文章编号:1004-2474(2016)05-0811-04

基于声表面波油包水微液滴分裂研究

王保成¹,付相庭²,章安良³

(1. 襄阳职业技术学院 电子信息工程学院,湖北 襄阳 441021;2. 宁波大学 微纳电子系统研究所,浙江 宁波 315211;3. 常州工学院 电气与光电子工程学院,江苏 常州 213002)

摘 要:提出了声表面波(SAW)实现油包水微液滴的分裂方法,并在 128°YX-LiNbO。基片上研制了分裂油包 水微液滴的微器件。在压电基片上采用微电子工艺制作叉指换能器,其激发的 SAW 部分作用于油包水微液滴,瞬 间降低电信号幅度,油相内水微液滴在惯性力作用下发生分裂,油相微液滴由于较大的表面张力发生形变而不分 裂。以石蜡油包裹蓝色水相微液滴为研究对象,进行了油包水微液滴分裂实验和理论分析,结果表明,当电信号从 功率为 12.3 dBm 瞬间关断时,可实现油相内水微液滴分裂。

关键词:声表面波(SAW);液滴;叉指换能器(IDT);分裂;辐射中图分类号:TN371文献标识码:A

Study on Splitting the Aqueous Droplet Encapsulated by Oil Based on Surface Acoustic Wave

WANG Baocheng¹, FU Xiangting², ZHANG Anliang³

School of Electronic Information Engineering, Xiangyang Vocational and Technical College, Xiangyang 441021, China;
 Institute of Micro and Nano Electronic System, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

3. School of Electrical and Photoelectronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: A method for splitting the aqueous droplet encapsulated by an oil droplet was presented in this paper. A micro-device on $128^{\circ}YX$ -LiNbO₃ substrate has been developed for splitting the aqueous droplet encapsulated by an oil droplet. An interdigital transducer for exciting surface acoustic wave was fabricated on the $128^{\circ}YX$ -LiNbO₃ substrate using micro-electric technology. The aqueous droplet would be split by instantaneously decreasing the power of the electrical signal due to the inertia force from surface acoustic wave, while the oil droplet was not split due to greater surface tension than the acoustic radiation force. The theoretical analysis and splitting experiments of a blue aqueous droplet encapsulated by a paraffin oil droplet were carried out. Results showed that the aqueous droplet in the oil droplet could be successfully split when the electrical signal with 12.3 dBm was suddenly switched off.

Key words: surface acoustic wave(SAW); droplet; interdigital transducer(IDT); split; radiation

0 引言

微流控芯片可将常规的生化分析实验室操作单 元集成在微小的芯片上,它极大减少了分析中的试剂 消耗量,缩短了生化分析时间,并降低了分析中人为 引入误差,在食品分析、生化检测、生物技术和临床分 析等领域,日益获得广泛应用^[1-4],在如硅、玻璃、有机 聚合物和纸等多种基片上实现了不同分析功能的微 流控芯片。这些基片在透光性、生物相容性和工艺简 单性等方面都各有其特点,并适用于不同应用场合。 但这些基片本身无法实现微流操作,需外加泵等驱动 源才能实现微流输运、混合、分离等基本操作,给微流 分析增加了体积和设备成本^[5]。压电微流器件可解 决基片上微流操作问题,它采用基片上叉指换能器 (IDT)激发的声表面波(SAW)实现微流混合^[6]、微流 输运^[7]、细胞分选^[8]、微粒或生物微粒富集^[9-10]等微 流操作,越来越受微流控学工作者的青睐。但与其他 材料为基底的微流控芯片一样,压电微流器件中压电 基片上微流在 SAW 声辐射作用下蒸发现象较严重, 影响了微流分析精度。油包微液滴可解决压电微流 器件微流蒸发问题,在压电微流分析中获得应用^[11]。

收稿日期:2015-08-01

基金项目:常州工学院科研基金资助项目(YN1404);常州工学院大学生创新基金资助项目(J140029);浙江省重点学科基金资助项目 (Xkl11077)

作者简介: 王保成(1974-), 男, 湖北宜城人, 副教授, 硕士, 主要从事压电微流器件和计算机应用技术等方向的研究。章安良(1968-), 男, 浙江临海人, 教授, 博士, 主要从事压电微流器件的研究。

)

在压电微流分析中,需将油包的水微液滴进行 分裂,以实现高通量、小剂量的微流分析。目前,有 关压电基片上油相内水微液滴分裂尚未见报道。文 献[12]指出,在微流控芯片的微流通道内,油相内微 液滴分裂法(如 T 型微通道法^[12])采用油相微流体 在微通道内流动时使水相流体产生剪切力,实现微 流体分裂。Link等^[13]采用微通道内放置微方形障 碍物,使微通道内水相微液滴在障碍物作用下发生 分裂,分裂微液滴尺寸可由障碍物在微通道内位置 而改变。这些方法无法直接应用于压电微流器件上 油包微液滴的分裂。本文探索压电基片上油包微液 滴在部分声场作用下水相微液滴的分裂,为压电微 流器件高通量微流分析提供基础。

1 实验

当在压电基片上采用微电子工艺制作 IDT,并 在其上加声同步频率的电信号时,压电基片上的 IDT 激发 SAW,且在其表面传播。传播的 SAW 遇 到压电基片上的微流体,则向微流体内以瑞利角 θ_{R} 辐射能量,声波辐射入微流体的 θ_{R} ^[14]为

$$\theta_{\rm R} = \arcsin(v_{\rm W}/v_{\rm R}) \tag{1}$$

式中:vw 为声波在微流体中传播速度;vR 为声波在 压电基片上传播速度。图1为 SAW 辐射入微流体 示意图。



图 1 声波辐射入微流体示意图

当电信号功率较小时,压电基片上微液滴在声辐射力及反射声波力共同作用下,微液滴受到不对称声辐射力作用而出现向心旋转运动;逐渐加大 IDT 上电信号功率,IDT 激发的 SAW 在微流体内产生足够大的声流力,则该微流体将沿声传播方向运动。

为实现微流体非对称声辐射力,采用部分声场 作用于微液滴,实现油包水微液滴产生向心运动,图 2 为部分声场作用下油包水微液滴分裂实验装置。



图 2 部分声场作用下油包水微液滴分裂实验装置

图 2 中,IDT 采用微电子工艺制作在 128° YX-LiNbO₃ 基片上。IDT 的指对数为 35,孔径均为 Ø4.32 mm,周期为 144 μm。信号发生器(SP1461, EPRE,)提供射频正弦波信号,该信号可由功率放 大器(TSA002A, TSH)放大,功率放大器的功率增 益为 48 dB,最大不饱和输出功率为 30 W。带高灵 敏度电荷耦合器(DCE-2, Novel)的显微镜用来观 察微液滴运动及分裂,并储存于计算机中。MD-VNT 软件用来摄像控制和图像处理。

采用微量进样器将油包水微液滴放置于压电基 片上,使部分声场作用该微液滴,并在 IDT 上加电 信号。由于声辐射力作用于油包水微液滴部分区 域,因此,微液滴受到不对称力作用,同时,微液滴重 力及其与压电基片间作用力共同作用下,微液滴在 原位发生向心旋转。瞬间断开电信号,微液滴由于 惯性力作用,水相微液滴发生分裂,而油相微液滴由 于分子间作用力较大发生形变而不至于分裂,从而 实现油相内水微液滴分裂。

2 实验结果与讨论

部分声场作用下 3 μL 油包裹 2 μL 蓝色水相微 流体分裂视频截图,如图 3 所示。图 3(a)为 3 μL 油 包裹 2 μL 水微液滴在压电基片上状态,此时,IDT 上未加电信号。当在 IDT 上加 12.3 dBm 电信号 (测得电信号峰-峰值为 3.66 V)时,油相微液滴发 生形变,并开始作向心旋转运动(见图 3(b)~(c)), 瞬间关断电信号,水相微液滴发生破裂,而油相微液 滴形变加大(见图 3(d)),经过 0.067 s 后,微液滴恢 复自然状态(见图 3(e)),再在 IDT 上加电信号,则 分裂了的微液滴在非对称声辐射力作用下向心旋转



运动(见图 3(f))。图 3(g)为第二次瞬间降低电信 号功率,水相微液滴发生分裂状态。图 3(h)~(i) 为2次分裂后,子液滴在 SAW 作用下向心运动。

由图 3 可知,在部分声场作用下,可实现油相内 水相微液滴在油相内分裂。另外,加在 IDT 上电信 号功率变化量越大,油相微液滴形变越大,分裂的水 相子液滴越远离微液滴中心(见图 3(d))。降低加 在 IDT 上的功率,使其电信号变化量减少,油相微 液滴形变减少,水相微液滴分裂的子液滴越靠近微 液滴中心(见图 3(g))。但在部分声场作用下,由于 所受声辐射力较小,油相微液滴本身不发生分裂,只 使水相微液滴在油相内分裂。

将整个油包水微液滴放置干声路径上,加在 IDT 上的电信号功率从 12.3 dBm 瞬间下降到 0,则 油包水相微液滴发生分裂并远离母液滴,成为独立 的油包水微液滴,如图4所示。图中,图4(a)为压 电基片上 5 μL 油包裹 2.5 μL 水微液滴状态,图 4(b)为 IDT 上加功率为 12.3 dBm 的电信号,微液 滴开始受声辐射力作用,当瞬间关断电信号,油包微 液滴发生分裂,并离开母液滴(见图 4(c)~4(d))。



(c) *t*=1.867 s

图 4 5 µL 油包 2.5 µL 水微液滴在声路径上分裂视频截图 由图 4 可见,油包微液滴处于整个声场内,相同 电信号功率变化量可使油包水微液滴发生分裂并分 离,成为独立的油包水子微液滴。由此可见,要实现 油包水微液滴内部水相微液滴分裂,部分声场作用 和电信号功率大小是关键因素。

为更好解释油包水相微液滴在母液滴内分裂, 对微液滴进行了力的分析和计算。图 5 为油包水微 液滴分裂示意图。





图 5 油包水微液滴分裂示意图

由图 5(a)可看出,在 SAW 作用时,油包水微液 滴受到液滴与压电基片间的表面张力、重力和声辐 射力的作用,其中,微液滴与压电基片间的表面张力 是固体(压电基片)-气体表面能 γ₁,液体(微液滴)-气体表面能 γ₂ 和固体-液体表面能 γ₃ 共同作用的 结果,该表面张力为

$$F_{\text{surface}} = \int_{0}^{2\pi} \gamma_2 \left(1 + \cos \phi\right) \cdot r_0 \, \mathrm{d}t \tag{2}$$

仪(DIGIDROP,GBX corp.)测量得到,油液滴对涂 覆有 Teflon AF1600 薄膜的压电基片接触角为 72.8°;r。为微液滴与压电基片表面接触边界(由实 验可得,微液滴在压电基片表面上接触边界近似为 圆形)。采用图像分析软件测得图 3(a)和图 4(a)油 包微液滴半径分别为 1.32 mm 和 1.54 mm。根据 式(2)可得,油包水微液滴与压电基片间的表面张力 为 0.354 4 mN 和 0.413 5 mN。

油包水微液滴重力为

$$F_{g} = (\rho_{1}V_{1} + \rho_{2}V_{2})g \tag{3}$$

式中: ρ1 和 ρ2 为石蜡油和水液滴密度; V1 和 V2 为 石蜡油和水液滴的体积;g为重力加速度。

根据石蜡油和水的密度及油包水微液滴体积,可 计算得到图 3(a)和图 4(a)油包水微液滴的重力分别 为 0.026 5 mN(3 µL 油重力)、0.019 6 mN(2 µL 水重 力)和 0.044 mN(5 µL 油重力)、0.024 5 mN(2.5 µL 水重力)。

SAW 辐射入微流体产生单位体积的声辐射 力[15-16] 为

$$F_{s} = -\rho (1 + \alpha_{1}^{2})^{3/2} A^{2} \omega^{2} K_{i} \exp (K_{i} x + \alpha_{1} K_{i} z)$$
(4)

式中: ρ 为微流体密度; ω 为角频率; A 为 SAW 幅 度; K_i 为漏 SAW 的波数的虚部; $\alpha_i = i\alpha$, $\alpha = \sqrt{1 - (v_{\rm R}/v_{\rm W})^2}$

根据式(4)并结合图 3 微流体在声路径的体积 (图 3 中,油包水微液滴接近一半体积处于声路径 中,为计算方便,采用一半的油包水微液滴体积),可 计算得到其所受声辐射力为 0.034 5 mN。同样,可 计算得到图 4 中油包水微液滴所受声辐射力为 0.103 5 mN。

图 3、4 中油包水微液滴表面张力和微液滴的重 力之和均大于微液滴所受声辐射力,所以,不管部分 声场作用还是全声场作用,与压电基片表面接触的 那部分油相微流体仍保持接触状态。在部分声场作 用时,SAW 对油包水微流体的声辐射力接近微流 体重力,考虑到液体表面间分子作用力,因此,部分 声场作用下,油相微液滴难以飞离母液滴。而油相 内部的水相微液滴,自身重力相对声辐射力较小,且 水相微液滴分子间作用较小,因此,水相液滴在油相 内发生分裂(见图 3(d))。在全声场作用下,SAW 声辐射力较大,远大于油包水微液滴重力,因此,当 激发 SAW 的电信号突然下降到 0 时,油包水微液 滴顶面部分由于受到惯性力作用发生分裂,离开母 液滴,而油包水微液滴的底面部分,由于其与压电基 片间的表面张力大于声辐射力,使其继续保留原位 (见图 4(c)~ 4(d))。

3 结论

提出了在部分声场作用下,油包水相微液滴的 分裂方法,采用声辐射力、液滴表面张力和惯性力的 共同作用,使油包水相微液滴发生分裂。以石蜡油 包蓝色水相微液滴作为实验对象,进行了 SAW 作 用下油包水相微液滴的分裂实验,验证了所提出方 法的正确性。本文可得结论:

1) 部分声场作用下,可成功分裂油包水相微 液滴。

2)部分声场作用,使得油包水相微液滴受到不 对称声辐射力作用,发生向心运动,使油包水相微液 滴可实现多次分裂。

3) 加在 IDT 上电信号功率影响分裂后水相子 液滴的空间位置。

参考文献:

- [1] KAZUNORI S, HIROYUKI A, KOHEI S, et al. Microfluidic devices for construction of contractile skeletal muscle microtissues[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2015, 119(2):212-216.
- [2] THIBAULT B, PATRICK P, AUDREY L, et al. Development of a new microfluidic platform integrating co-cultures of intestinal and liver cell lines[J]. Toxicology in Vitro, 2014, 28(5):885-895.
- [3] MAJID M, ASIER J, MADDY P, et al. An open access microfluidic device for the study of the physical limits

of cancer cell deformation during migration in confined environments[J]. Microelectronic Engineering, 2015, 144(8):42-45.

- [4] KIM J, SHIM Y, SONG S, et al. Rapid prototyping of multifunctional microfluidic cartridges for electrochemical biosensing platforms[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 202(10):60-66.
- [5] FU L M, JU W J, LIU C C, et al. Integrated microfluidic array chip and LED photometer system for sulfur dioxide and methanol concentration detection[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 243(5):421-427.
- [6] MYEONG C J, RASIM G. Dual surface acoustic wavebased active mixing in a microfluidic channel[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 196(1):1-7.
- [7] RENAUDIN A, TABOURIER P, ZHANG V, et al. SAW nanopump for handling droplets in view of biological applications [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2006, 113(1):389-397.
- [8] LI H Y, JAMES R F, LESLIE Y Y. Scaffold cell seeding method driven by surface acoustic waves[J]. Biomaterials, 2007, 28(28):4098-4104.
- [9] ZENG Q, CHAN H W L, ZHAO X Z, et al. Enhanced particle focusing in microfluidic channels with standing surface acoustic waves [J]. Microelectronic Engineering, 2010, 87(5/8): 1204-1206.
- [10] SURENDRA K R, DARREN W B, CONRAD D J, et al. A microfluidic system combining acoustic and di-electrophoretic particle preconcentration and focusing
 [J]. Sensors and Actuators B; Chemical, 2008, 130 (2):645-652.
- [11] LEE C Y, YU H Y, Kim E S. Droplet-based microreactions with oil encapsulation [J]. Journal of Microelectromechnical Systems, 2008, 17(1):147-156.
- [12] SONG H, TICE J D, ISMAGILOV R F. A microfuidic system for controlling reaction networks in time [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2003, 42 (7):768-772.
- [13] LINK D R, ANNA S L, WEITZ D A, et al. Geometrically mediated breakup of drops in microfuidic devices [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(5):054503.
- [14] TOYOKAZU U, TAKAYUKI S, SHOWKO S. Investigation of acoustic streaming excited by surface acoustic waves [C]//New York, USA: IEEE Ultrasonics Symposium, 1995(7/10):1081-1084.
- [15] SHIOKAWA S, MATSUI Y, UEDA T. Liquid streaming and droplet formation caused by leaky Rayleigh wave[C]//New York, USA: IEEE Ultrasonics Symposium, 1989:643-646.
- [16] 李志鹏,李晓英,邵宪友.基于 COMSOL 声表面波扭 矩传感器的有限元分析[J].重庆理工大学学报(自然 科学版),2015(11):17-22.
 LI Zhipeng, LI Xiaoying, SHAO Xianyou, Finite ele
 - ment analysis of torque sensor based on COSMOL surface acoustic wave[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2015(11):17-22.