

文章编号 1004-924X(2014)01-0138-08

悬空零电极介电湿润芯片的设计

许晓威, 陈立国*, 陈 涛, 孙立宁

(苏州大学 机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021)

摘要:针对目前单极板数字微流控芯片驱动液滴的效果多通过数值仿真方法验证而缺乏实验支持, 本文提出将单极板结构中的零电极进行悬空设计, 并通过实验对比分析了设计的悬空零电极单极板结构的芯片和传统双极板结构的芯片对液滴的驱动效果。首先, 基于介电湿润原理, 推导出传统双极板结构中液滴所受到的介电驱动力以及每个阻力, 接着, 对文中设计的悬空零电极结构的单极板数字微流控芯片中液滴的受力情况进行分析。然后, 对比分析两种结构的数字微流控芯片中液滴的受力情况。最后, 对两种结构的数字微流控芯片驱动去离子水微液滴的效果进行试验验证。实验结果显示, 驱动同等体积大小的微液滴时, 本文设计制作的悬空零电极单极板芯片比双极板结构的芯片所需的电压更低, 液滴的运动速度更快; 当有效驱动电压达到 44 V 时, 液滴的速度可以达到 15 cm/s。得到的实验结果证明了在单极板悬空零电极结构的数字微流控芯片上液滴驱动速度更高, 驱动电压更低。

关键词:数字微流控芯片; 介电湿润; 单极板; 液滴速度

中图分类号: TN405; O442 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142201.0138

Design of EWOD device with suspended ground electrode

XU Xiao-wei, CHEN Li-guo*, CHEN Tao, SUN Li-ning

(Robotics & Microsystems Center, Soochow University, Suzhou 215021, China)

* Corresponding author, E-mail: clg@hit.edu.cn

Abstract: This paper researches how to design the suspended ground electrode of an electrowetting-on-dielectric(EWOD)based device, because most of the existing investigations for the efficiency of single-plate EWOD device were carried out by means of numerical simulations and lack of experimental results. Then, it compares, the driving effectiveness for a liquid droplet by the proposed EWOD device with suspended ground electrode and a traditional bipolar plate device. Based upon the theory of the EWOD, the dielectric, deriving EWOD force and each resistive force of the droplet holding between the bipolar plates were derived, and the forces of the droplet sitting on the single-plate EWOD device were analyzed. Then, the forces were compared between the bipolar plate device and the single-plate EWOD device. Finally, the driving characteristics of the droplet were tested via the fabricated EWOD device. The experimental results show that the driving voltage of single-plate is more low, and its velocity is more faster than that of the bipolar plates; the velocity of 1 μ L droplet can be 15 cm/s when the driving potential is 44 V_{RMS}. In conclusion, the obtained experimental results validate the feasibility of the single-plate EWOD device with suspended ground electrode for its faster velocity and low driving potential.

Key words: digital microfluidic device; electrowetting-on-dielectric EWOD; single-plate; droplet velocity

收稿日期: 2013-06-09; 修订日期: 2013-09-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51275327)

1 引言

在过去的几十年,基于介电湿润原理的数字微流控技术以其独特的优势得到越来越多的关注和发展。在微观尺度下相对于其他力,物体的表面张力会居于支配地位,介电湿润原理正是操控液滴的表面张力来对单个液滴进行控制,所控制液滴的体积为微升,甚至纳升。较小体积的液滴可以更好地用来为生化反应提供一种载体和微环境,例如可以利用 EWOD 芯片操控微液滴来进行酶分析、细胞分析、聚合链式反应(PCR)、DNA 的富集和提取以及蛋白质组学^[1-2]等在连续流体中存在很大难度的生化分析,不需要微泵、微阀和微流道等机械工艺复杂的设备,更重要的是 EWOD 芯片所操控的是单个的体积较小的液滴,不会造成死体积、交叉污染等连续流体中经常会遇到的问题,所以 EWOD 芯片技术被越来越多的应用在芯片上实验室(Lab on a Chip)进行生化分析。数字微流控芯片分为 2 种结构:双极板结构和单极板结构,其中双极板结构最为常见,液滴被放置在上下极板之间,下极板包含有驱动电极,上极板为零电极。双极板结构的数字微流控芯片可以实现 4 项基本操控:液滴的分配、液滴的分离、液滴的合并和液滴的运输。单极板结构的数字微流控芯片是驱动电极和零电极位于同一块面板之上,该结构不能实现对液滴的分配和和分离的操作。但是,在单极板结构的数字微流控芯片上 2 个液滴的混合会更加均匀,可以运输更大体积的液滴和便于光学检测,使得单极板结构的数字微流控芯片在一些特定场合得到了更多的应用^[2-3]。

单极板数字微流控芯片结构中,零电极的不同布局会改变芯片上液滴周围的电场密度和分布状况,而液滴周围电场的密度和分布又会对介电湿润驱动力的大小产生一定的影响。文献[2-3]仅是通过数值仿真的方法总结得到了悬空零电极的结构中液滴所受到的介电驱动力最大,并无实验验证。本文根据文献[2-3]得到的数值仿真结果,采用了数学建模的方法对液滴的受力进行分析,首次推导出了悬空零电极单极板 EWOD 芯片结构中液滴的物理受力模型,建立了液滴的动能方程,并设计制作和封装了悬空零电极结构的 EWOD 芯片。通过实验对比分析了传统的双极

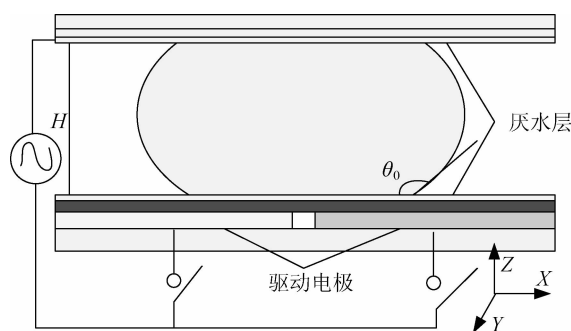
板结构和悬空零电极结构单极板 EWOD 芯片对液滴的驱动效果,同等实验条件下,本文所研制的悬空零电极单极板结构的 EWOD 芯片阻力更小,所驱动液滴的速度更高,对要求利用高速液滴的场合和领域有一定的理论和应用价值。同等液滴速度的条件下可以降低 EWOD 芯片的驱动电压,这样可以降低液滴中的电场强度,就更有利于保护液滴中所运输的生物活性样本。

2 介电湿润的基本原理

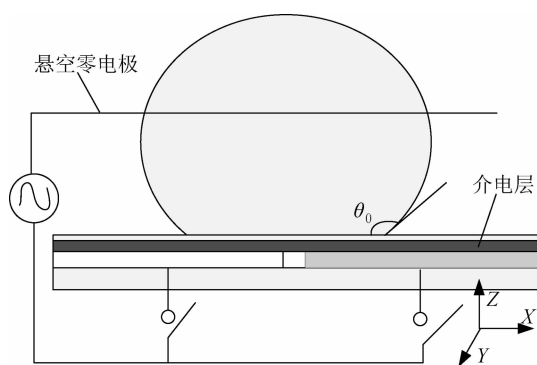
在介电湿润过程中,图 1(a)所示为传统的双极板结构(“三明治”结构),上极板接通零电极,位于下极板上方的驱动电极接驱动电压。液滴位于左右 2 个驱动电极之上,液滴前部位于右侧驱动电极之上,当右侧灰色驱动电极导通时,微液滴与施加驱动电压的驱动电极表面湿润性发生改变,由厌水变的亲水。驱动电压与接触角的关系可以由杨-李普曼方程进行描述^[3],如式(1)所示:

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

式中: θ_V 和 θ_0 分别表示不加驱动电压时的初始接触角和加驱动电压 V 时的接触角, ϵ_r 表示介电层的相对介电常数, ϵ_0 表示真空的介电常数, γ_{LG} 表示“液-气”表面张力, V 表示所加电压, d 表示介电层的厚度。由式(1)可知,当驱动电压增大时,微液滴的接触角随着驱动电压的增大而减小,液滴左右两侧的接触角不同从而在其内部产生压力差而驱动微液滴沿着施加电压的驱动电极单元方向运动,只要按时序给驱动电极单元施加一定频率和幅值的交流电压,就可以驱动微液滴沿着预先设定好的路径运动,实现对微液滴的操控。图



(a)双极板结构
(a)Bipolar plate EWOD device



(b)单极板悬空零电极结构

(b)Single-plate EWOD device with suspended electrode

图 1 介电湿润原理示意侧视图

Fig. 1 Cross view of schematic illustration of EWOD principle

1(b)为悬空零电极结构,如图所示上极板零电极设计为一根悬空的导线,该零电极与液滴接触,下极板与双极板结构的下极板结构相同。

3 液滴受力分析

3.1 双极板液滴受力模型分析

微液滴在 EWOD 芯片中被驱动的过程是液滴在介电湿润力和各个反作用力综合作用的结果,其中反作用力又分为上下极板对液滴的剪切阻力、液滴周围介质对液滴的黏滞阻力和液滴的三相接触线摩擦。

3.1.1 介电湿润驱动力

介电湿润力的产生过程是当驱动电极导通时,在驱动电极和零电极之间会形成一个电场,此时液滴中的自由反离子会和灰水层(特氟龙层)中的自由电荷在电场的作用下相互吸引^[4],而 EWOD 芯片和液滴在驱动电极导通时可以看作是一个电容结构。液滴中的自由反离子和灰水层中的自由电荷在电场作用下相互吸引的过程就相当于 EWOD 芯片和液滴所组成的电容在充电的过程。换句话说,驱动电极导通时在 EWOD 芯片中的灰水层和介电层就会存储了一定的能量,尽管灰水层、水和最上层零电极也组成了一个电容结构,但相对于下极板和液滴所组成的电容该电容值太大,所以电压降都被认作发生在下极板电容上^[5-7]。电容器电容的大小和电容的正对面积成

正比,在微观尺度下根据能量最小化原理,EWOD 芯片和液滴所组成的电容为了达到能量最小状态,液滴就会通过减小位于驱动电极上方接触角使位于该区域上的液滴分散开来,如图 2 所示,右侧灰色电极表示该驱动电极导电,位于其上液滴的接触圆为有效三相接触线(Effective Triple Contact Line, TCL),三相接触线所形成的弦长为 e ,此时驱动电极上方的灰水层在电极导通时会由厌水性变为亲水性,位于其上液滴的接触角就会变小^[11-12]。

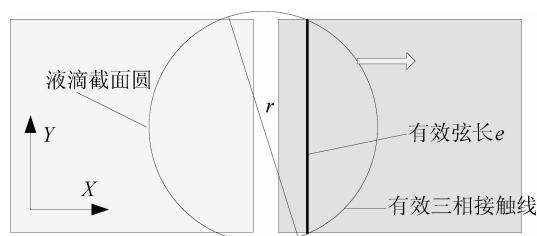


图 2 介电湿润原理示意俯视图

Fig. 2 Top view of schematic diagram of EWOD force generated on effective TCL

系统在达到能量最小状态的过程中会产生一个静电驱动力来驱动液滴进行运动,该力可以用存储在 EWOD 芯片和液滴中的能量进行微分得到^[4-9],忽略垂直方向上的力,用公式表述为:

$$F_{\text{EWOD}} = -\frac{dE}{dx} = \frac{CV^2}{2}e, \quad (2)$$

式中: E 表示存储在系统中总的能量大小, C 表示 EWOD 芯片和液滴所组成的电容大小, V 表示施加在 EWOD 芯片驱动电极上的电压, x 表示液滴运动的方向, e 表示液滴有效三相接触线所形成的弦长。

3.1.2 上下极板对液滴的剪切阻力

上下极板对液滴的剪切阻力与液滴的运动速度有关^[6-9]。当液滴静止时,液滴并不会受到上下极板的剪切阻力,所以上下极板作用在液滴上的剪切力可以对液滴的体积速度在垂直于液滴运动的方向进行微分,表述为公式(3):

$$F_w = \mu A \frac{dv}{dz} = 6\mu \frac{v}{h} \pi R_c^2, \quad (3)$$

式中: μ 表示液滴的黏度, A 表示液滴和上下极板间的接触面面积, v 表示液滴的速度, y 表示在垂直于液滴运动速度方向上某一距离的大小。

3.1.3 液滴周围介质对液滴的黏滞阻力

根据流体力学的基本原理,假设 EWOD 芯片中的液滴在运动过程中是一个刚体,液滴在运动过程中受到来自周围介质的黏性阻力^[6-10]表示为式(4):

$$F_D = \frac{1}{2}(C_D \rho_f v^2) A_C, \quad (4)$$

式中: C_D 表示阻力系数, ρ_f 表示液滴周围介质的浓度, v 表示液滴的运动速度, A_C 表示液滴的截面积。为了简化计算阻力系数,液滴在上下极板间的介质中运动时可以看作是是一个圆柱体,阻力系数的大小和流体的雷诺数有关。阻力系数和液滴周围介质的雷诺数成反比,和 EWOD 芯片结构几何尺寸大小有关的一个常数 a 成正比。当液滴是规则的球形时,常数 a 的大小取值为 24,当把液滴看作是圆柱体时常数 a 的大小为 12,根据以上假设,阻力系数取值为 24^[6]。所以,作用在液滴上的黏滞阻力可以表示为公式(5):

$$F_D = \mu_f \cdot \frac{a}{2} \cdot H \cdot v, \quad (5)$$

式中: μ_f 表示液滴周围介质的黏度, H 表示 EWOD 芯片中上下极板间间距。当液滴周围介质是空气时,相对于三相接触线的摩擦力和黏性力,周围介质对液滴的黏性阻力可以忽略不计。

3.1.4 液滴的三相接触线摩擦力

三相接触线摩擦力分为静态和动态 2 种^[6],其中,静态三相接触线摩擦力是由于 EWOD 芯片表面缺陷造成的,大小与液滴的接触角滞后有关。固液界面取代气固界面后形成的接触角叫作前进角;气固界面取代液固界面后形成的接触角叫作后退角。接触角滞后是指固体表面在一定程度上或者粗糙不平或者化学组成不均匀,这就使得实际物体表面上的接触角并非如杨氏方程所预示的取值唯一,而是在相对稳定的 2 个角度之间变化,液滴的滞后接触角为 $\Delta\theta = \theta_R - \theta_A$, θ_R 表示液滴的前进接触角, θ_A 表示液滴的后退接触角。液滴的静态三相接触线摩擦力大小表示为式(6):

$$F_{CL} = 2k\gamma_{LG} \cos(\Delta\theta) \cdot e = 2k\gamma_{LG} [\cos \theta_R - \cos \theta_A] \cdot e, \quad (6)$$

式中: e 表示液滴有效三相接触线所形成的弦长, k 表示与液滴三相接触线形状有关的一个修正系数, γ_{LG} 表示气液表面张力。

液滴的动态三相接触线摩擦力 F_{CL} 来自

EWOD 芯片表面和液滴接触面间的分子间吸引力。液滴运动时液滴的前进角和后退角与液滴的三相接触线的运动速度成一定的比例关系,而液滴的三相接触线摩擦力与液滴的前进角和后退角有关,所以液滴的动态三相接触线摩擦力与液滴的三相接触线运动速度成一定的比例关系。在相关文献中不同的研究学者对液滴的动态三相接触线摩擦力有不同的定义和解释,比较通用的一个表达式是基于分子间吸引力而得到的^[5-10],表示为式(7):

$$F_{CL,dynamics} = \xi \cdot v^n \cdot L. \quad (7)$$

式(7)是液滴速度 v 的一个幂函数, L 表示液滴三相接触线的长度,在分子动力学中表示接触线摩擦系数,大小为 $0.08 + 0.03 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,幂指数 n 的大小在 0 到 2 之间,假设液滴的三相接触线摩擦力与液滴的速度成线性关系,所以幂指数 n 取值为 1^[6],那么作用在液滴三相接触线上总的摩擦力表示为式(8):

$$F_{CL} = \min(F_{el}, 2k\gamma_{LG}e[\cos \theta_R - \cos \theta_A]_{\max,static}) + (0.08 \pm 0.03 \text{ Pa} \cdot \text{s})4\pi \cdot r \cdot v_x, \quad (8)$$

式中: r 表示液滴截面圆半径。由液滴所受三相接触线摩擦力可知当液滴所受到的介电湿润驱动力 F_{EWOD} 小于某一临界值时,液滴只发生变形,其相对位置不会发生改变,而此时作用在液滴上的介电湿润驱动力 F_{EWOD} 会被作用在液滴上的静态三相接触线摩擦力所抵消。当作用在液滴上的介电湿润驱动力 F_{EWOD} 大于某一临界值时液滴才会发生运动,此时的临界值即为液滴的静态三相接触线摩擦力。同时,当加大驱动电压以增大作用在液滴上的静电驱动力时并不会使液滴的静态三相接触线摩擦力增大,液滴的静态三相接触线摩擦力保持为某一临界值不变^[5-10]。

所以液滴在介电湿润驱动力和各个阻力综合作用下的动能方程^[5-10]表示为式(9):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = ma_1 = F_{EWOD} - F_{CL} - F_w - F_D, \quad (9)$$

式中: a_1 为液滴的加速度。文献[5],[7],[9-10]通过数值仿真的方法得到了液滴在该动能方程下的介电驱动力和各个阻力随驱动时间的变化关系,比较了液滴在运动的过程中,三相接触线摩擦力 F_{CL} ,上下极板对液滴的剪切阻力 F_w 和液滴周围介质对液滴的黏滞阻力 F_D 的大小,得到了这 3 个阻力中的关系可以概括为 $F_{CL} \approx 7(F_w + F_D)$;

另外,液滴所受到的三相接触线摩擦力 F_{CL} 会随着液滴速度的增大而增大。所以,阻碍液滴运动各个的阻力中三相接触线摩擦力所占的比重约为 87.5%,起到了主要的阻碍液滴运动的作用。

文献[2-3]详细比较了不同零电极布局对介电驱动力的影响,得出了悬空零电极布局结构的单极板 EWOD 芯片中的介电驱动力最大。根据以上双极板结构中液滴的动态受力模型分析,下面将对本文中所设计的悬空零电极结构的单极板 EWOD 芯片中的液滴进行受力分析。

3.2 悬空零电极液单极板 EWOD 芯片中液滴的受力分析

悬空零电极与双极板结构相比,在芯片下极板结构,液滴体积,驱动电压等相同的条件下^[10-11],液滴受到的介电驱动力 F_{EWOD} 相同,液滴周围的介质对液滴的黏滞阻力 F_D 相同,所不同的是受到的下极板的剪切阻力减小为式(10):

$$F_w^2 = \mu A \frac{dv}{dy} = 3\mu \frac{v}{h} \pi R_c^2 = \frac{1}{2} F_w^1. \quad (10)$$

由于取消了上极板结构,而悬空零电极表面具有厌水性,直径只有 0.1 mm,那么零电极线对液滴的三相接触线摩擦力可以忽略,所以对比双极板结构,液滴所受到的三相接触线摩擦力为式(11):

$$F_{CL}^2 = \frac{1}{2} F_{CL}^1. \quad (11)$$

悬空零电极结构的单极板 EWOD 芯片中液滴的动能方程表示为式(12):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = ma_2 = F_{EWOD} - \frac{1}{2} F_{CL}^1 - \frac{1}{2} F_w^1 - F_D. \quad (12)$$

用式(9)~(12)得到双极板和悬空零电极单极板 EWOD 芯片中液滴的加速度关系式:

$$a_2 = a_1 + \frac{F_{CL} + F_w}{2m}, \quad (13)$$

式中: a_2 表示悬空零电极单极板 EWOD 芯片中液滴的加速度,所以对比双极板结构的 EWOD 芯片,悬空零电极单极板结构的 EWOD 芯片中液滴所受到的阻力更小,加速度更大,同等驱动电压和驱动时间条件下,相同体积液滴的运动速度会更高;同等液滴速度条件下可以降低 EWOD 芯片的

驱动电压。

4 实验及讨论

4.1 芯片的制作工艺流程

本文利用微机械工艺技术加工了方形驱动电极结构的数字微流控芯片;EWOD 芯片下极板上的驱动电极数为 5 个,大小为 1.5 mm×1.5 mm,驱动电极间距为 20 μ m。文中采用 ITO(Indium-Tin Oxide)玻璃作为介电湿润微流控芯片的基底材料,通过湿法刻蚀技术加工出驱动电极和电极引线。在 ITO 玻璃上旋涂一层光刻胶(NR9-1000),通过光刻,将所需的电极形状刻在光刻胶上,然后通过显影,有光刻胶涂覆的地方不能被 ITO 刻蚀液刻蚀掉,刻蚀后剩下的 ITO 膜即为所需要的电极。本文通过旋涂 SU-8(T3001, Micro Chem, 3 250 r/min, 30S) 做为芯片的介电层材料, SU-8 的介电常数为 3.2。在已刻好电极的 ITO 玻璃上均匀涂一层 SU-8,通过旋涂,前烘(95 $^{\circ}$ C, 1 min),后烘(95 $^{\circ}$ C, 2 min),显影,得到 SU-8 介电层的厚度为 1 μ m^[13]。

本文采用电子氟化液(Fluorinert FC-40)作为溶剂稀释特氟龙(Teflon AF1600)溶液(5:1, 溶剂体积:溶质体积),得到浓度为 1%的旋涂液;以转速 3 000 r/min 旋涂 60 s,在热板上 160 $^{\circ}$ C 烘烤 10 min,得到 50 nm 左右厚度的厌水层。其中,上极板直接在 ITO 玻璃表面旋涂一层特氟龙涂层作为厌水层,制作工艺和下极板厌水层的制作工艺一样。然后用双面胶带(3M)作为上下极板连接在一起,单层双面胶带的厚度是 50 μ m,将不同层数的双面胶带层叠起来就可以获得不同的厚度,本文用 6 层双面胶层叠,上下极板间的间距 $H=300 \mu$ m。另外,悬空零电极采用直径为 0.1 mm 的单条铜导线,并在其表面旋涂一层厚约为 50 nm 的特氟龙作为厌水层。

在进行双极板实验时,使用微量注射器将去离子水液滴放置在芯片下极板驱动电极上,由于芯片表面有特氟龙厌水层的存在,液滴的初始接触角 θ_0 可以达到约为 120 $^{\circ}$,然后用一定层数的双面胶带将上极板和下极板组合在一起构成“三明治”结构。由于上极板表面也涂有特氟龙厌水层,不会影响下极板液滴的初始接触角大小。本文将信号发生器产生的信号电压经压电陶瓷驱动电源

放大产生驱动液滴所需的电压,频率为 100 Hz,将组合在一起的介电湿润芯片上极板接,下极板驱动电极引线接交流电压。去离子水液滴的运动情况由 CCD 照相机进行记录。在进行悬空零电极结构的实验时,先把一定体积的去离子水放置在下极板驱动电极上,然后把铜导线的两端用一定层数的双面胶带进行固定并保证铜导线与液滴能够接触。

4.2 液滴操控实验及讨论

为了减小液滴的挥发对实验数据的影响,进行每组实验时都会更换新的液滴,液滴的体积都为 $1 \mu\text{L}$,每组实验都进行 5 次,其他实验条件相同。

图 3 是芯片的最小驱动电压和极板间间距的关系,为了与双极板结构进行对比分析,其中悬空零电极结构中悬空零电极与下极板的距离在本文中看作是上下极板间间距。驱动电压值为交流电的有效值。由图 3 可知,零电极的空间位置对悬空零电极结构的 EWOD 芯片的最小驱动电压没有影响,而双极板结构 EWOD 芯片中上下极板间间距对芯片的最小驱动电压有很大的影响,间距越大最小驱动电压就会越大,这是因为同等体积的液滴在极板间间距越小的情况下液滴与极板的接触圆周长就会越大,三相接触线摩擦力就会越大。

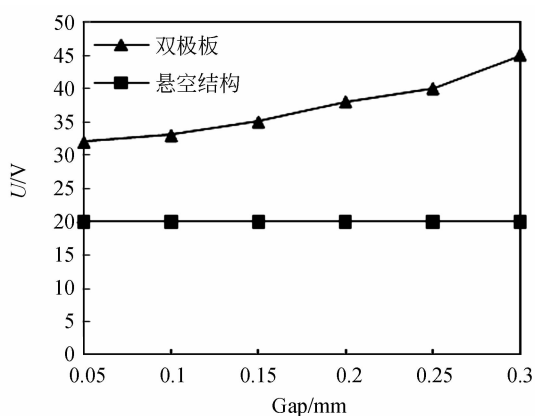


图 3 最小驱动电压和极板间间距的关系

Fig. 3 Minimum driving voltage versus the gap between the plates

图 4 所示为 2 种结构中所驱动液滴的体积和驱动该体积时的最小驱动电压关系。图 4 中双极板间间距为 $300 \mu\text{m}$,悬空零电极距离下极板的

距离也同为 $300 \mu\text{m}$ 。由图 4 可知,在液滴体积逐渐增大的过程中,悬空零电极结构的 EWOD 芯片的最小电压增加量很小,而双极板结构的电压增加量很大。例如,当体积从 $3 \mu\text{L}$ 增大到 $3.5 \mu\text{L}$ 时,最小驱动电压从 65 V 增大到 85 V。这是因为液滴的体积越大,液滴与极板的接触圆周长就会越大,而液滴的有效三相接触线的增加量要远小于接触圆周长的增加量,所以就会出现体积越大所需的最小驱动电压就会越大。

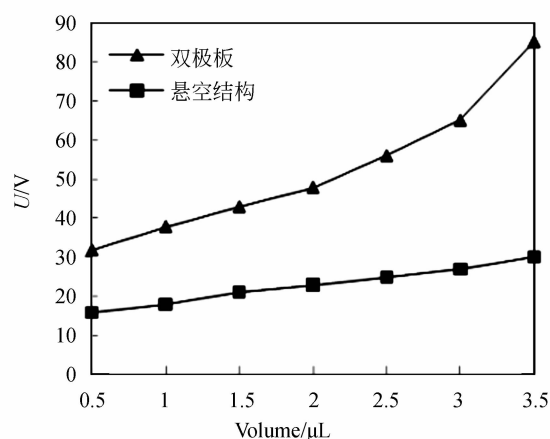


图 4 液滴的体积和驱动该体积的最小驱动电压的关系

Fig. 4 Minimum driving voltage versus the volume of droplets

图 5 所示为的液滴的运动速度和驱动电压关系。图 5 中两种结构中所驱动的液体积为 $1 \mu\text{L}$,双极板间间距为 $300 \mu\text{m}$,悬空零电极距离下极板的距离也同为 $300 \mu\text{m}$ 。由图 5 可知两种结构中

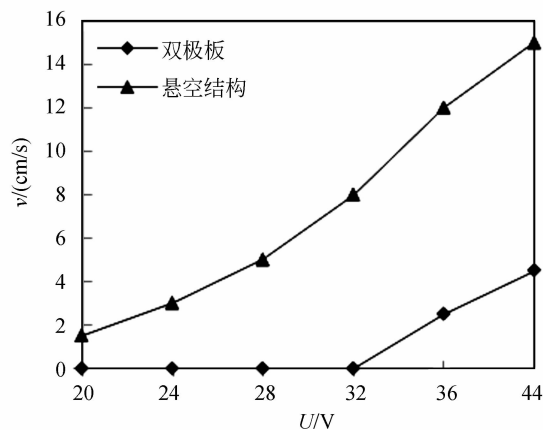


图 5 液滴运动速度和驱动电压的关系

Fig. 5 Driving voltage versus the velocity of droplets

液滴的运动速度都会随着驱动电压的增大而增大;当驱动电压有效值达到 44 V 时,悬空零电极结构中液滴的速度可以达到 15 cm/s,此时液滴运动状况视频截图俯视图如图 6 所示。如图 6 中(a)图为液滴运动的初始时刻,液滴呈现静止状态;(b)图为液滴刚开始运动的时刻,可以看到该时刻液滴右边部分先开始运动;(c)图所示为某时刻液滴运动瞬时形态,该图很明显的显示出液滴呈现高速运动状态;(d)图为液滴运动到了加电驱动电极的上方,此时液滴运动了一个驱动电极的长度。

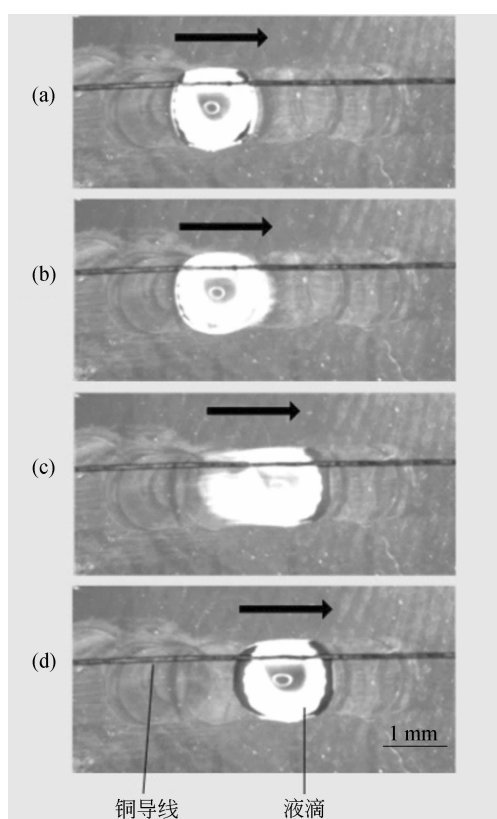


图 6 液滴运动视频截图俯视图

Fig. 6 Top view of sequential images of 1 μ L droplet transportation

通过理论分析和实验验证,分析总结出悬空零电极单极板 EWOD 芯片相对于双极板结构的 EWOD 芯片所具有的独特优点归纳为如下 6 点:

(1)在保证与液滴接触的前提下,悬空零电极导线可以任意布置而不会影响芯片对液滴的驱动效果。

(2)可驱动液滴的体积范围更大。

(3)液滴运动速度更快,可以达到 15 cm/s,在介电层不被击穿的前提下,加大驱动电压该速度还可以增大。

(4)芯片中进样和取样简单易操作。

(5)能够更好地保证液滴初始时刻的相对位置,从而有利于液滴的驱动效果。

(6)当液滴中包含有蛋白质和细胞等活性物质时便于进行光学检测。

悬空零电极单极板 EWOD 芯片的缺点概括为两点:第一,悬空零电极是单根铜导线,铜导线偏软,两端不能够轻易被固定,这样就很容易使铜导线弯曲,弯曲的导线就会产生一定的阻力进而影响液滴的运动。因而需要把铜导线两端固定得当,用力适当,就可以避免铜导线的弯曲。第二,悬空零电极的结构设计不适用驱动电极布局较复杂的 EWOD 芯片,因为要保证成功驱动液滴就需要悬空的零电极导线位于驱动电极的上方,而这不利于悬空零导线的布局。

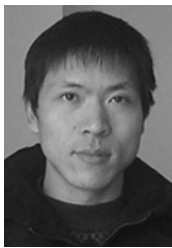
5 结 论

本文理论分析了双极板 EWOD 芯片中液滴的受力情况,建立了液滴的动能方程,并以此推导出了悬空零电极单极板 EWOD 结构芯片中液滴的受力情况和动能方程。对比分析了双极板和悬空零电极 EWOD 芯片中液滴所受到的阻力,结果显示:悬空零电极单极板 EWOD 芯片中液滴受到的三相接触线摩擦力和液滴周围介质对液滴的黏滞阻力减小到了双极板结构中的一半,而三相接触线摩擦力在液滴运动的过程中约占全部阻力的 87.5%,所以悬空零电极单极板 EWOD 结构的芯片可以在不改变介电驱动力的情况下通过降低芯片上三相接触线摩擦力的方式来提高液滴的运动速度,从而达到降低芯片驱动电压的目的。通过一系列实验,分析得到了悬空零电极单极板 EWOD 结构的芯片驱动同等大小体积的液滴所需的电压更小;同等液滴体积和同等驱动电压下,悬空零电极 EWOD 芯片上液滴的运动速度更大,本文中 1 μ L 的液滴在 44 V 的有效驱动电压时速度可以达到 15 cm/s,所以对要求利用高速液滴的场合有一定应用价值。

参考文献:

- [1] MAIS J J, MICHAEL S B, KAMLESH D P. Digital microfluidics: a versatile tool for applications in chemistry, biology and medicine [J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12: 2452-2463.
- [2] MOHAMED A, PHILIP P, AARON R W. Optimization of device geometry in single-plate digital microfluidics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(9), 094506.
- [3] BERTHIER J, CLEMENTA P, FOUILLET Y, *et al.*. Computer aided design of an EWOD microdevice [J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, A127: 283-294.
- [4] PENG CH, FANG B Y, WE Z. Influence of electrolytes on contact angles of droplets under electric field [J]. *Analyst*, 2013, 138:2372-2377.
- [5] BIDDUT B. Study of droplet splitting in an electrowetting based digital Systems [D]. Okanagan: University of British Columbia, 2012.
- [6] HERMAN O, BART V, MARTINE B. Modeling and control of electrowetting induced droplet motion [J]. *Micromachines*, 2012, 3:150-167.
- [7] AHMADI A, NAJJARAN H, HOORFAR M, *et al.*. Two-dimensional flow dynamics in digital microfluidic systems[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19: 065003.
- [8] CHEN CH H, TSAI S L, JANG L SH, *et al.*. Effects of gap height, applied frequency, and fluid conductivity on minimum actuation voltage of electrowetting-on-dielectric and liquid dielectrophoresis [J]. *Sensors and Actuators: Chemical*, 2011, B 159:321-327.
- [9] BIDDUT B, HONMAYOUN N. Droplet position control in digital microfluidic systems [J]. *Biomed Microdevices*, 2010, 12: 115-124.
- [10] BIDDUT B, HOMAYOUN N. Simulation of droplet position control in digital microfluidic systems [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2010, 132:014501.
- [11] CHANG J H, KIM D S, JAMS J. Simplified ground-type single electrowetting device for droplet transport [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2011, 6(3):402-407.
- [12] CHANG J H, JAMS J P. Twin-plate electrowetting for efficient digital microfluidics [J]. *Sensors and Actuators*, 2010, B 160: 1581-1585.
- [13] 许晓威,陈立国,孙立宁.半月形电极微液滴驱动的微流控芯片[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2557-2565.
XU X W, CHEN L G, SUN L N. Micro-droplet driven digital microfluidic device with crescent electrode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2557-2565. (in Chinese)

作者简介:



许晓威(1984—),男,河南息县人,博士研究生,2008年于东南大学获得学士学位,主要从事数字微流控芯片方面的研究。E-mail: 851597503@qq.com

导师简介:



陈立国(1974—),男,辽宁葫芦岛人,教授,博士生导师,主要从事微纳米驱动及微操作机器人技术、微流控与微系统技术等方面的研究。E-mail: clg@hit.edu.cn

(本栏目编辑:马健)
(版权所有 未经许可 不得转载)