

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100023

參展科別 工程學

作品名稱 可撓式高分子光電材料的研製與應用

得獎獎項

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學

指導教師 周芳妃、謝馬利歐

作者姓名 趙若嘉、賴蕙云

關鍵詞 聚矽氧烷、可撓式高分子、光電材料

作者簡介



大家好，我們是目前就讀於臺北市立第一女子高級中學科學班的趙若嘉（左）和賴蕙云（右）。我們自幼熱愛科學，非常幸運能成為科學班的一份子，在高中階段有機會進入實驗室研究與學習，並且於群英薈萃的科學展覽會上分享新發現。本研究發想於閱讀學姊的得獎作品，進一步精進光電元件的「可撓」功能，進一步尋找取代矽基板的高分子材料。由衷感謝周芳妃老師與謝馬利歐教授，在我們專題研究的路途中相伴而行、無私奉獻，給予專業建議、支持與鼓勵，成為最堅強的後盾與船帆，引領著我們無畏風雨、破浪前航。

摘要

當軟性穿戴裝置成為趨勢，可撓式光電材料極需被開發。聚矽氧烷(PDMS)是常見的高分子軟材料，其合成簡單，也是目前廣泛研發應用於功能性透明薄膜的材料，但其本質不具導電性。文獻查詢得知利用銀膠與 PDMS 之混合物及矽基板，配合旋轉塗佈可開發出銀-聚矽氧烷新材料，並可開發出 I-V 線性、非線性之電學及感光元件，然而發現其成品再現性較低，且使用硬性矽基板，大大限制了可撓性光電材料的應用性。本研究著重軟性材料作為基板的製程研發，並比較可撓式元件產品的電學性質，使用的高分子基板包括各種市售薄膜。其中當 Ag-PDMS 質量比為 1.4:1.0，以軟性 PET 膜片可呈現最佳結果，可呈現 I-V 線性電學元件的材料特性，其電學特性與文獻使用之矽基板一樣好。使用軟性 PET 膜片(1.5 cm*1.0 cm)為基板製程條件中(Ag-PDMS/PET)，可撓式的 Ag-PDMS/PET 的電學特性不會受到旋轉塗佈轉速影響，而是受到施加電壓的影響。重複文獻的硬性矽基板條件(Ag-PDMS/Si)，施加電壓在 40V 之前，電阻值為才能使硬性 Ag-PDMS/Si 成為 I-V 非線性之電學元件，但是本研究開發的軟性 Ag-PDMS/PET 要表現出 I-V 非線性電性的施加電壓需求，只要 5V 就輕易達成，成為極佳的節能電子元件。文獻中的硬性 Ag-PDMS/Si 具有光電特性，本研究之軟性 Ag-PDMS/PET 的光電特性的研究仍在進行，期能找到最佳條件。本研究亦正進行以鎳取代銀，以降低成本，期能未來朝穿戴式醫療裝置的提供製程簡單的可撓式高功能的節能材料。

Abstract

As flexible wearable devices become a trend, the development of photoelectric materials is in high demand. Polydimethylsiloxane (PDMS) is a common soft polymer. Its synthesis method is simple and is currently widely developed and applied to functional transparent films, but it is not electrically conductive in nature. According to previous documents, a novel Ag-PDMS material, which can be made into diodes and photosensitive devices, can be developed by spin coating a mixture of PDMS and silver paint onto silicon substrates. However, it was found that the reproducibility of those products is low, and the use of rigid silicon substrates greatly limited the applicability of flexible photoelectric materials. This study focuses on the process development using flexible materials as substrates and compares the electric property of different flexible components. The polymer substrate used includes a variety of commercially available films. Among all, when the mass ratio of Ag-PDMS is 1.4:1.0, the soft PET film can show the best results, which can show the material properties of conductors and I-V nonlinear electrical properties. The electrical properties of Ag-PDMS /PET is as good as the silicon substrate used in the documents. Under the process condition of using a soft PET film (1.5 cm*1.0 cm) as the substrate, the electric properties of the flexible Ag-PDMS/PET will not be affected by the speed of spin coating, but by the applied voltage. Reproducing the rigid silicon substrate conditions (Ag-PDMS/Si) in the document, the applied voltage must reach more than 40V to make it a device with I-V nonlinear electrical properties. However, the soft Ag-PDMS/PET developed in this research requires only the applied voltage of 5V to show the I-V nonlinear electrical properties, making it an excellent energy-efficient electronic component. The Ag-PDMS/Si in the document possesses photosensitivity. The research on the photosensitivity of the Ag-PDMS/PET in this research is still in progress, hoping to find the best conditions. The research is also replacing silver particles with nickel particles to reduce cost. We expect to provide flexible, high-function, energy-efficient materials with simple processes for wearable medical devices in the future.

壹、前言

一、研究動機

現代科技日新月異，穿戴裝置逐漸普及，如日常生活中可見的智慧手環、血壓測量機，乃至醫療院所中所使用的腦波感測器，都屬於穿戴式裝置的範疇。然而目前的穿戴式裝置多使用硬式電路，除了其不具可塑性，在製作可撓式穿戴裝置會產生無法緊實貼合皮膚的缺點，其材料更包括玻璃纖維不織物、環氧樹脂等，耗材量大，相當不環保。參考過去文獻，曾經利用旋轉塗佈機及銀膠配方成功將 PDMS 做成 I-V 線性、非線性之電學元件及感光元件，為積體電路之一大突破，但此方法尚未能夠製作出可撓式的光電材料，故想以此方法做為基礎，致力於開發可撓式光電材料，並嘗試減少其中耗資較大的銀（如：將鎳摻入銀），製作出物美價廉的光電元件。

二、研究目的

- (一) 優化銀-聚矽氧烷的製程，找出配方的最佳質量比及旋轉塗佈的轉速
- (二) 探討銀-聚矽氧烷塗佈於各種軟性基板之電學特性
- (三) 利用銀-聚矽氧烷開發出可撓式 I-V 線性、非線性之電學元件

三、文獻回顧

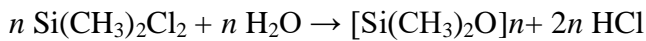
(一) 可撓式光電材料的前景

可撓式光電材料能以不同形式彎曲、扭曲、拉伸，其材料主要是塑膠材料，但也有以可撓式玻璃、金屬箔，或紙製成的版本。可撓式光電材料除了經濟實惠外，更具備能靈活應用、易攜帶、可客製化等特色。此外，可撓式光電材料更可廣泛應用於生物識別技術、醫療電子產品、優化電子電路，其中醫療方面更可能發展出電子皮膚、紫外線輻射偵測貼片、具備可撓電路的隱形眼鏡等穿戴設備。

(二) 聚矽氧烷(PDMS)的合成與高分子特性

1. 合成；

工業上製造鏈狀聚二甲基矽氧烷的反應：



實驗室中以主劑與硬化劑以質量比 10 : 1 比例混合均勻後，利用真空幫浦抽真空的方式使混合液中的氣泡浮至表面並破裂，再放上 120 度的烤盤上烤約一個小時（溫度與時間參數的不同將會製作出不同硬度的 PDMS）。

2. 高分子特性：液態時的聚二甲基矽氧烷為黏稠液體，稱”dimethicone”，屬於矽油之類別，是一種具有不同聚合度鏈狀結構的有機矽氧烷混合物，其端基和側基全為烴基（如：甲基、乙基、苯基等）。一般矽油為無色、無味、無毒、不易揮發的液體。固態的聚二甲基矽氧烷為一種矽膠，為無毒、疏水性的惰性物質，且為不易燃的透明彈性體。聚二甲基矽氧烷的製程簡便且快速，材料成本遠低於矽晶圓，且其透光性良好、生物相容性佳、易與多種材質於室溫下結合，其也因低楊氏模量(Young’s modulus)導致結構高彈性。

（三） 銀與聚矽氧烷(PDMS)複合材料的例子

根據文獻^[10]，此研究將奈米銀及奈米金粒子嵌入 PDMS 的表面。表面奈米複合材料合成於 PDMS 膜上及基於 PDMS 製作之微流控芯片內。為了最大化地提高奈米複合材料的體積折射率敏感性，此研究對其製程進行了優化。而此材料可應用於生物傳感器，在奈米粒子的表面會形成生物受體來結合目標分子。所製程之奈米層可基於其局部表面電漿共振(LSPR)性質，而使用拉曼光譜及光學光譜進行表徵。此研究之具經濟效益的奈米複合材料可成功的用於 LSPR 和 SERS(surface-enhanced Raman-spectroscopy)之目的。

根據文獻^[13]，此研究將奈米銀嵌入 PDMS，並發現奈米銀之抗菌性可使 PDMS 的生物相容性上升，並且降低其疏水性，使得 PDMS 更易讓細胞附著，能廣泛應用於醫療方面。

根據 2020 綠色化學創意競賽得獎作品「可撓式聚矽氧二極體與光感測電子元件之綠色化學製程」可知市售之銀膠與 PDMS 混合並旋轉塗佈於矽基板上可成功將 Ag-PDMS 製作成 I-V 線性、非線性之電學元件及感光元件。

(四) 穿戴式傳感設備

根據文獻^[12]，此文介紹了一種可獲得多尺度結構彈性體電極及高靈敏度壓力傳感器的低成本簡便製造技術。此研究利用了 PDMS 表面可撓性及奈米銀嵌入的原理製備了多尺度結構彈性體電極，並將此電極壓到介電層底部電極模板上可獲得壓力傳導器，此壓力傳導器基於電容傳感機制，具備高靈敏度($>3.8 \text{ kPa}^{-1}$)，快速反應及恢復時間($<150 \text{ ms}$)、高彎曲穩定性和高循環穩定性。製造過程可以按比例放大以生產壓力傳感器陣列，並且檢測施加壓力的空間分佈，展示了指尖壓力傳感裝置能夠感知每個手指在抓取物體時的壓力分佈。

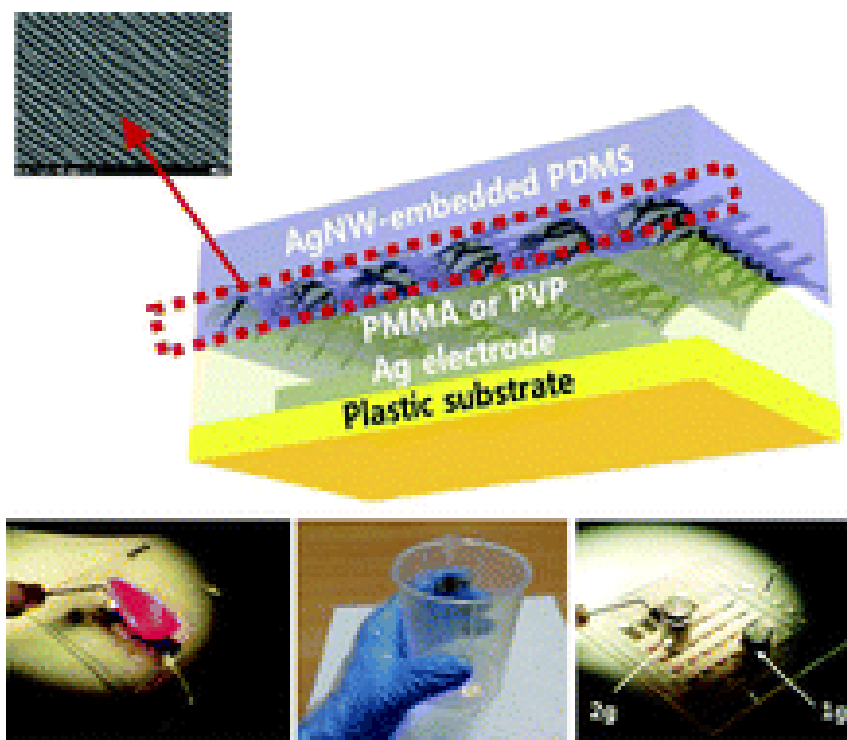


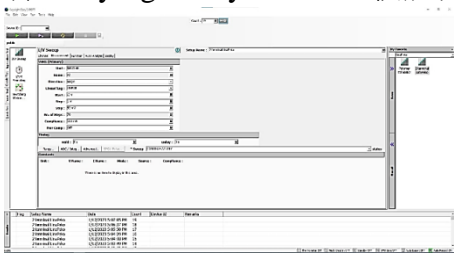



圖 1：利用 PDMS 可撓式和奈米銀嵌入的原理，製備了多尺度結構的彈性體電極

(圖片來源：Silver nanowire-embedded PDMS with a multiscale structure for a highly sensitive and robust flexible pressure sensor)


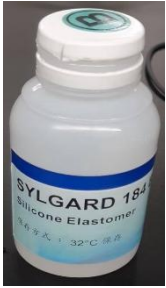
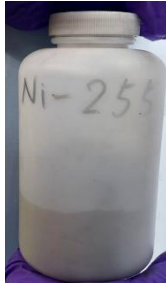

貳、研究方法或過程

一、研究設備及器材

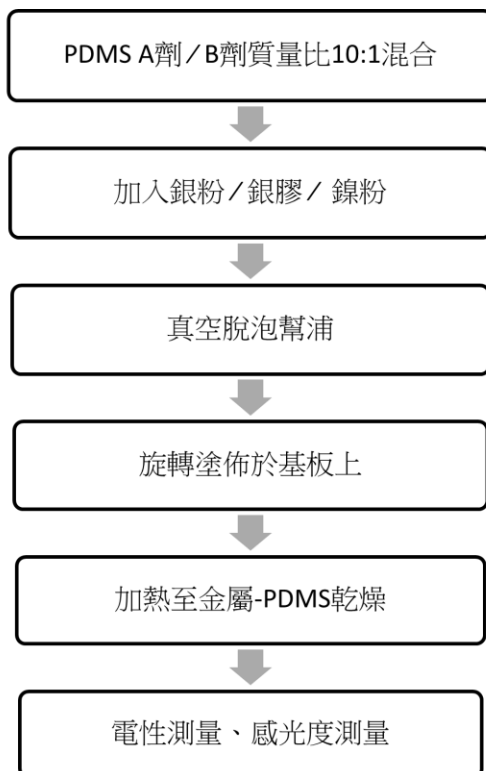
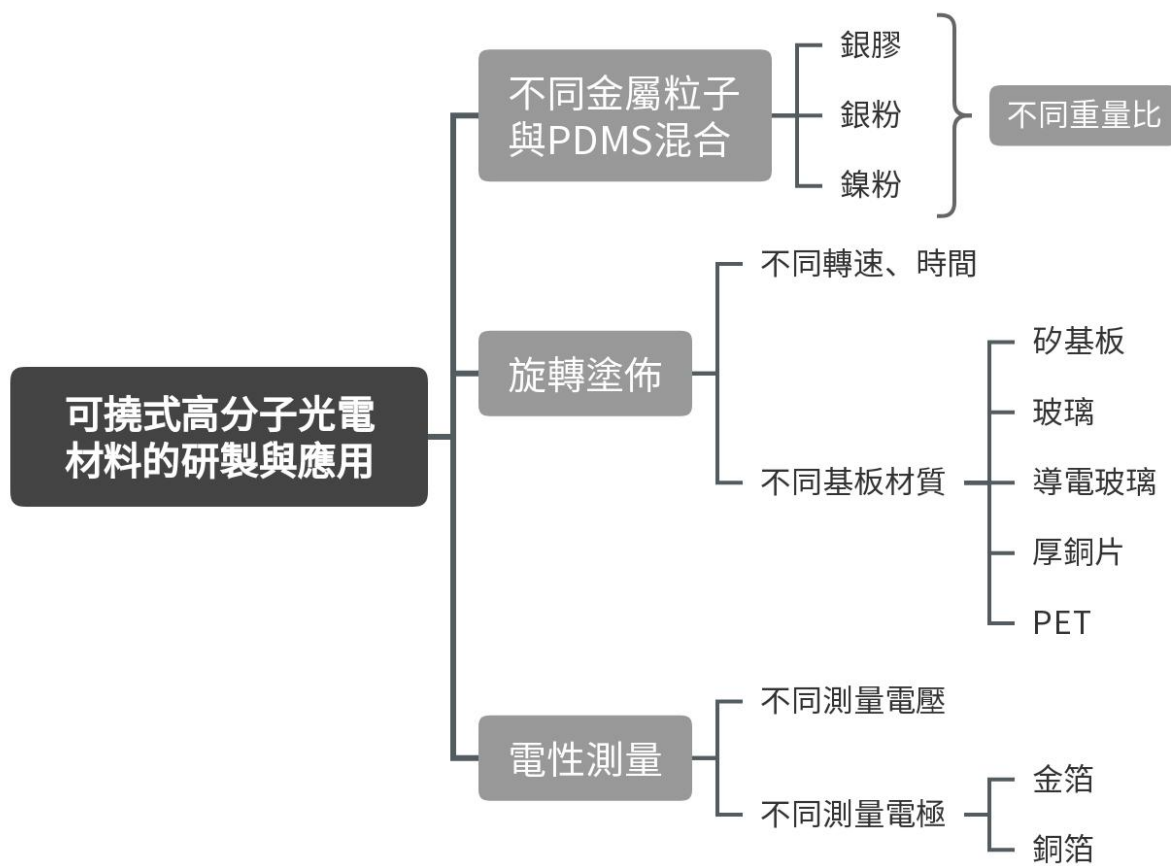
(一) 設備

器材 / 目的	器材 / 目的
電性測量系統 (含 KeySight EasyEXPERT 軟體) 	旋轉塗佈機 (spin coater) 
目的：測量樣品之電學特性	目的：將 Ag-PDMS 均勻塗佈於基板上
電子秤 	加熱板 
目的：秤量藥品重量	目的：加熱以乾燥基板上之 Ag-PDMS
真空幫浦 目的：脫除混和金屬粒子及 PDMS 所產生之氣泡	雷射筆 目的：將光束打至樣品上以測量其感光性質
真空乾燥盒 目的：連接真空幫浦進行抽真空	

(二) 藥品與器材

聚矽氧彈性體主劑 (A 劑) 	聚矽氧彈性體硬化劑 (B 劑) 	鎳粉 (粒子半徑 2.2-2.8 μ m) 	銀膠 Leitsilber 200 Silver Paint (粒子半徑 10 μ m) 
矽基板、碳化矽基板、導電玻璃、PET 膜片、銅片、載玻片、3M 銅箔膠帶、銅箔、金箔			

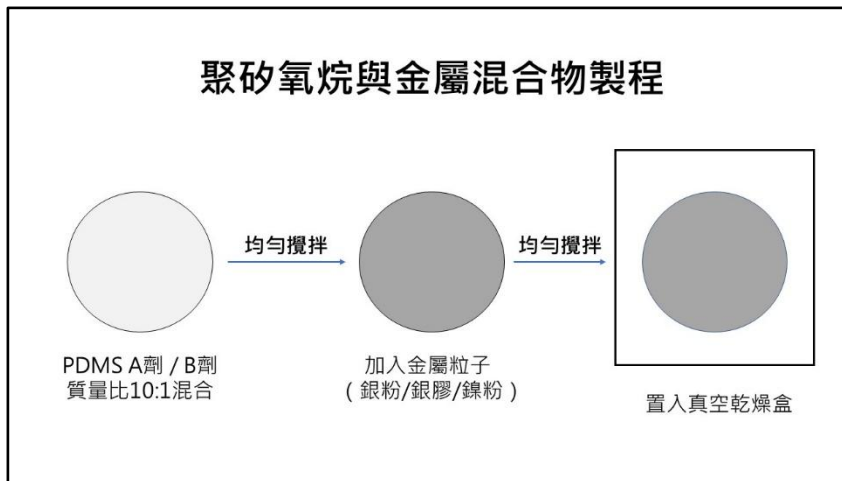
二、研究方法及步驟



我們可將實驗步驟大致分為三大部分：

(一) 樣本製作

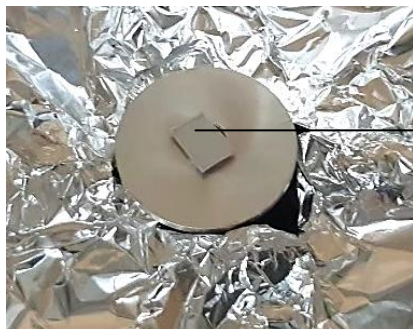
1. 配置不同配方之 PDMS



- (1) 分別秤量聚矽氧烷主劑、聚矽氧烷硬化劑，使兩者之重量比為 10:1，總重視與塗佈之基板總數而定。
- (2) 加入金屬粒子（銀粉銀膠鎳粉），並視實驗操作改變其與 PDMS 之重量比。
- (3) 將 PDMS 與金屬粒子攪拌使其均勻混合。
- (4) 將金屬-PDMS 混合物置入真空乾燥盒並開啟真空幫浦，使金屬-PDMS 無氣泡混入。

2. 旋轉塗佈：旋轉塗佈分為兩階段式旋轉，可調整兩階段的轉速與時間

- (1) 調整兩階段之轉速、時間。
- (2) 將基板放置於旋轉塗佈機上，並將適量金屬-PDMS 混合物至於基板中央，進行旋轉塗佈。



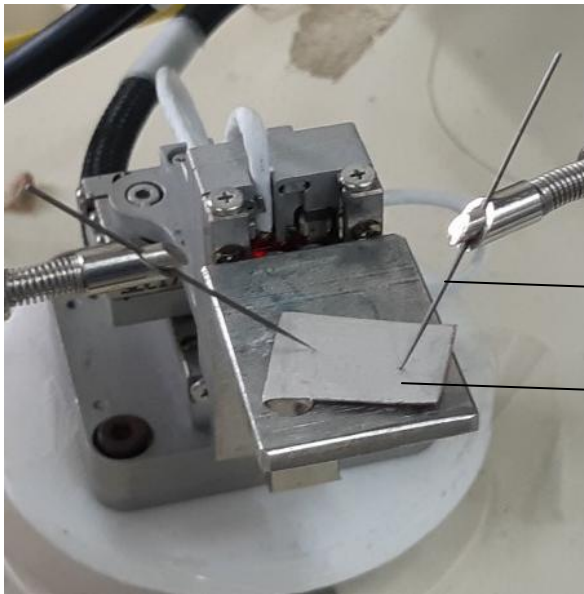
完成塗佈 Ag-PDMS 之矽基板樣本

- (3) 將旋轉塗佈完成的樣本置於加熱板上加熱至金屬-PDMS 混合物乾燥為止。

(二) 測量樣本之電學特性：

1. 將樣本置於載物台上，以金屬探針觸碰電極。
2. 開啟 EasyEXPERT 系統測量電學特性。

註：在測量前須先放置金屬電極，且金屬表面必須直接與金屬-PDMS 接觸，方能進行電性測量。(本實驗兩電極皆相距 0.1cm)



金屬探針

尚未黏貼電極之待測樣本

(三) 測量樣本之感光性質：

1. 將樣本置於載物台上，以金屬探針觸碰電極。
2. 將周圍燈光關閉，使測量系統周圍無光照，並測量一次電學特性。
3. 以紅光雷射筆照射樣本，再測量一次電學特性。

參、研究結果與討論

一、探討 Ag-PDMS 本身之電學特性

將銀膠與 PDMS 均勻混合並脫除空氣後加熱使之成為固態，並分別量測其於電性測量系統之兩金屬探針相距 3.7 公分、2.5 公分、1.3 公分時之電性，所得之 I-V 圖為一電流趨近於零的平直線，故得知 Ag-PDMS 本身為絕緣體，不具導電性。

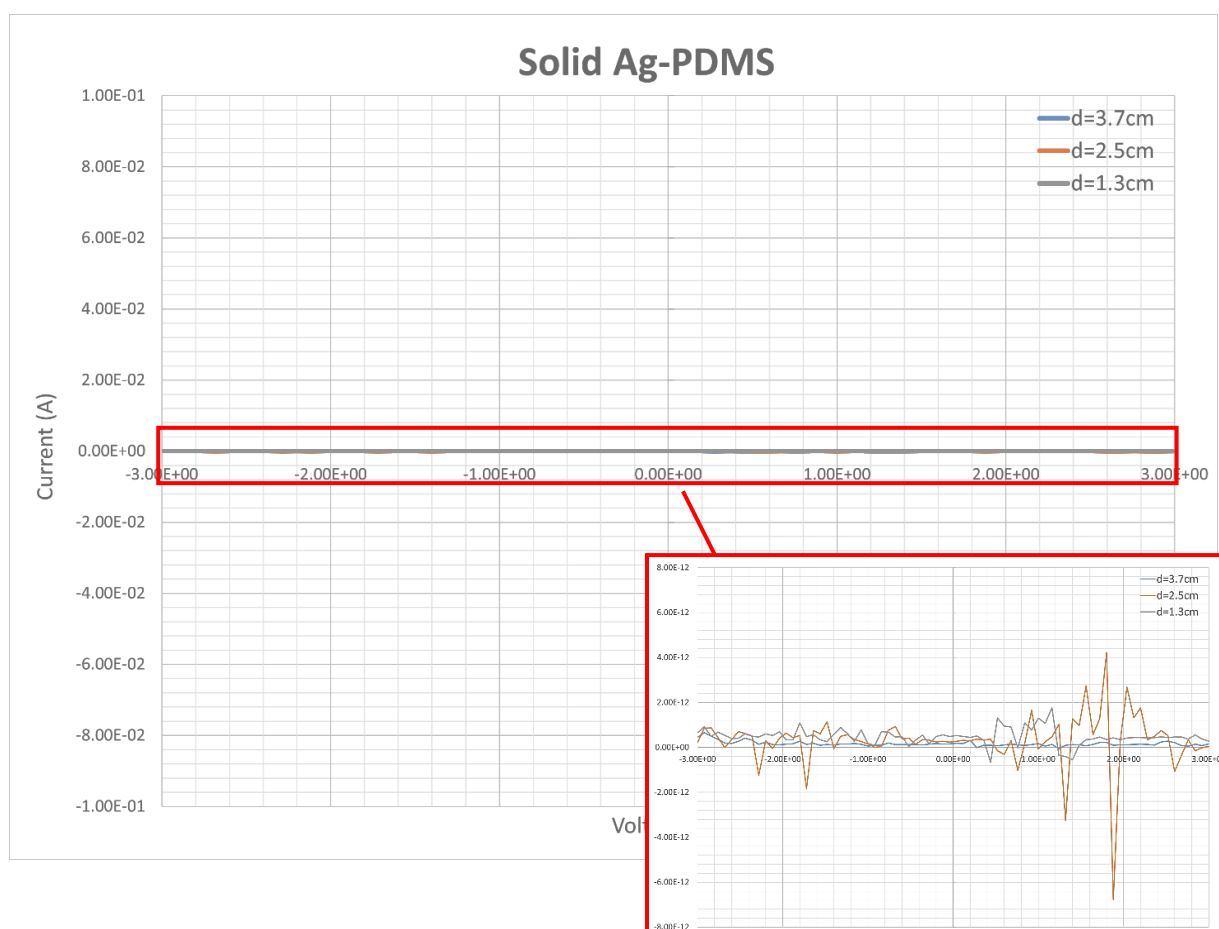


圖 1-1：固態 Ag-PDMS 所得之 I-V 圖為一電流趨近於零的平直線。

紅色區域的放大圖，所呈現之 I-V 圖為一不規則曲線。(放大區塊縱軸電流上限為 1×10^{-12} A)

二、探討 Ag-PDMS 塗佈於不同基板之電學特性

以下從基板所得 I-V 電學性質的結果分項討論，包含單晶矽、碳化矽、導電玻璃(ITO)、玻璃、銅片、聚酯(PET)膜片：

(一) 矽基板

為重現 2020 年綠色化學創意競賽得獎作品「可撻式聚矽氧烷二極體與光感測器電子元件之綠色化學製程」中之實驗條件，故先使用矽基板作為塗佈基板。

1. 不同性質的銀粒子對於電性之影響

- (1) 銀粉：最初將銀粉與 PDMS 混合，並旋轉塗佈於矽基板上，其中在銀粉與 PDMS 質量比為 1:2 時，有樣本出現線性電性，但因銀粉之銀粒子顆粒半徑較大，在旋轉塗佈的過程中易沉積聚集成塊，並未均勻分布，因而導致測量電性時部份圖表不理想，故後續使用銀粒子顆粒較小的銀膠。
- (2) 銀膠：將銀膠與 PDMS 混合，並旋轉塗佈於矽基板上，銀粒子顆粒較小不易於塗佈過程積聚，粒子均勻分布，在適當比例及電壓會出現 I-V 線性、非線性之電性（比例及電壓於後文詳細討論）。

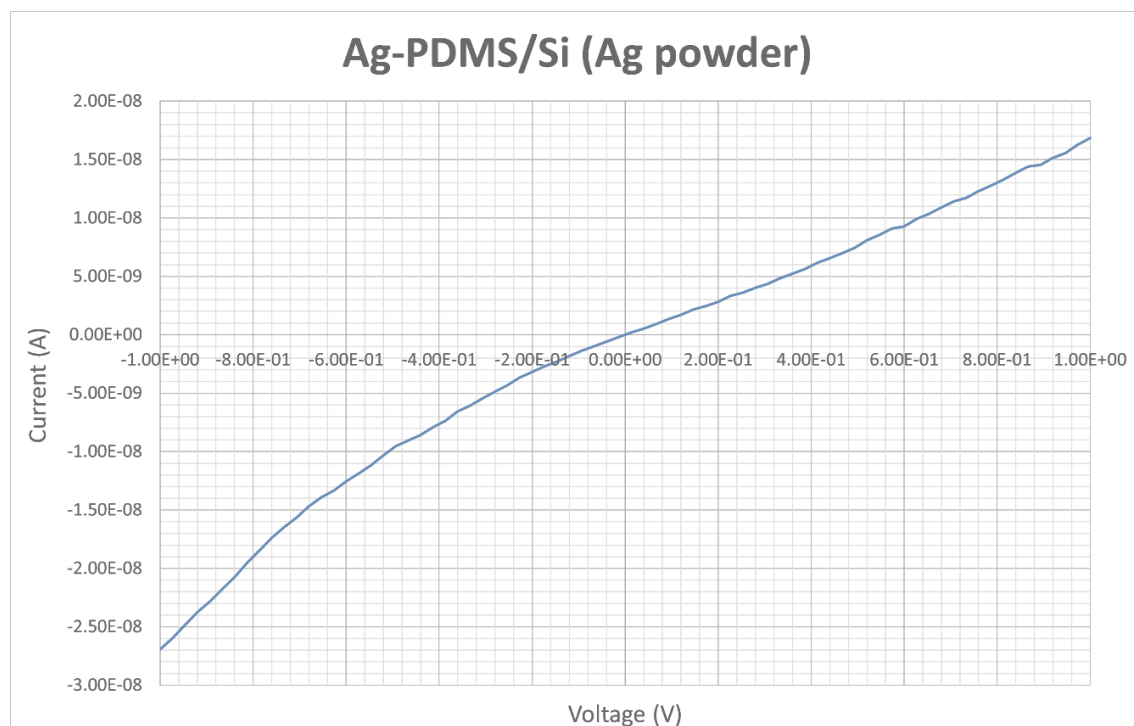


圖 2-1-1：矽基板，使用銀粉製作之 Ag-PDMS/PET 可出現線性電性。

但其銀粒子較大，易在塗佈過程中積聚沉積。(縱軸電流上限為 2×10^{-8} A)

2. 不同轉速對於電性之影響

將銀膠與 PDMS 以重量比 1:2 混合，使得比例固定，分別以 500 rpm*20 s + 800 rpm*40 s、800 rpm*20 s + 1200 rpm*40 s、1200 rpm*20 s + 1500 rpm*40 s 進行旋轉塗佈，並測量三者所得的樣本之電性。所得結果為三者所得的 Ag-PDMS/Si 在相同電壓下皆會出現電流極小、不通過原點的斜直線，得知轉速對於塗佈後樣本之電學特性不產生影響，故後續不再對轉速進行討論。而其中 I-V 不通過原點的原因仍有待釐清。

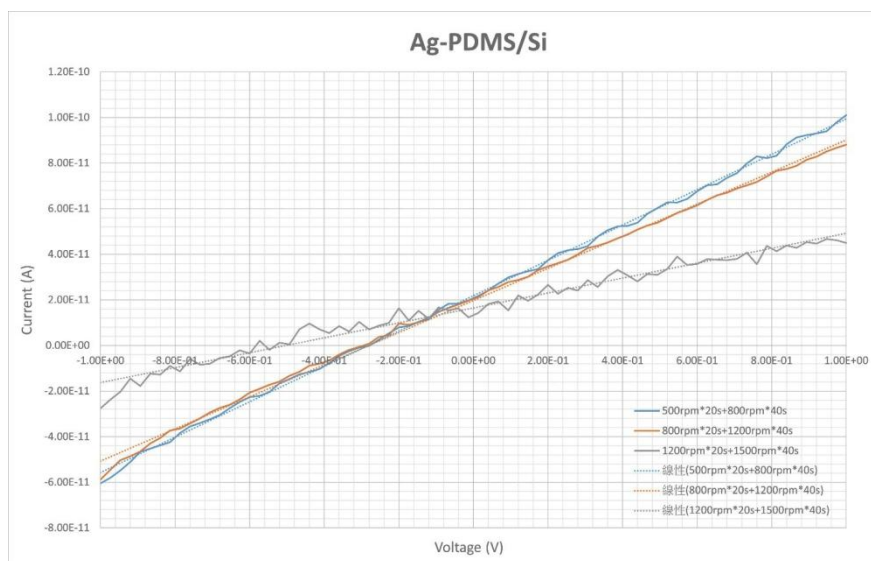


圖 2-1-2：矽基板，銀膠與 PDMS 以重量比 1:2 混合。(縱軸電流上限為 1.2×10^{-10} A)

進行旋轉塗佈所得 I-V 圖皆為電流極小且不通過原點的斜直線，條件分別如下：

500 rpm*20 s + 800 rpm*40 s、800 rpm*20 s + 1200 rpm*40 s、1200 rpm*20 s + 1500 rpm*40 s

3. 不同銀膠:PDMS 比例對於電性之影響

在重現 2020 年綠色化學創意競賽得獎作品「可撓式聚矽氧烷二極體與光感測器電子元件之綠色化學製程」中之實驗條件時，發現文獻內之 Ag-PDMS 比例再現性極低，故我們重新調整並測試了 Ag-PDMS 之比例，分別配置銀膠:PDMS 質量比=1:10、1:5、1:4、1:2、1:1 之 Ag-PDMS，在旋轉塗佈時間速度為 800 rpm*20 s + 1200 rpm*40 s 下進行旋轉塗佈，並進行電性測量。得知在銀膠:PDMS 質量比=1:1 時，Ag-PDMS/Si 在不同電壓下可分別出現 I-V 線性、非線性之電性，並具有高再現性。

4. 不同電壓對於電性之影響

經電性測量後發現，銀膠:PDMS 重量比=1.1 之 Ag-PDMS 經旋轉塗佈於矽基板後，

施加電壓達 40V 時會呈現 I-V 非線性電性，40V 以下則呈現 I-V 線性電性，故得知不同電壓對於 Ag-PDMS/Si 的電性會有所影響。

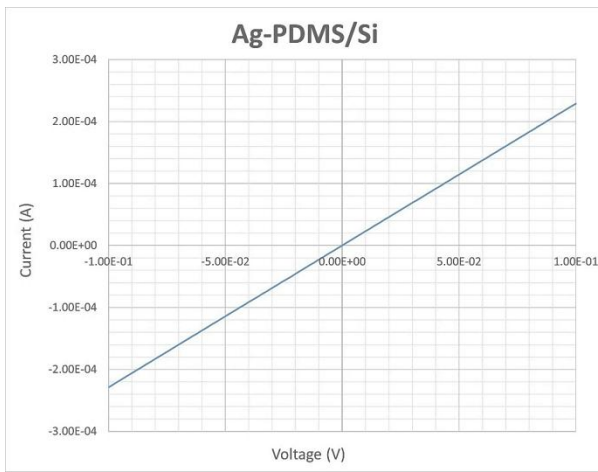


圖 2-1-3 矽基板，施加電壓未達 40V
(縱軸電流上限為 3×10^{-4} A)

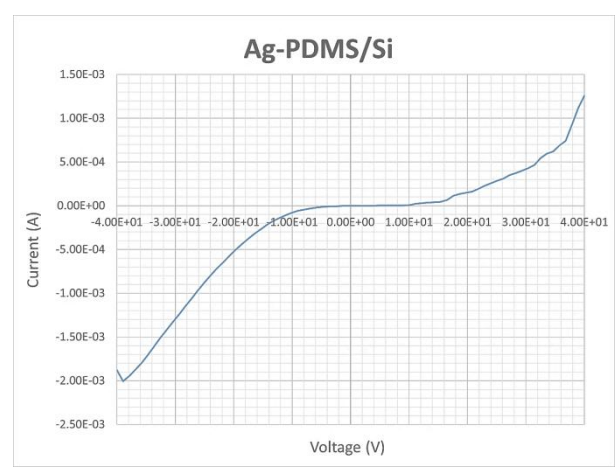


圖 2-1-4 矽基板，施加電壓 40V 以上
(縱軸電流上限為 1.5×10^{-3} A)

比較圖 2-1-3 與圖 2-1-4：銀膠:PDMS 重量比=1.1 之 Ag-PDMS/Si

在施加電壓未達 40V 時呈現 I-V 線性電性，40V 以上呈現 I-V 非線性之電性

5. 推測出現 I-V 非線性之電性及線性電性乃因 Schottky contact 及 Ohmic contact：

- (1) 討論 Schottky contact 效應：當金屬與半導體接觸時產生耗盡型(depletion type)，會在半導體表面形成一耗盡區，在一定寬度內，幾乎不存在自由電子，電子不易在半導體與金屬內傳輸，形成 Schottky contact。
- (2) 討論 Ohmic contact 效應：當金屬與半導體接觸時產生累積型(accumulation type)，電子在傳導帶濃度較高，易於半導體和金屬內傳輸，形成 Ohmic contact。
- (3) 結論：由於使用之矽基板為半導體材質，銀膠中之銀粒子為金屬，故推測 Ag-PDMS/Si 會出現 I-V 非線性之電性及線性電性是因為產生 Schottky contact 及 Ohmic contact 所致，並推測 Ag-PDMS 塗佈於不同基板會出現不同電性，故使用更多性質之基板進行旋轉塗佈，作為尋找合適可撓基板之依據。

(二) 碳化矽基板

延續使用在矽基板下具有高再現性且能出現 I-V 非線性之電性及線性電性之銀膠:PDMS 質量

比=1:1 比例配方，以旋轉塗佈時間速度為 800 rpm*20 s + 1200 rpm*40s 下將 Ag-PDMS 塗佈於碳化矽基板上，測得 Ag-PDMS/SiC 會出現小電流、不過原點的線性電性，其中出現截距的原因仍有待釐清。

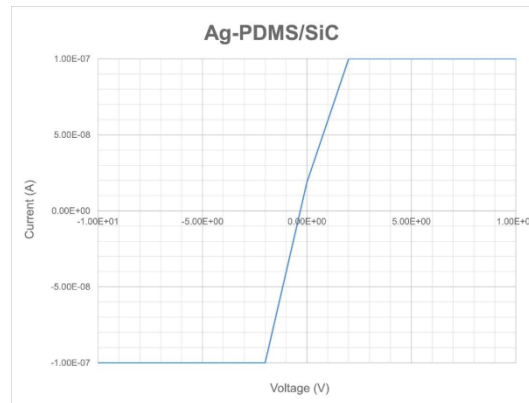


圖 2-2-1：碳化矽基板，銀膠:PDMS 質量比=1:1 之 Ag-PDMS/SiC 出現小電流、不過原點之線性電性。(縱軸電流上限為 1×10^{-7} A，儀器上限 100mA，超出 100mA 即為平直線)

(三) ITO 基板

同樣使用銀膠:PDMS 重量比=1:1 比例配方，以旋轉塗佈條件為 800 rpm*20 s + 1200 rpm*40 下將 Ag-PDMS 塗佈於導電玻璃上，測得 Ag-PDMS/ITO 之 I-V 圖為一電流趨近於零的平直線，得知 Ag-PDMS/ITO 不具任何特殊電學特性。

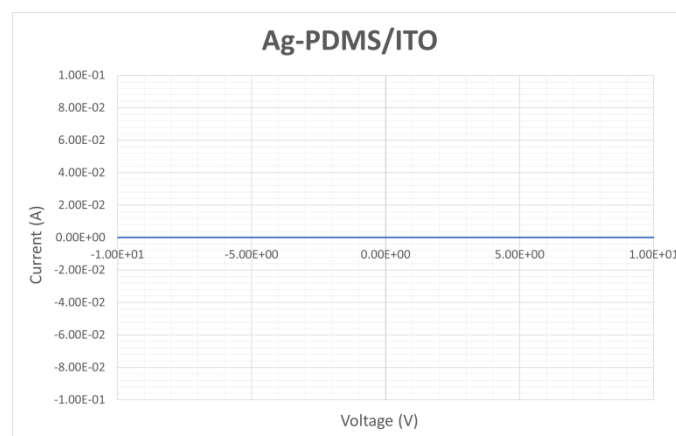


圖 2-3-1：ITO 基板，銀膠:PDMS 質量比=1:1 之 Ag-PDMS/ITO 所得之 I-V 圖為一電流趨近零的平直線。(縱軸電流上限為 0.1A)

(四) 玻璃基板

同樣使用銀膠:PDMS 重量比=1:1 比例配方，以旋轉塗佈條件為 800 rpm*20 s + 1200 rpm*40s

下將 Ag-PDMS 塗佈於玻璃上，測得 Ag-PDMS/glass 之 I-V 圖為一電流趨近於零的平直線，故得知 Ag-PDMS/glass 不具任何特殊電學特性。

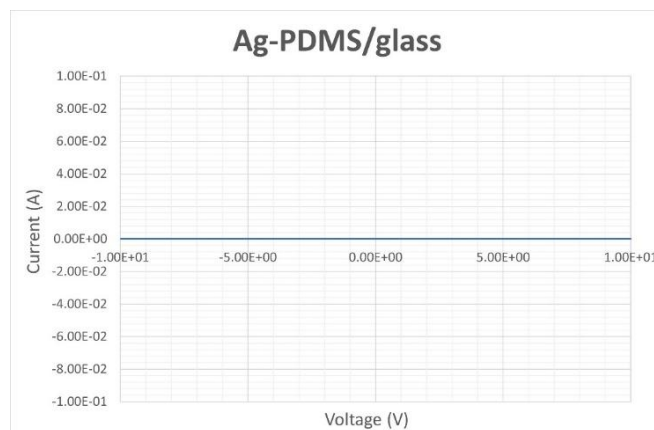


圖 2-4-1：玻璃基板，銀膠:PDMS 質量比=1:1 之 Ag-PDMS/glass 所得之 I-V 圖為一電流趨近零的平直線。(縱軸電流上限為 0.1A)

(五) 銅片基板

使用銀膠:PDMS 重量比=1:1 比例配方，以旋轉塗佈條件為 800 rpm*20s + 1200 rpm*40 下將 Ag-PDMS 塗佈於銅片上，可產生線性電性，但相同電壓下電流較未塗佈 Ag-PDMS 時小（即電阻較大）。

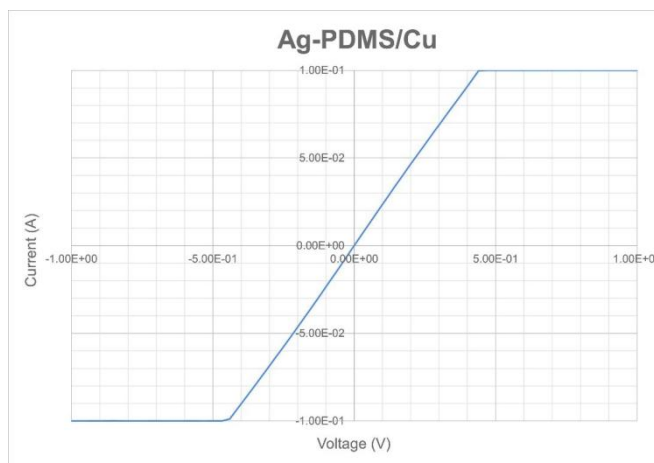


圖 2-5-1：銅片基板，銀膠:PDMS 質量比=1:1 之 Ag-PDMS 可呈現線性電性。
(縱軸電流上限為 0.1A，儀器上限 100mA，超出 100mA 即為平直線)

(六) PET 基板

測試完將 Ag-PDMS 塗佈於多種硬基板上後，我們改將 Ag-PDMS 塗佈於可撓式高分子材料上。

本研究找尋質輕且價格低廉的高分子材料作為可撓式基板，一開始使用市售各種塑膠薄膜材料，包含膠帶材質(PP、PE、PS、PET 等)，分別進行 Ag-PDMS 旋轉塗佈。結果發現除了 PET 產品可出現可撓式電學元件之外，其他高分子材料作為基板皆呈現絕緣體狀態。以下就 PET 膜片作為可撓式高分子基板進行 Ag-PDMS 旋轉塗佈的結果進一步說明。

1. 不同性質之 PET 基板對於電性之影響：

(1) PET 無前處理：直接使用未經處理 PET 基板進行塗佈實驗過程中我們發現在矽基板上具有最佳再現性且能出現 I-V 非線性電性及線性電性之銀膠:PDMS 質量比=1:1 之配方在 PET 基板上無論在任何電壓都僅能出現不過原點之線性電性，故重新尋找能夠使 Ag-PDMS/PET 出現 I-V 線性、非線性電性之 Ag-PDMS 配方。測試銀膠:PDMS 重量比=1:2、1:1、1.2:1、1.4:1、1.45:1、1.45:1 後，發現銀膠:PDMS 重量比=1.4:1 時，Ag-PDMS/PET 在施加電壓達 5V 時會出現 I-V 非線性電性，5V 以下則出現 I-V 線性電性，且同時具備良好再現性。

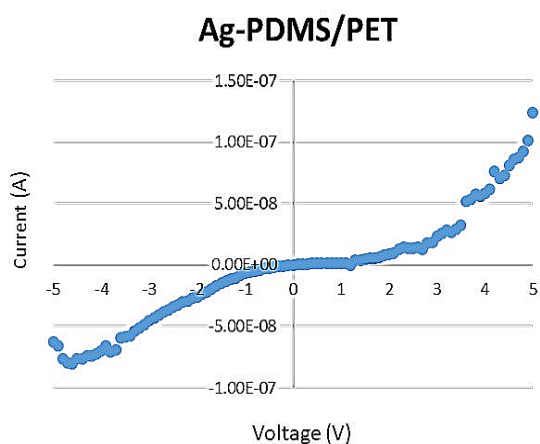


圖 2-6-1 PET 基板，施加電壓未達 5V 時。

(縱軸電流上限為 $1 \times 10^{-7} \text{A}$)

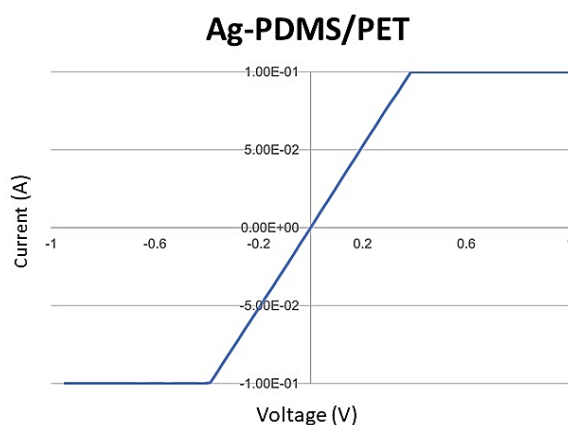


圖 2-6-2 PET 基板，施加電壓在 5V 以上

(縱軸電流上限為 0.1A)

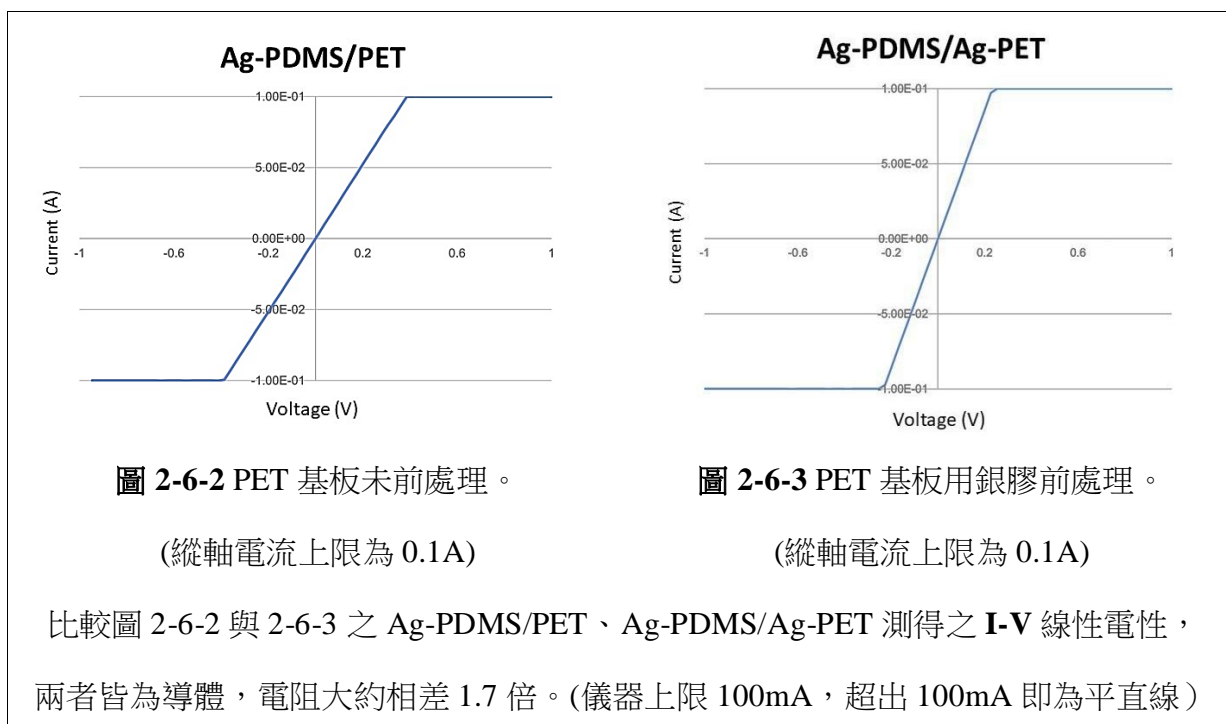
比較圖 2-6-1 與圖 2-6-2：銀膠:PDMS 重量比=1.4:1.0 之 Ag-PDMS/PET，

在施加電壓未達 5V 時呈現線性電性，5V 以上呈現非線性電性。

(儀器上限 100mA，超出 100mA 即為平直線)

(2) PET 用銀膠前處理：在 PET 基板上刷上銀膠，使之成為導體，在使用銀膠:PDMS 質量比=1.4:1 之 Ag-PDMS 配方進行旋轉塗佈，所得之樣本進行電性測量後，得知

其在任何電壓皆呈現線性電性，與未經銀膠處理之 PET 比較，兩者皆為導體，電阻大約相差 2 倍。Ag-PDMS/Ag-PET 之電阻較小，電阻約為 $(0.2V/0.1A)=2\Omega$ 。Ag-PDMS/PET 之電阻較大，電阻約為 $(0.35V/0.1A)=3.5\Omega$ 。



三、探討不同金屬粒子混和 PDMS 塗佈於 PET 基板之電學特性

經由各種基板的測試，成功利用 PET 及 Ag-PDMS 製作出可撓式的 I-V 線性、非線性之電學元件後，由於銀膠價格相對高昂，故嘗試以鎳取代銀與 PDMS 混合。

- (一) Ag-PDMS/PET：銀膠:PDMS 重量比=1.4:1 之 Ag-PDMS 旋轉塗佈於 PET 上，施加電壓達 5V 會出現 I-V 非線性電性，5V 以下則為 I-V 線性電性。
- (二) Ni-PDMS/PET：使用鎳粉全面取代銀膠，將鎳粉:PDMS 重量比=1.4:1 之 Ni-PDMS 旋轉塗佈於 PET 上，所得之 I-V 圖為一電流趨近於零的平直線，故得知 Ni-PDMS/PET 不具任何特殊電學特性。且此配方之 Ni-PDMS 過於黏稠、不易混合及塗佈，塗佈時鎳粒子易積聚成塊。未來將嘗試以鎳粉部分取代銀膠。

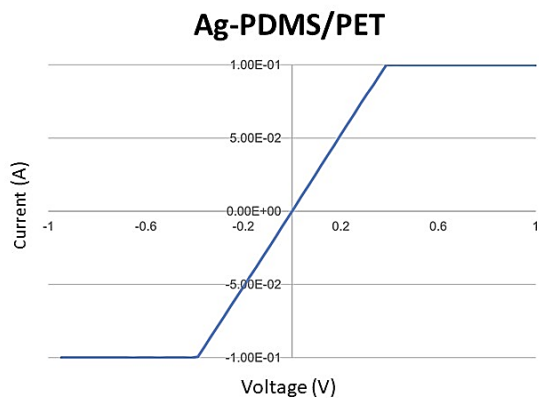


圖 3-1 PET 基板之 Ag-PDMS。

(縱軸電流上限為 0.1A)

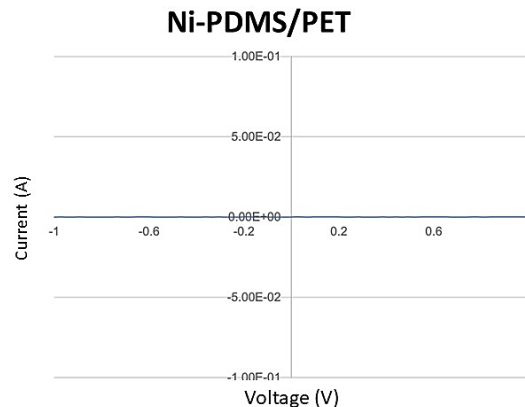


圖 3-2 PET 基板之 Ni-PDMS。

(縱軸電流上限為 0.1A)

比較圖 3-1 與圖 3-2 可知：Ag-PDMS/PET 在施加電壓 1V 下可呈現線性電性、Ni-PDMS/PET 無特殊電性。(儀器上限 100mA，超出 100mA 即為平直線)

四、探討 Ag-PDMS/PET 之感光性質

找出可撓式基板材料之後，成功利用 PET 及 Ag-PDMS 製作出可撓式導體及非線性之電學特性後，我們進一步探討 Ag-PDMS 塗佈於 PET 之感光性質。我們使用紅色雷射光作為光源，在未照射樣本時進行一次電性測量，在照射樣本時進行一次電性測量，得到兩次電性測量結果發現電阻無明顯差異，無感光之效果。目前正在使用更多色光進行感光測量。

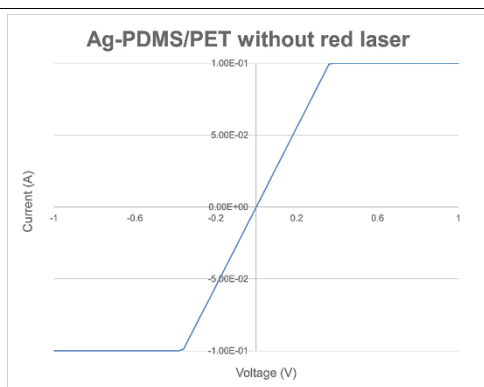


圖 4-1 PET 基板之 Ag-PDMS，無照光結果。

(縱軸電流上限為 0.1A)

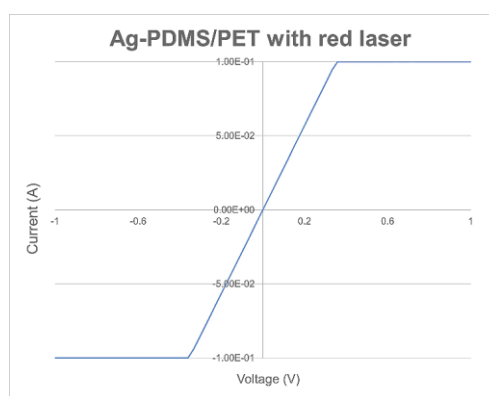


圖 4-2 PET 基板之 Ag-PDMS，紅光雷射

筆照光結果。(縱軸電流上限為 0.1A)

比較圖 4-1、4-2 可知 Ag-PDMS/PET 的電阻不受紅光照射影響。

(儀器上限 100mA，超出 100mA 即為平直線)

五、Ag-PDMS/Si 與 Ag-PDMS/PET 之效果比較

本研究成功將 Ag-PDMS 電學元件的基板替代成可撓式的 PET 高分子材料，也成功開發出非常節能、僅以一枚普通 9V 電池電壓(5V 即可)驅動的可撓式 I-V 非線性電性之電子元件。將同樣在不同電壓下之硬性 Ag-PDMS/Si 與可撓式 Ag-PDMS/PET 進行比較，可撓式 Ag-PDMS/PET 雖使用較多銀膠，但其施加電壓僅需 5V 及可出現 I-V 非線性之電學特性，遠勝於硬性 Ag-PDMS/Si 的 40V，此創新發現在綠能應用有重要價值，其為良好節能材料。

比較	圖 2-1-3	圖 2-6-1
編碼	Ag-PDMS/Si	Ag-PDMS/PET
基板性質	硬性	軟性 (可撓式)
最佳銀膠:PDMS 質量比	1:1	1.4:1
具備 I-V 非線性之電學特性所需之最小施加電壓	40V	5V

肆、結論與應用

一、結論：

本研究目前製作出之 Ag-PDMS/PET 電子元件，具備以下三種特質：可撓式、隨施加電壓大小呈現不同特性、低耗能的施加電壓。歸納製程條件如下：

- (一) Ag-PDMS 本身為絕緣體，不具導電的電性。將 Ag-PDMS 以旋轉塗佈在矽基板，Ag-PDMS/Si 可出現 I-V 線性電性。銀膠:PDMS 重量比=1:1 的 Ag-PDMS/Si，在施加電壓達到 40V 時會產生 I-V 非線性之電學特性，小於 40V 則為線性電性。
- (二) 改用碳化矽基板，Ag-PDMS/SiC 會出現不過原點的 I-V 線性電性。改用導電玻璃與玻璃基板，Ag-PDMS/ITO 與 Ag-PDMS/glass 皆為絕緣體。改用銅片基板，Ag-PDMS/Cu 只有 I-V 線性電學性質。
- (三) 質輕且價格低廉的高分子材料作為可撓式基板，除了 PET 產品可出現可撓式電學元件之外，其他高分子材料作為基板皆呈現絕緣體狀態。銀膠:PDMS 重量比=1.4:之 Ag-PDMS/PET，在施加電壓達到 5V 時會產生 I-V 非線性之電學特性，小於 5V 則為 I-V 線性電學性質。目前研究數據，Ag-PDMS/PET 對紅光照光尚未出現電阻變化。
- (四) 將重複文獻條件的硬性 Ag-PDMS/Si 與本研究開發的可撓式 Ag-PDMS/PET 做比較，本研究成功將 Ag-PDMS 電學元件的基板替代成可撓式的 PET 高分子材料，也成功開發出非常節能、僅以一枚普通 9V 電池電壓(5V 即可)驅動的可撓式 I-V 非線性電學特性之電子元件，遠勝於硬性 Ag-PDMS/Si 的 40V，此創新發現在綠能應用有重要價值，其為良好之節能材料。

二、未來展望與應用：

- (一) 銀膠價格相對高昂，故未來將使用鎳粉部分取代 Ag-PDMS/PET 中之銀膠，以期達到製作出價格較低之可撓式電子元件。
- (二) 測試 Ag-PDMS/PET 對於不同波段光線之感光性：目前已知 Ag-PDMS/PET 對於紅光不具感光性，未來將嘗試使用不同波段之光線照射 Ag-PDMS/PET，期待能找出使 Ag-PDMS/PET 具備感光效果之光線波段，做成感光元件。

伍、參考文獻

- [1] 王露熹、邱毓庭 (2020)。可撓式聚矽氧烷二極體與光感測器電子元件之綠色化學製程。2020年綠色化學創意競賽普通型高等中學組佳作作品。
- [2] Chou, N., Yoo, S., & Kim, S. (2012). *Fabrication of Stretchable and Flexible Electrodes Based on PDMS Substrate*.
- [3] Mannsfeld, S. C. b., Tee, B. C., Stoltenberg, R. M., Chen, C. V. h-h., Barman, S., Muir, B. V. o., Sokolov, A. N., Reese, C., & Bao, Z. (2010). Highly Sensitive Flexible Pressure Sensors with Microstructured Rubber Dielectric Layers. *Nature Materials*.
- [4] Heo, S., Song, K., Choi, M., Sung, T., & Moon, D. (2011). Patternable Solution Process for Fabrication of Flexible Polymer Solar Cells Using PDMS. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,95(12).
- [5] Guo, L., Guvanasen, G. S., Liu, X., Tuthill, C., Nichols, T. R., & Deweerth, S. P. (2013). A PDMS-Based Integrated Stretchable Microelectrode Array (IsMEA) for Neural and Muscular Surface Interfacing. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst.*,7(1), 1–10
- [6] Rehman, K. U., Chiu, Y., Wang, L., Raman, R., Li, Y., Chou, F., Hsieh, Y., & Hofmann, M. (2021). *Semiconductor-Free Electronics through Connectivity-Controlled Percolation*.
- [7] Kangishwar, S., Radhika, N., Sheik, A. A., Chavali, A., & Hariharan, S. (2022). A Comprehensive Review on Polymer Matrix Composites: Material Selection, Fabrication, and Application. *Polymer Bulletin*.
- [8] Mokhtar, S. M. ajmal, Eulate, E. A. de, Yamada, M., Prow, T. W., & Evans, D. R. (2022). Conducting Polymers in Wearable Devices. *Medical Devices & Sensors*,4(1).
- [9] Polydimethylsiloxane. 查詢日期2022年9月，英文維基百科，
<https://en.wikipedia.org/wiki/Polydimethylsiloxane>
- [10] Borók, A., Izsold, Z., Zangana, S., & Bonyár, A. (2020). *Optimization of Silver-PDMS and Gold-PDMS Surface Nanocomposite Fabrication Technologies Considering LSPR and SERS Applications*.

[11] *The Future of Flexible Electronics*. Global Electronic Services Inc.

<https://gesrepair.com/future-of-flexible-electronic/>

[12] Joo, Y., Byun, J., Seong, N., Ha, J., Kim, H., Kim, S., Kim, T., Im, H., Kim, D., & Hong, Y.

(2015). Silver Nanowire-Embedded PDMS with a Multiscale Structure for a Highly Sensitive and Robust Flexible Pressure Sensor. *Nanoscale*,7(14), 6208–6215.

[13] Solano, V., & Vega-baudrit, J. R. (2018). Silver Nanoparticles and PDMS Hybrid Nanostructure for Medical Applications. *Silver Nanoparticles - Fabrication, Characterization and Applications*.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.74372>

【評語】 100023

該研究探討 Ag-PDMS 複合材料製備方式以用於可撓式光電材料電極應用，並探討於不同基板材料下之電學性質。實驗數據成果發現有許多不同電學性質發現，唯應多加以探討電學之線性特性或二極體特性在不同基板所造成之交互影響，並提出其學理機制推演，以期更了解未來實際應用於光電材料元件之實用性。此外建議實驗方法中因此材料具有光電性質，需進行暗電流量測實驗，以確認材料在照光環境下其光電響應成效。