

文章编号 1004-924X(2009)05-1093-06

行波电渗微流体驱动理论模型与实验

姜洪源¹, 杨胡坤¹, 敖宏瑞¹, RAMOS Antonio²

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 西班牙塞维利亚大学 电子电磁学院, 塞维利亚 41012)

摘要: 为了研究行波电渗(TWEO)微流体驱动,在封闭的微通道内建立了 TWEO 微流体驱动模型,并进行了仿真和实验研究。根据 TWEO 驱动原理,分别建立了封闭通道内 TWEO 微流体驱动电场及流场的数学模型,并对电场及流场问题进行了求解,流场的仿真结果说明了实验测量通道高度 2/3 处速度的合理性。最后,分析了实验和仿真结果并确定了容抗比例系数。实验及仿真结果表明:电导率分别为 1.5 mS/m、7.7 mS/m、16.9 S/m 的 KCl 溶液的容抗比例系数分别为 0.05、0.035、0.025,而且电导率与容抗比例系数呈线性关系。结果为进一步研究 TWEO 及其应用提供了理论基础及实验方法。

关键词: 行波电渗;理论模型;微流体驱动;仿真

中图分类号: TH38 **文献标识码:** A

Theoretical model and experiments for TWEO pumping microflow

JIANG Hong-yuan¹, YANG Hu-kun¹, AO Hong-rui¹, RAMOS Antonio²

(1. School of Electromechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Departament of Electronics and Electromagnetism, University of Seville, Seville 41012, Spain)

Abstract: To explore Traveling Wave Electroosmotic (TWEO) pumping microflow, a TWEO pumping model is established in a closed microchannel, and simulation and experiments are presented. Based on the TWEO driving mechanism, the mathematic models of an electric field and a flow field in the closed microchannel are established respectively to solve the electric field and flow field problems. From the flow field simulation results, the measuring velocity on 2/3 of the microchannel height in experiments is proved to be reasonable. The experiment and simulation are undertaken to determine the capacitance impedance coefficients. The results show that for KCl solution with conductivities of 1.5 mS/m, 7.7 mS/m and 16.9 S/m, its capacitance impedance coefficients are 0.05, 0.035 and 0.025, respectively, and conductivities of the solution are proportional to the capacitance impedance coefficients linearly. The results can offer a theoretical and experimental base for further research and applications of the TWEO.

Key words: traveling wave electroosmotic; theoretical model; pumping microflow; simulation

收稿日期:2008-06-05;修订日期:2008-08-15.

基金项目:高等学校学科创新引智计划资助项目(No. B07018)

1 引言

精确控制微小体积流体是微泵^[1]、芯片实验室(lab-on-a-chip)及微全分析系统(μ TAS)中的重要要求^[2]。压力驱动机械式微泵^[1,3,4]由于存在可致动部件,在微泵使用的可靠性等方面依然存在很多问题需要解决^[5]。随着技术的发展,人们提出了电动效应^[6]驱动微流体的非机械式微泵,如直流电渗微泵、电热微泵、交流电渗非对称电极微泵等。但是在直流电渗微泵及电热微泵中,由于该类微泵需要极高的直流驱动电压,相对于芯片实验室系统而言,其电极很难与芯片实验室这类微小系统集成。在此基础上,Ramos 等学者提出了交流电渗非对称电极微泵^[7],文献[8]对该种泵的驱动原理及仿真进行了分析。研究表明,一种以行波信号为驱动源的对称电极交流电渗驱动比非对称电极交流电渗驱动效率更高,而且其流线更平坦^[9]。因此,研究行波对称电极交流电渗驱动更具有理论意义和经济价值。

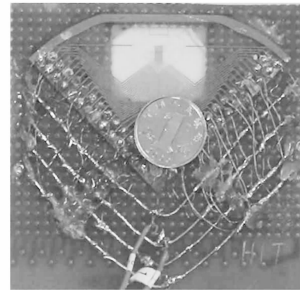
行波电渗驱动原理与非对称电极交流电渗驱动原理类似,即在两个假设的前提下,驱动信号电压足够低,不至于电极与溶液产生电解反应;驱动信号频率足够低,使得双电层中的电荷能够达到准平衡。但是在行波电渗驱动中,是行进波产生的行进电场驱动双电层的电荷做定向迁移来形成电渗流;而在非对称电极交流电渗驱动中,是由于非均匀电场作用在双电层电荷上来产生电渗流,这是两者的主要区别^[10]。

在电渗驱动理论中,学者往往把电极表面感应的双电荷层假设成一个理想电容,即该电容的电荷按线性分布^[8,10-12]。但是根据 Gouy-Chapman-Stern 双电层模型^[13],扩散层的电势降与电荷的分布规律满足 Boltzmann 分布,是一个典型的非线性问题。为此,笔者建立了行波电渗双电层模型,对微通道内的行波电渗驱动进行了电场、流场仿真分析,并在实验研究的基础上验证了本文的理论研究成果。

2 行波电渗实验方法

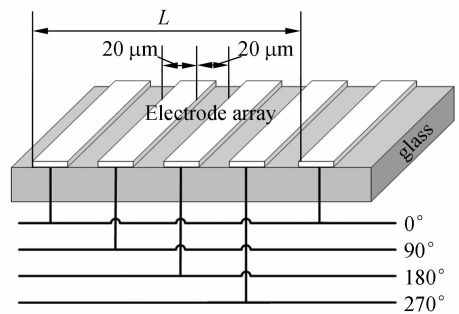
行波电渗微流体驱动芯片是在基底材料(玻璃)上通过 MEMS 加工工艺沉积出一系列的等宽

电极。本文实验中所用的电极及电极间距均为 $20\ \mu\text{m}$,其中每个电极包括 $10\ \text{nm}$ 厚的 Ti 层(黏结层)和 $100\ \text{nm}$ 厚的 Pt 层,如图 1(a)所示。实验过程为:在芯片电极上盖上一封闭的 PDMS 微通道,微通道内注入混有直径为 $500\ \text{nm}$ 荧光粒子电解质溶液(KCl),再盖上一个盖玻片。用 TGA1244 四相信号发生器为信号源,其电路连接图如图 1(b)所示,4 个电极为一组,两者之间的电势信号相位差为 90° 。实验时,通过输入不同信号参数的行波信号,在荧光显微镜下记录不同信号下的视频文件,采用粒子图像测速法(PIV)对视频文件进行数据处理,即可获得行波电渗驱动微流体的速度。



(a) 芯片

(a) Chip



(b) 电路

(b) Circuit

图 1 芯片及电路

Fig. 1 Chip and circuit

3 行波电渗仿真

由于电极长度远大于电极宽度,对行波电渗微流体驱动数值仿真可以简化为二维问题。对行波电渗微流体驱动理论进行非线性数值仿真分

析与线性分析过程一致,同样需要对电场问题和流场问题进行数值求解。

3.1 电场问题

以上文所述的两个基本假设为前提,则在电极双电层外侧的体溶液可假设成一理想的电阻,电势在体溶液中的分布满足 Laplace 方程

$$\nabla^2 \phi = 0. \quad (1)$$

求解上述偏微分方程,需在微通道内确立电极表面、基底、微通道上表面及通道两侧的边界条件。由于笔者采用电极阵列芯片,微通道两侧可采用周期性边界条件。

图 2 是行波电渗电极表面双电层 Gouy-Chapman-Stern 模型,其中 V 为施加在电极上的电势, ζ 为扩散层中的 zeta 电势, ϕ 为双电层外侧上的电势。

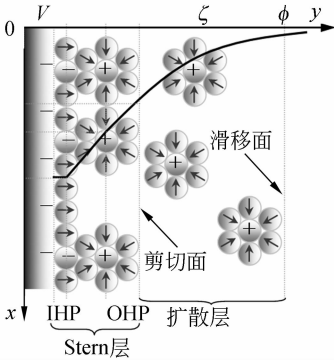


图 2 Gouy-Chapman-Stern 双电层模型
Fig. 2 Gouy-Chapman-Stern EDL model

施加在电极上的输入信号电势可以表示为

$$V = V_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} k_0), \quad (k_0 = 0, 1, 2, 3, 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

通过相位和欧拉变换,作用在一组电极上的电势可以用复数表示为 $V_0, iV_0, -V_0, -iV_0$ 。

假设电极表面的电荷密度为 q , Stern 层电容为 C_s , 扩散层电容为 C_d 。根据扩散层中电势降和电荷密度满足 Boltzmann 分布及在双电层中的电荷满足电荷守恒方程,则在电极上存在边界条件

$$V - \phi = \frac{q}{C_s} + \zeta, \quad (3)$$

$$\zeta = 2 \cdot \frac{D}{\mu} a \sinh\left(\frac{q\mu}{2C_d D}\right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\sigma \nabla \phi, \quad (5)$$

式中 D 为溶液的扩散系数, μ 为电荷迁移率, σ 为

溶液的电导率。

把式(4)按 Maclaurin 公式展开,取前 3 项,有

$$\zeta = 0 + \frac{q}{C_d} + 0 = \frac{q}{C_d}, \quad (6)$$

把式(6)代入式(3)有

$$V - \phi = q \frac{C_s + C_d}{C_s C_d}, \quad (7)$$

式(5)通过复数变换,有

$$i\omega q = -\sigma \cdot \mathbf{n} \cdot \nabla \phi, \quad (8)$$

式中 \mathbf{n} 为电极表面上的单位法向量。

而整个双电层电容可通过 $C_T = \frac{\epsilon}{\lambda_D}$ 求得^[14], 其中 λ_D 为 Debye 长度, ϵ 为溶液的介电常数。令扩散层的容抗与整个双电层容抗的比例系数为 δ , 则 $\delta = \frac{(i\omega C_d)^{-1}}{(i\omega C_d)^{-1} + (i\omega C_s)^{-1}} = \frac{C_s}{C_s + C_d}$, 由此可以看出 $\delta < 1$ 。结合式(7)和式(8),即可得到 Laplace 方程在电极上的边界条件

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \phi - iC_T \cdot \frac{\omega}{\sigma} \cdot \phi = -iC_T \cdot \frac{\omega}{\sigma} V. \quad (9)$$

基底与通道上表面为绝缘层,其上边界条件为

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \phi = 0. \quad (10)$$

3.2 流场问题

微通道内的流体为不可压缩流体,则通道内的流体流动满足 Navier-Stokes 方程,即满足流体流动条件的运动方程

$$\eta \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p = 0, \quad (11)$$

和连续方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (12)$$

其中 η 为液体粘度。

对以上问题的求解,同样需要设置电极、基底、微通道上表面及两侧的边界条件。在基底及微通道上表面,由于没有流速产生,因此为无滑移边界条件,在两侧为周期性边界条件。在电极上,根据电渗流流速计算公式,在电极表面电渗流流速为^[9]

$$\mathbf{u}_{\text{eof}} = -\frac{\epsilon \zeta \mathbf{E}_t}{\eta}, \quad (13)$$

式中 \mathbf{E}_t 为输入信号的电势在电极表面产生的切向电场强度, ζ 可由式(6)和式(7)得到,即 $\zeta = \delta(V - \phi)$ 。则在一个周期内电极表面电渗流的平均流速为

$$\overline{\mathbf{u}_{\text{cof}}} = -\frac{\partial \epsilon}{2\eta} \text{Re}((V-\phi) \cdot \mathbf{E}_i^*), \quad (14)$$

式中 E_i^* 为 E_i 的共轭复数, ϵ 为介电常数, $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部。

3.3 封闭通道内的流场问题

实验研究发现, 封闭微通道内的行波电渗微流体驱动所产生的流场在微通道内分为两层, 这两层的速度方向相反。经理论分析发现, 行波电渗产生的微流体流动为单向流, 但由于实验中所用的是封闭的微通道, 该单向流遇到微通道管壁时会反向流动, 即所谓的 Poiseuille 流。根据两者流动产生的流体流量相等, 可以确定 Poiseuille 流场函数。

设 Poiseuille 流场函数为

$$\mathbf{u}_p = Ay^2 + By + C, \quad (15)$$

式中 A, B 和 C 为待定系数。根据 Poiseuille 流函数的特点, 在通道上下边界(即 $y=0$ 及 $y=h$ 处)速度为 0; 此外, 行波电渗产生的流体流量与 Poiseuille 流产生的流量相等, 即

$$\int_0^h \mathbf{u}_p dy + \int_0^h \mathbf{u} dy = 0, \quad (16)$$

式中 h 为通道高度。由此 3 个条件可以确定 A, B 和 C 的取值。

通过以上分析, 在一封闭的微通道内, 行波电渗驱动微流体产生的流场为 $\mathbf{u} + \mathbf{u}_p$ 。仿真结果如图 3 所示, 图中箭头表示速度的方向及大小。

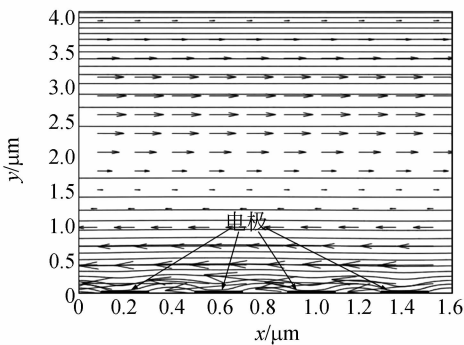


图 3 行波电渗驱动微流体流场

Fig. 3 Flow field of TWEOP pumping flow

从行波电渗驱动微流体流场仿真结果可以看出, 在靠近电极的微通道下边界, 流线呈波浪式向前推进, 远离下边界, 流线呈直线状态, 这与文献[5]观察到的实验结果相一致, 而且在通道高度为 $2h/3$ 处速度最大, 为实验数据测量提供了理论依据。与非对称电极交流电渗微流体驱动相比

较, 行波电渗微流体驱动的流线更加平坦。

4 实验与仿真结果分析

选取电导率分别为 1.5 mS/m, 7.7 mS/m 和 16.9 mS/m 的 KCl 溶液作为被驱动溶液进行了实验分析。图 4 是信号输入电压为 1 V, 信号频率不同时, 在微通道高度 $2h/3$ 处测量出的电渗流速图。

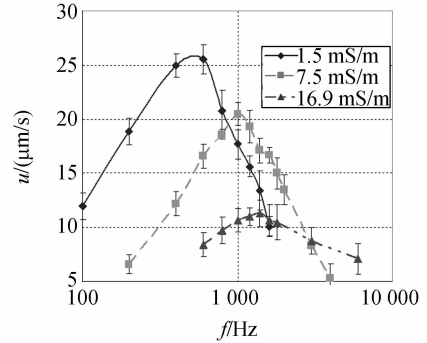


图 4 电渗流速-频率实验曲线

Fig. 4 Experiment of EO flow velocity versus frequency

行波电渗驱动仿真中, 取 $\eta = 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, $\epsilon = 7.1 \times 10^{-10} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$, $\lambda_D = 30 \text{ nm}$, 其他条件与实验条件一致。

实验与仿真结果显示, Pt 行波电极驱动不同电导率的溶液, 容抗比例系数 δ 与电导率 σ 存在表 1 所示的关系。

表 1 容抗比例系数 δ

Tab. 1 Capacitance impedance coefficient δ

U/V	$\sigma / (\text{mS/m})$		
	1.5	7.7	16.9
1.00	0.056	0.038	0.025
1.25	0.054	0.035	0.025
1.50	0.047	0.035	0.025
1.75	0.045	0.035	0.027
2.00	0.040	0.033	0.021

从表 1 中可以看出, 对于一定电导率的溶液, 容抗比例系数可以认为是固定不变的, 如对于电导率分别为 1.5 mS/m, 7.7 mS/m 和 16.9 S/m 的 KCl 溶液的容抗比例系数可取为 0.05、0.035 和 0.025。更多实验研究发现, 电导率与容抗比

例系数呈线性关系,同时可发现行波电渗微流体驱动适合于电导率较低的流体。选定容抗比例系数数值,可得到如图5所示的数值仿真结果。

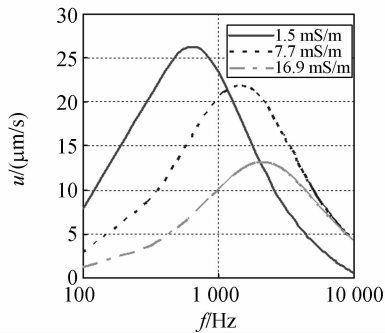


图5 电渗流速度-频率仿真曲线

Fig. 5 Simulation of EO flow velocity versus frequency

通过分析比较图4和图5发现,不同电导率溶液在不同频率信号的驱动下,速度与频率的关系可近似为正态分布,电导率越高,速度达到最大

参考文献:

- [1] 刘国君,程光明,杨志刚.一种压电式精密输液微泵的试验研究[J].光学精密工程,2006,14(4):612-616.
LIU G J, CHENG G M, YANG ZH G. Experimental research on a piezoelectric micro-pump for precision pumping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 612-616. (in Chinese)
- [2] STONE H A, STROOCK A D, AJDARI A. Engineering flows in small devices: microfluidics towards a lab-on-a-chip [J]. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2004(36):381-411.
- [3] 孙晓锋,杨志强,刘晓论,等.整体开启阀与悬臂梁阀压电泵性能研究[J].光学精密工程,2006,14(4):648-651.
SUN X F, YANG ZH Q, LIU X L, et al.. Performance research on piezoelectric pumps based on holistic opening valve and cantilever valve [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 648-651. (in Chinese)
- [4] 吴丽萍,程光明,曾平,等.单振子双腔体无阀压电泵结构设计与机理分析[J].光学精密工程,2007,15(7):1044-1048.
WU L P, CHENG G M, ZENG P, et al.. Structural design and mechanism analysis of a valveless piezoelectric pump with single bimorph and double

值时对应的频率越大,但速度最大值越来越小。比较实验与数值仿真的计算结果,两者的速度-频率曲线相近,验证了本文中行波电渗理论的合理性。

5 结论

本文根据 TWEO 微流体驱动原理及电极表面双电层电荷分布的特点,首先说明了 TWEO 微流体驱动的实验方法,然后分析了 TWEO 微流体驱动的数学模型的建立过程,并对 TWEO 电场及流场问题进行了仿真分析,说明了实验测量微通道高度 $2/3$ 处的速度的合理性。仿真和实验结果表明:对于电导率分别为 1.5 mS/m , 7.7 mS/m 和 16.9 mS/m 的 KCl 溶液,其容抗比例系数分别为 0.05 、 0.035 和 0.025 ,而且电导率与容抗比例系数呈线性关系。本文的实验为 TWEO 的进一步研究及应用提供了方法和手段。

- chambers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1044-1048. (in Chinese)
- [5] SHOJI S, ESASHI M. Microflow devices and systems [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1994(4):157-171.
- [6] 张鹏,左春怪,周德义.矩形微流道内流体电动效应研究[J].光学精密工程,2007,15(4):522-528.
ZHANG P, ZUO CH CH, ZHOU D Y. Study on characteristics of liquid flow through a rectangular microchannel with electrokinetic effects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 522-528. (in Chinese)
- [7] RAMOS A, MORGAN H, GREEN N G, et al.. AC electrokinetics: a review of forces in microelectrode structures [J]. *J Phys D: Appl Phys.*, 1998, 31: 2338-2353.
- [8] 姜洪源,杨胡坤,闫辉,等.交流电渗微泵理论模型与数值仿真[J].哈尔滨工程大学学报,2007,28(2):1367-1370.
JIANG H Y, YANG H K, YAN H, et al.. Theoretical model and numerical simulation on AC EO micropumps [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(2):1367-1370. (in Chinese)
- [9] GARCIA-SÁNCHEZ P, RAMOS A, et al.. Experiments on AC electrokinetic pumping of liquids using arrays of microelectrodes [J]. *IEEE Trans-*

actions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(3):669-677.

- [10] RAMOS A, MORGAN H, GREEN N G, *et al.*. Pumping of liquids with traveling-wave electroosmosis [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(8):1-8.
- [11] RAMOS A, GONZÁLEZ A, CASTELLANOS A, *et al.*. Pumping of liquids with AC voltages applied to asymmetric pairs of microelectrodes [J].

Physical Review E, 2003, 67(62):05630211-056302111.

- [12] MORGAN H, GREEN N G. *AC electrokinetics: colloids and nanoparticles* [M]. BALDOCK: Research Studies Press LTD., 2003:86-105.
- [13] RAMOS A, MORGAN H, GREEN N G, *et al.*. AC electric field induced fluid flow in microelectrodes [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1999, 217: 420-422.

作者简介:



姜洪源(1960—),男,黑龙江哈尔滨人,教授、博士生导师,主要从事交流电动微流体驱动、粒子分离技术、金属橡胶和 FES 技术等方面的研究。E-mail: jhy_hit@sina.com



敖宏瑞(1973—),男,辽宁朝阳人,博士,讲师,主要从事微机械动力学、振动与冲击防护、微纳米摩擦学等方面的研究。E-mail: hongrui_ao@yahoo.com



杨胡坤(1975—),男,安徽宿松人,博士,主要从事微流体驱动与油气田地面工程及采油节能技术。E-mail: hk_yang@163.com



Antonio Ramos(1965—),西班牙 Cadiz 人,博士,教授,主要从事电液动力学方面的研究。E-mail:ramos@us.es

(本栏目编辑:李树军)

●下期预告

特气室温红外探测器的噪声分析

戴天明,徐 晨,宋义超,李晓波,邓 琛

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院 北京市光电子技术实验室,北京 100124)

由 MEMS 技术制备的特气室温红外探测器的噪声主要包括温度噪声、机械热噪声和背景噪声;从理论上建立了器件的基本热模型,并推导得到器件的等效热容和等效热导分别为 $8.1 \mu\text{J}/\text{K}$ 和 $1.0 \times 10^{-3} \text{ W}/\text{K}$,得到其温度噪声约为 $1.73 \times 10^{10} \text{ W}/\text{Hz}^{1/2}$;通过器件的工作机理和能量均分原理,推导得到热机械噪声的等效噪声功率约为 $9.96 \times 10^{-9} \text{ W}/\text{Hz}^{1/2}$;器件的背景噪声约为 $9.03 \times 10^6 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。从而推导得出了器件的归一化探测率。器件的噪声中热机械噪声为主要噪声源,大小主要由浓硼硅薄膜的机械性能和器件结构决定,可以通过增大薄膜厚度,减小薄膜面积,从而增加薄膜的特征频率的办法来减小器件受外界振动的影响,但以降低器件的灵敏度为代价。另外环境振动噪声也对器件的影响很大。为了减小由于外界气压和温度变化的影响,提出了一种新型的双腔结构来减小和平衡外界环境变化引入的噪声。