

# DISPOSITIVOS MICROFLUÍDICOS DIGITALES: FUNDAMENTOS DE SU FUNCIONAMIENTO, REQUERIMIENTOS DE FABRICACIÓN Y APLICACIONES

**Oriol Caro-Pérez, M<sup>a</sup> Blanca Roncero, Jasmina Casals**

MICROTECH LAB Research Group

## Resumen

---

El uso de dispositivos microfluídicos digitales (DM) han demostrado ser herramientas muy eficaces para la manipulación de pequeños volúmenes de líquidos de forma precisa o su uso en lentes líquidas que superan en versatilidad a las lentes convencionales. Sin embargo, en la actualidad, la fabricación de estos dispositivos presenta numerosos desafíos, debido en especial al alto impacto medioambiental de los materiales utilizados. Aquí se presenta una breve explicación de los fundamentos de funcionamiento de estos dispositivos, requerimientos en su fabricación y algunas de sus aplicaciones.

### 1. Introducción

En los últimos años, la práctica clínica ha experimentado un aumento significativo de la cantidad de análisis a realizar, mientras que el volumen de la muestra se ha mantenido constante. Por este motivo, el interés por la manipulación de volúmenes del orden de microlitros para su posterior análisis se ha incrementado de forma significativa. Los dispositivos basados el efecto *electrowetting-on-dielectric* (EWOD) ofrecen una solución a este desafío muy eficaz. La tecnología del

efecto *electrowetting-on-dielectric* (EWOD) permite la manipulación de volúmenes discretos de un líquido (una gota) sobre una superficie, sin necesidad de utilizar canales y/o bombas. El efecto EWOD explica la disminución de la tensión superficial en la inter-fase líquido/sólido de un líquido por la acción de una tensión eléctrica. Las capacidades de estos dispositivos no se dirigen exclusivamente en el campo de los análisis, ya que la posibilidad de manipulación de líquidos permite su aplicación en la óptica, creación de superficies auto-limpiables o incluso funcionalización de superficies.

La fabricación de los dispositivos DM involucran 3 capas funcionales sobre un sustrato. Estas capas son: capa conductora, capa dieléctrica y capa hidrofóbica. Cada una de las capas cumple una función importante en el dispositivo. La capa eléctrica tiene la función de conducir la tensión eléctrica y distribuir las cargas que provocarán el cambio en la tensión superficial del líquido. Por otro lado, la capa dieléctrica evitará que se provoque un corto-circuito, ya que la gota pone en contacto los electrodos entre sí. Finalmente, la capa hidrofóbica proporciona que se presente el mayor ángulo de contacto del líquido sobre la superficie, para que la disminución de la tensión superficial del líquido provoque mayor magnitud de cambio.

## **2. Configuraciones de dispositivos EWOD**

Existen tres configuraciones diferentes: convencional, placas paralelas y placas coplanarias [1].

La configuración convencional (Figura 1a) está formada por una única placa conductora en la superficie del dispositivo con un electrodo superior. Es una configuración ideal para el uso de lentes ópticas líquidas, ya que no requieren que el líquido se desplace a través de la

superficie, sino que simplemente cambie el ángulo de contacto que presenta para así cambiar la distancia focal.

En las configuraciones de placas paralelas y placas coplanarias, se permite el desplazamiento de las gotas sobre una superficie. En la configuración de placas paralelas (Figura 1b), existen dos placas, una superior con un único electrodo cubriendo toda la superficie y otra placa inferior, con diferentes electrodos que se van conectando para desplazar la gota con su potencial. En esta configuración se permite la manipulación de las gotas de forma precisa, permitiendo realizar operaciones como fusión/fisión de gotas o mezclas de líquidos. En la configuración placas coplanarias, en cambio, es una sola superficie por donde se desplaza la gota, gracias al accionamiento de diferentes electrodos adyacentes entre ellos (Figura 1c).

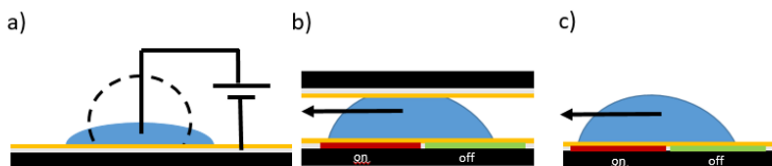


Figura 1. (a) Configuración convencional, común en dispositivos ópticos  
(b) Configuración placas paralelas (c) Configuración placa coplanaria.

Fuente: Elaboración Propia.

La configuración placas paralelas y placa coplanaria son muy similares, sin embargo, la configuración placas paralelas, sufre más fuerza de fricción, al tener dos placas en contacto con la gota, reduciendo su rendimiento.

### **3. Concepto teórico de funcionamiento**

El comportamiento de una gota sobre una superficie fue descrito por Thomas Young [2], donde se describe el comportamiento de la gota de agua sobre una superficie como el equilibrio entre las energías de las interfaces líquido-aire, líquido-sólido y sólido-líquido. En el momento en que se aplica un campo eléctrico, se acumula una capa de iones en el líquido con carga opuesta al potencial eléctrico. La fuerza electrostática resultante del potencial eléctrico y la capa de iones con carga opuesta, tira de los extremos de la gota hacia afuera, provocando una disminución del ángulo de contacto que se observa en la zona de las tres interfaces, conocida como interfaz trifásica. Este comportamiento viene explicado por la ecuación Lippmann-Young [2]:

$$\cos\theta_v - \cos\theta_0 = \frac{C}{2\gamma}V^2 \quad (1)$$

Donde  $\theta_v$  y  $\theta_0$  son el ángulo de contacto bajo el campo eléctrico y sin él, respectivamente.

La capacitancia del dispositivo es  $C$ ,  $\gamma$  es la tensión superficial del líquido y  $V$  el voltaje del potencial eléctrico.

Como se ha descrito, el dispositivo está formado por una capa eléctrica y otra capa dieléctrica, por lo que se puede deducir que el comportamiento del dispositivo EWOD se describe como un condensador. La distribución de las cargas en el condensador provoca los cambios en el ángulo de contacto, por lo que la capacidad del dispositivo para manipular un líquido depende directamente de las características de este condensador. La capacitancia dependerá de los materiales y las características de la capa dieléctrica, como se puede observar en esta fórmula (2):

$$C = \epsilon_0 \epsilon_d \epsilon_h \frac{A}{\epsilon_d t_d + \epsilon_h t_h} \quad (2)$$

Donde  $\epsilon$  es la constante dieléctrica del espacio vacío ( $\epsilon_0$ ), capa dieléctrica ( $\epsilon_d$ ) y capa hidrofóbica ( $\epsilon_h$ ).  $t$  es el grosor de la capa dieléctrica ( $t_d$ ) y capa hidrofóbica ( $t_h$ ). El área total de la superficie donde se proyecta el electrodo viene definida como  $A$ .

#### **4. Materiales de Fabricación**

Los dispositivos DM están formados por 4 capas: 3 de ellas funcionales y el sustrato.

##### **4.1. Sustrato**

El sustrato es el soporte donde se asientan las 3 capas funcionales del dispositivo. No necesita materiales en especial para cumplir su función. La única limitación que se puede encontrar en los materiales usados es que debe reunir las características necesarias según la función del propio dispositivo y que sean compatibles los materiales entre sí. Por ejemplo, si un dispositivo tiene como finalidad el uso como lente óptica líquida, el sustrato debe ser transparente, con el propósito de no afectar a la función de la lente óptica. Por otro lado, si un dispositivo DM debe ajustarse a una superficie curva, el sustrato debe ser flexible.

##### **4.2. Capa eléctrica**

Los materiales para formar los electrodos son múltiples, ya que el único requerimiento que ha de cumplir es la conductividad de la corriente eléctrica. No obstante, hay que tener en cuenta los métodos

de fabricación de estos electrodos, ya que la elección de un método u otro puede afectar al material utilizado [1]. Se pueden generar electrodos por métodos de serigrafía, deposición química o impresión a chorro de tinta [3]. El método no afecta a la aplicación del dispositivo, pero sí debe adaptarse al sustrato que se utiliza y a los métodos disponibles en el lugar de fabricación del dispositivo. Zonas rurales o zonas catastróficas [3], pueden ser lugares con gran demanda de estos dispositivos, pero sus recursos limitados pueden afectar a los métodos de fabricación. Los métodos más comunes en esos casos son la impresión a chorro de tinta y la serigrafía con tintas de nano-partículas de metales conductores, como la plata y el oro.

Otro dato importante a tener en cuenta es la propia geometría de los electrodos. La geometría de los electrodos es una variable importante según la aplicación del dispositivos EWOD [5]. Según si el propósito del dispositivo es fusionar gotas y/o dividir las, mover en una sola dirección o en múltiples direcciones, el diseño de la geometría de los electrodos es diferente [7], siendo algunas configuraciones más óptimas o plenamente funcionales que otras. Jain, V et al. presentaron un estudio con electrodos de diferentes geometrías donde se apreciaba diferencias significativas en la velocidad a la que se desplazaba la gota sobre la superficie, surgiendo la geometría del borde en zig-zag como la más efectiva [5].

### **4.3. Capa dieléctrica**

La presencia de la capa dieléctrica entre el electrodo y el líquido conductor produce el efecto de condensador. La capa es crítica para el funcionamiento óptimo del dispositivo DM. Las principales características que debe reunir es tener una constante dieléctrica

elevada y que se posibilite la deposición de una capa lo más fina posible [1]. Como se puede apreciar en la fórmula 2, si la capa dieléctrica tiene una constante dieléctrica elevada ( $\epsilon_d$ ) y un espesor mínimo ( $t_d$ ), obtendremos una capacitancia elevada (C). Esto aplicado a la fórmula 1, se presentan dos posibilidades: podemos obtener una disminución del ángulo de contacto de la gota mayor, o podemos obtener un cambio en el ángulo de contacto igual con un voltaje inferior. Así, con mayores constantes dieléctricas y espesores menores obtendremos dispositivos DM más óptimos.

Métodos como la deposición química, permiten la formación de capas del orden de nanómetros usando materiales con altas constantes dieléctricas, como el dióxido de silicio (constante dieléctrica 3,7) [6], óxido de aluminio (constante dieléctrica 9,34) [8] y pentóxido de tántalo (constante dieléctrica 71,62) [9]. Pero la deposición química es un método costoso y se necesita instrumentos especializados. Sin embargo, existen métodos más sencillos, como *spin-coating*, que permite incorporar capas dieléctricas de espesor de unos pocos micrómetros de materiales como el polidimetilsiloxano (PDMS) (constante dieléctrica 2) [10] o Sukhoi-8 (SU-8) (constante dieléctrica 3,2) [11]. Este método facilita la fabricación de los dispositivos, pero puede reducirse la eficiencia del dispositivo, obligando a utilizar voltajes mayores.

#### **4.4. Capa hidrofóbica**

El movimiento de la gota en la superficie del dispositivo se produce cuando el desequilibrio de fuerzas entre la línea de contacto en el electrodo conectado y la línea de contacto en el electrodo no conectado supera las fuerzas de arrastre o adhesión de la gota sobre la superficie.

Por este motivo es necesario incorporar una capa hidrofóbica, que presente muy poca energía superficial. Los materiales más comunes en esta capa son los fluorados, como el Teflón y el Cytop. Estos materiales, además, permite su incorporación al dispositivo con métodos sencillos como *spin-coating*, consiguiéndose espesores tan pequeños que son despreciables en la fórmula 2 de la capacitancia [12].

Sin embargo, estos materiales tienen un gran impacto medioambiental. Es interesante ampliar las investigaciones para usar materiales que tengan una huella medioambiental más limitada, ya que uno de los principales usos de estos dispositivos son los análisis clínicos, donde se emplearían dispositivos de un solo uso para evitar contaminaciones cruzadas entre muestras. En la actualidad, la alternativa más usada es el PDMS o lubricación de la superficie con diferentes lubricantes.

## **5. Aplicaciones de los dispositivos EWOD**

En la actualidad ya existen dispositivos DM comercializados. Los dispositivos EWOD convencionales tienen su mercado en el uso de lentes líquidas. Los teléfonos móviles ya utilizan esta tecnología en sus lentes, como por ejemplo el móvil Xiaomi Mi Mix [15]. Por otro lado, la DM tiene un gran interés comercial en dispositivos analíticos y biomédicos. Por ejemplo, el sistema de preparación de bibliotecas NeoPrep de Illumina utiliza microfluidos digitales coplanarios impulsados por EWOD para manipular muestras biológicas [15]. Al margen de los resultados comerciales de estos dispositivos, en la actualidad se está investigando el uso novedoso de dispositivos DM en las siguientes áreas:



### **5.1. Lentes ópticas líquidas**

La manipulación del ángulo de contacto de una gota mediante EWOD afecta al valor de la reflexión de la luz que atraviesa el líquido. Éste permite un desplazamiento de la distancia focal que puede sincronizarse a través de diferentes potenciales eléctricos. Otra de las características que proporcionan las lentes líquidas ópticas flexibles es que pueden adaptarse a cualquier superficie si se han utilizado materiales flexibles en su fabricación [13].

Los dispositivos DM únicamente permiten el cambio de la distancia focal debido a que cambian la forma de la gota sobre una superficie, sin embargo, pueden usarse cámaras de líquido auxiliares que permitan la incorporación de mayor volumen de líquido en la lente óptica [13]. Esto permite incorporar capacidad de aumento en las lentes líquidas.

### **5.2. Manipulación de cultivos celulares**

En la manipulación de cultivos celulares siempre se corre el riesgo de contaminaciones con hongos y/o bacterias. Esto se debe principalmente al uso de instrumentos que, pese a que han sido esterilizados previamente, siempre pueden quedar residuos. El uso de dispositivos DM permite las manipulaciones de cultivos celulares en gotas, permitiendo añadir medio de cultivo sin necesidad del uso manual de instrumentos. Un ejemplo de ellos se puede apreciar en el trabajo de Li W et al en 2020, en el que se reproduce un protocolo de extracción de DNA libre de un cultivo de células embrionarias con el uso exclusivamente de un dispositivo EWOD [13]. El rendimiento obtenido fue del 23 % frente al 18 % con el protocolo habitual aplicado de forma manual.

### **5.3. Análisis químicos y biológicos**

Como se ha podido apreciar, el uso de dispositivos DM permite la manipulación de sustancias sin necesidad de tener contacto directo con las muestras. Esto no sólo previene la contaminación de las muestras a analizar, sino que evita riesgos derivados de estar en contacto con sustancias nocivas al personal que trabaja en estos análisis. Uno de los ejemplos más significativos que podemos destacar ha sido durante la pandemia de coronavirus 2019 (COVID-19). En un estudio de Jain V et al en 2020 se diseñó una plataforma para el análisis de muestras COVID-19 basada en DM, que permitía depositar muestras, mezclar con los reactivos necesarios y realizar los análisis pertinentes de detección sin necesidad de contacto por parte del personal clínico [14].

## **6. Conclusiones**

Pese a la existencia de dispositivos DM comerciales, en la actualidad queda por solventar diversas limitaciones en estos dispositivos. Estas limitaciones están estrechamente ligadas a la necesidad de usar voltajes elevados y al uso de materiales con alto impacto medioambiental, como el Teflón. Actualmente existen buenos materiales biodegradables y de bajo impacto medioambiental para las capas sustrato, conductora y en menor medida para la capa dieléctrica. La capa dieléctrica sería interesante encontrar materiales biodegradables que tuvieran una constante dieléctrica muy elevada y que permitieran ser incorporados al dispositivo en un grosor menor de lo que ofrece hoy en día el SU-8 o el PDMS, alrededor de 5 micrómetros. El gran desafío tiene que ver con la capa hidrofóbica. El Teflon y/o Cyttop son materiales que están muy asentados en su uso y no hay muchas alternativas que puedan ofrecer el mismo rendimiento.

Existen trabajos en que se usa PDMS como capa hidrofóbica, sin embargo, requiere capas gruesas, del orden de micrómetros, frente a los nanómetros que presenta el Teflon. Las investigaciones deberían girar en torno a estas dos capas con el objetivo de reducir voltajes, alargando la vida útil de los dispositivos y su eficiencia.

## Referencias

1. Caro-Pérez, O., Casals-Terré, J., & Roncero, M. B. (2022). Materials and Manufacturing Methods for EWOD Devices: Current Status and Sustainability Challenges. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2200193. <https://doi.org/10.1002/mame.202200193>
2. Berthier, J., Dubois, P., Clementz, P., Claustre, P., Peponnet, C., & Fouillet, Y. (2007). Actuation potentials and capillary forces in electrowetting based microsystems. *Sensors and Actuators A: physical*, 134(2), 471-479. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.04.050>
3. Ugsornrat, K., Pasakon, P., Karuwan, C., Sriprachubwong, C., Maturros, T., Pogfay, T., & Tuantranont, A. (2019). Low-cost and disposable electrowetting-on-dielectric lab on a chip with an integrated electrochemical detector fabricated by screen-printing process. *IEEE Sensors Journal*, 19(19), 8597-8604. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2921789>
4. Son, C., Ji, B., Park, J., Feng, J., & Kim, S. (2021). A magnetically actuated superhydrophobic ratchet surface for droplet manipulation. *Micromachines*, 12(3), 325. <https://doi.org/10.3390/mi12030325>
5. Jain, V., Devarasetty, V., & Patrikar, R. (2017). Effect of electrode geometry on droplet velocity in open EWOD based device for digital microfluidics applications. *Journal of Electrostatics*, 87, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.jelstat.2017.02.006>
6. Khan, I., Castelletto, S., & Rosengarten, G. (2018). Deposition method and performance of SiO<sub>2</sub> as a dielectric material for beam steering electrowetting devices. *Materials Research Express*, 5(7), 076304. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad010>
7. Ohya, C., & Konishi, S. (2018, January). Droplet height control by electrowetting-on-dielectric for selective contact fusion of droplets on facing substrates. In *2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (pp. 1201-1204). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2018.8346778>
8. Ribet, F., De Pietro, L., Roxhed, N., & Stemme, G. (2018). Gas diffusion and evaporation control using EWOD actuation of ionic liquid microdroplets for gas sensing applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 267, 647-654. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.04.076>

9. Chen, S., & Kim, C. J. (2019). Counterbalanced Valve Metal Oxide as a Reliable Dielectric Layer for Electrowetting-on-dielectric Devices. *Sensors and Materials*, 31(9). <https://doi.org/10.18494/SAM.2019.2449>
10. Li, J., & Kim, C. J. (2019, January). Electrodeposition on Transparent Substrate: Device Fabrication and Demonstration. In *2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (pp. 180-181). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2019.8870871>
11. Ciou, Y. J., Lee, H. T., Lin, Y. W., & Yao, D. J. (2020). Microfluidic patterning using a digital microfluidic system. *AIP Advances*, 10(12), 125115. <https://doi.org/10.1063/5.0012684>
12. Li, C., & Jiang, H. (2014). Fabrication and characterization of flexible electrowetting on dielectrics (EWOD) microlens. *Micromachines*, 5(3), 432-441. <https://doi.org/10.3390/mi5030432>
13. Walther, A., Desloges, B., Lejoste, C., Coster, B., Audebert, P., & Willemin, J. (2013). Development of a 3D capacitive gyroscope with reduced parasitic capacitance. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23(2), 025013. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/23/2/025013>
14. Vandana, J., & Muralidhar, K. (2020). Electrowetting-on-dielectric system for COVID-19 testing. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 5(2), 251-254. <https://doi.org/10.1007/s41403-020-00113-x>
15. Li, J. (2020). Current commercialization status of electrowetting-on-dielectric (EWOD) digital microfluidics. *Lab on a Chip*, 20(10), 1705-1712. <https://doi.org/10.1039/D0LC00144A>