

双胞胎结构介电湿润芯片的设计与实验

许晓威, 张玉良

(衢州学院机械工程学院, 浙江衢州 324000)

摘要: 基于介电湿润效应的数字微流控技术在操作单个微液滴方面所表现出的独特优势使其已在生物、医学及化学等领域得到了广泛关注与应用。数字微流控芯片中较高的驱动电压不但容易使芯片的介电层被击穿, 而且较强的电场会给液滴中的活性物质带来不可逆的损伤, 因此, 降低介电湿润芯片的驱动电压是很有必要的。通过理论分析得到由2块相同单极板共平面芯片构成的双胞胎结构芯片不但能获得较大的介电驱动力, 而且临界驱动电压更低。实验结果表明采用双胞胎结构设计的芯片不仅能提高液滴的平均运动速度, 而且可以有效地降低驱动电压, 特别是在较低驱动电压时可获得更优的液滴驱动效果。

关键词: 数字微流控技术; 介电湿润机理; 驱动电压; 液滴平均速度

中图分类号: TH69 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.11.010

引用格式: 许晓威, 张玉良. 双胞胎结构介电湿润芯片的设计与实验[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(11): 943-948.

XU Xiaowei, ZHANG Yuliang. Design and experiment of twin plate device based on electrowetting-on-dielectric actuation[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(11): 943-948.

Design and experiment of twin plate device based on electrowetting-on-dielectric actuation

XU Xiaowei, ZHANG Yuliang

(College of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China)

Abstract: Digital microfluidics based on electrowetting on dielectric is an emerging popular technology that manipulates single droplets. It has shown enormous advantages in biology, medicine and chemistry and so on, where it has been used extensively. However, the higher driving voltage of digital microfluidic devices not only causes the dielectric layer of the chip to be broken down, but the strong electric field can cause irreversible damage to the active material in the droplet. Therefore, it is necessary to reduce the driving voltage of the digital microfluidic device. Compared with the two plate structure, the twin plate device composed of two identical coplanar electrodes was obtained by theoretical analysis, which can not only achieve greater driving force, but also lower the threshold driving voltage. The experimental results demonstrate that the twin plate structure can improve the average velocity of droplets and reduce the driving voltage effectively. Especially, in the lower driving voltage a better droplet driving effect can be obtained with the twin plate structure.

Key words: digital microfluidics; electrowetting on dielectric; driving voltage; average droplet velocity

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-05-24

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ16E050008), 国家自然科学基金(51876103)资助。

作者简介: 许晓威(通讯作者), 男, 1984年生, 博士/讲师。研究方向: 数字微流控芯片及相关技术。E-mail: 851597503@qq.com

0 引言

近二十年微流控技术随着微制作工艺的快速发展取得了很大的突破,基于介电湿润效应(electrowetting on dielectrics, EWOD)的数字微流控技术成为微流控技术的新热点^[1-8].由于数字微流控技术操控液滴在平板上进行,不需要微泵、微阀和微管道等复杂的机械结构,这样避免了结构复杂部件的制作和装配、交叉使用造成的污染,因此数字微流控芯片在“片上实验室”(lab-on-a-chip)得到了越来越多的应用,它以液滴为载体,液滴中可以包含细胞^[9-11]和蛋白质^[12]等活性物质.另外,数字微流控技术在光学^[13-14]、电子芯片降温^[15]、特种传感器^[16-18]等领域也得到了广泛的应用.

目前,介电湿润芯片的驱动电压为几十伏甚至更高,较高的驱动电压不但容易使介电湿润芯片的介电层被击穿,而且较强的电场会给液滴中的活性物质带来不可逆的损伤,因此,降低介电湿润芯片的驱动电压是很有必要的.截至目前,降低芯片驱动电压的方法可归纳为两类,第一类是选用新型介电材料^[17-19],该方法能够有效地降低驱动电压,但制备新型介电材料成本较昂贵;第二类是芯片结构的优化设计^[10, 20-21],该方法也能有效地降低驱动电压,与选用新型介电材料相比,其优点是成本低.

本文针对降低介电湿润芯片驱动电压的问题采用双胞胎结构设计的方法.首先,在液滴受力基础上对芯片的结构进行优化设计,采用双胞胎结构设计的芯片相对于常规双极板的结构设计,其所获得的介电驱动力更大,所需驱动电压更小.然后设计制作了芯片及搭建了实验系统.最后结合常规双极板结构芯片对双胞胎结构芯片的液滴驱动效果进行实验,两种芯片驱动液滴结果对比表明,采用双胞胎结构设计的芯片能提高液滴平均速度和降低驱动电压.

1 双胞胎结构介电湿润芯片设计

1.1 介电湿润效应的基本原理

数字微流控技术是通过给介电层下方的驱动电极加电来操控液滴,如图 1 所示,此时右侧驱动电极加电,液滴的大部分位于左侧不加电驱动电极之上,位于加电驱动电极之上的液滴接触角 θ 减小,当 θ 的减小量足够大时,液滴就会向加电驱动电极的方向运动,按时序分别给阵列驱动电极加电,液滴就会

按照规划好的路径运动.数字微流控技术包括液滴的分配、分离、合并和运输四项基本操控^[1-6].驱动电压与液滴接触角的关系可由杨-李普曼方程^[3,6,20-21]进行描述:

$$\cos\theta_V - \cos\theta_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{2d\gamma_{lg}} V^2 \quad (1)$$

$$f_{er} = \frac{1}{2} c V^2 \quad (2)$$

式中, V 为驱动电压值, θ_V 为加驱动电压 V 时的液滴接触角, θ_0 为不加驱动电压时的初始接触角, ϵ_r 为介电层的相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, γ_{lg} 为“气-液”表面张力, d 为介电层厚度, f_{er} 为液滴在水平方向上每单位长度所受介电驱动力, c 为每单位介电层等效电容.

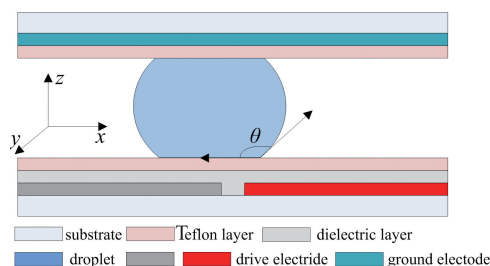


图 1 介电湿润示意图(侧视图)

Fig. 1 Schematic of electrowetting on dielectrics (side view)

液滴有效三相接触形成介电驱动示意图如图 2 所示,左右 2 个驱动电极中右侧驱动电极导通,液滴截面圆位于导电驱动电极上的三相接触线为有效三相接触线(three-phase contact line, TCL).把 f_{er} 沿着有效三相接触线进行积分可得到液滴在 x 方向上的介电驱动力表达式为

$$F_{ex} = \int_{TCL} f_{er} \cos\varphi dl = \frac{L}{2} c V^2 = L f_{er} \quad (3)$$

式中, L 为液滴有效三相接触线所形成的弦长, l 为液滴相应截面圆的弧长.作用在液滴上的介电驱动力大小分别与驱动电压的平方和弦长 L 成正比.介

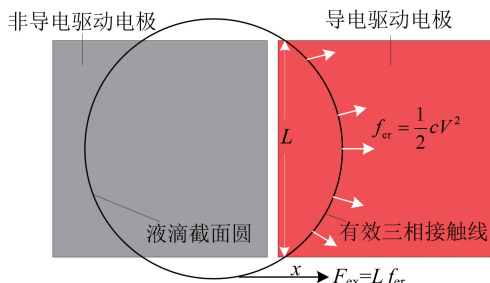


图 2 有效三相接触线形成介电驱动力示意图

Fig. 2 Schematic of electrowetting force generated on the effective TCL for droplet transport

电驱动力相同情况下,可通过增大弦长 L 的方法以达到相对降低驱动电压的目的。

1.2 双胞胎结构芯片的设计原理

目前,数字微流控芯片的结构主要有两种形式.一种是有上下极板的“三明治”结构形式,阵列驱动电极位于下极板,零电极位于上极板,液滴位于上下极板之间,如图 1 所示,本文中称其为常规双极板结构.另一种是单极板的平面电极阵列形式,如图 3 所示.单极板结构形式中,驱动电极与零电极共平面,零电极紧邻驱动电极布置,该种类型芯片能实现液滴的运输和混合操作,但不能进行液滴的分离和生成操作,使其应用范围大大变小,因此本文不对该类型芯片进行研究。

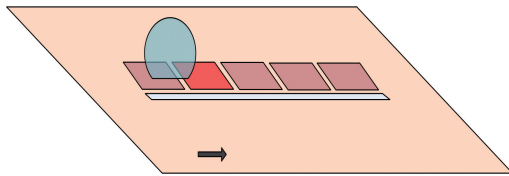


图 3 单极板共平面芯片示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single plate with coplanar electrodes

本文研制的双胞胎结构介电湿润芯片如图 4 所示,该芯片是由图 3 中的两块单极板芯片封装构成,双胞胎结构芯片的名称由此而来.根据式(3),采用两种结构设计时与介电驱动力计算相关的参数如表 1 所示。

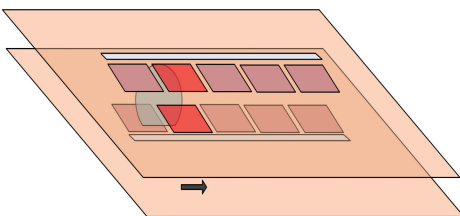


图 4 双胞胎结构芯片示意图

Fig. 4 Schematic diagram of twin plate configuration

表 1 介电驱动力相关参数

Tab. 1 Relative parameters of EWOD driving force

| 驱动力参数 | 双极板结构 | 双胞胎结构 |
|-----------------------|---------------|----------------|
| 驱动电压 V | V_D | V_D |
| 弦长 L | W | $2W$ |
| 相同驱动电压时介电驱动力 F_{cr} | $(W/2)cV_D^2$ | WcV_D^2 |
| 相同介电驱动力时所需驱动电压 V | V_D | $V_D/\sqrt{2}$ |

由表 1 可知,在芯片材料、驱动电极尺寸、液滴体积、芯片所处环境等相同条件下,相同驱动电压

时,双胞胎结构芯片的弦长是常规双极板结构芯片的 2 倍;由式(3)可知在相同驱动电压时双胞胎结构芯片的介电驱动力是常规双极板结构芯片的 2 倍;同理,根据式(3),获得相同介电驱动力时双胞胎结构芯片所需驱动电压是常规双极板结构芯片的 70%左右.从驱动电压的角度考虑,无论是在相同驱动电压或相同介电驱动力条件下,双胞胎结构芯片所获得的介电驱动力与所需驱动电压都要优于常规双极板芯片.综合以上分析可知采用图 4 所示的双胞胎结构设计具有降低驱动电压的效果。

2 实验与结果分析

2.1 芯片的设计制作及系统搭建

选用 ITO 玻璃(方阻 $<7 \Omega / m^2$)通过湿法刻蚀技术制作 EWOD 芯片的驱动电极、零电极和电极引线,主要制作工艺流程如图 5 所示。

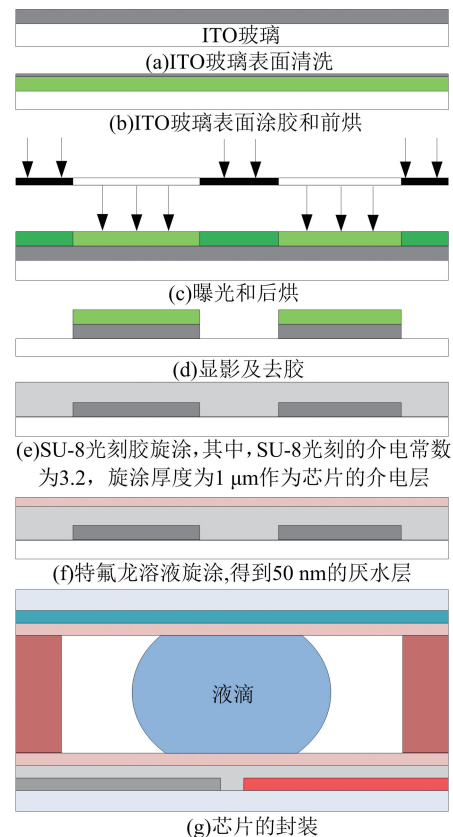


图 5 EWOD 芯片主要制作工艺流程图

Fig. 5 Flow chart of main process

EWOD 芯片实物图如图 6 所示.每块芯片上的驱动电极数为 5 个,呈单排直线阵列布局,每个驱动电极尺寸为 $1 \times 1 \text{ mm}$,驱动电极间间距为 $20 \mu\text{m}$,其中双胞胎结构中零电极宽度为 $50 \mu\text{m}$,零电极与驱动电极间间距为 $20 \mu\text{m}$.液滴驱动实验平台如图

7 所示,经电源放大电路的交流电通过光电耦合开关施加到 EWOD 芯片的驱动电极上,液滴的运动情况通过 CCD 摄像头连接到 PC 上进行记录和观察.实验时使用双面胶带固定芯片上下极板,上下极板间距为 $300\ \mu\text{m}$,驱动电极与经过电压放大电路放大的频率为 $100\ \text{Hz}$ 的正弦信号相连,芯片零电极与电路零电极相连.采用去离子水为实验对象,操控液滴的介质为空气.

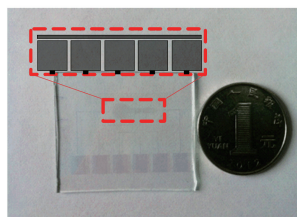


图 6 EWOD 芯片
Fig. 6 EWOD chip

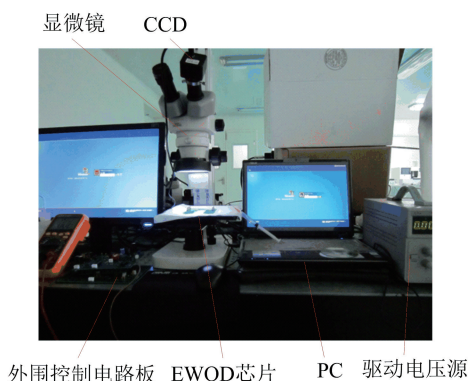


图 7 实验平台
Fig. 7 Experimental platform

双胞胎结构芯片由两块单极板芯片封装而成,为充分发挥其驱动能力,要保证芯片封装时在同一平面内上下两片上的每一个驱动电极前后左右完全对齐,即,上极板芯片上的每个驱动电极投影要重合于下极板芯片上的每个驱动电极.如果电极对准存在偏差,液滴在上下两极板上所形成的有效三相接触线长度不相等,从而其所形成的弦长 L 不相等,液滴所受总的介电驱动力就会小于单极板共平面设计时介电驱动力的 2 倍,将会降低其驱动液滴的性能.单极板芯片是直线阵列电极,因此只要两块芯片中的第一个驱动电极是对齐的就能保证双胞胎结构芯片的封装效果.

2.2 实验与分析

图 8 为双胞胎结构芯片上 $1\ \mu\text{l}$ 去离子水液滴在驱动电压为 $50\ \text{V}$ 时的运动情况视频截图,文中电压值均为有效电压值.由于 ITO 玻璃具有很好的透光性,当 SU-8 光刻胶固化之后呈乳白色变得不透

明,所以无法直接显示出驱动电极的形状,鉴于此,文中用虚线框表示驱动电极和零电极的轮廓,如图 8(a)所示.液滴从图 8(a)中的开始位置运动到图 8(e)中的最右侧驱动电极之上,持续完成了一个电极阵列的运动距离,参考文献[22]中液滴计算公式计算出液滴的平均速度约为 $110\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

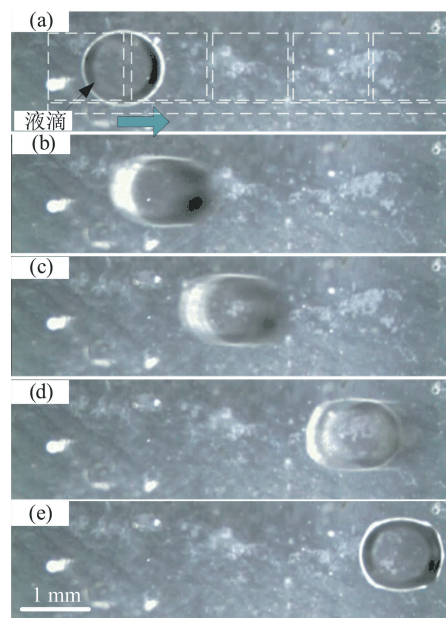


图 8 $1\ \mu\text{l}$ 液滴运动视频截图(俯视图)

Fig. 8 Screenshots of $1\ \mu\text{l}$ droplet motion (vertical view)

介电湿润芯片上液滴的平均速度是衡量芯片性能优劣的一个重要指标,相同驱动电压时平均速度越大,芯片的综合性能更优.图 9 为 $1\ \mu\text{l}$ 去离子水液滴在常规双极板结构与双胞胎结构芯片上的驱动电压和平均速度对比关系.相同实验条件下,为减小数据误差,每一个驱动电压下都进行了 10 次实验,取其平均值.该实验结果表明在相同驱动电压值下双胞胎结构芯片驱动液滴的速度是常规双极板结构

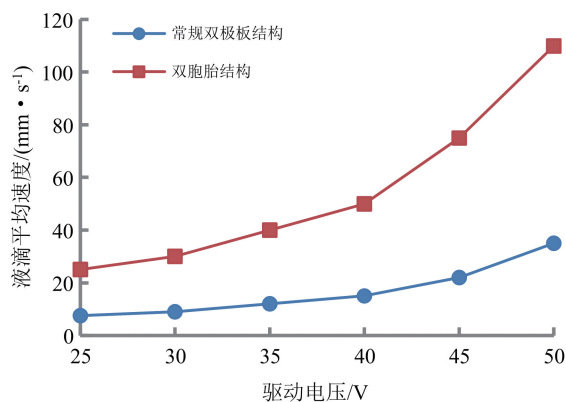


图 9 $1\ \mu\text{l}$ 液滴驱动电压和平均速度关系对比

Fig. 9 Relationship between driving voltage and average velocity

芯片的 3.3 倍左右。

临界驱动电压为可驱动液滴运动的最小电压,是衡量介电湿润芯片的一个重要指标.图 10 为两种结构芯片驱动不同体积液滴时的临界驱动电压对比关系.驱动每一种体积的液滴都进行了 10 次实验,电压取其平均值.由图 10 可知,相同实验条件下驱动体积分别为 1, 1.5, 2 μl 的液滴时,双胞胎结构芯片的临界驱动电压值都低于常规双极板结构芯片,前者为后者的 75%, 67%, 65%.由此可知获得相同介电驱动力时双胞胎结构芯片的驱动电压是常规双极板结构芯片的 70% 左右。

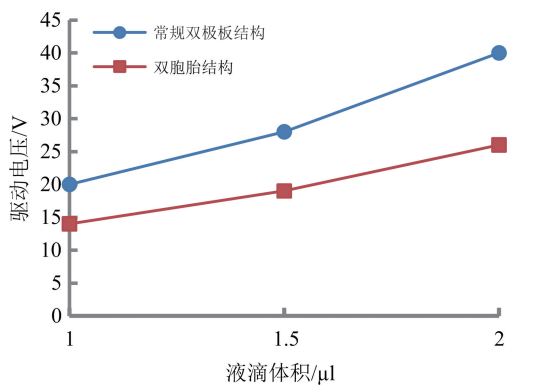


图 10 两种结构芯片的临界驱动电压对比

Fig. 10 Relationship of threshold voltages of two structure chips

由于芯片表面缺陷、电压波动和环境变化因素的存在,液滴运动过程中会发生运动中断的情况,液滴运动中断就会导致整个液滴运动过程的失败,因此,数字微流控芯片需要尽量减少液滴运动失败情况的发生.为进一步验证双胞胎结构芯片驱动持续运动的稳定性,规定液滴从图 8(a)中运动到图 8(e)中为一个运动周期,液滴成功完成一个运动周期记为成功 1 次.每一个驱动电压值都进行 20 次液滴驱动实验。

图 11 为两种结构芯片在不同电压下成功驱动 1 μl 去离子水液滴完成运动周期的情况.该实验结果表明无论是低电压或高电压驱动双胞胎结构芯片成功驱动液滴持续运动的次数都是最多的。

由实验结果可知,双胞胎结构芯片并没有百分之百成功驱动液滴持续运动,造成这种情况的原因可归纳为三点:第一,根据式(3)可知液滴所受介电力大小与驱动电压的平方成比例,液滴在较低驱动电压时所受介电驱动力较小,而液滴持续运动的条件是需要克服上下极板对其的剪切力、周围介质对其的黏滞阻力和三相接触线摩擦力,当液滴所受介电驱动力不足以克服上述阻力时就会发生运动中断的

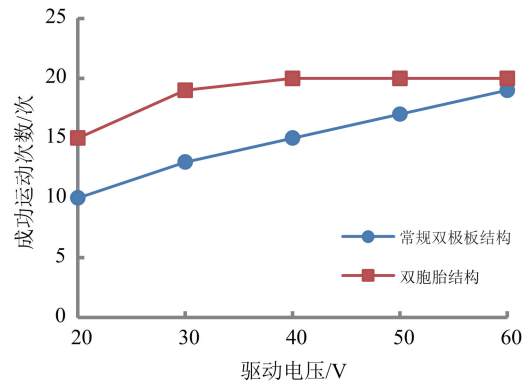


图 11 成功驱动液滴运动周期次数

Fig. 11 Number of successful driving circles

情况;第二,在驱动电压作用下持续进行 20 次实验时可能会造成同一块芯片的介电层与灰水层发生一定的变化,该变化可能是部分介电层被击穿;第三,由于芯片表面本身存在一定的缺陷、电网电压的波动和实验环境的变化等因素,这些因素都会给液滴的持续运动带来负面影响。

由成功驱动液滴运动次数对比可知,当驱动电压值接近或稍大于临界驱动电压值时,双胞胎结构芯片克服阻力和芯片缺陷的能力更强;当驱动电压远大于临界驱动电压时,两种结构的芯片驱动性能相近.因此,双胞胎结构芯片在低电压驱动时具有更大优势,即,低电压驱动时不但能保证芯片成功驱动液滴持续运动的次数,而且芯片内部较小的电场强度不会对液滴所运载的活性物质造成不可逆损伤,同时,还能使芯片介电层被击穿的概率大幅度降低。

综合以上分析,在相同驱动电压下双胞胎结构芯片驱动液滴的速度是常规双极板结构芯片的 3.3 倍左右;获得相同介电驱动力时双胞胎结构芯片的驱动电压是常规双极板结构芯片的 70% 左右;双胞胎结构芯片驱动液滴持续运动的性能更优,特别是在较低驱动电压时双胞胎结构芯片克服阻力和芯片缺陷的能力更强.因此,当驱动同体积液滴时介电湿润芯片采用双胞胎结构设计时可实现更低的电压驱动、更高的液滴运动速度、更好的运动持续性,从而可达到降低驱动电压的效果。

3 结论

本文针对降低介电湿润芯片驱动电压的问题采用双胞胎结构设计的方法.通过公式推导和理论分析,得到了芯片采用双胞胎结构设计时在相同驱动电压值下,能获得近 2 倍于常规双极板芯片的介电驱动

力,从而可通过增大液滴有效三相接触线所形成弦长的方法以达到降低驱动电压的目的.实验结果表明相对于常规双极板结构,介电湿润芯片采用双胞胎结构设计时不但具有降低驱动电压的效果,而且能提高液滴的平均速度和液滴持续运动的成功次数.

考虑我们仅使用去离子水液滴来验证双胞胎结构芯片驱动液滴的性能,未来研究方向将侧重考虑在去离子水液滴中增加活性物质,如蛋白质或细胞,以进一步检验介电湿润芯片采用双胞胎结构设计时降低驱动电压和提高液滴驱动的性能.

参考文献(References)

- [1] ABDELGAWAD M, WHEELER A R. The digital revolution: A new paradigm for microfluidics [J]. *Advanced Materials*, 2010, 21 (8): 920-925.
- [2] JEON J H, LEE J H, LEE J J, et al. Structural basis for carbapenem-hydrolyzing mechanisms of carbapenemases conferring antibiotic resistance [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, 16 (5): 9654.
- [3] YU Y H, CHEN J F, ZHOU J. Parallel-plate lab-on-a-chip based on digital microfluidics for on-chip electrochemical analysis[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2014, 24 (1): 015020.
- [4] SHEN H H, FAN S K, KIM C J, et al. EWOD microfluidic systems for biomedical applications[J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2014, 16 (5): 965-987.
- [5] CHEN T, DONG C, GAO J, et al. Natural discharge after pulse and cooperative electrodes to enhance droplet velocity in digital microfluidics [J]. *Aip Advances*, 2014, 4(4): 1725.
- [6] JAIN V, RAJ T P, DESHMUKH R, et al. Design, fabrication and characterization of low cost printed circuit board based EWOD device for digital microfluidics applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21: 1-9.
- [7] MADISON A C, ROYAL M W, FAIR R B. Fluid transport in partially shielded electrowetting on dielectric digital microfluidic devices [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016, 25 (4): 593-605.
- [8] LI Y, BAKER R J, RAAD D. Improving the performance of electrowetting on dielectric microfluidics using piezoelectric top plate control[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2016, 229: 63-74.
- [9] AHMADI A, HOLZMAN J F, NAJJARAN H, et al. Electrohydrodynamic modeling of microdroplet transient dynamics in electrocapillary-based digital microfluidic devices[J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2011, 10 (5): 1019-1032.
- [10] XU X, SUN L, CHEN L, et al. Electrowetting on dielectric device with crescent electrodes for reliable and low-voltage droplet manipulation [J]. *Biomicrofluidics*, 2014, 8 (6): 064107.
- [11] ZENG Z, ZHANG K, WANG W, et al. Portable electrowetting digital microfluidics analysis platform for chemiluminescence sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16 (11): 4531-4536.
- [12] VERGAUWE N, WITTERS D, CEYSSENS F, et al. A versatile electrowetting-based digital microfluidic platform for quantitative homogeneous and heterogeneous bio-assays [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2011, 21 (5): 054026.
- [13] BASOVA E Y, FORET F. Droplet microfluidics in (bio)chemical analysis[J]. *Analyst*, 2015, 140: 22-38.
- [14] ZHANG Z, HITCHCOCK C, KARLICEK R F. 3D model for rectangular electrowetting lens structures [J]. *Applied Optics*, 2016, 55 (32): 9113.
- [15] BINDIGANAVALE G S, YOU S, MOON H. Study of hotspot cooling using electrowetting on dielectric digital microfluidic system [C]//*Proceeding of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. IEEE, 2014: 1039-1042.
- [16] TRÖLS A, CLARA S, JAKOBY B. A low-cost viscosity sensor based on electrowetting on dielectrics (EWOD) forces[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2016, 244: 261-269.
- [17] CHANG J H, CHOI D Y, HAN S, et al. Driving characteristics of the electrowetting-on-dielectric device using atomic-layer-deposited aluminum oxide as the dielectric [J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2010, 8 (2): 269-273.
- [18] CHEN J, YU Y, ZHANG K, et al. Study of cyanoethyl pullulan as insulator for electrowetting[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2014, 199 (199): 183-189.
- [19] SOHAIL S, MISTRI E A, KHAN A, et al. Fabrication and performance study of BST/Teflon nanocomposite thin film for low voltage electrowetting devices[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2016, 238: 122-132.
- [20] CHANG J, PAK J J. Twin-plate electrowetting for efficient digital microfluidics[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2011, 160 (1): 1581-1585.
- [21] SAMAD M F, KOUZANI A Z. Design and analysis of a low actuation voltage electrowetting-on-dielectric microvalve for drug delivery applications [C]//*Engineering in Medicine and Biology Society*. IEEE, 2014: 4423-4426.
- [22] SONG J H, EVANS R, LIN YY, et al. A scaling model for electrowetting-on-dielectric microfluidic actuators [J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2009, 7 (1): 75-89.