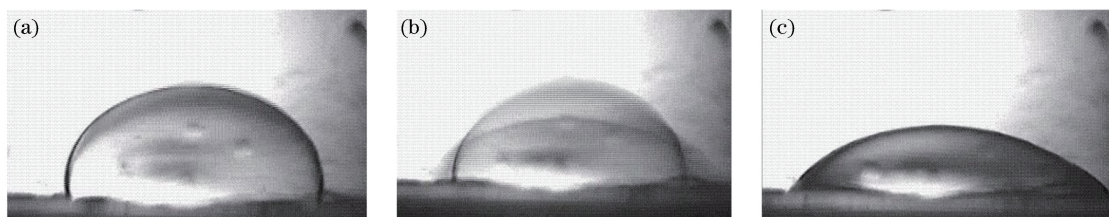


图7 透镜中心液滴形变过程。(a)初始液滴形状;(b)变焦中液滴形状;(c)变焦后液滴形状

Fig. 7 Drop deformation process in lens center. (a) Initial droplet shape; (b) droplet shape in zooming; (c) droplet shape after zooming

4 结 论

基于液体透镜微型化、集成化和无机械组件的发展方向,本文研制了一种基于介电效应的液体变焦透镜,通过调频法实现了透镜焦距的改变,获得了频率与电压、接触角、焦距、透镜孔径间的变化关系。本透镜的最佳工作频率为 11 kHz,当频率在 0~20 kHz变化时,焦距可在 6~8 cm 间变化,透镜孔径可在 2~3.25 mm 之间变化,透镜响应时间约为 375 ms,功耗为 17.7 mW。本次实验研制的液体透镜证明了调频变焦的可行性,并具有良好的回复性和变焦效果。但针对不同的变压器,电压与频率的关系会有所不同,下一步工作是进一步加强液体透镜调频变焦的普适性。

参 考 文 献

- [1] Solgaard O, Godil A A, Howe R T, *et al.* Optical MEMS: from micromirrors to complex systems[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(3): 517-538.
- [2] Nguyen N T. Micro-optofluidic lenses: a review[J]. *Biomicrofluidics*, 2010, 4(3): 031501.
- [3] Wei K, Domicone N W, Zhao Y. Electroactive liquid lens driven by an annular membrane [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1318-1321.
- [4] Lü H Y, Cui J G, Liu S X, *et al.* Research status of optofluidic variable aperture [J]. *Laser &*

Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090002.

吕红艳, 崔建国, 刘盛雄, 等. 光流体可变光圈的研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090002.

- [5] Cui J G, Wang R S, Yuan W, *et al.* Research status and prospects of liquid lens[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.
- [6] Chen Q M, Li T H, Zhu Y J, *et al.* Dielectrophoresis-actuated in-plane optofluidic lens with tunability of focal length from negative to positive[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6532-6541.
- [7] Jin B Y, Ren H W, Choi W K. Dielectric liquid lens with chevron-patterned electrode [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32411-32419.
- [8] Almoallem Y D, Jiang H R. Double-sided design of electrodes driving tunable dielectrophoretic miniature lens[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(5): 1122-1131.
- [9] Brown C V, Wells G G, Newton M I, *et al.* Voltage-programmable liquid optical interface [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(7): 403-405.
- [10] Zheng H B, He Y L, Ding D Y. The developing milestones of liquid lens [J]. *Physics and Engineering*, 2008, 18(4): 42-47.

- 郑浩斌, 何焰蓝, 丁道一. 液体透镜的诞生和发展 [J]. 物理与工程, 2008, 18(4): 42-47.
- [11] Xu M, Wang X H, Ren H W. Tunable focus liquid lens with radial-patterned electrode [J]. Micromachines, 2015, 6(8): 1157-1165.
- [12] Zhang Y Y, Cui J G. Rapid microfabrication technology based on digital lithography projection system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(3): 448-453.
- 张雅雅, 崔建国. 基于数字光刻投影系统的快速微加工技术[J]. 应用光学, 2015, 36(3): 448-453.
- [13] Ren H W, Xianyu H Q, Xu S, *et al.* Adaptive dielectric liquid lens [J]. Optics Express, 2008, 16(19): 14954-14960.
- [14] Xu S, Ren H W, Wu S T. Dielectrophoretically tunable optofluidic devices[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(48): 483001.
- [15] Cheng C C, Andrew Y J. Dielectrically actuated liquid lens[J]. Optics Express, 2007, 15(12): 7140-7145.
- [16] Cheng C C, Alex C C, Andrew Y J. Variable focus dielectric liquid droplet lens [J]. Optics Express, 2006, 14(9): 4101-4106.
- [17] Ren H W, Wu S T. Tunable-focus liquid microlens array using dielectrophoretic effect [J]. Optics Express, 2008, 16(4): 2646-2452.
- [18] Xu C L, Zhao W C, Hu J H, *et al.* Liquid lens-based optical sectioning tomography for three-dimensional flame temperature measurement [J]. Fuel, 2017, 196: 550-563.
- [19] Wei K, Huang H Y, Wang Q, *et al.* Focus-tunable liquid lens with an aspherical membrane for improved central and peripheral resolutions at high diopters[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3929-3939.