

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051807

電來水走——探討電場作用時水珠的電濕潤現象

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 胡廷瑄 高二 陳佳萱	指導老師： 簡麗賢
-------------------------	--------------

關鍵詞：電濕潤、表面張力、電場

摘要

本研究透過自製電路板及實驗裝置，結合程式碼控制電場，探討不同電濕潤的裝置、水量及電場與水珠運動速度的關係，並探究使水珠運動速率最大化的條件。

研究發現水珠運動方向與所加電場方向相同，且增強電場、增加水量、減小電極間距、降低疏水材料的表面粗糙程度、先行分離水珠內部正負離子以及在 $3200\ \mu\text{m}$ 以下增加電極寬度，皆使水珠運動速率變快。

透過探討影響水珠移動速率的變因，可提升電濕潤顯示器單位時間內的幀數(張數)，亦即流暢度，並期盼將此研究結果應用於各式表面的自我清潔系統中。

壹、研究動機

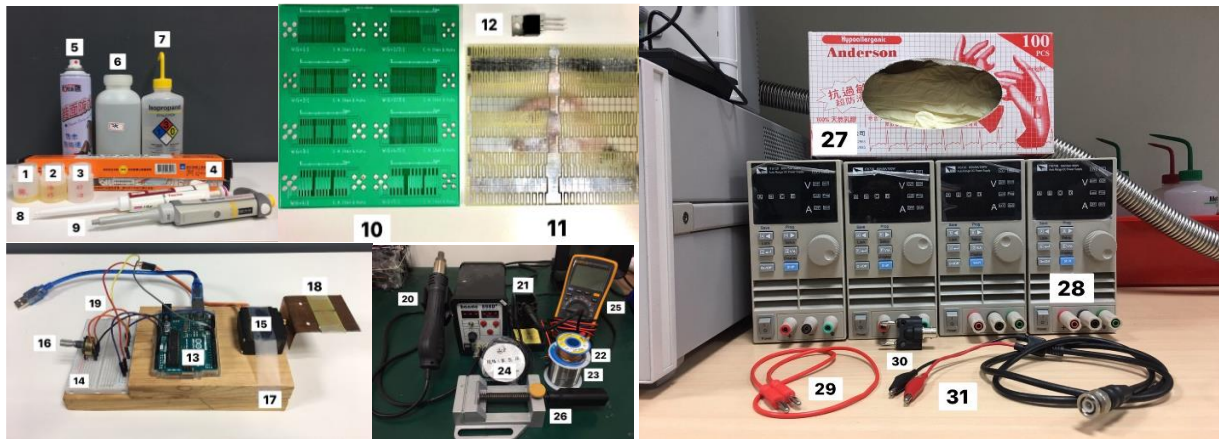
每次學校打掃時間，就要爬上窗台擦拭玻璃，但經過一段時間又會蒙上一層灰塵與污垢。若玻璃能自動清潔該有多好！

我們上網查詢「玻璃自淨」，搜尋到一篇「Smart Self-Cleaning Cover Glass For Automotive Miniature Cameras」，文中提及「電濕潤」可使玻璃上的水珠移動的物理現象，達到玻璃自我清潔的效果。為更進一步瞭解電濕潤，我們設計實驗，探討其運動原理，並以電腦程式輔助探究使水珠運動速度最大化的條件，希望能更深入認識電濕潤的原理與技術！

貳、研究目的

- 一、探討讓水珠移動最快的裝置
- 二、探討電場如何影響水珠移動
- 三、探討不同水量、電極寬度、電極間距和疏水材料，能使水珠運動的最小驅動電壓
- 四、探討不同供電方式與能使水珠流暢運動的最短供電週期的關係

參、研究設備及器材



圖一、實驗器材及編號

表一、實驗器材及編號

編號	名稱	型號/成分	用途
1	橄欖油	N/A	作為不同材質的疏水層以供比較
2	油炸專用油	OAL22972	
3	矽油	N/A	
4	保鮮膜	南亞保鮮膜	
5	防水噴霧	貓頭鷹鞋面防水劑	
6	蒸餾水	N/A	作為電濕潤實驗移動的液滴
7	Isopropanol	(CH ₃) ₂ CHOH	清洗電路板
8	微量吸量管	Eppendorf Research plus(20-200 μl)	吸取液狀疏水層，固定疏水層厚度
9	微量吸量管	Thermo F1 (1-10 μl)	吸取溶液，固定液滴體積
10	電路板 (1)	自行設計	操作於電濕潤實驗
11	電路板 (2)	自行設計	
12	Mosfet (N-Channel)	IRF740	作為供電開關
13	Arduino(板+USB 連接頭)	Arduino Uno	<ol style="list-style-type: none"> 寫入程式碼以可變電阻控制液滴在不同疏水層上的滑動角實驗裝置的傾斜角度 寫入程式碼以電晶體為電壓開關控制液滴運動
14	麵包板	N/A	搭建電路
15	馬達	N/A	組成水滴在不同疏水層上的滑動角實驗的裝置
16	可變電阻	B-type 10K Ω, 16 φ	
17	木板	N/A	
18	鐵架	N/A	

編號	名稱	型號/成分	用途
19	杜邦線	40Pin 1046A-20	1. 在麵包板上連接電路 2. 焊接於自行設計的電路板上
20	熱風槍	HANDO 898D+	將杜邦線焊接於自行設計的電路板上
21	焊槍	HANDO FX-888D	
22	吸錫帶	CP-20B (寬 2.0mm)	
23	錫線	WU-4 (寬 0.6mm)	
24	單蕊線	N/A	在麵包板上連接電路
25	三用電錶	FLUKE 17B+	檢測電壓、電流、電阻等數值
26	虎鉗	N/A	固定自行設計的電路板
27	乳膠手套	N/A	隔離汙染，保持實驗精準度
28	直流電源供應器	IT6720	使數台直流電源供應器串聯輸出電壓
29	香蕉－香蕉(線)	N/A	
30	BNC 母頭－香蕉 (接頭)	N/A	
31	BNC 公頭－鱷魚夾 (線)	N/A	
32	接觸角量測儀	LSA60	計算液滴在不同疏水層上的接觸角
33	EAGLE(軟體)	N/A	設計電路板
34	Arduino IDE(軟體)	N/A	1. 以可變電阻控制水滴在不同疏水層上的滑動角實驗裝置的傾斜角度 2. 以電晶體作為電壓開關控制水滴運動
35	Geogebra(軟體)	N/A	計算液滴在不同疏水層上的滑動角
36	Fritzing(軟體)	N/A	繪製 Arduino 的電路圖

肆、研究方法

一、 原理介紹

圖二(a)為濕潤的力平衡模型，(b)為典型封閉電濕潤裝置結構及電濕潤驅動方式的示意圖。於此電濕潤裝置中，其包含金屬電極、金屬導線、電解質溶液與直流電源。若利用金屬導線對液珠與電極施加一偏壓，則電極表面將聚集電荷，並吸引液珠中電子而形成電雙層 (electrical double layer)，則其電極與液珠界面的表面張力與壓力的關係，可用 Lippmann 方程式表述為(1):

$$\sigma_{SL} = \sigma_{SL,0} - \frac{1}{2} C_H V^2 \quad (1)$$

其中， $\sigma_{SL,0}$ 為未施加電壓時電極與液珠界面的表面張力， C_H 為電雙層電容由液體的介電常數(permittivity)與接觸面積所決定， V 為偏壓大小。

若將上式代入濕潤理論(wetting theory)中著名的楊氏(Young)方程式(2)，則可得平衡接觸角與電壓的關係式為利普曼-楊氏(Lippmann-Young)方程式(3):

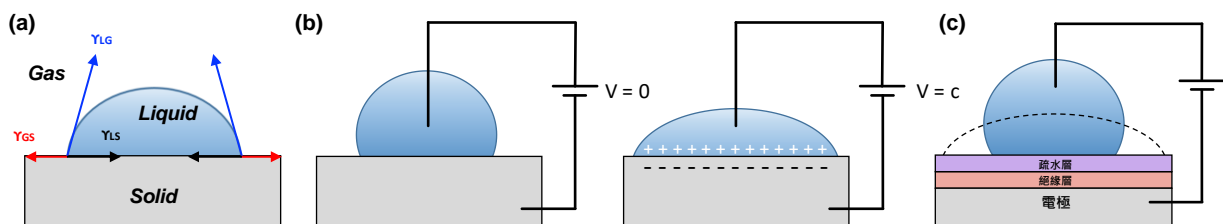
$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos\theta_0 \quad (2)$$

$$\cos\theta_e = \cos\theta_0 + \frac{1}{2\sigma_{LG}} C_H V^2 \quad (3)$$

其中， σ_{LG} 為周遭介質(通常為氣體)與液體的表面張力。

然而，電極與液珠直接接觸的電濕潤，其電雙層厚度通常只有幾奈米到幾十奈米，因此常因過大的偏壓而擊穿，發生電解反應，造成電濕潤操作時無法使用太高的電壓，也無法影響液珠接觸角，甚至無法移動與分離液珠，影響電濕潤的應用與發展甚鉅。

為克服上述問題，學者提出介電濕潤(electro-wetting on dielectric, EWOD)，如圖二(c)所



圖二、(a) 濕潤問題之力平衡模型、(b) 典型電濕潤裝置結構組成及電濕潤驅動方式之示意圖及(c)介電濕潤結構組成。

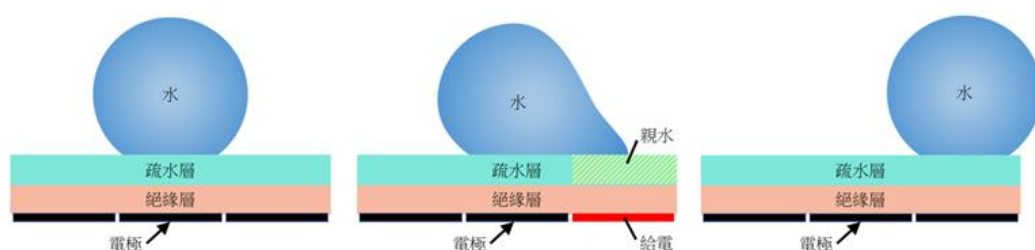
示，其透過在電極與液珠間添加絕緣材料，達到類似電雙層的效果，且絕緣材料厚度通常可設計在一微米至數十微米之間，因此可有效避免發生擊穿現象，亦可施加較高的操作電壓對液珠產生較大的影響。由於添加絕緣材料，偏壓造成的靜電能僅有一部份改變固液界面的表面張力，且液珠的接觸表面已非電極，式(3)不再適用。考慮添加絕緣材料，可將利普曼方程式與利普曼-楊氏方程式修正為式(4)與(5)：

$$\sigma_{SL} = \sigma_{SL,0} - \frac{1}{2} \frac{\epsilon}{d} V^2 \quad (4)$$

$$\cos\theta_e = \cos\theta_0 + \frac{\epsilon}{2d\sigma_{LG}} V^2 \quad (5)$$

其中， d 為絕緣層厚度、 ϵ 為絕緣材料的介電係數。值得注意的是，此處 σ_{LG} 為周遭介質與絕緣材料間的表面張力；式(5)右邊第二項為電濕潤係數(coefficient of electro-wetting, η_E)，常用於評估靜電能與界面表面張力的相對大小。

二、實驗一：設計、製作及探討使水珠移動最順暢的裝置



圖三、介電濕潤裝置由下而上包含橫向排列的電極、絕緣層及疏水層，水珠則滴於疏水層上方。透過對電極施加一偏壓，可使該電極上方的疏水層部分區域變得親水，使水珠產生形變。透過不斷形變，可使水珠運動。

圖三所示為設計的介電濕潤裝置，以橫向電場為動力，促使水珠橫向移動，並由**電極、絕緣層、疏水層**構成，因此以下裝置的架設主要分成這三個方向進行探討。

(一) 電極——提供電場使水珠運動

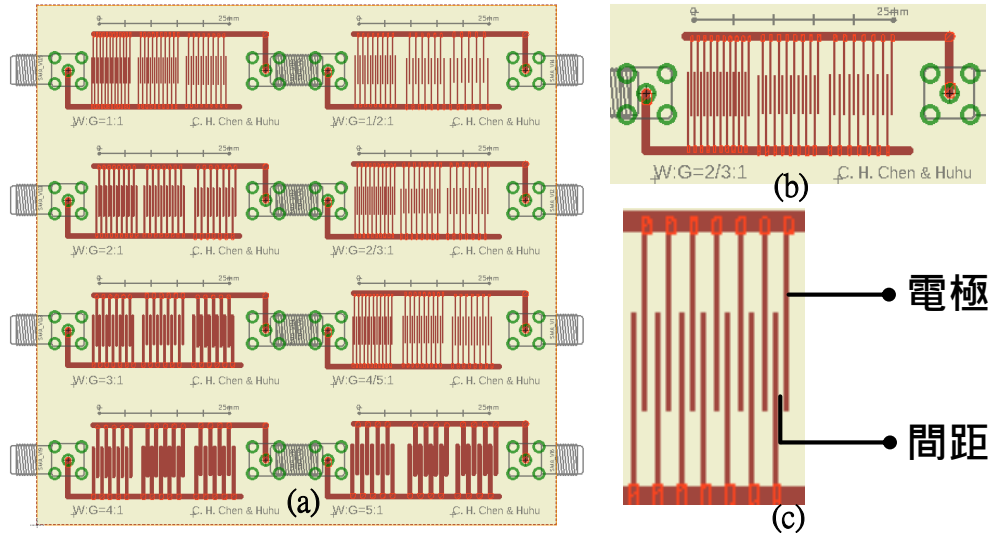
如圖四(a)所示，使用電路板佈局軟體(EAGLE)設計電路板，再送廠製作。

1. 初版 (實體如圖一(10)所示，表層舖有綠色防焊層，為一絕緣材質)

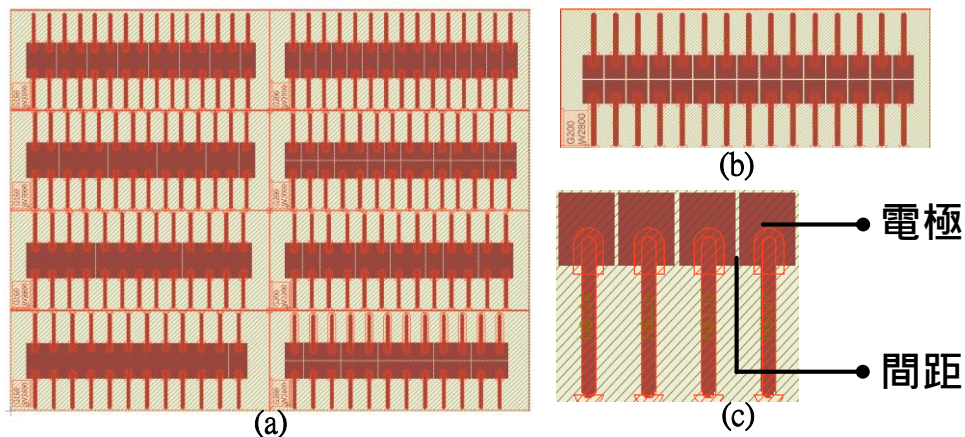
(1) 電路：奇數電極與偶數電極分別並聯，接至正負兩極。

(2) 電極寬度與間距：如圖四(a)所示，同一供電系統內的電極寬度(W)與電極

間距(G)的比例固定，共 8 組。如圖四(b)所示，同一供電系統內又分為 3 組，其中電極寬度以組為單位，由左而右等差增加，電極間距依固定比例，隨電極寬度增加而變化。



圖四、初版電路板製圖，其中深紅色部分為鋪錫的位置。(a)為完整電路板；(b)為其中一組供電系統；(c)為電極寬度與間距的示意圖。



圖五、第二版電路板製圖，其中深紅色部分為鋪錫的位置。(a)為完整電路板；(b)為其中一組電極寬度與間距比例；(c)為電極寬度與間距的示意圖。

(3) 實測結果：水珠無動於衷，位置與形狀皆無變化，此次實驗失敗。

(4) 推測失敗原因：i. 絕緣層過厚，導致電場減弱。

ii. 電極過細，水珠橫跨數個電極，導致電場相互抵消。

2. 第二版 (實體如圖一(11)所示，表層金屬電極裸露)

(1) 電路：每個電極獨立供電，不侷限固定的供電方式，且增為上下兩排電極，使水珠能在多種軌道運動。

(2) 電極寬度與間距：如圖五(b)，將電極寬度增加、間距縮小，推測能使電場

增強。

(3) 實測結果：水珠受電場影響而移動，因此後續皆以此電路板實驗。

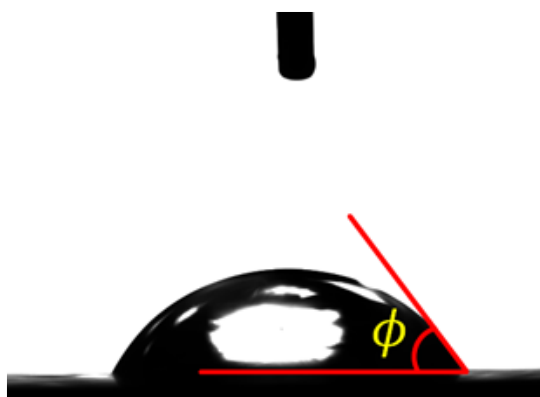
(二) 絕緣層——避免偏壓過大而擊穿水珠，使其發生電解反應

比較防焊層(初版電路板的表層)、熱塑性自封薄膜(封口蠟膜, parafilm)和保鮮膜等絕緣材料：

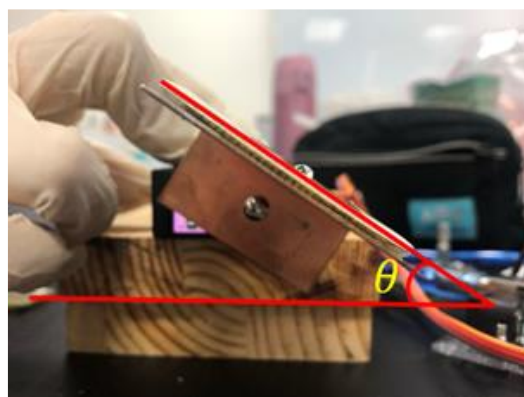
表二、絕緣層的優缺點比較

	優點	缺點
防焊層	表面平整、廠商代工	過厚、無法調整厚度
熱塑性自封薄膜	表面平整、服貼度高	具延展性造成厚薄不均
保鮮膜	厚度適中、服貼度高	具延展性造成厚薄不均

因保鮮膜厚度適中，不致過厚而削弱電場，且可透過不拉扯而直接覆蓋於電路板上的方式，改善其具延展性的缺點。過程中不施加橫向的力而產生形變，所以能統一每次實驗的絕緣層厚度，因此後續實驗皆採用保鮮膜作為絕緣層。



圖六、水珠接觸角 ϕ 為液體/空氣界面接觸固體表面的夾角，且由水珠接觸角大小可判斷其疏水程度。



圖七、水珠滑動角 θ 為水珠滑動瞬間，滑動面與水平面的夾角，且由水珠滑動角大小可判斷其表面粗糙程度。

(三) 疏水層——易使水珠運動

比較防水噴霧、矽油、橄欖油、油炸專用油等四種材料，並以保鮮膜作為對照組。在初步的實驗與觀察後，發現疏水層影響水珠移動的因素，主要分成接觸角與滑動角，如圖六與圖七所示。

以下實驗分別以接觸角與滑動角兩種向度，比較與分析各疏水材料：

1. 水珠接觸角

(1) 實驗目的：探討不同界面的疏水程度。

(2) 實驗步驟：

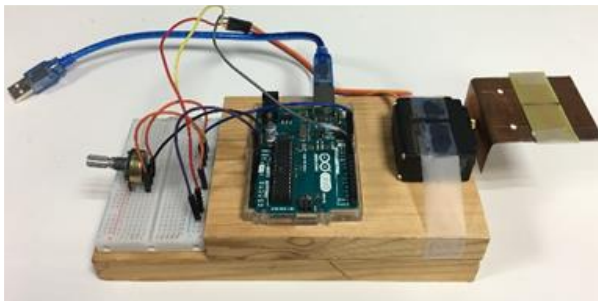
- i. 使用接觸角量測儀滴定固定水量於疏水層介面。
- ii. 電腦分析影像，計算水珠與疏水層界面的接觸角。

2. 水珠滑動角 (如圖八所示)

(1) 實驗目的：探討不同界面的表面粗糙程度。

(2) 實驗步驟：

- i. 在剪裁後電路板的背面畫上中線以利觀察，並包上保鮮膜。
- ii. 將電路板黏於馬達上裝置好的金屬片上。
- iii. 如圖九所示，寫入程式碼控制 arduino，利用可變電阻手動調整馬達轉速與轉動角度。



圖八、滑動角實驗裝置

```
#include <Servo.h>
Servo myservo ;
int r1_pin = 2 ;
int r1_val;

void setup() {
  myservo.attach(9) ;
}

void loop() {
  r1_val = analogRead(r1_pin);
  r1_val = map(r1_val, 0, 1023, 0, 160)
  myservo.write(r1_val);
  delay(15);
}
```

圖九、以可變電阻控制馬達的 Arduino 程式碼

iv. 使用微量吸量管將水珠滴在中線上。

v. 開始轉動馬達，同時採俯視與平視觀察水珠滑動情形。

vi. 在滑動瞬間，馬達停止轉動，使手機與桌面垂直，鏡頭對齊水珠位置拍攝。

vii. 將照片匯入 geogebra 軟體測量角度。

三、實驗二：

(一)實驗目的：

探討供電方式如何影響水珠移動

(二)實驗器材：

使用表一的老虎鉗、電路板、麵包板、pipette、保鮮膜、手套、矽油、油炸專用油、蒸餾水、杜邦線、香蕉－香蕉(線)、BNC 公頭－鱷魚夾(線)、BNC 母頭－香蕉(接頭)、直流電源供應器。

(三)實驗步驟：

1. 選取電路板上 3 個電極。
2. 使用微量吸量管取水 $20\ \mu\text{l}$ ，並滴於中間電極。
3. 紀錄並分析以下 8 種供電方式，如表三與表四，水珠的形變與移動情形。

表三、不同供電方式的電壓(單位為 V)

	電極 1	電極 2	電極 3
A	120	0	120
B	0	120	0
C	120	0	0
D	0	120	120

表四、不同供電方式的電壓(單位為 V)

	電極 1	電極 2	電極 3
A'	-120	0	-120
B'	0	-120	0
C'	-120	0	0
D'	0	-120	-120

四、實驗三：

(一)實驗目的：

探討不同水珠質量、電極寬度、電極間距、疏水界面下，能使水珠運動的最小驅動電壓。(最小驅動電壓：水珠在 3 秒內觸及下一個電極最遠邊界的最小電壓)

(二)實驗器材：

使用表一的老虎鉗、電路板、麵包板、pipette、保鮮膜、手套、矽油、油炸專用油、蒸餾水、杜邦線、香蕉－香蕉(線)、BNC 公頭－鱷魚夾(線)、BNC 母頭－香蕉(接頭)、直流電源供應器。

(三)實驗步驟：

- 1.將杜邦線焊在電路板上。
- 2.包上保鮮膜。
- 3.使用微量吸量管分別取油炸專用油和矽油各 $20\ \mu\text{l}$ ，滴於電路板上並均勻塗抹。
- 4.連接電路。
- 5.使用微量吸量管分別取純水 $10\ \mu\text{l}$ 、 $15\ \mu\text{l}$ 、 $20\ \mu\text{l}$ ，滴於第一個電極上。
- 6.以 5V 為一單位，從 200V 開始向下遞減，並測量最小驅動電壓。

五、實驗四：

(一)實驗目的：

探討不同供電方式與能使水珠流暢運動的最短供電週期的關係。

(供電週期：每一次切換電壓相隔的時間；最短供電週期：能使水珠在 4 格電極來回運動，且水珠運動速率最快的供電週期)

(二)實驗器材：

使用表一的老虎鉗、電路板、麵包板、Arduino 板、電腦、pipette、保鮮膜、手套、矽油、油炸專用油、蒸餾水、杜邦線、香蕉－香蕉(線)、BNC 公頭－鱷魚夾(線)、BNC 母頭－香蕉(接頭)、直流電源供應器

(三)實驗方法：

寫程式碼控制 arduino，供給基極與閘極 5V 的電壓，進而使電晶體導通或不導通，並藉由此開關控制各獨立電極是否接收高電壓。

(四)實驗步驟：

1. 選擇電晶體：
 - a. 雙極性電晶體(BJT)

	元件結構組成	裝置電路
--	--------	------

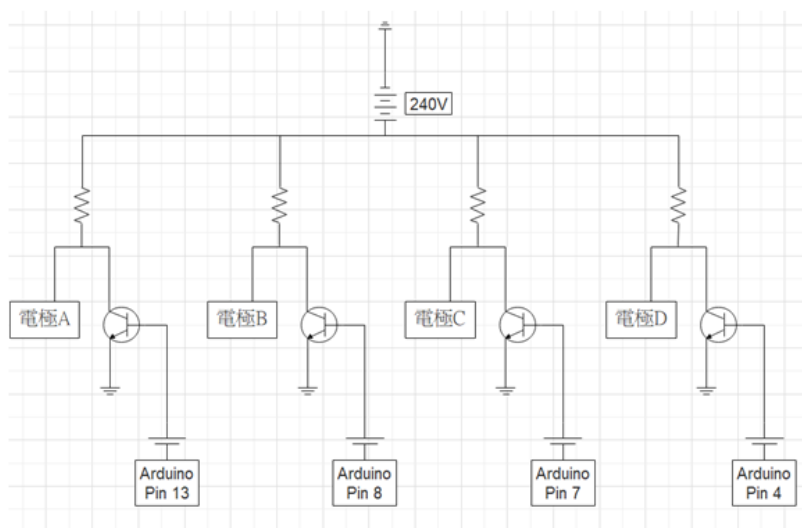
BJT	<p align="center">Bipolar Junction Transistor (BJT)</p> <p> </p>	
特性簡述	<p>電源輸出控制： 控制流經基極的電流</p> <p>開關切換速度： 低 (稍有延遲)</p> <p>電阻值： 低</p>	<p>電阻溫度係數： 負 (當溫度上升→電阻下降→電流上升，因此較易損壞)</p> <p>適用環境： 低電流</p>

b. 金屬氧化物半導體場效電晶體(MOSFET)

	元件結構組成	裝置電路
MOSFET	<p align="center">Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)</p>	
特性簡述	<p>電源輸出控制： 控制流經閘極的電壓</p> <p>開關切換速度： 高 (即時回應)</p> <p>電阻值： 高</p>	<p>電阻溫度係數： 正 (當溫度上升→電阻上升→電流減少，因此較難損壞)</p> <p>適用環境： 高電壓</p>

基於 MOSFET 的優點，並考量本研究利用高電壓使水珠移動，與 MOSFET 的適用環境契合，因此以下實驗均使用 MOSFET。

2. 設計電路：



圖十、架設電路圖，以 4 個 MOSFET 作為開關。

本實驗設計的電路使用四顆 MOSFET，透過 arduino 腳位 4、7、8 與 13 提供的電壓，控制電晶體是否導通，並將其汲極連接 $10^6 \Omega$ 的電阻，若 MOSFET 不導通時，電極的電壓為高電壓 240V；導通時，則電流通過電阻，此時電極的電壓即為零。

3. 寫程式碼(共 4 種)控制 Arduino：

A. 推進式供電方式：

表五、不同供電方式各階段的電壓(單位為 V)

	電極 1	電極 2	電極 3	電極 4
第一階段	240	0	0	0
第二階段	240	240	0	0
第三階段	240	240	240	0
第四階段	0	0	0	240
第五階段	0	0	240	240
第六階段	0	240	240	240

B. 限定式供電方式：

表六、不同供電方式各階段的電壓(單位為 V)

	電極 1	電極 2	電極 3	電極 4
第一階段	240	0	240	240
第二階段	240	240	0	240
第三階段	240	240	240	0
第四階段	240	240	0	240
第五階段	240	0	240	240
第六階段	0	240	240	240

A' 推進式供電方式且電荷先行分離：

表七、不同供電方式各階段的電壓(單位為 V)

	電極 1	電極 2	電極 3	電極 4
第一階段	240	240	240	240
第二階段	240	0	0	0
第三階段	240	240	0	0
第四階段	240	240	240	0
第五階段	0	0	0	240
第六階段	0	0	240	240
第七階段	0	240	240	240

B' 限定式供電方式且電荷先行分離：

表八、不同供電方式各階段的電壓(單位為 V)

	電極 1	電極 2	電極 3	電極 4
第一階段	240	240	240	240
第二階段	240	0	240	240
第三階段	240	240	0	240
第四階段	240	240	240	0
第五階段	240	240	0	240
第六階段	240	0	240	240
第七階段	0	240	240	240

4. 將杜邦線焊於電路板上並包上保鮮膜
5. 使用 pipette 取 $20\ \mu\text{l}$ 油滴於電路板上並均勻塗抹
6. 架設電路
7. 使用 pipette 分別取 $10\ \mu\text{l}$ 、 $15\ \mu\text{l}$ 、 $20\ \mu\text{l}$ 純水，滴於第一個電極上
8. 以 0.5 秒為一單位，從 10 秒開始向下遞減並進行測量

伍、研究結果

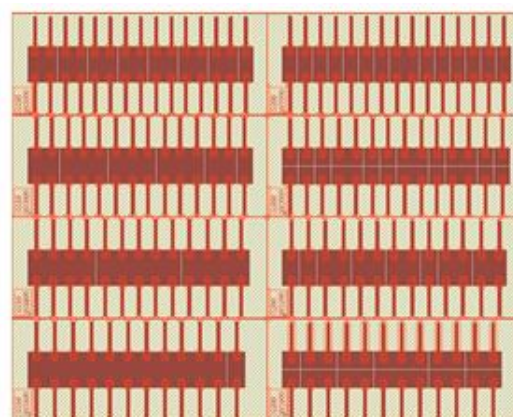
一、實驗一：設計及製作電濕潤裝置

(一)電極

最終使用第二版電路板(如圖十一)

(二)絕緣層

最終使用保鮮膜

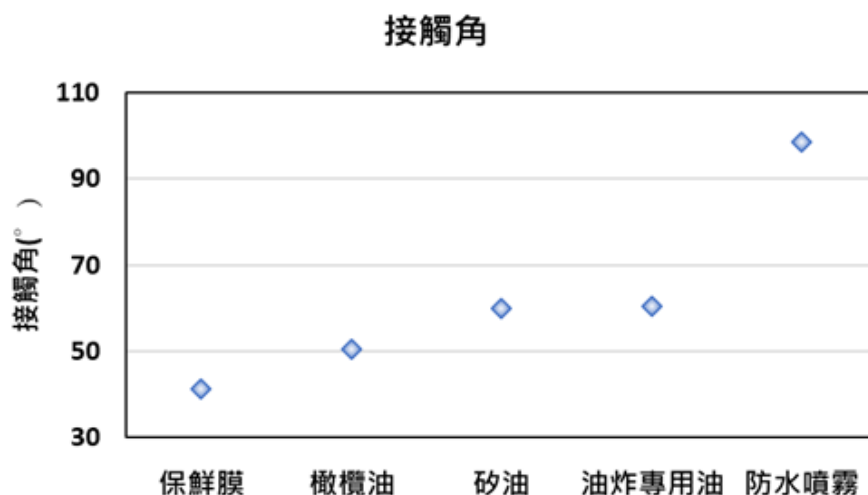


圖十一、最終使用第二版電路板

(三)疏水層

1.水珠接觸角

數據分析：



圖十二、疏水程度由大至小依序為：防水噴霧、油炸專用油、矽油、橄欖油、保鮮膜(對照組)

2.水珠滑動角

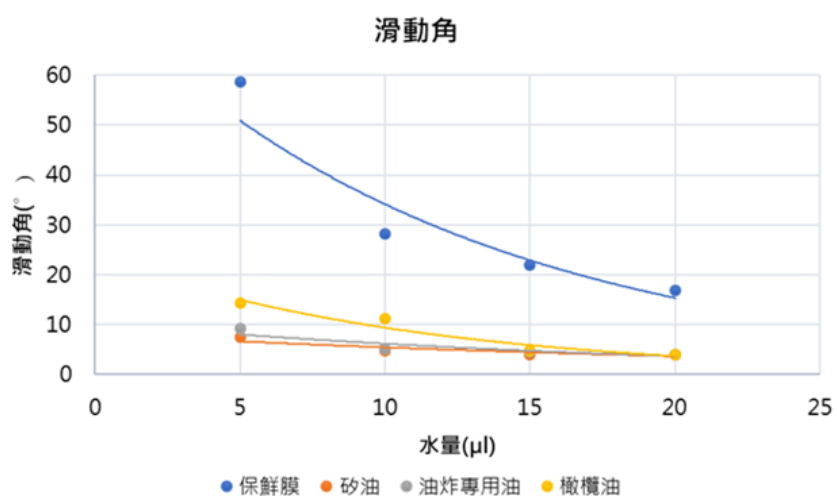
(1)實驗數據：

因裝置最小轉動角度為 4° ，故小於 4° 者皆記為 4° 。

表九、各疏水材料的水珠滑動角(單位為度)，其中防水噴霧均無滑動，因此標示為×。

	$5\mu l$	$10\mu l$	$15\mu l$	$20\mu l$
保鮮膜	56.91	28.76	21.81	18.04
	57.69	29.81	22.51	17.72
	61.50	28.97	21.49	14.69
	58.7(平均值)	29.18(平均值)	21.93(平均值)	16.82(平均值)
矽油	7.81	4	4	4
	7.52	4.49	4	4
	6.91	4.87	4	4
	7.41(平均值)	4.45(平均值)	4(平均值)	4(平均值)

油炸專用油	9.47	5.5	5.16	4
	8.75	4.48	4	4
	9.17	5.45	4.82	4
	9.13(平均值)	5.14(平均值)	4.66(平均值)	4(平均值)
橄欖油	13.68	9.46	4.33	4
	15.36	9.98	4.53	4
	13.24	10.60	5.19	4
	14.09(平均值)	10.01(平均值)	4.68(平均值)	4(平均值)
防水噴霧	×	×	×	×
	×	×	×	×
	×	×	×	×
	×(平均值)	×(平均值)	×(平均值)	×(平均值)



圖十三、滑動角大小由小至大應為砂油、油炸專用油、橄欖油、保鮮

膜、防水噴霧，其中防水噴霧不滑動。

綜合以上接觸角與滑動角兩種向度考量，應採用接觸角較大且滑動角較小的疏水材料，防水噴霧的疏水程度雖最高，但幾乎無法滑動，並不適合作為此裝置的疏水材料。油炸專用油與砂油的接觸角大小排名分別為第二和第三，同時滑動角大小排名分別為第二和第一，且角度都十分相近，因此得到油炸專用油與砂油為最佳疏水層的材料。

二、實驗二：探討供電方式如何影響水珠移動

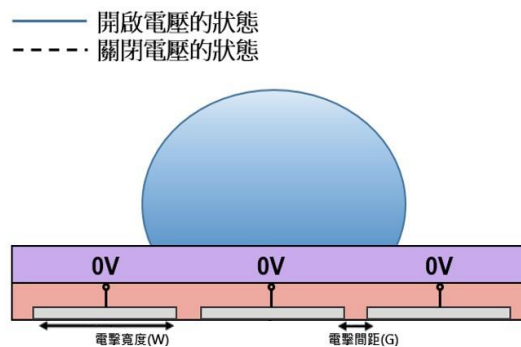
結果分析如圖十四、十五：

由上圖十四、十五可得：

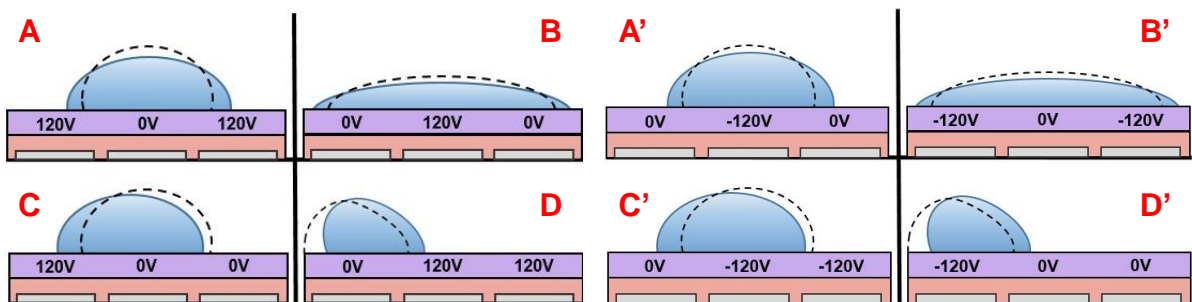
(一)水珠在 B、B' 往兩側攤開的幅度比在 A、A' 大。

(二)水珠在 D、D' 的移動幅度比在 C、C' 大。

由(一)、(二)得知，水珠傾向往電位相對低的電極移動，亦即水珠運動方向與電場方向相同。



圖十四、為本實驗的實驗裝置，也是未供電時水珠位置和形狀的示意圖。



圖十五、左圖為 A、B、C、D 四種由 120V 與 0V 組成的不同供電方式，右圖為 A'、B'、C'、D' 四種由 -120V 與 0V 組成的不同供電方式，與其分別對應到的水珠形變示意圖。其中藍色塗色區塊為供電時水珠的形狀，虛線區塊為關閉電源後水珠的形狀。

(三)停止供電後，A、A' 上的水珠會退回初始位置，B、B' 則否。

(四)停止供電後，C、C' 上的水珠會退回初始位置，D、D' 則否。

由(三)、(四)得知，水珠最後傾向停留在供電時，電位相對較低的電極上。

三、實驗三：探討不同水珠質量、電極寬度、電極間距、疏水介面下，能使水珠運動的最小
驅動電壓

a. 油炸專用油

(一) 實驗數據：

表十、疏水層為油炸專用油時，不同水量、電極寬度與間距的最小驅動電壓(單位為 V)

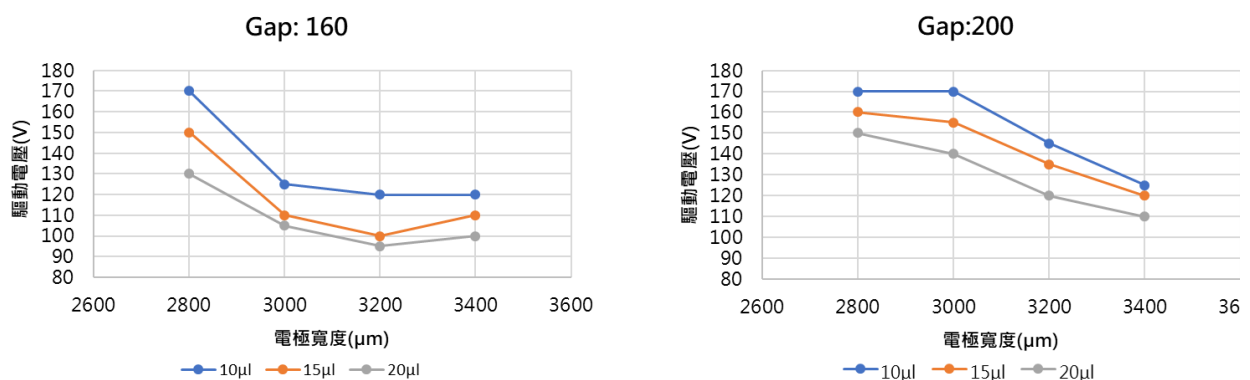
電極間距	水量	電極寬度： 2800 μm	電極寬度： 3000 μm	電極寬度： 3200 μm	電極寬度： 3400 μm
160 μm	10 μl	169	124	120	118
	15 μl	148	109	98	110
	20 μl	127	103	95	97
200 μm	10 μl	170	167	143	123
	15 μl	157	154	132	118
	20 μl	148	138	117	109

(二) 數據分析：

1. 在不同電極寬度與間距下，水量對最小驅動電壓的影響。

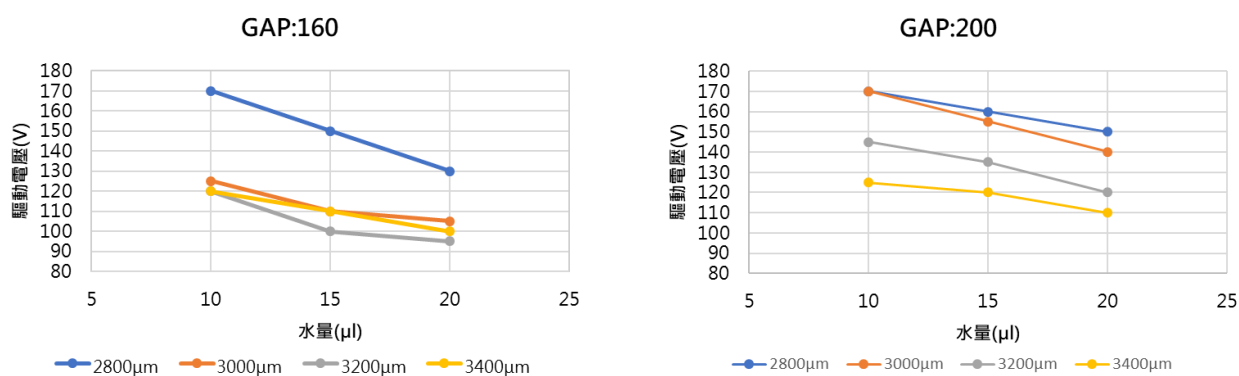
(1) 由圖十六得到，水量越大，驅動電壓越小。

(2) 比較圖十六中左圖和右圖，發現電極間距較小的 160 μm ，整體驅動電壓較電極間距較大的 200 μm 小。



圖十六、不同電極寬度和間距下，水量與最小驅動電壓的關係。左圖電極間距為 160 μm ，右圖電極間距為 200 μm 。

2.在不同水量與電極間距下，電極寬度與最小驅動電壓的關係。



圖十七、不同水量下，電極寬度和間距與最小驅動電壓的關係。左圖電極間距為 $160 \mu\text{m}$ ，右圖電極間距為 $200 \mu\text{m}$ 。

(1)由圖十七得到，電極寬度越大，驅動電壓越小。圖十七左圖中，推測電極寬度 $3400 \mu\text{m}$ 的最小驅動電壓應為實驗誤差。

(2)比較圖十七中左圖和右圖，發現電極間距較小的 $160 \mu\text{m}$ ，整體驅動電壓較電極間距較大的 $200 \mu\text{m}$ 小。

b. 矽油

(一) 實驗數據：

表十一、疏水層為矽油時，不同水量、電極寬度與間距的最小驅動電壓(單位為 V)

電極間距	水量	電極寬度： $2800 \mu\text{m}$	電極寬度： $3000 \mu\text{m}$	電極寬度： $3200 \mu\text{m}$	電極寬度： $3400 \mu\text{m}$
$160 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{l}$	115	105	95	120
	$15 \mu\text{l}$	100	95	90	115
	$20 \mu\text{l}$	85	90	90	120
$200 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{l}$	139	130	118	120
	$15 \mu\text{l}$	118	119	117	137
	$20 \mu\text{l}$	99	108	109	148

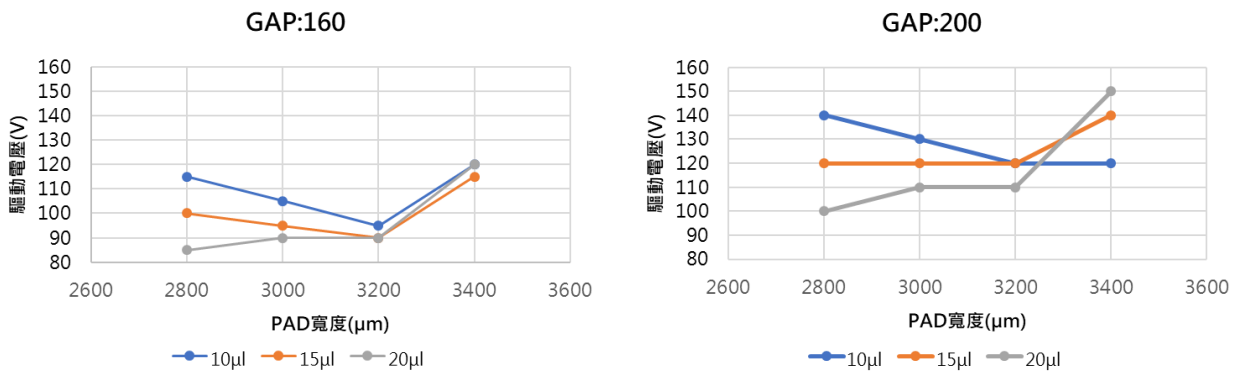
(二)數據分析：

1.在不同電極寬度與間距下，水量對最小驅動電壓的影響。

(1)由圖十八得到，水量較小 $10\mu\text{l}$ 在電極寬度小於 $3200\mu\text{m}$ 時，最小驅動電壓持續下降；水量 $15\mu\text{l}$ 在電極寬度小於 $3200\mu\text{m}$ 時，最小驅動電壓也呈現下降的趨勢，較水量 $10\mu\text{l}$ 平緩，兩者在電極寬度 $3400\mu\text{m}$ 卻變為上升的趨勢；水量 $20\mu\text{l}$ 的最小驅動電壓則持續上升，而在電極寬度 $3200\mu\text{m}$ 到 $3400\mu\text{m}$ 間急速上升。

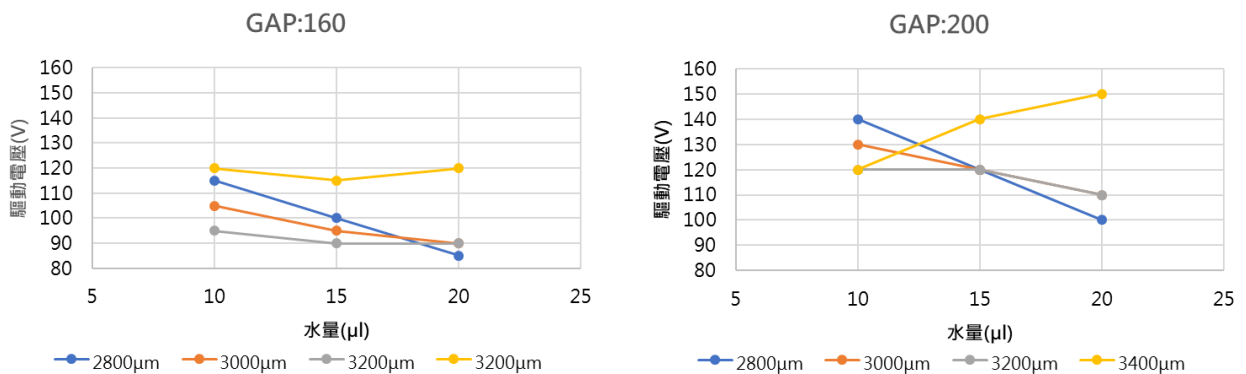
由上述可推測電極寬度 $3200\mu\text{m}$ 為一轉折點，亦即在電極寬度為 $3200\mu\text{m}$ 時，應出現最小驅動電壓的最低值。

(2)比較圖十八中左圖和右圖，發現電極間距較小的 $160\mu\text{m}$ ，整體驅動電壓較電極間距較大的 $200\mu\text{m}$ 小。



圖十八、不同電極寬度和間距下，水量與最小驅動電壓的關係。左圖電極間距為 $160\mu\text{m}$ ，右圖電極間距為 $200\mu\text{m}$ 。

2.在不同水量與電極間距下，電極寬度與最小驅動電壓的關係。



圖十九、不同水量下，電極寬度和間距與最小驅動電壓的關係。左圖電極間距為 $160\mu\text{m}$ ，右圖電極間距為 $200\mu\text{m}$ 。

(1)由圖十九得到，電極寬度 2800 μm 、3000 μm 、3200 μm 的最小驅動電壓呈下降趨勢，且由寬度小到大逐漸變得平緩；電極寬度 3400 μm 的驅動電壓則呈現上升的趨勢。若討論斜率，此 4 種電極寬度由小而大的斜率逐漸增加，而 3200 μm 到 3400 μm 則是斜率正負切換處，因此也可視 3200 μm 為一轉折點。

(2)比較圖十九中左圖和右圖，發現電極間距較小的 160 μm ，整體最小驅動電壓較電極間距較大的 200 μm 小。

綜合以上結果分析，比較操縱變因，疏水材料矽油、水量 20 μl 、電極寬度 2800 μm 和電極間距 160 μm 的組合最佳。

四、實驗四：探討不同供電方式與能使水珠流暢運動的最短供電週期的關係。

(一)實驗數據：

表十二、不同供電方式下，使水珠流暢運動的最短供電週期(單位為秒)

	第一次	第二次	第三次	平均
<i>A</i>	1.3	1.2	1.3	1.27
<i>B</i>	1.4	1.5	1.5	1.47
<i>A'</i>	0.7	0.7	0.6	0.67
<i>B'</i>	0.8	0.9	0.8	0.83

(二)數據分析(分別比較 A-B 與 A' -B')：

1. A 與 A' 的最短供電週期均較 B 與 B' 的最短供電週期短。

由上述可推測原因為 A 與 A' 的供電方式產生的電場方向，因均相同故可疊加；B 與 B' 則同時產生不同方向的電場而出現部分抵消。

2. A' 與 B' 的最短供電週期均較 A 與 B 的最短供電週期短。

由上述可推測原因為 A' 與 B' 起初皆為+240V 時，負電荷已移至水珠最底層，亦即最靠近電極，當電場產生時，負電荷受到電場作用幾乎不移動，因此水珠僅因正電荷受到電場作用而移動。

陸、討論

一、討論供電方式如何影響水珠移動的結果

(一) 討論水珠向負極形變幅度，大於向正極形變幅度的影響因子。

1. 空氣中自由電子：

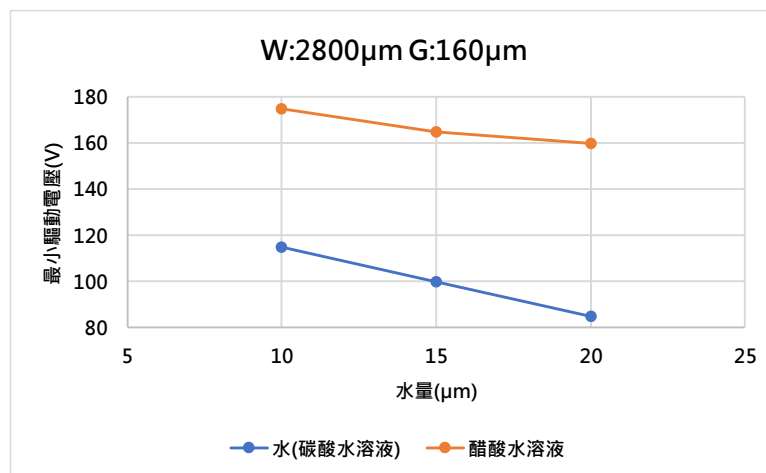
由於空氣中的負電荷向正電極靠近，導致正電極的電壓比施加的小，因此具有比較小的靜電力，攤開的幅度亦較小。

2. 離子遷移速率：

從化學離子遷移速率的觀點，一般自來水，或是擺放超過半天的蒸餾水，都會有二氧化碳溶於其中，形成 pH 值約為 6 的碳酸水溶液，其中會解離出帶正電的氫離子與帶負電的碳酸氫根。據此，我們推測在此溶液中，氫離子的遷移速率為碳酸氫根的幾萬倍，因而造成水珠向負極形變幅度，大於向正極形變幅度的現象。

因此我們配製 pH 值同樣為 6，且在水中解離出氫離子與醋酸根的醋酸水溶液，在相同疏水層、電極寬度與間距的條件下，比較最小驅動電壓。已知其中氫離子的遷移速率相同，而醋酸根離子的遷移速率較碳酸氫根離子慢，因此，若影響其形變差距的原因為遷移速率，則醋酸水溶液的最小驅動電壓會較碳酸水溶液大。

實驗結果如圖二十五所示：



圖二十五、醋酸水溶液的最小驅動電壓較碳酸水溶液大。初步證明，離子遷移速率將影響水珠向正負極形變幅度。

(二) 關閉電壓後水珠的回復幅度

根據實驗(一)的結果，當水珠往相對高電位移動，關閉電壓後，水珠會退回初始位置；當水珠往相對低電位移動，關閉電壓後，水珠不退回初始位置，而傾向停留於形變後的位置。

原理分析：

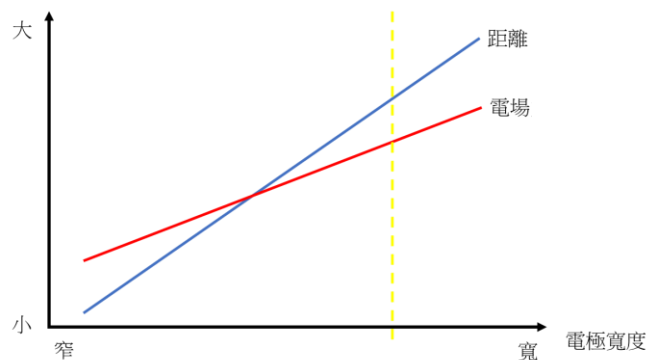
設水珠原來體積為 V_1 ，水珠、周圍空氣與接觸面的邊界分力呈力平衡，直到水珠體積增加至 V_2 時會突然溢出，而在水珠溢出瞬間的接觸角稱為**前進接觸角**。此時向外溢出的水因失去正向力支撐，受到重力作用而產生加速度，使水珠受到一向外的力，並令其水平分力為 F_1 ，向四周攤開。

由上述討論一中(一)的假設原因「水珠往相對高電位移動的力小於水珠往相對低電位移動的力」，我們推測此現象發生的原因為：水珠往相對高電位移動的電場作用力 $\leq F_1$ ，故電場消失後，仍能回復原來形狀；水珠往相對低電位移動的電場作用力 $\geq F_1$ ，故電場消失後，不能回復原來形狀，仍停留於形變後的狀態。

三、討論最小驅動電壓之的結果

在矽油的實驗中，已知電極寬度 $3200 \mu\text{m}$ 到 $3400 \mu\text{m}$ 為一轉折處。

推測原因為：



圖二十六、隨著電極寬度增加，電場強度及水珠需移動距離也增加。

圖二十六中虛線為水珠需移動距離與電場強度，對水珠移動的影響程度相同的階段，而此虛線對應的電極寬度應位於 $3200 \mu\text{m}$ 至 $3400 \mu\text{m}$ 之間。因此在虛線左側時，電場對水珠移動影響較大，隨著電極寬度增加，驅動電壓越來越小；而在虛線右側時，距離對水珠移動影響較大，隨著電極寬度增加，驅動電壓越來越大。

柒、結論

一、疏水層的疏水程度與表面粗糙程度影響電濕潤效果。

電濕潤裝置中，疏水層可以接觸角——疏水程度及滑動角——表面粗糙程度，兩面向進行分析，且推測其表面粗糙程度影響程度較大。

二、水珠運動方向與電場方向相同，且在停止供電後，傾向留在原電位相對低的電極上。

在我們使用的水(碳酸水溶液)中，因正離子的遷移速率較負離子快，水珠傾向往相對電位低的電極移動(與電場方向相同)，且在停止供電後，傾向停留在原電位相對低的電極上。

三、水量越大，水珠運動速率越快。

四、電極與水珠運動速率的關係

(一)電極寬度

電極寬度 $3200\ \mu\text{m}$ 與 $3400\ \mu\text{m}$ 之間，有一轉折點。在此轉折點前，驅動電壓逐漸下降；在此轉折點後，驅動電壓則會明顯上升。

(二) 電極間距

電極間距較小的 $160\ \mu\text{m}$ 之驅動電壓，比較大的 $200\ \mu\text{m}$ 來得小。

五、推進式的水珠移動速率較限定式供電方式快；電荷先行分離的水珠移動速率變快。

(一) 推進式供電方式(實驗五中 A 與 A') 表現較佳，因均為同方向電場，電場可疊加。

(二) 起初若先有正電壓後才開始使水珠移動之供電方式(實驗五中 B 與 B') 表現較佳，因負電荷已先移動，後續水珠移動僅受正電荷影響。

六、使水珠移動速率最大化的有利條件，包含推進式之供電方式，且初始需給正電壓等。

最有利條件為以下四點：

(一) 電極為方格狀、絕緣層薄、疏水程度佳且表面粗糙程度低

(二) 電極寬度不超過 $3200\ \mu\text{m}$ 、電極間距小、水量 $20\ \mu\text{l}$ 內，越大越好

(三) 電壓差距大→電場強度強

(四) 採推進式之供電方式，且初始需給正電壓

捌、參考資料及其他

- [1] Kang Yong Lee, *et al.*, “Smart Self-Cleaning Cover Glass For Automotive Miniature Cameras,” *IEEE MEMS*, Shanghai, CHINA, 24-28 January 2016
- [2] Xuaifeu Reb, *et al.*, “Electrohydrodynamic analysis of electrowetting-on-dielectric (EWOD)-Induced transport of a microdroplet based on the lattice Boltzmann method,” *AIP Advances* 9, 2019.
- [3] Vandana Jain, *et al.*, “Effect of electrode geometry on droplet velocity in open EWOD based device for digital microfluidics applications,” *Journal Electrostatics*, 2017.
- [4] Mdd Enayet Razu, *et al.*, “Digital microfluidics using a differentially polarized interface (DPI) to enhance translational force,” *Lab on a Chip*, 2018.
- [5] Cheung Tong Cheng, *et al.*, “Wetting characteristics of bare micro-patterned cyclic olefin copolymer surfaces fabricated by ultra-precision raster milling,” *RSC Advances*, 2016.
- [6] Katsuo Mogi, *et al.*, “Electrowetting on Dielectric (EWOD) Device with Dimple Structures for Highly Accurate Droplet Manipulation,” *Applied Sciences*, 2019.

附錄

一、實驗四：探討不同供電方式與能使水珠流暢運動的最短供電週期的關係。

A 供電方式的 arduino 程式碼：

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
}

void loop() {
  int a=1;
  int sec=5000;

  Serial.print("2");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(sec);

  Serial.print("3");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(sec);

  Serial.print("4");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(sec);

  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(sec);
}
```



```

Serial.print("2");
Serial.print("\n");
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
delay(a);
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(13, HIGH);
delay(sec);

Serial.print("1");
Serial.print("\n");
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
delay(a);
digitalWrite(13, HIGH);
delay(sec);
}

```

B 供電方式的 arduino 程式碼：

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
}

void loop() {
  int a=1;
  int sec=15000;

  Serial.print("2");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(4, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(8, HIGH);
  delay(sec);

  Serial.print("3");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(4, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(7, HIGH);
  delay(sec);

  Serial.print("4");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(sec);

  Serial.print("3");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(4, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(7, HIGH);
  delay(sec);

  Serial.print("1");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(4, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(sec);
}
}

```

A' 供電方式的 arduino 程式碼：

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);

  Serial.print("WATCH OUT!!! All 240V!");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(4, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(3000);
}

void loop() {
  int a=1;
  int sec=600;

  Serial.print("2");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(sec);
}

```

```

Serial.print("3");
Serial.print("\n");
digitalWrite(13, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
delay(a);
digitalWrite(7, HIGH);
delay(sec);

```

```

Serial.print("4");
Serial.print("\n");
digitalWrite(13, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
delay(a);
digitalWrite(4, HIGH);
delay(sec);

```

```

Serial.print("3");
Serial.print("\n");
digitalWrite(13, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
delay(a);
digitalWrite(7, HIGH);
delay(sec);

```

```

Serial.print("2");
Serial.print("\n");
digitalWrite(13, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
delay(a);
digitalWrite(8, HIGH);
delay(sec);

```

```

Serial.print("1");
Serial.print("\n");
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
delay(a);
digitalWrite(13, HIGH);
delay(sec);

```

```

}

```

B' 供電方式的 arduino 程式碼：

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);

  Serial.print("WATCH OUT!!! All 240V!");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(4, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(3000);
}

void loop() {
  int a=1;
  int sec=700;

  Serial.print("2");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(4, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(8, HIGH);
  delay(sec);

```

```

  Serial.print("3");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(sec);

  Serial.print("4");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(sec);

  Serial.print("3");
  Serial.print("\n");
  digitalWrite(4, LOW);
  delay(a);
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(sec);

```

```
Serial.print("2");  
Serial.print("\n");  
digitalWrite(4, LOW);  
digitalWrite(7, LOW);  
delay(a);  
digitalWrite(8, HIGH);  
digitalWrite(13, HIGH);  
delay(sec);
```

```
Serial.print("1");  
Serial.print("\n");  
digitalWrite(4, LOW);  
digitalWrite(7, LOW);  
digitalWrite(8, LOW);  
delay(a);  
digitalWrite(13, HIGH);  
delay(sec);
```

```
}
```

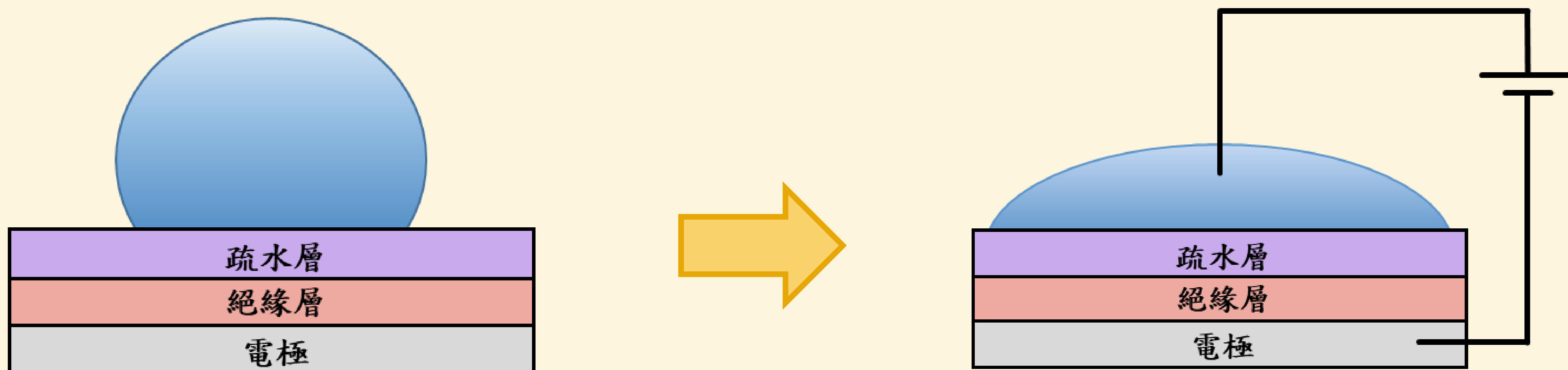
【評語】 051807

本作品探討不同電濕潤的裝置、水量及電場與水珠運動速度的關係，並探究使水珠運動速率最大化的條件。作者展現優良的實驗設計與執行能力，對本主題進行有系統的探討，堪稱佳作。唯本主題並非新穎題材，作品內容宜有更大幅度創新。

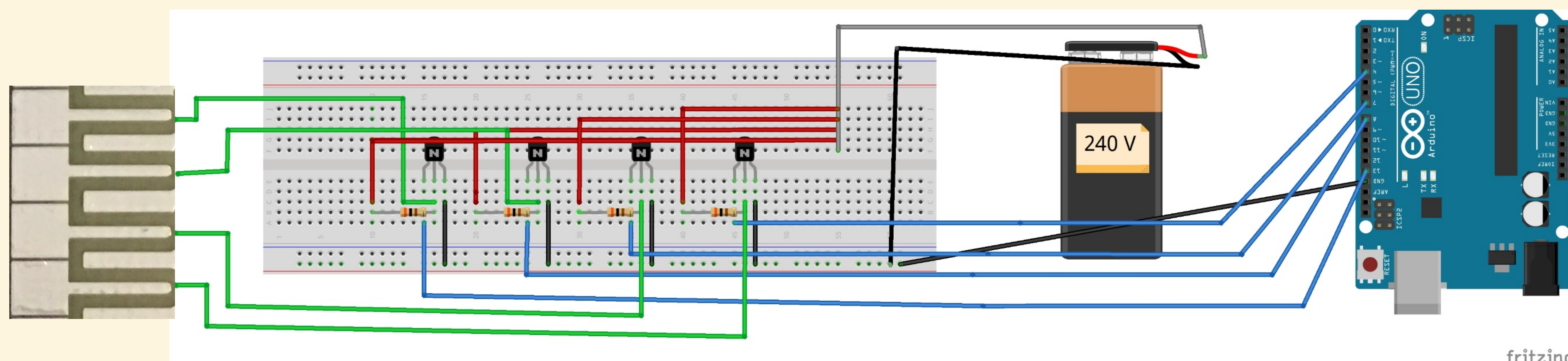
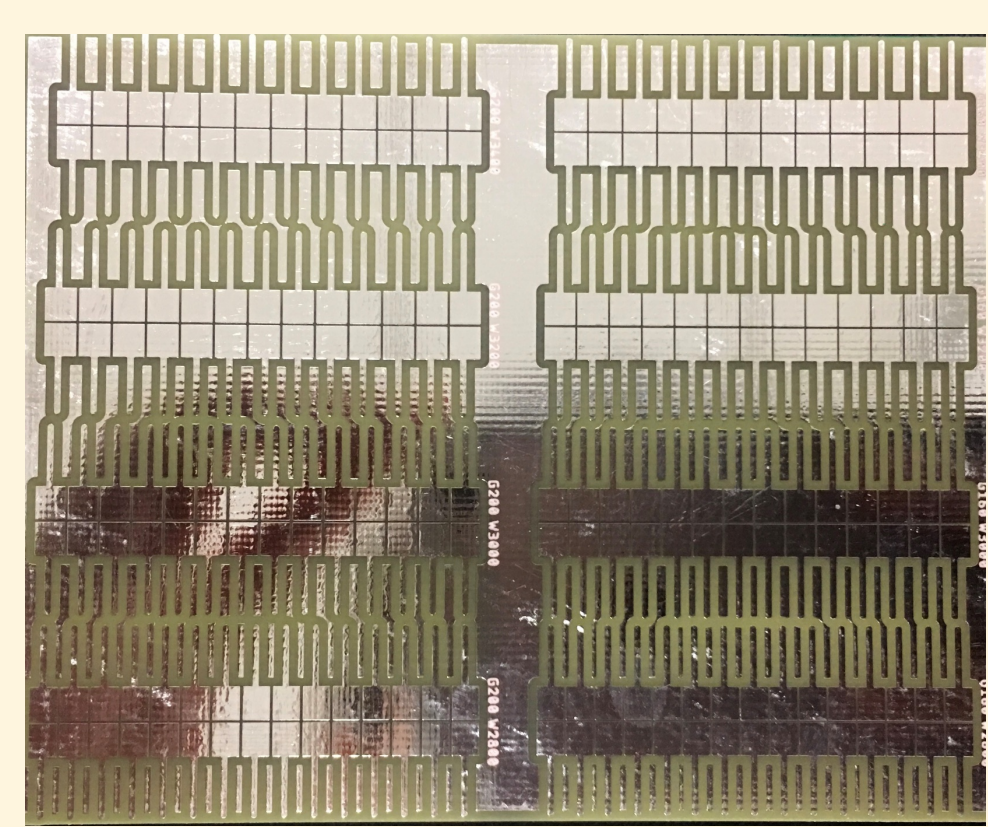
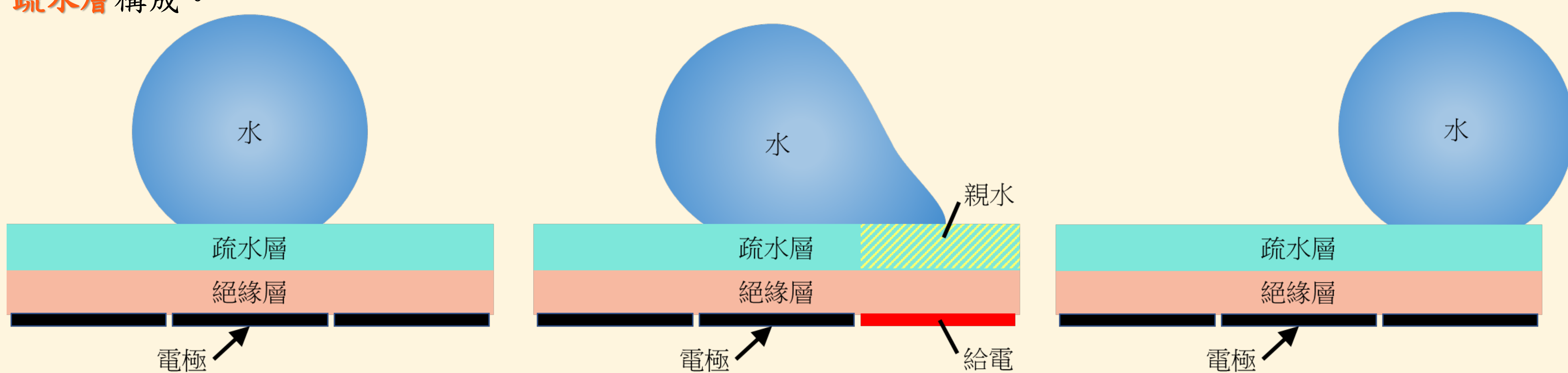
研究目的

本研究首先探討自製電路板及實驗裝置上，會影響水珠移動的變因，並結合程式碼控制電場，探討電場如何影響水珠移動，另外也探討不同水量、電極寬度、電極間距、疏水材料及供電方式與水珠運動速度的關係，並從中探究使水珠運動速率最大化的條件。

透過探討以上變因與水珠運動速度的關係，可望提升電濕潤顯示器單位時間內的幀數(張數)，亦即流暢度，並期盼將此研究結果應用於各式表面的自我清潔系統中。



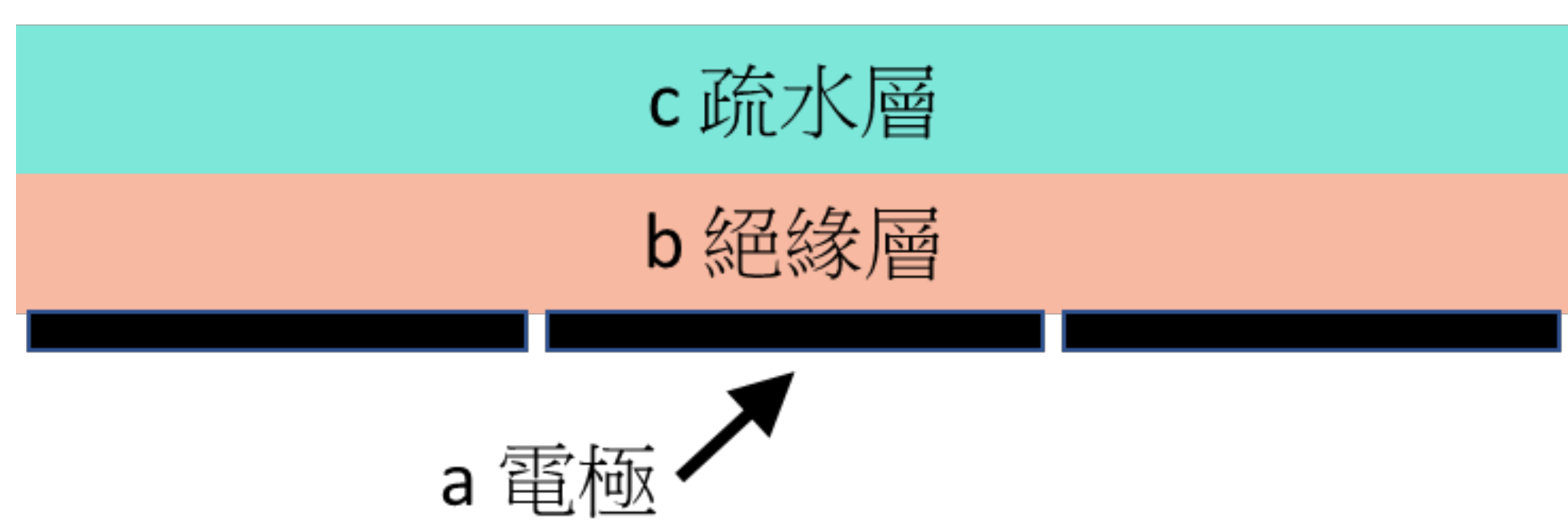
下圖所示為自行設計的介電濕潤裝置，以橫向電場為動力，促使水珠橫向移動，並由**電極**、**絕緣層**、**疏水層**構成。



fritzing

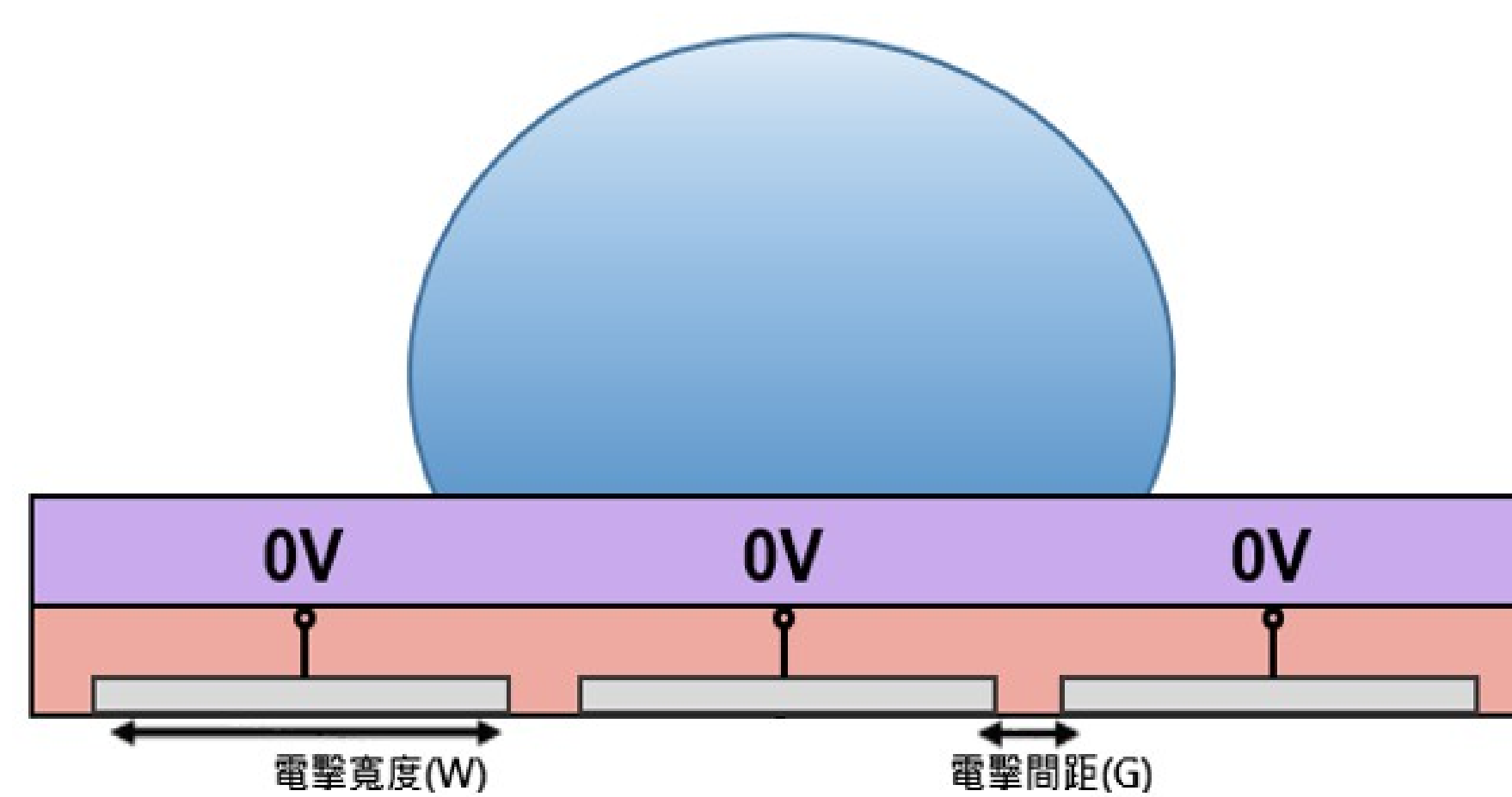
實驗一

製作實驗裝置，探討裝置上影響水珠移動的變因



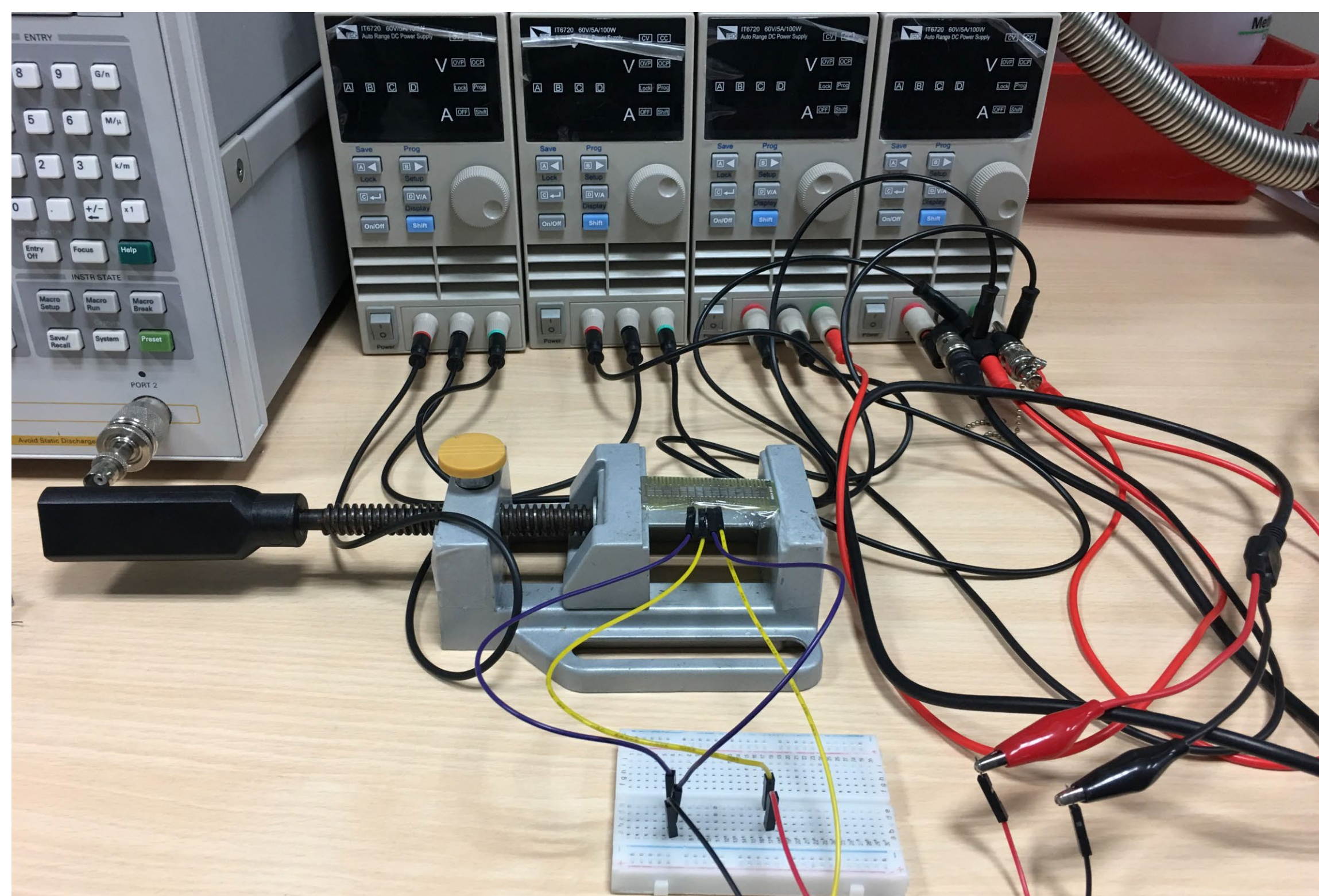
實驗二

探討電場如何影響水珠移動



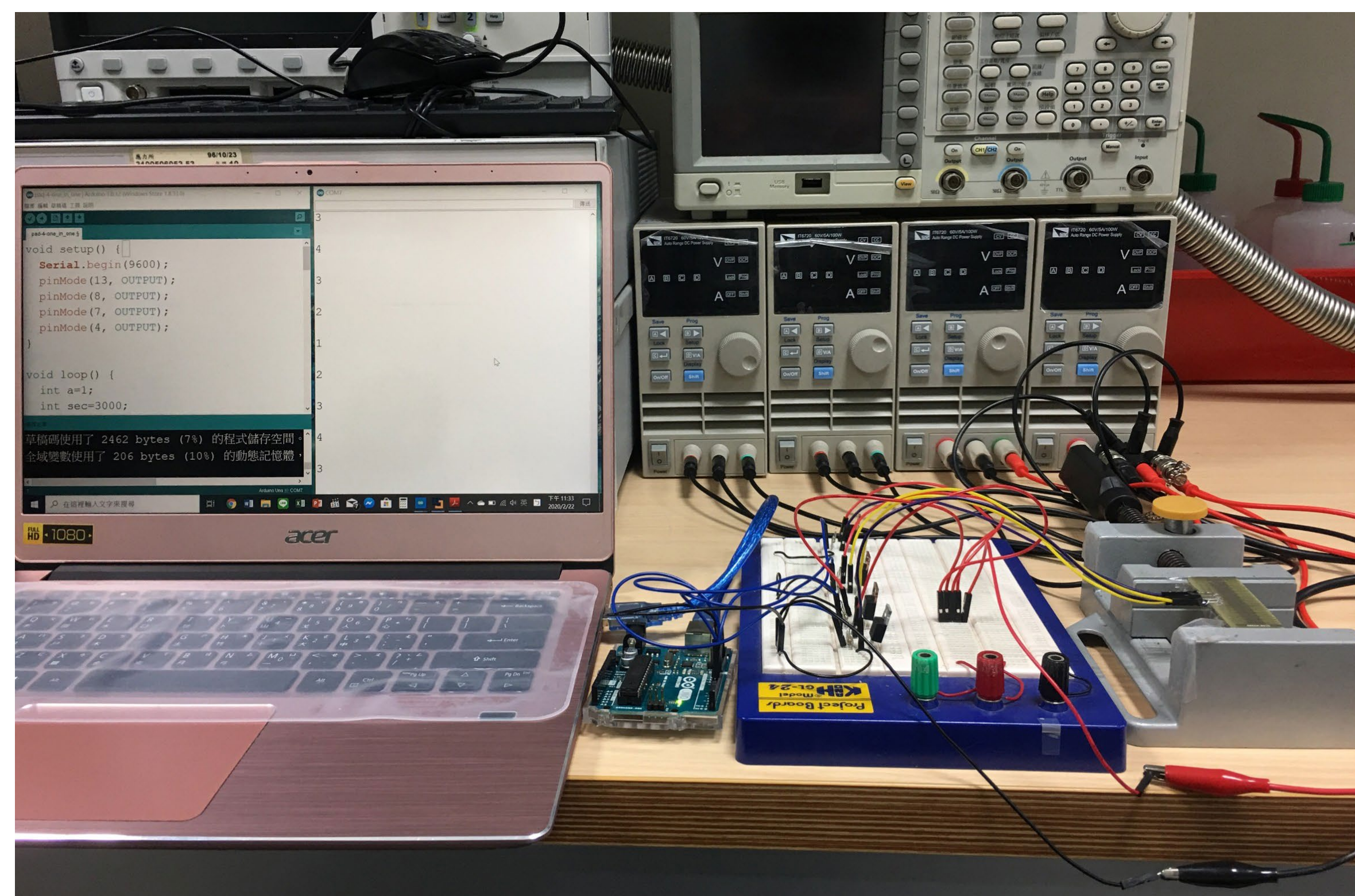
實驗三

探討不同水量、電極寬度、電極間距和疏水材料，與水珠運動速度的關係



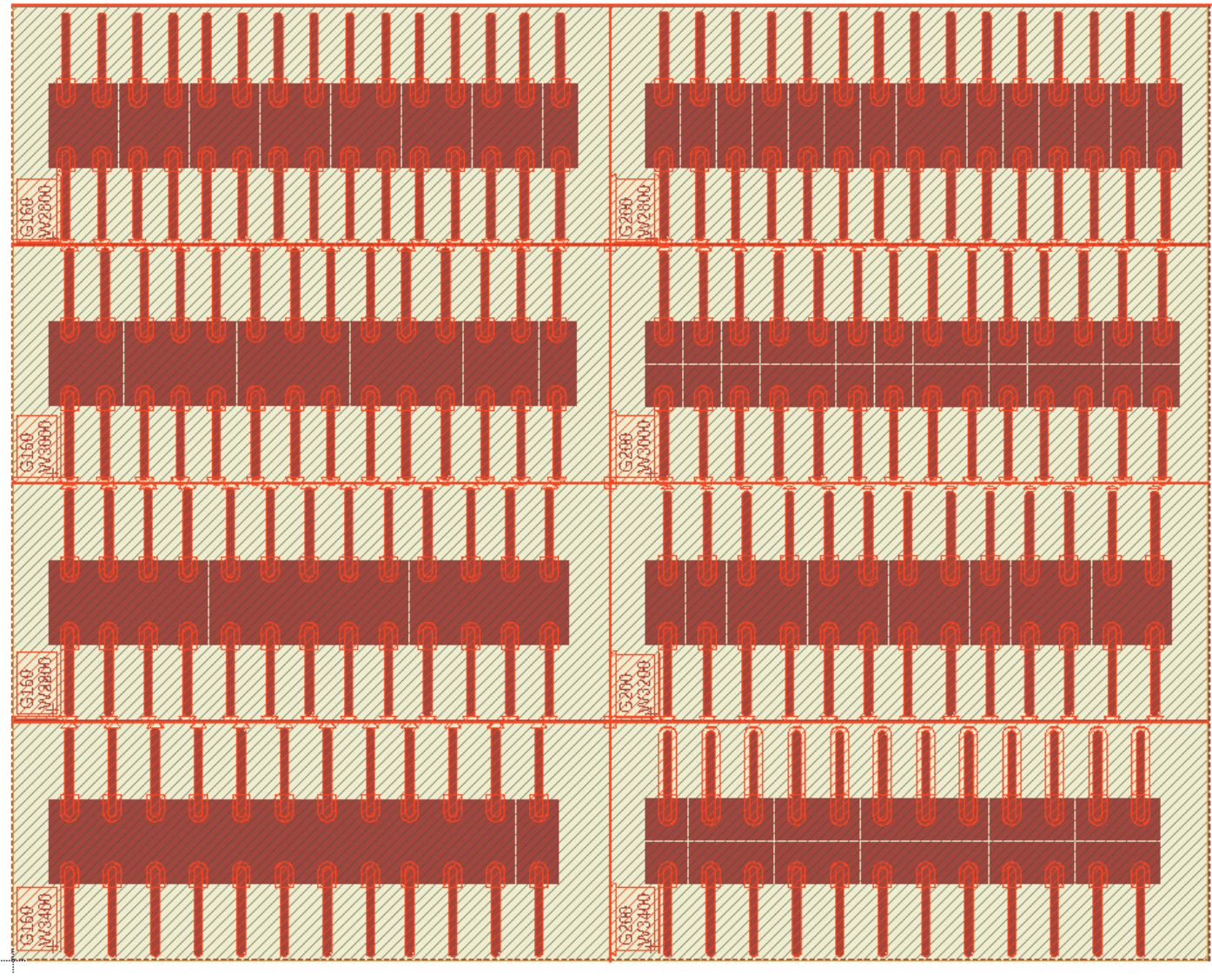
實驗四

探討不同供電方式與水珠運動速度的關係



實驗一

(一) 電極——提供電場使水珠運動

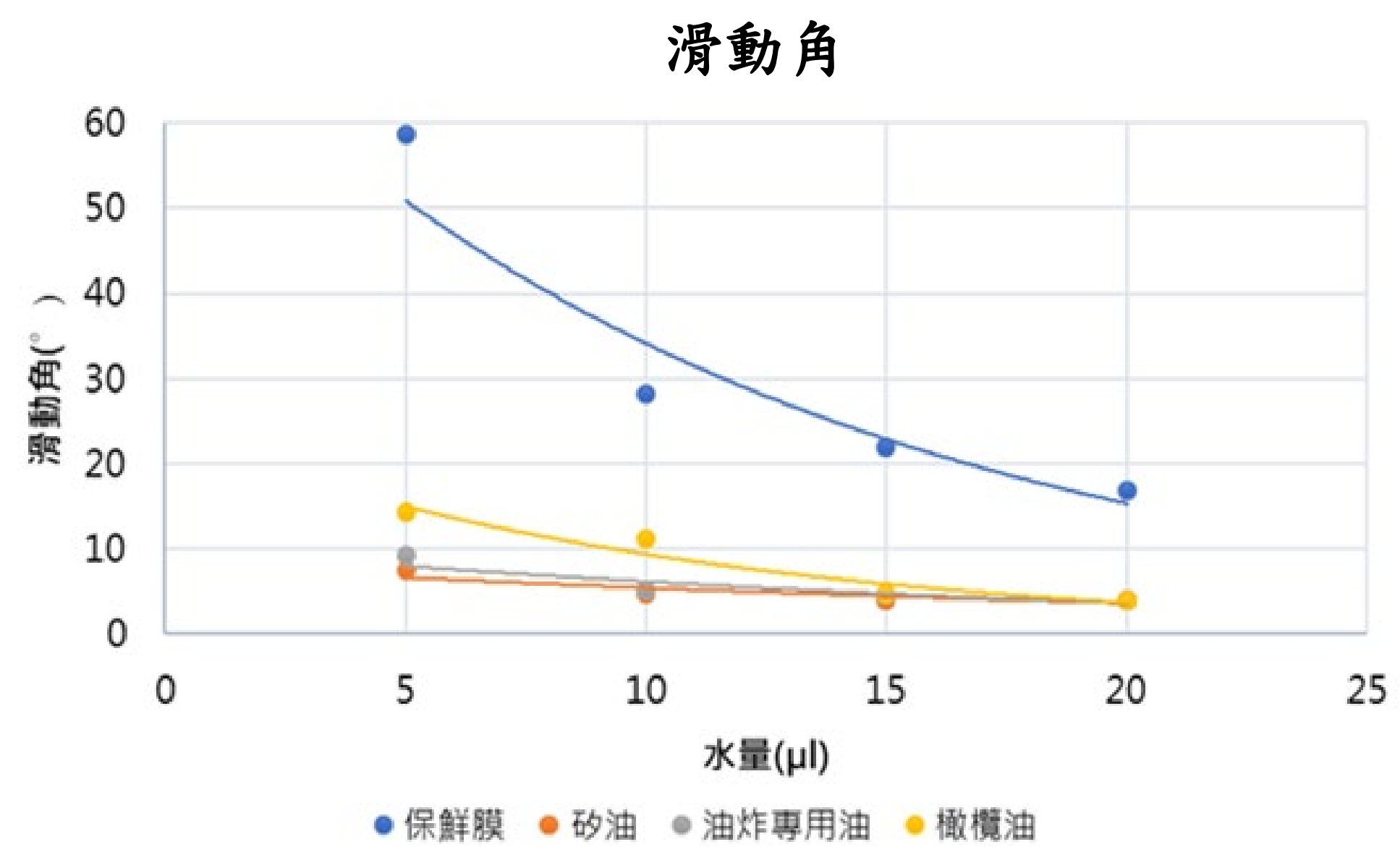
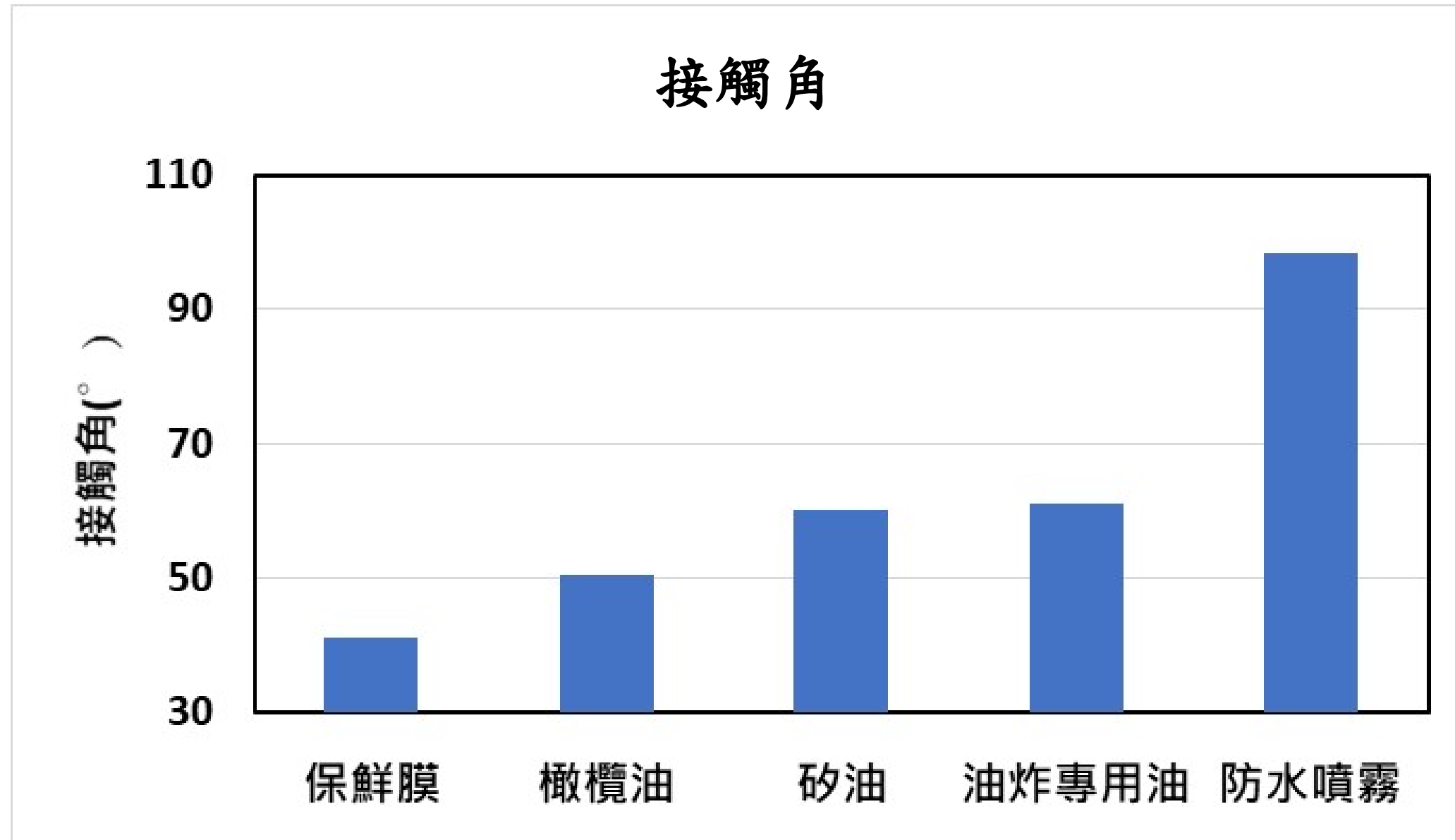


(二) 絕緣層——避免偏壓過大擊穿電雙層發生電解反應

	優點	缺點
防焊層	表面平整、 廠商代工	過厚、 無法調整厚度
Parafilm	表面平整、 服貼度高	具延展性 造成厚薄不均
保鮮膜	厚度適中、 服貼度高	具延展性 造成厚薄不均

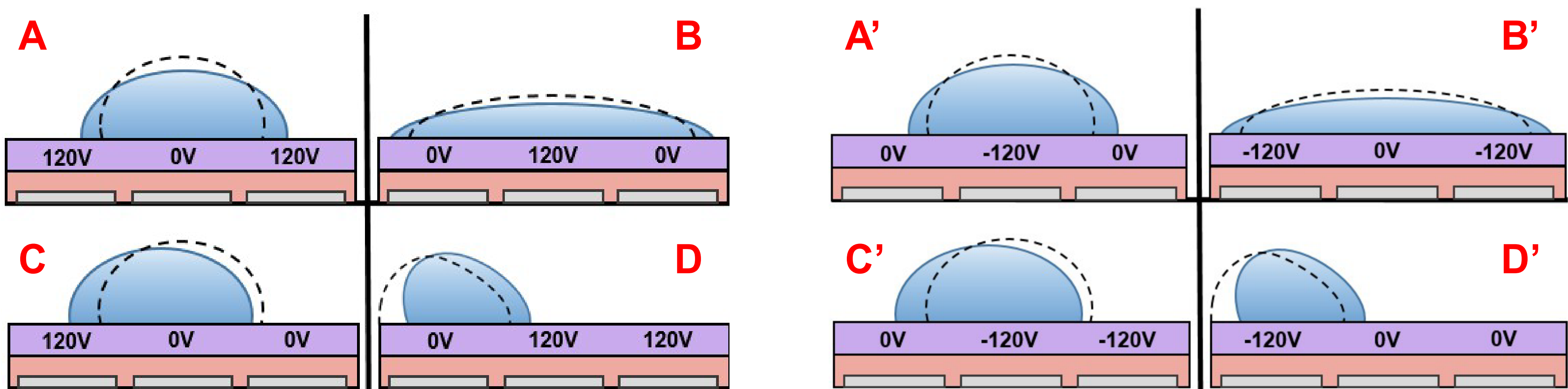
(三) 疏水層——易於水珠運動

以防水噴霧、矽油、橄欖油、油炸專用油及保鮮膜（即絕緣層，作為對照組）五種材質經接觸角與滑動角比較。實驗結果：**油炸專用油與矽油**為最佳疏水層之材料。



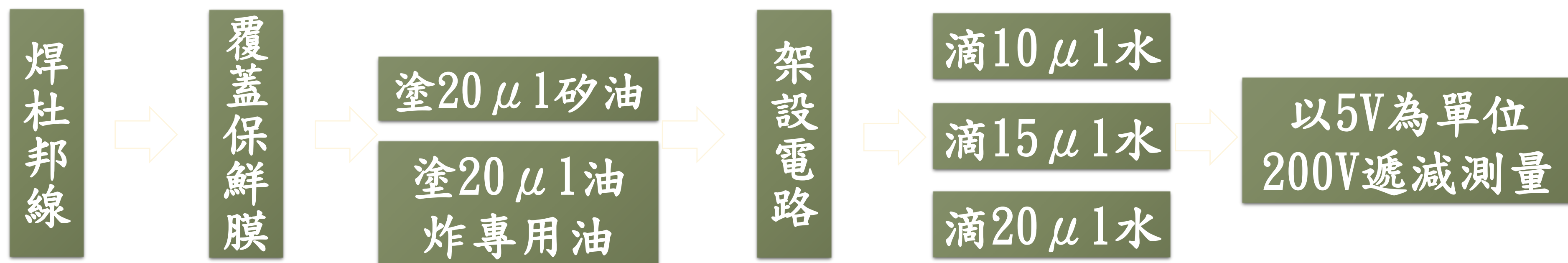
實驗二

—— 開啟電壓的狀態
----- 關閉電壓的狀態



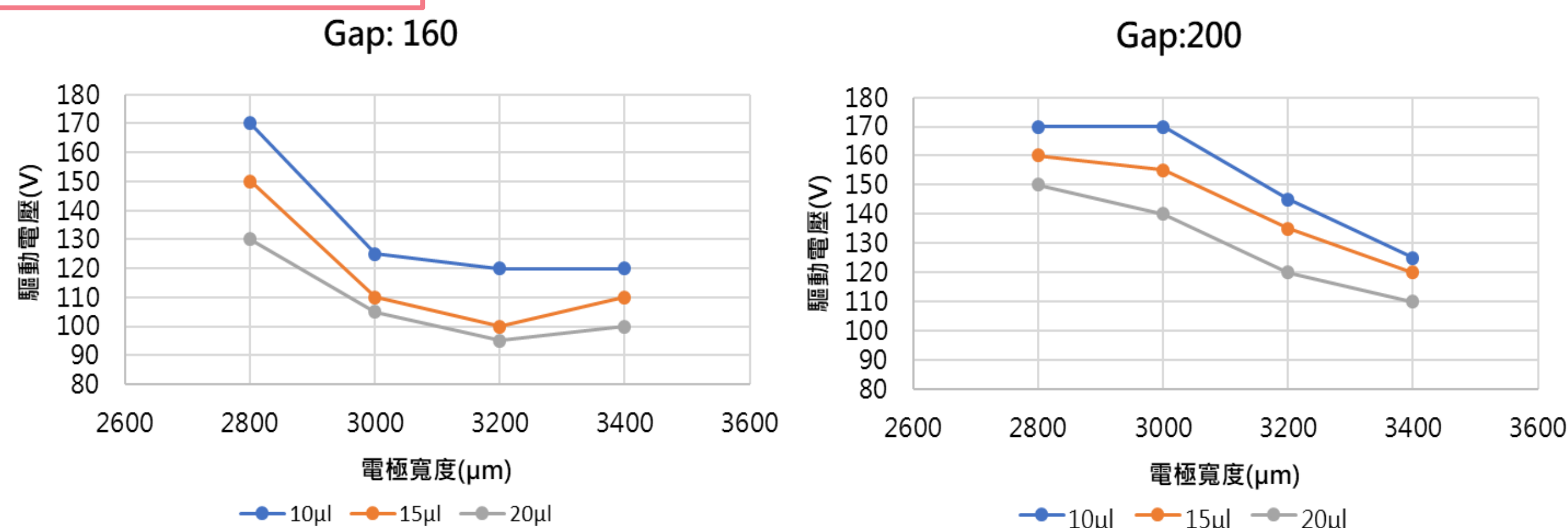
1. 水珠向相對**低電位**移動之幅度 > 向相對**高電位**移動之幅度。
2. 水珠在關閉電壓後，傾向停留於**供電時電位相對低**的電極上。

實驗三



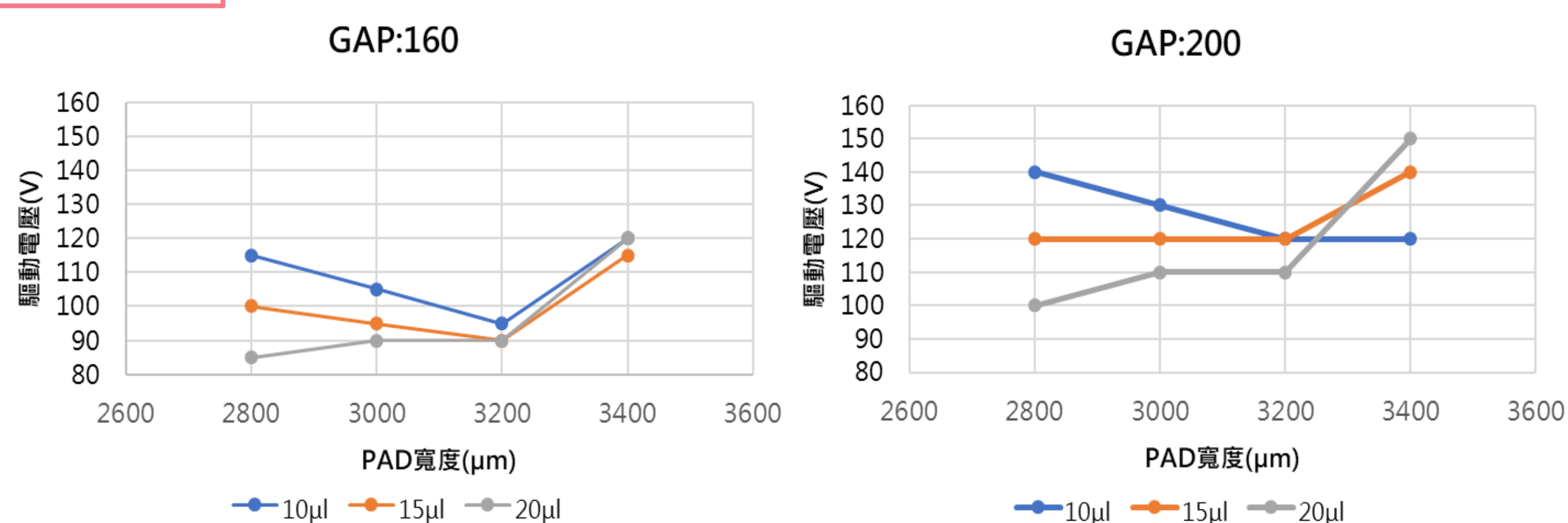
已知條件：最小驅動電壓越小，水珠運動速度越快

A. 油炸專用油



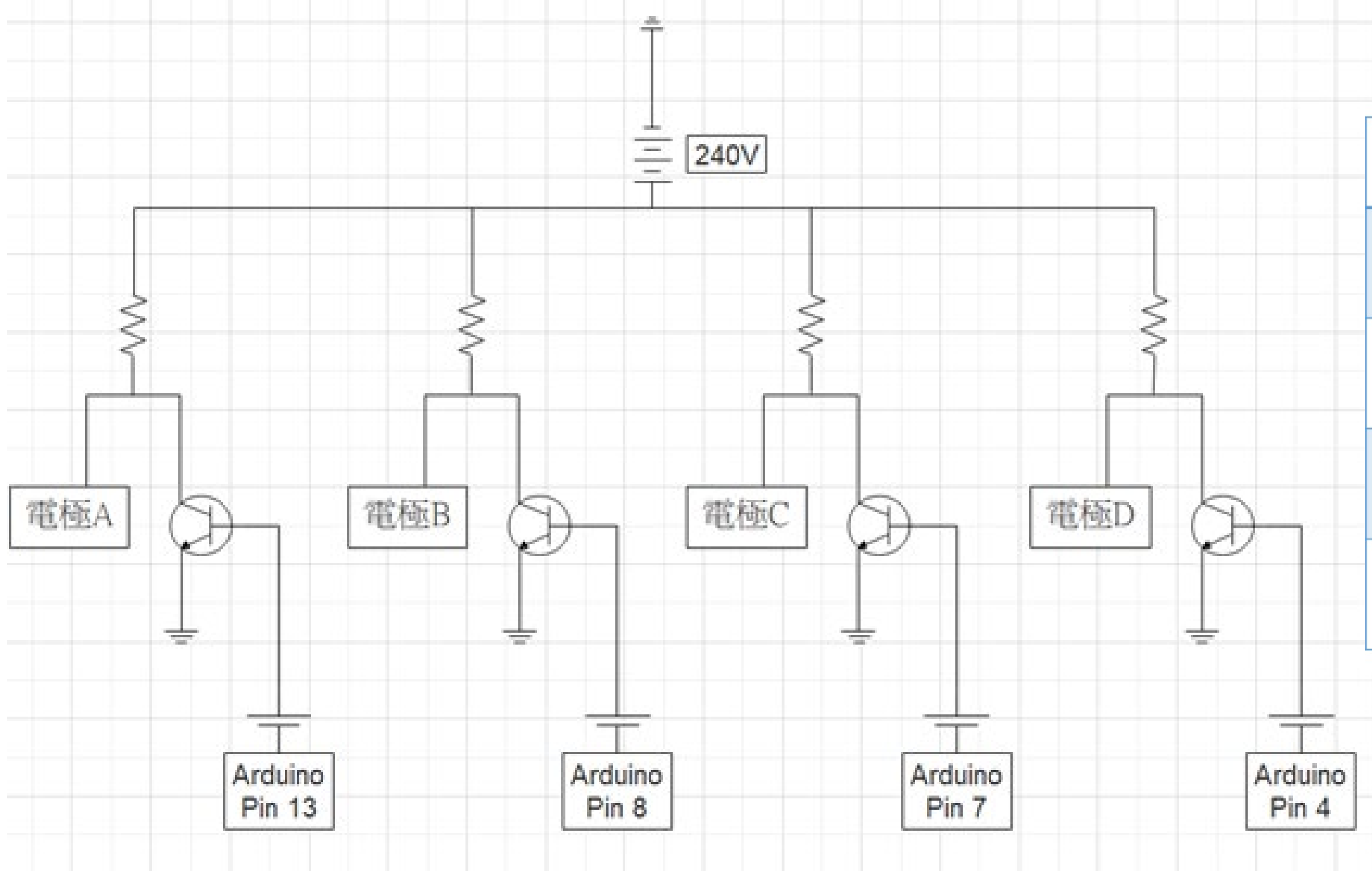
1. 在不同電極寬度與間距下，**水量越大**，驅動電壓越小。
2. 在不同水量與間距下，**電極寬度越大**，驅動電壓越小。
3. **電極間距較小**，整體驅動電壓較小。

B. 矽油



1. 在不同電極寬度與間距下，水量越大，驅動電壓越小；但**在水量20 μl時**，**電極寬度越大**，驅動電壓越大。
2. 在不同水量與間距下，電極寬度越大，驅動電壓越小。**若遇3200 μm~3400 μm之間的轉折點則趨勢相反。**
3. 電極間距較小，整體驅動電壓較小。

實驗四



	一	二	三	四	五	平均
A	1.25s	1.20s	1.30s	1.20s	1.25s	1.24s
B	1.40s	1.45s	1.50s	1.45s	1.50s	1.46s
A'	0.65s	0.70s	0.65s	0.65s	0.60s	0.65s
B'	0.80s	0.85s	0.80s	0.90s	0.80s	0.83s

	推進式	限制式
一般式	供電方式A	供電方式B
電荷分離式	供電方式A'	供電方式B'

1. 推進式較限制式的供電週期短。
2. 電荷分離式較一般式的供電週期短。

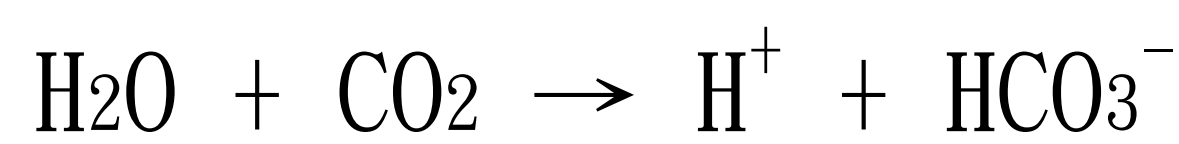
分析實驗結果：

1. 因電場同向而疊加，導致強度增強，故水珠於推進式較限制式運動速度快。
2. 水珠於電荷分離式較一般式運動速度快，則初步證實內部正負離子分布對水珠運動速度具影響性。

實驗結果的原理討論

一、討論供電方式如何影響水珠移動的結果

(一) 水珠向低電位形變幅度，大於向高電位形變幅度的影響因素為**離子遷移速率**。

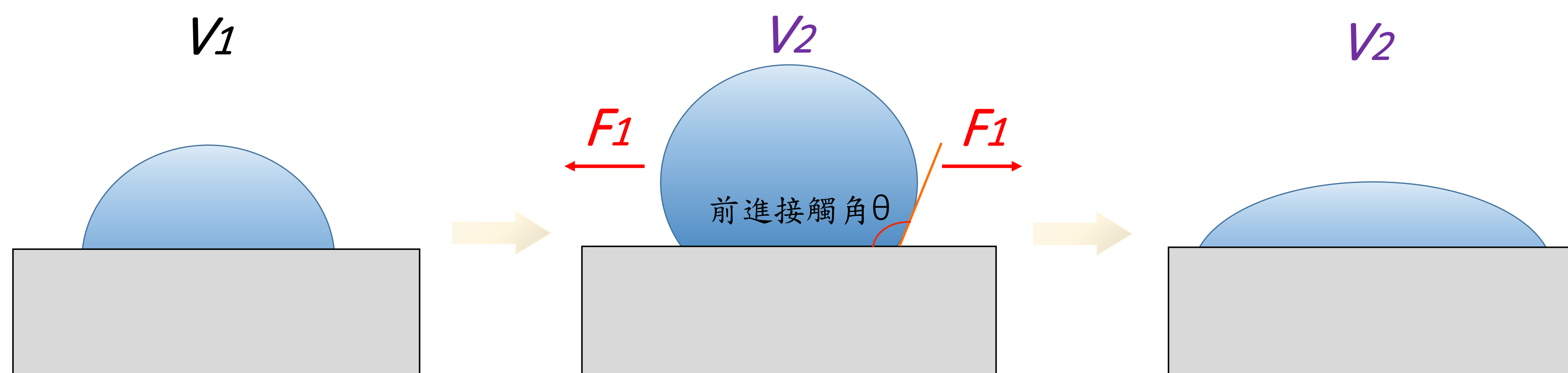


已知**氫離子的遷移速率為碳酸氫根的幾萬倍**，故造成該現象發生，此假設另由實驗證明。

(二) 影響關閉電壓後水珠的回復幅度差距的原因為**前進接觸角**。

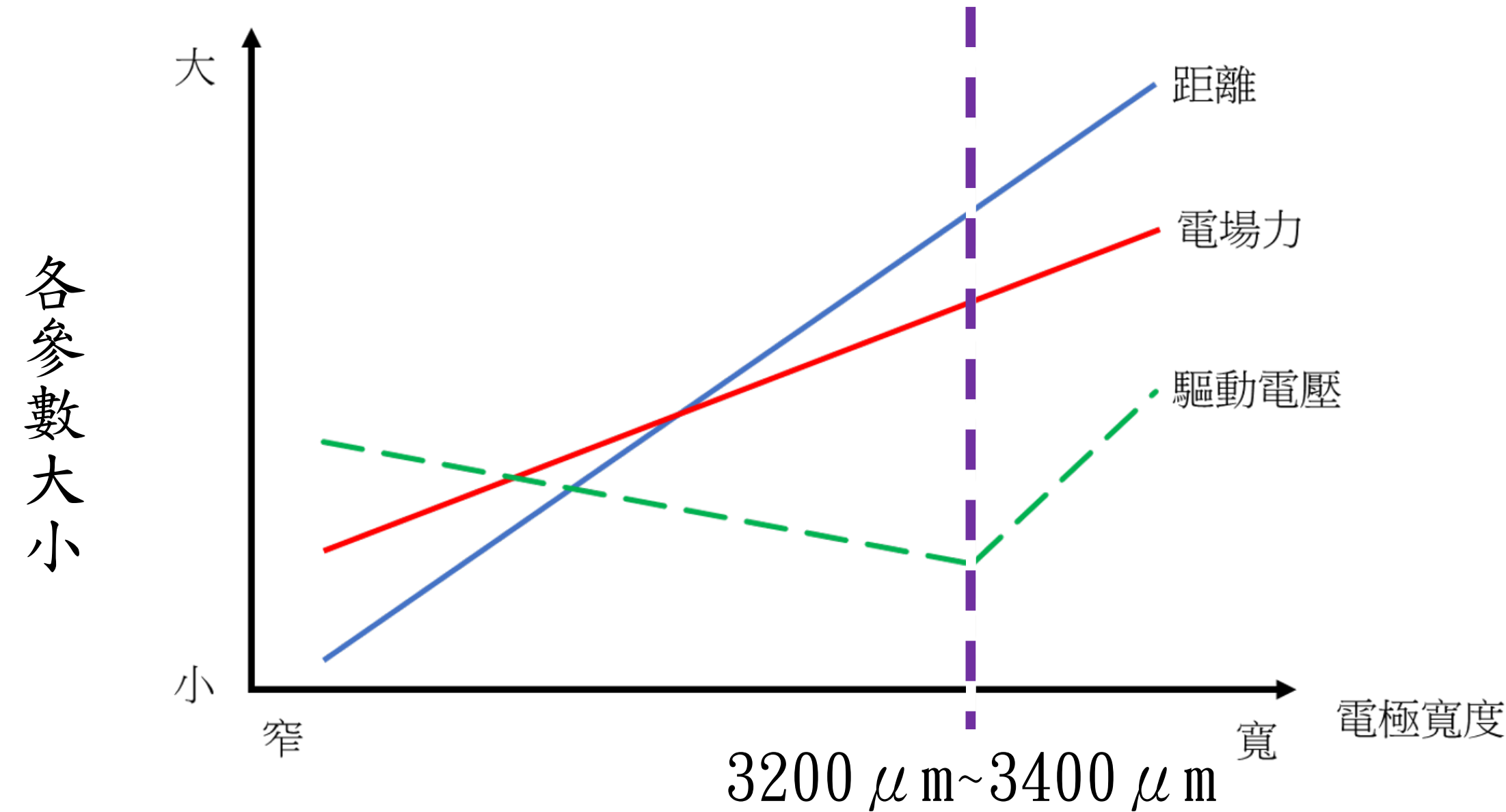
令水珠突破前進接觸角而溢出瞬間，對水珠的水平作用力為 F_1 。

推測此現象發生原因為**水珠往相對高電位移動的電場作用力小於 F_1** ，故電場消失後，仍能回復原來形狀；**水珠往相對低電位移動的電場作用力大於 F_1** ，故電場消失後，不能回復原來形狀，仍停留於形變後的狀態。



二、討論最小驅動電壓出現轉折點的原因

(一) 在矽油的實驗中，已知電極寬度 $3200\ \mu\text{m}$ 到 $3400\ \mu\text{m}$ 有一轉折點。



當電極寬度增加，距離與電場皆增大。距離與電場的線下面積為各自對水珠移動的影響程度。**紫色虛線表示水珠需移動距離與電場強度，對水珠移動的影響程度相同時，對應到的電極寬度應位於 $3200\ \mu\text{m}$ 至 $3400\ \mu\text{m}$ 間。**

結論

- 一、疏水層的疏水程度與表面粗糙程度影響電濕潤效果。
- 二、水珠運動方向與電場方向相同，且在停止供電後，傾向留在原電位相對低的電極上。
- 三、水量、電極寬度越大，電極間距越小，皆使水珠移動速率變快；但遇轉折點，則趨勢相反。
- 四、推進式、電荷分離式，皆使水珠移動速率變快。

未來展望

- 一、以玻璃基板、聚合物絕緣紙作為絕緣層進行以上實驗，可望未來應用於汽車擋風玻璃與太陽能板的自我清潔系統，或電濕潤顯示紙更加省電節能的應用。
- 二、以不同物質狀態（如水蒸氣）進行以上實驗，期望應用於汽車擋風玻璃，解決霧氣影響視線問題。