



# 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。

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

可以藉由固液界面上的電壓來控制介面上的表面張力。

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V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移，而使粒子漂移的力稱為介電泳力，可以下列公式表示： $F_{DEP} = 2\pi \epsilon_{\infty} a^3 \operatorname{Re}[f_{CM}(\omega)] \nabla E^2$

$\epsilon_{\infty}$ ：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)

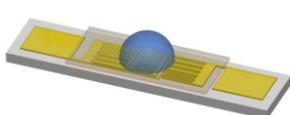
$\operatorname{Re}[f_{CM}(\omega)]$ ：CM factor 的實部

當介電潤濕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，可以以亥姆霍茲方程式解釋：由  $\vec{f}_e = \rho_e \vec{E} + \nabla (\frac{1}{2} E^2 \frac{\partial \sigma}{\partial E}) - \frac{1}{2} E^2 \nabla \sigma$  所產生的力有3種：第一種是自由電荷所產生的力，與  $\rho_e$  有關；而介電溶液的  $\rho_e = 0$ ，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

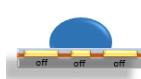
■ Glass ■ Au ■ SU-8 ■ Teflon ■ Droplet

(a) Solidworks Schematic diagram

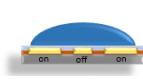


Droplet cutting

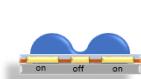
(b)



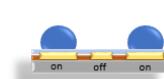
(c)



(d)



(e)



Droplet cutting (Top view)

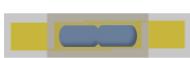
(f)



(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(能接觸到兩旁指又是電極)，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)。



(圖三)



(圖四)



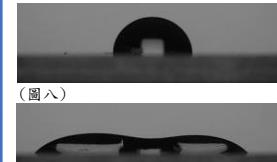
(圖五)



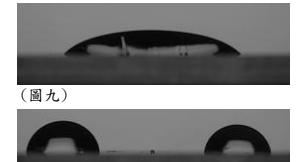
(圖六)



(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#>