**文章编号:**1004-2474(2018)05-0646-04

# 压电基片上微液滴沿球形表面输运特性研究

章安良1,董良威2,刘尉悦3

(1. 武夷学院 微电子系,福建 武夷山 354300;2. 常州工学院 电子系, 江苏 常州 213022;

3. 宁波大学 微纳电子系统研究所,浙江 宁波 315211)

**摘 要:**研究了声表面波驱动压电基片上微液滴沿球形表面输运特性。球珠底部采用聚二甲基硅氧烷点粘在 128°YX-LiNbO<sub>3</sub> 压电基片上,并放在恒温箱中固化。压电基片上微液滴在声表面波驱动力和球珠阻力的共同作用 下沿球珠表面输运。为便于观察,采用红墨水溶液为实验对象,对球形表面微液滴声表面波作用下输运特性进行 了研究。结果表明,微液滴在球形表面上输运特性取决于激发声表面波的电信号功率、球珠直径和微液滴体积。 3 μL微液滴在 28.7 dBm 电信号功率下,可以输运到直径 Ø2 mm 的球珠顶端。

关键词:声表面波;输运特性;液滴;叉指换能器;显色反应

中图分类号:TN371 文献标识码:A **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.05.002

## Study on Transporting Characteristics of Micro-droplets Along Spherical Surface on Piezoelectric Substrate

#### ZHANG Anliang<sup>1</sup>, DONG Liangwei<sup>2</sup>, LIU Weiyue<sup>3</sup>

(1. Department of Microelectrics, Wuyi University, Wuyishan 354300, China;

2. Department of Electronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213022, China;

3. Institute of Micro and Nano Electronic System, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The transporting characteristics of micro-droplets along the spherical surface driven by surface acoustic wave were investigated. The bottom of the steel ball was adhered to the 128° YX-LiNbO<sub>3</sub> piezoelectric substrate by polydimethylsiloxane, and is cured in an incubator. The micro-droplets on the piezoelectric substrate were transported along the surface of the ball under the combined action of the surface acoustic wave driving force and the ball resistance. For convenience of observation, the transporting characteristics of micro-droplets on spherical surface under surface acoustic waves were studied using the red ink aqueous solution as experimental object. The results showed that the transport properties of micro-droplets on spherical surfaces were determined by the electrical signal power which excited the surface acoustic wave, the diameter of the spherical ball and the volume of the micro-droplets. The micro-droplets of 3  $\mu$ L can be transported to the top of the steel ball with a diameter of  $\emptyset 2$  mm at the electrical signal power of 28.7 dBm.

Key words: surface acoustic wave; transporting characteristic; droplet; interdigital transducer; color reaction

0 引言

微分析系统可以实现片多、样品复杂分析,近年 来受到国内外专家重视,并得到快速发展。与常规 实验室分析方法相比,微分析系统具有体积小,试剂 消耗量少,分析成本低,可实现自动化分析操作,并 行多样品分析等优点<sup>[1-3]</sup>。因此,微流分析系统在高 通量毒品检测、食物安全、国家安全和即时诊断等领 域获得广泛应用<sup>[4-6]</sup>。 声表面波是沿着固体材料表面传播的弹性波, 它可由加有电信号的叉指换能器激发。由于声能量 集中于基片表面,因此,声表面波适合于压电基片上 微流驱动实现微流操作<sup>[7]</sup>。Alan Renaudin 等<sup>[8]</sup>设 计了分配和定位微液滴平台,实现蛋白质分析。 Myeong 等<sup>[9]</sup>在压电基片上通过驻波实现微粒分 离,成功地将不同粒径和密度的荧光粒子进行了分 离。Li 等<sup>[10]</sup>在压电基片上采用声表面波实现微液

收稿日期:2018-06-14

基金项目:江苏省高校自然科学研究基金资助项目(17KJB510004)

作者简介: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。

滴内荧光粒子、聚苯乙烯微粒和活的酵母细胞富集, 并详细分析了粒子类型、粒子尺寸对富集效果的影响。此外,采用声表面波实现微气泡操纵<sup>[11]</sup>,微液 滴驱动<sup>[12]</sup>,微混合<sup>[13]</sup>,纳升、微升量级微液配送和 操纵<sup>[14-15]</sup>。

上述提及的压电基片上微流操作限于水平方向 控制及特性研究,未涉及微流空间方向输运。在微 流两基片间输运、微流垂向控制等场合,需要微流体 在空间方向的传输。为此,需要研究压电基片上微 流体在空间方向输运及其运动特性。本课题组曾提 出了两相向声表面波实现压电基片上微流体垂向输 运方法,并研究了微流体体积、电信号功率与微流输 运高度间的关系<sup>[16]</sup>。本文提出了球珠辅助作用下, 声表面波驱动微液滴沿球形表面输运的方法,并研 究其输运特性。

1 实验

当向压电基片的叉指换能器施加适当频率电信 号时,叉指换能器激发声表面波。当其在压电基片 上的传播过程中遇到微流体(如微液滴),则向微流 体内以瑞利角  $\theta_{\rm R}$ 辐射能量。声辐射入微流体的瑞 利角  $\theta_{\rm R}^{[17]}$ 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。当声表面波强度较大时,压 电基片上微液滴沿声传播方向运动。若微液滴在运 动方向受到阻力,则微液滴向空间方向运动。

压电基片上微液滴沿球珠表面输运器件制作工 艺如图1所示。



图 1 压电基片上微液滴沿球珠表面输运器件制作工艺

图 1 中,128°YX-LiNbO<sub>8</sub> 压电基片(见图 1(a)) 通过微电子工艺制作叉指换能器(见图 1(b))。叉 指换能器指对数为 35,孔径为Ø4.32 mm,周期为 144 μm。在基片空白区涂覆 Teflon AF 1600 疏水 层(见图 1(c)),进而点涂聚二甲基硅氧烷(见图 1(d)),其上放置球珠用于阻挡微液滴水平方向输 运,并在恒温箱内固化聚二甲基硅氧烷(见图1(e))。 待输运微液滴采用微量进样器进样到压电基片上的 叉指换能器和球珠之间(见图 1(f))。

压电基片上微液滴沿球珠表面空间输运的实验 装置如图 2 所示。图中,信号发生器(SP1461)用于 提供射频正弦波信号,该信号可由功率放大器 (TSA002A)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)的显微镜用于观察微液滴输运,并将 观察结果存储于计算机中。MDVNT 软件用于进 行摄像控制和图像处理。



2 实验结果与讨论

为了便于观察,采用微量进样器在压电基片声 路径上进样红墨水,同时,在叉指换能器上加电信 号,逐渐增加电信号功率,观察红墨水在球珠表面上 的输运。图3为5μL 红墨水在电信号作用下沿球 珠表面输运视频截图。



图 3 电信号作用下 5 µL 红墨水沿球珠表面输运视频截图

图 3(a)为 5 μL 红墨水采用微量进样器进样到 压电基片上,在叉指换能器上加电信号,并逐渐增加 电信号功率。图 3(b)为微流体在声表面波作用下 发生运动,当电信号功率增加到 27.3 dBm 时,微流 体开始沿球珠表面输运(见图 3(c)),进一步增加电 信号功率,微流体沿球珠表面进一步爬升(见图 3(d)~(e));继续增加电信号功率到 30.8 dBm,微 液滴发生分裂,且爬升高度进一步增大(见图3(f))。 由图 3 可知,在声表面波驱动下,微流体可沿球珠表 面输运,实现空间方向输运。

减少红墨水体积到 3 μL,进行相同实验,当在 叉指换能器上加 28.7 dBm 电信号功率时,实现微 液滴爬升到球珠顶部。

为定量分析微液滴沿球珠表面输运特性,对压 电基片上微液滴进行受力分析。图4为球珠表面微 液滴受力分析示意图。





如图 4 所示,液滴在声表面波作用下,运动到球 珠表面后所受的作用力包括:液滴自身重力 F<sub>g</sub>、球 珠表面反作用力 F<sub>c</sub>、压电基片反作用力 F<sub>n</sub> 和声流 力 F<sub>s</sub>。

当液滴体积较小时,液滴在声表面波作用下,其 高度小于球珠半径,液滴所受力的方向如图 4(a)所 示。此时,各力的合力平衡,不能实现液滴在球珠表 面上输运。

当液滴体积较大时,液滴一部分充填球珠 AT 弧面与压电基片间的空隙,另一部分处于 AP 弧面 上。此时,该部分液滴所受的球珠表面反作用力 F。 方向发生变化,其方向始终垂直于弧面切线的法线 方向,其纵向分力方向向上,只要满足:

 $F'_{cy} + F'_{sy} \ge F'_{g}$  (2) 即可实现 AP 弧面部分液滴沿球珠表面输运。其 中,  $F'_{cy}$ ,  $F'_{sy}$ 和  $F'_{g}$ 分别为 AP 弧面部分微液滴所受 的球珠表面反作用力垂直方向分量、声流力的垂直 方向分量和重力。临界运动条件时,满足如下条件:

$$F'_{sy} = F'_g \tag{3}$$

AT 弧面与基片间隙体积为

$$V_{AT} = \left[ (2R)^3 - \frac{4}{3}\pi R^3 \right] \times n \tag{4}$$

式中:R为球珠半径;n为微液滴与球珠表面接触面 所占半球面的比率,其值可由实验获得。

无声表面波作用时,液滴在压电基片上的形状 接近球冠,因此,可用球冠近似描述压电基片上的微 液滴,液滴高度 h 与液滴体积 V 之间的关系<sup>[16]</sup>为

$$V = \frac{1}{3}\pi h^2 (3r - h)$$
(5)

式中r为微液滴半径。

对于 3  $\mu$ L 微液滴,根据式(5)可计算得到高度 为 1.452 mm,其值大于 1 mm 的球珠半径,液滴高 度满足沿球珠表面输运要求。结合实验获得 n=0.22,根据式(4)可得  $V_{AT}=0.839 \ \mu$ L,远小于 3  $\mu$ L 微液滴体积。因此,在足够的电信号功率时,3  $\mu$ L 微液滴可以实现球珠表面输运条件,与实验结果 相符。

作为微液滴沿球珠表面输运的一个应用,采用 所制作器件,在声表面波控制下,实现滤纸基片上淀 粉显色反应。直径  $\emptyset$  6 mm 滤纸浸入质量分数 0.4%的淀粉溶液和 0.2 mol/L 过二硫酸铵溶液的 混合液约 3 s,室温下晾干,然后放置于球珠顶部。 为使滤纸放置稳定,在压电基片上贴合聚二甲基硅 氧烷垫块,使得滤纸一侧在球珠顶部,另一侧在垫块 上。采用微量进样器进样 4  $\mu$ L、0.2 mol/L 碘化钾 溶液到压电基片上。在叉指换能器上逐渐增大电信 号功率,当电信号功率增大到 28.5 dBm,碘化钾溶 液输运到滤纸基片,开始显色反应。图 5 是 4  $\mu$ L 碘 化钾溶液输运及滤纸基片显色反应视频截图。



图 5 4 μL 碘化钾溶液输运及滤纸基片显色反应视频截图 图 5 (a) 为 4 μL 碘化钾溶液在压电基片上。 图 5(b)为叉指换能器加上电信号,碘化钾溶液开 始沿球珠表面输运;继续增加电信号功率到 28.5 dBm,碘化钾溶液到达球珠顶并在滤纸基片 内输运(见图 5 (c)),实现滤纸基片内淀粉显色反 应(见图 5(d))。

由图 5 可知,在声表面波控制下,基片上微流体 通过空间方向输运,实现从压电基片到滤纸基片间 微流输运及滤纸基片内的淀粉显色反应。

### 3 结论

本文提出了空间基片间微流输运方法,研究了 声表面波控制下,微流在球形表面上的输运特性。 采用红墨水微液滴为实验对象,实现压电基片上微 液滴在球形表面上输运特性。可得如下结论:

 提出在声表面波控制下,通过球珠表面导引 微流方法实现微流空间输运。

 2) 压电基片上微液滴成功输运到球珠顶取决 于微液滴体积、电信号功率和球珠直径。

#### 参考文献:

- [1] KUDR J, ZITKA O, KLIMANEK M, et al. Microfluidic electrochemical devices for pollution analysis-A review [J]. Sensors and Actuators B, 2017, 246 (7): 578-590.
- [2] SHAMSI M H, CHOI K, CHAMBERLAIN M D, et al. Electrochemiluminescence on digital microfluidics for micro RNA analysis[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016,77(3):845-852.
- SHUNYA O, YOSHIAKI U. Automatic microfluidic enzyme-linked immunosorbent assay based on CLOCKcontrolled autonomous centrifugal microfluidics [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 261(5): 264-270.
- [4] CHOI J, SONG H, SUNG J H, et al. Microfluidic assay-based optical measurement techniques for cell analysis: A review of recent progress[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 77(3):227-236.
- [5] OLIVEIRA R A G, CAMARGO F, PESQUERO N C, et al. A simple method to produce 2D and 3D microfluidic paper-based analytical devices for clinical analysis[J]. Analytica Chimica Acta, 2017, 957(3): 40-46.

- [6] ZHAO Y, LIU X, LI J, et al. Microfluidic chip-based silver nanoparticles aptasensor for colorimetric detection of thrombin[J]. Talanta, 2016, 150(4):81-87.
- [7] DONG L W, HU Y L. Splitting droplets in a channel by help of surface acoustic wave[J]. Ferroelectrics, 2016, 502(1):19-27.
- [8] ALAN R, SOZANSKI J P, BERNARD V. Monitoring SAW-actuated microdroplets in view of biological applications[J]. Sensors and Actuators B, 2009, 138(1): 374-382.
- [9] MYEONG C J,RASIM G. Active density-based separation using standing surface acoustic waves[J]. Sensors and Actuators A,2012,187(11):22-28.
- [10] LI H Y, JAMES R F, YEO L Y. Surface acoustic wave concentration of particle and bioparticle suspensions[J]. Biomedical Microdevices, 2007, 9(5): 647-656.
- [11] MENG L, CAI F Y, JIN Q F. Acoustic aligning and trapping of microbubbles in an enclosed PDMS microfluidic device[J]. Sensors and Actuators B, 2011, 160(1):1599-1605.
- [12] THUHANG B, VAN N, STEN V, et al. Effect of droplet shrinking on surface acoustic wave response in microfluidic applications[J]. Applied Surface Science, 2017,426(12):253-261
- [13] MYEONG C J, RASIM G. Dual surface acoustic wave-based active mixing in a microfluidic channel[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 196 (1): 1-7.
- [14] 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):1204-1206.
- [15] MYEONG C J, RASIM G. Particle manipulation by phase-shifting of surface acoustic waves [J]. Sensors and Actuators A,2014,207(1): 39-42.
- [16] 章安良,尉一卿,韩庆江,等. 声表面波实现微流体垂 向输运[J]. 分析化学, 2011,39(12):1805-1810.
  ZHANG Anliang, WEI Yiqing, HAN Qingjiang, et al. Paper-based microfluidic device based on surface a-coustic wave[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2011, 39(12):1805-1810.
- [17] TOYOKAZU U, TAKAYUKI S, SHOWKO S. Investigation of acoustic streaming excited by surface acoustic waves[C]//New York, USA: IEEE Ultrasonics Symposium, 1995, 7:1081-1084.