

# 介電濕潤驅動的微流體晶片實現液滴控制



指導教授:陳俊宏 專題生:黃銘、龔誌堯、王翊恆

## 摘要

微流體晶片 (Microfluidic Chip) 技術具備低樣本消耗、高整合、高通量與可自動化等優點,近年於生醫、化學分析及細胞工程領域快速發展。其中,介電濕潤 (Electrowetting on Dielectric, EWOD) 為一種利用電場操控微小液滴的方法,能精準控制液體運動、分割與融合,已逐步應用於細胞與粒子之操控。本研究旨在介紹微流體晶片與 EWOD 之基本原理,探討其於細胞分類、篩選與純化中之應用與未來發展潛力。

## 目的

1. 認識微流體晶片與 EWOD 技術基本原理
2. 探討未來發展與挑戰

## 原理

微流體是一種利用電信號操控液滴在基底上的行為。電濕潤通過在液體和固體之間施加電壓,來改變液體和固體之間的表面張力,1993年,berge引入介電層,以免發生電解作用,該技術被稱為介電濕潤。

根據Lippman's equation  $\gamma_{SL}(V) = \gamma_{SL}(V=0) - \frac{\epsilon}{2} V^2$

可以藉由固液交界面上的電壓來控制界面上的表面張力。其中,  $\gamma_{SL}$  是施加電壓後固體和液體間的表面張力,  $\gamma_{SL}(V=0)$  是未加電壓前固體和液體間的表面張力,  $C$  是介電層的電容,  $V$  是外加電壓。

代入Young's 方程式可得到電濕潤方程式  $\cos \theta(V) = \cos \theta_Y + \frac{CV^2}{2\gamma_{LV}}$  : 電壓增加,接觸角  $\theta(V)$  變小。

介電泳是粒子在溶液中受到外加的非均勻電場而感應產生偶極矩,偶極矩在電場中受到了作用使粒子顯形,而使粒子漂移的力稱為介電泳力,以下列公式表示:  $F_{DEP} = 2\pi \epsilon_a a^3 \text{Re}[f_{CM}(\omega)] |\nabla E|^2$

$\epsilon_m$ : 溶液介電常數

$a$ : 粒子半徑

$E$ : 電場強度

$|\nabla E|^2$ : 外加電場平方之梯度

$f_{CM}(\omega)$ : 頻率之函數 Clausius-Mossotti factor (CM factor)

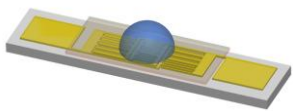
$\text{Re}[f_{CM}(\omega)]$ : CM factor 的實部

當介電濕潤中所產生的介電泳力大於液滴形變及位移時的阻力,便可為液滴進行各種不同的操作;此運動機制與電流體動力學有關,可以亥姆霍茲方程式解釋:由  $f_e = \rho_f E + \nabla(\frac{1}{2} \epsilon^2 \rho_{eff}^2) - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon$  所產生的力有3種,第一種是自由電荷所產生的力,與  $\rho_f$  有關,而介電容液的  $\rho_f = 0$ ,固可忽略第二種;是電致伸縮的力,而液體不可壓縮,固也可忽略;第三種為L-DEP力,即為介電泳力,為三相產生,固在交界處最強,由此可知,L-DEP力作用方向會沿著電極方向延展而去

## 主題圖

■ Glass ■ Au ■ SU-8 ■ Teflon ■ Droplet

(a) Solidworks Schematic diagram

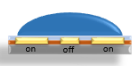


Droplet cutting

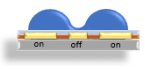
(b)



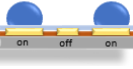
(c)



(d)



(e)



Droplet cutting (Top view)

(f)



(g)



(h)



(i)



## 實驗方法



(圖一)訊號產生器與功率放大器



(圖二)光學式接觸角測量儀

(實驗使用的訊號產生器所能輸出的最大交流電壓為10Vpp, 功率放大器放大倍率為80倍。)

訊號產生器的輸出端與功率放大器的輸入端對接,再將放大器的輸出與電路板的EWOD端腳連接。再以滴管滴上定量液體在晶片中央區域上方(能接觸到兩旁指叉是電極),並設定訊號產生器的電壓輸出及頻率(sin波)即可觀察液珠變化(如圖三所示)。

本單板實驗採用之數據為驅動電壓400Vpp、頻率100kHz。

其中,圖四、圖五、圖六、圖七為實驗之俯視圖;

圖八、圖九、圖十、圖十一為實驗之側視圖。



(圖三)



(圖四)



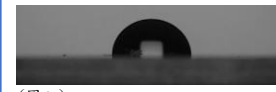
(圖五)



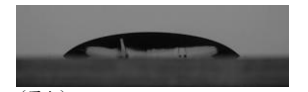
(圖六)



(圖七)



(圖八)



(圖九)



(圖十)



(圖十一)

## 應用與展望

細胞分類:利用電場、EWOD 液滴包裹單細胞可分離血液細胞、循環腫瘤細胞 (CTCs) 以及免疫細胞分選 (如 T Cells, NK Cells)  
細胞篩選與純化:利用液滴包裹單細胞後進行單細胞擴增或藥物反應測試  
另外在生醫檢測、診斷及類器官與組織工程都能有相關應用

趨勢及展望:高整合「智慧細胞工廠晶片」、低成本一次性生醫晶片

## 結論

微流體晶片與 EWOD 技術能以高精準、低耗材方式操作細胞與液體,逐漸成為生物醫學、精準醫療與藥物研究的重要工具。本研究整理此技術在細胞分類、篩選與純化之應用,展示其在單細胞分析、癌症診斷與藥物開發等領域具有巨大潛力。未來持續結合 AI、自動化與生醫材料技術,有望推動更智慧、更普及的微流體生醫平台。

## 參考資料

- 劉希晏。(2024)。結合介電泳和介電濕潤於單板微流體晶片進行粒子純化之研究(碩士論文)。
- 蘇州文號股份有限公司。(2019, August 22)。數字微流體今日Nature:可控電濕潤液滴。<https://www.whchip.com/news/electrowetting.html#>