

# 雷射表面改質技術於感測器平面熱元件製作

## Laser Surface Modification Technology Applied for the Sensor Device Planar Thermal Element Fabrication

陳柔甄、林奕成、楊智仲、蕭育仁、蕭文澤

Rou-Jhen Chen, Yi-Cheng Lin, Chih-Chung Yang, Yu-Jen Hsiao, Wen-Tse Hsiao

隨著雲端、通訊、穿戴式裝置及物聯網產業等新興領域應用快速發展，使得感測器元件廣泛被應用。混合型功能性薄膜材料 (mixed functional thin film materials) 具備低電阻率 ( $< 100 \text{ ohm/square}$ ) 與低功耗特性，適用於製作各種感測器，同時具備輕、薄、短、小、多功能整合特性。本文將以透明導電氧化物、奈米銀線混合透明導電薄膜與導電高分子聚合物 (PEDOT:PSS) 作為感測器加熱元件應用，並輔以雷射改質技術，作為給讀者未來發展感測元件相關產品參考。

With the rapid development of applications in emerging fields such as cloud, communications, wearable devices, and the Internet of Things industry, sensor components are widely used. The mixed functional thin film materials have the properties of low sheet resistance ( $< 100 \text{ ohm/square}$ ) and low power consumption; therefore, it's suitable for the production of the sensor devices. This article uses the functional thin film materials- transparent conductive oxide, silver nanowire as network mixed the transparent conductive films and transparent conductive polymer (3,4-ethylene dioxathiophene, PEDOT; Polystyrenesulfonic Acid, PSS; PEDOT: PSS) to fabricate thermal components for sensor device applications, as a reference for readers to develop sensor device-related products in the future.

### 一、前言

隨著雲端 (cloud)、通訊 (communication)、穿戴型裝置 (wearable device) 及物聯網 (internet of things, IoT) 產業等新興領域應用快速發展，使得感測器元件開發備受矚目。根據國際研究顧問機構 Gartner 公司所公佈的新興技術發展週期 (hype cycle for emerging technologies) 指出，產品發展週期約略可分為下列五階段，包括：科技誕生的驅動期、過高期望的高峰期、想像幻滅的低谷期、穩步回升的光明期與技術成熟能實質生產的高原期，如

圖 1 所示<sup>(1)</sup>。由圖中得知近年來 3D (生物材料) 列印、物聯網、巨量資料、雲端運算、NFC 付費、顯示器、觸控螢幕及網路電視等技術，成為全球最熱門且發展最快的技術之一，其發展週期將達 10 年以上。因此，具備輕、薄、短、小、省電與多功能之感測器元／組件開發在此扮演重要角色並且成為各大廠躍躍欲試的明星產品之一。

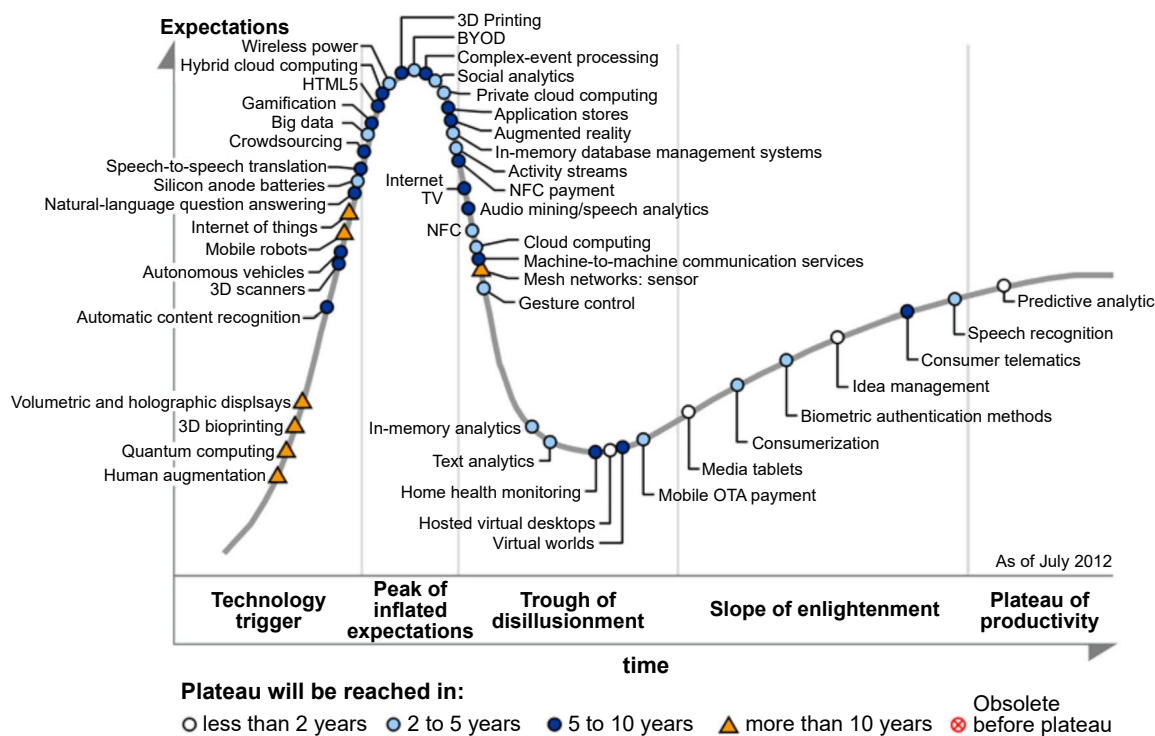


圖 1. 新興技術週期<sup>(1)</sup>。

以物聯網架構係由感知層、網路層與應用層組成。感知層為最底層元件 (感測器)，透過基本物理量量測光、聲、電、熱、力、磁等與時間／空間資訊結合。感測器可應用於下列產業中如：3C 產業 (智慧型手機、觸控面板)、車用電子 (安全氣囊、胎壓偵測、輔助駕駛、汽車導航)、醫療電子 (生理信號監控、居家照護)、智慧聯網 (交通運輸、公共建設、環境保護) 等<sup>(2-4)</sup>。為全球感測器市場分為「光感測器」及「非光感測器」兩類，光感測器 (optical sensor) 占銷售金額約 2/3。此外，在非光感測器市場部分，2012—2015 年平均複合成長率將達到 6% 以上。

由上述感測器市場與應用可看出，其市場正迅速且蓬勃發展，除了感測器應用外，平板電腦、觸控螢幕手持式行動裝置、筆記型電腦、平面顯示器、OLED 照明、太陽能電池等皆須使用到金屬導電薄膜 (metal conductive thin films)。金屬導電薄膜材料具有輕薄、容易圖案化製程、低成本、低功耗、低反射率、可彎折等特性，故具備相當競爭優勢。金屬導電材料大多以銅合金 (copper alloy) 與銀合金 (silver alloy) 為主，受觸控品與穿戴式產品趨勢影響，使得金屬薄膜朝向更低片電阻值 (low sheet resistivity) 的取代性材料方向發展，如：石墨烯 (graphene)、奈米碳管 (carbon nanotube, CNT)、奈米銀線 (Ag Nanowire, AgNW)、金屬網格 (metal mesh) 與導電高分子聚合物 (3, 4-ethylenedioxythiophene, PEDOT; Polystyenesulfonic Acid, PSS; PEDOT:PSS)<sup>(5-10)</sup>。

雷射製程具備非接觸式、快速、靈活性等優勢，常被使用於電極圖案化製程與改質等應用。國內外學者提出諸多文獻探討應用於感測器製程技術當中，Sugioka 等人<sup>(6)</sup> 提出紫外線雷射 (UV) 與真空紫外線 (VUV) 雷射針對玻璃材料進行剝蝕與改質。研究結果發現，使用複合式雷射加工方式可有效針對透明材料進行微結構製作、切割、標記與印刷 (圖 2)。

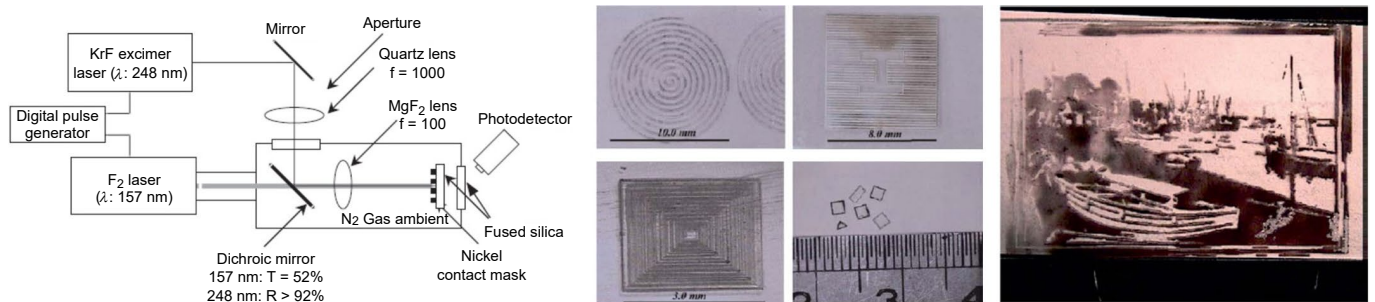


圖 2. 複合式雷射製程技術於玻璃基板進行改質與切割<sup>(6)</sup>。

Aminuzzaman 等人<sup>(7)</sup> 以顯微聚焦光束直接針對多層導電銀薄膜材料進行直寫，藉由使用不同倍率物鏡 (5×/10×/20×/100×) 獲得不同加工線寬微結構。研究結果顯示，其線寬可隨意控制從 5 至 75 μm，如圖 3 所示。

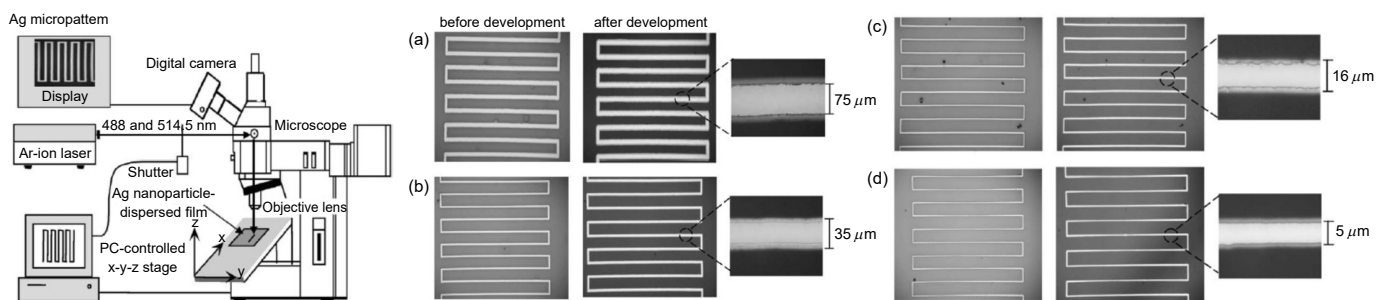


圖 3. 多層導電銀薄膜顯微雷射加工系統與直寫結果<sup>(7)</sup>。

Yavas 等研究學者<sup>(8, 9)</sup> 提出 ITO 薄膜吸收係數對於不同雷射波長蝕刻影響研究，利用一維熱擴散方程式<sup>(8)</sup> 模擬雷射光束照射於 ITO 薄膜後所引發表面溫度變化情形。研究中發現 ITO 薄膜於紫外光波段有較好製程品質<sup>(9)</sup>。Booth<sup>(10)</sup> 提出直接雷射加工於玻璃基板之 ITO 薄膜上方法，應用於大型電漿平面顯示器 (plasma panel display, PDP)，以領結形 (bow tie scanning, BTS) 掃描進行高速加工。圖 4 (左)、(中)、(右) 分別為領結形掃描示意圖、雷射電極成型加工路徑規劃結果與實際電極圖案化加工結果。Wang 等人<sup>(11)</sup> 使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 雷射系統剝蝕非晶 I-GZO 薄膜，探討不同雷射功率、掃描速度、重覆頻率、掃描線寬、光斑重疊率與殘留分析。Tsang 等人<sup>(12)</sup> 以溶凝膠法製備 AZO 薄膜，並以 KrF 準分子雷射 (波長：248 nm) 在不同能量下對薄膜進行退火。相關雷射調變參數如下：雷射脈衝數為 1/3/5 shots 條件下與雷射能量在 150/200/250 mJ。Chung 等人<sup>(13)</sup> 利用 XeCl 準分子雷射 (波長：308 nm) 針對 ITO 薄膜進行退火實驗研究，探討電性與光穿透率。實驗結果顯示：其片電阻由退火前 190

ohm/square 下降為 33 ohm/square。在光穿透率分析中，ITO 薄膜經雷射退火後發現可見光穿透率從 70% 提升至 85%，此現象歸咎於表面粗糙度的降低，使得光穿透率提升。Zhou 等人<sup>(14)</sup> 使用二極體雷射 (633nm) 顯微系統聚焦於氧化石墨烯奈米片進行多層膜雷射直寫，針對加工後石墨烯材料進行拉曼光譜量測與 I-V 曲線分析，圖 5 所示為切割後拉曼光譜影像與 I-V 曲線。

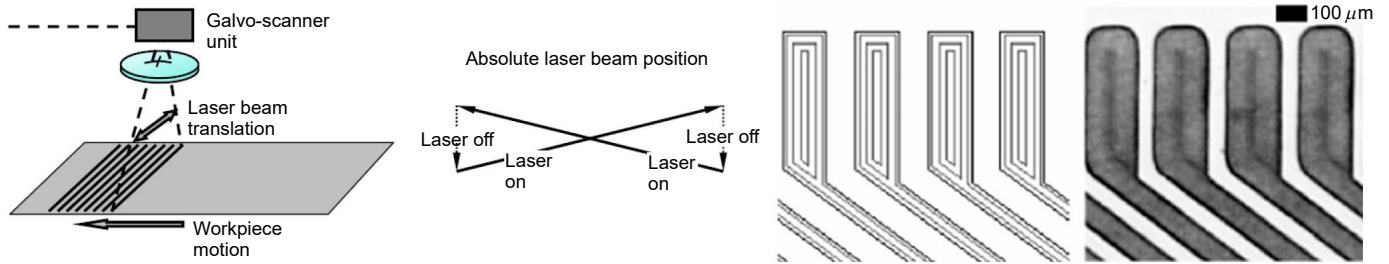


圖 4. 雷射加工路徑規劃與加工後結果<sup>(10)</sup>。

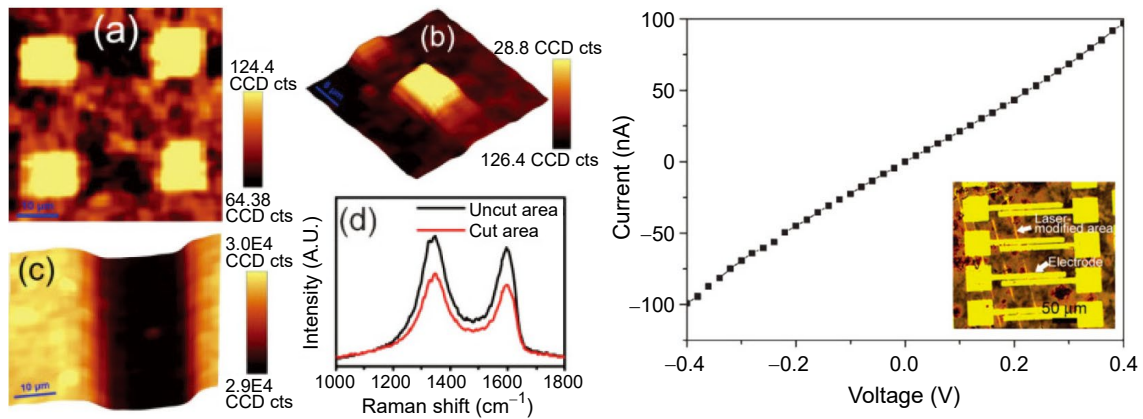


圖 5. I-GZO 薄膜劃線後光穿透率／線寬與表面形貌<sup>(14)</sup>。

Acuautla 等人<sup>(15)</sup> 使用 ZnO 薄膜材料光微影蝕刻與雷射蝕刻進行微型加熱器製作。研究中發現使用兩種方式所製作的感測器，其加熱溫度曲線一致 (圖 6(左))。此外，使用雷射製作的感測器，其電阻值低於光微影蝕刻 (圖 6(右))。

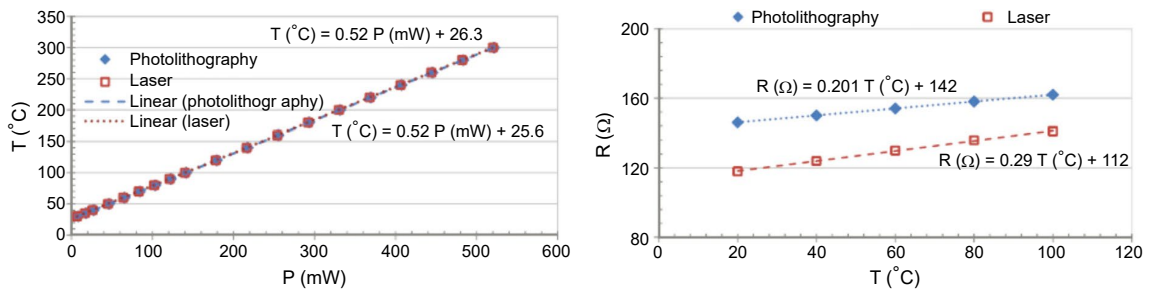


圖 6. 不同製程條件下感測器溫度曲線與電阻值趨勢<sup>(15)</sup>。

Molpeceres 等人<sup>(16)</sup> 使用 KrF 準分子雷射 (248 nm)、基頻 DPSS 雷射 (1064 nm) 與三倍頻 DPSS 雷射 (355 nm) 製作感測器 (圖 7)，同時針對結構後電極進行表面形貌量測。實驗結果發現，當使用較短波長雷射源因其能階 (band gap) 值高於材料本身，故可獲得較佳表面形貌。

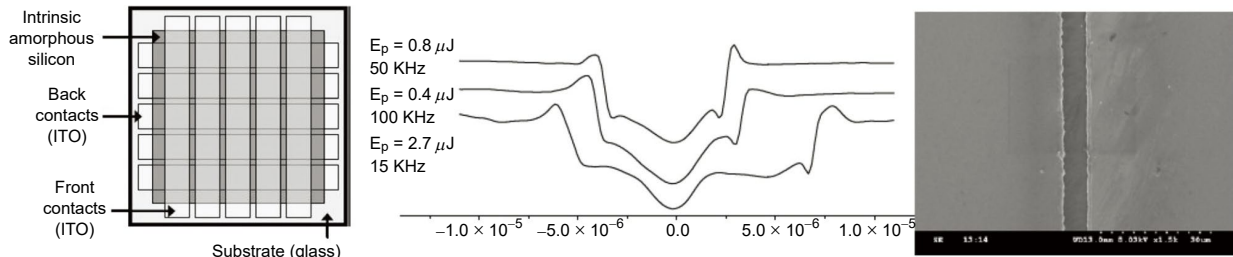


圖 7. ITO 感測器電極架構與劃線結果<sup>(16)</sup>。

Do 等人<sup>(17)</sup> 發展具鐵電特性之可撓式感測器製作技術。Wojakowski 等人<sup>(18)</sup> 發展三維感測器製作技術於熱固性塑膠材質。Nguyen 等人<sup>(19)</sup> 以鈦鈣鈦礦氧化物薄膜作為基材進行微型天線製作。Hwang 等人<sup>(20)</sup> 發展微型加熱元件最佳化參數設計藉以應用於氣體感測器。Kim 等人<sup>(21)</sup> 使用雷射直寫技術製作生物阻抗型結構電極進行化學感測實驗。Takamatsu 等人<sup>(22)</sup> 以簡單的雷射直寫技術搭配摻雜元素技術針對 PEDOT:PSS 材料進行感測器製作，並探討其材料親／疏水特性。Hsia 等人<sup>(23)</sup> 以奈米碳管為基底製作可彎曲 (flexible) 之陣列形超級電容藉以探討其充／放電效應。Ribeiro 等人<sup>(24)</sup> 在聚合物基質摻入二氧化矽納米粒子 (SiNPs) 藉以獲得超疏水塗層。Zamfirescu 等人<sup>(25)</sup> 以超快雷射 (775 nm/150 fs) 製作週期性高頻電路電極，進由改變掃描速度與移除閾值可獲得 700–1000 nm 的橫向結構尺寸。Cheng 等人<sup>(26)</sup> 以低功率綠雷射針對 ITO 薄膜進行電極製作應用於流體量測應用。Park 等人<sup>(27)</sup> 以水凝膠介電薄膜材料直寫技術製作微孔洞於表面化學感測之應用。Hu 等人<sup>(28)</sup> 以奈米碳管 (CNT) 為基材製作可撓式觸覺感測器，經由轉印方式將圖案轉移至 PDMS 基板上。Huang 與 Wan<sup>(29)</sup> 以一維金屬半導體氧化物薄膜針對電子鼻與低功率加熱氣體感測器。Gutierrez-Heredia 等人<sup>(30)</sup> 以低溫製程製作全面積氧化鋅 (ZnO) 透明導電薄膜反向器，其平均上升／下降時間與延遲時間分別為 0.65 ms/0.44 ms/0.21 ms。Zacharatos 等人<sup>(31)</sup> 透過綠光 (532 nm) 雷射直寫與光束整形技術在鍍銀 (silver) PEN 塑膠薄膜上製作無線射頻 (radio frequency, RF) 元件，製作完成的元件其阻抗值為 50 Ω，可偵測 0.04–40 GHz 頻寬。Ko 等人<sup>(32)</sup> 使用選擇性雷射低溫處理技術應用於可撓式顯示器 (organic light-emitting diode, OLED) 與有機電晶體 (organic field-effect transistor, OFET) 結構製程，經由實驗結果發現，經雷射結構化製程後具備良好的分辨率 (圖 8)。藉此可進行大面積與低溫製程降低製作成本。Lee 等人<sup>(33)</sup> 使用 532 nm 連續波 (continuous wave, CW) 低溫雷射退火製程應用於卷繞式 R2R (roll to roll) 連續製程製作軟性超級電容 (supercapacitor)，透過低溫退火後奈米銀粒子與導電碳漿完全融合，故具備良好的導電性，同時經由彎曲測試驗證，彎折角度達 135 度時不影響其電容的操作特性。

## 二、雷射表面改質製程

本研究係透過兩種波長雷射源 (奈秒脈衝高頻紫外光雷射源 (355 nm / 14 W)、遠紅外線波段二氧化碳雷射源 (10,600 nm / 5 W)，進行三種面型熱元件薄膜材料 (i.e. 氧化鈮

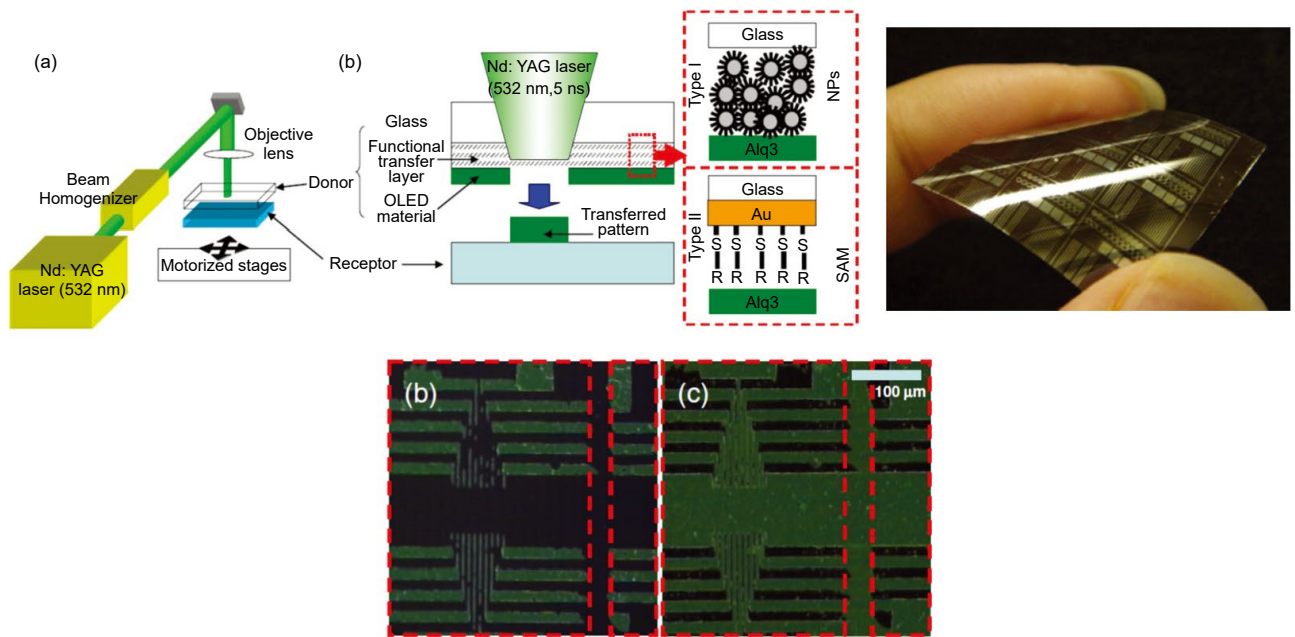


圖 8. 選擇性雷射低溫處理技術於 OLED 與 OFET 結構製程<sup>(32)</sup>。

錫 (ITO)，氧化鋅鎘 (GZO)，導電高分子混合奈米銀線 (PEDOT:PSS+AgNW) 表面改質 (modification)。所使用的雷射規格如表 1 與表 2 所示。

表 1. 奈秒脈衝高頻紫外光雷射源 (UV laser)。

System specifications	Values
Wavelength (nm)	355
Average output power (watt)	14
Repetition rate range (kHz)	~ 300
Pulse width (ns)	30
Spatial mode	TEM <sub>00</sub> ( $M^2 < 1.3$ )
1/e <sup>2</sup> beam diameter (mm)	3.5
Machining field (mm <sup>2</sup> )	60

表 2. 遠紅外線波段二氧化碳雷射源 (CO<sub>2</sub> laser)。

System specifications	Values
Wavelength (nm)	10,600
Average output power (watt)	5
Repetition rate range (kHz)	1 – 10
Spatial mode	TEM <sub>00</sub> ( $M^2 < 1.1$ )
1/e <sup>2</sup> beam diameter (mm)	2.4
Machining field (mm <sup>2</sup> )	50

透過雷射光之能量，並搭配振鏡掃描將能量傳遞至欲改質材料表面，其雷射光束重疊率示意如圖 9 所示。其雷射光斑重疊率 (overlapping rate) 對於面型熱元件薄膜材料表面改質有顯著影響。透過改變製程條件，如：雙軸振鏡掃描系統掃描速度 (scan speed)、雷射源脈衝重覆頻率 (pulse repetition frequency, PRF)、雷射源聚焦於材料上光斑直徑 (beam diameter,  $b$ )、雷射光斑咬合距離 (bite size,  $B_s$ )。光斑咬合距離 ( $B_s$ ) 與光斑重疊率 (OR (%))，可由方程式 (1) 與 (2) 估算得知：

$$B_s = \frac{V}{f} \quad (1)$$

$$O_R(\%) = \frac{b - B_s}{b} \times 100 \quad (2)$$

其中， $B_s$  表示咬合距離 (mm)， $V$  表示進給速率 (mm/min)， $f$  表示雷射脈衝重覆頻率 (Hz)， $O_R(\%)$  表示重疊率， $b$  表示雷射光斑直徑 (mm)。

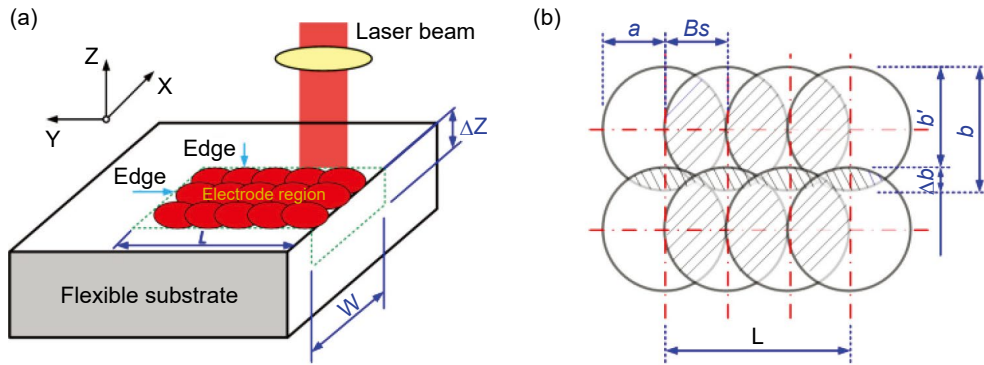


圖 9. (a) 感測器熱元件薄膜材料雷射改質示意圖、(b) 雷射光斑重疊率示意圖。

在雷射表面改質時間與次數評估計算中，水平軸向改質次數 ( $N_x$ )，可由方程式 (3) 進行推估。其中， $L$  為改質區域長度 (mm)， $a$  為光束未重疊區距離 (mm)。當光斑咬合距離為光束一半時，則可將方程式 (3) 改寫為方程式 (4)。其中， $a$  為未咬合區域距離 (mm)。在垂直軸向雷射改質次數 ( $N_y$ ) 計算，可方程式 (5) 進行推估。

$$N_x = \frac{L}{B_s} = \frac{L \cdot f}{V} \quad (3)$$

$$N_x = \frac{L}{a} \quad (4)$$

$$N_y = \frac{w}{b'} + 1 \quad (5)$$

其中， $w$  為改質區域寬度 (mm)， $b'$  為每一個光斑在 Y 軸雷射改質方向未重疊距離 (mm)。 $\Delta b$  為 Y 軸雷射改質方向光斑咬合區域，可由方程式 (6) 進行估算。

$$b' = b - \Delta b \quad (6)$$

雷射改質區域總改質次數計算，將方程式 (4) 與 (5) 進行相乘，再乘上每一脈衝雷射源所需作用時間 ( $t$ )，即可得到改質總時間 ( $t_{process}$ )，如方程式 (7) 所示。其中，脈衝作用時間  $t$  為雷射脈衝重覆頻率分之一。

$$T_{process} = \frac{L}{a} \cdot \left( \frac{w}{(b - \Delta b)} + 1 \right) \cdot \frac{1}{f} \quad (7)$$

### 三、導電薄膜面型熱元件製備、導電特性與熱元件溫度量測

本研究所使用之導電薄膜材料，包含：氧化銻錫 (ITO)、氧化鋅鎘 (GZO)、導電高分子混合奈米銀線 (PEDOT:PSS+AgNW) 等薄膜材料作為面型加熱器電極層。其中，在氧化銻錫 (ITO) 與氧化鋅鎘 (GZO) 係委託自強基金會以磁控濺鍍設備進行 200 nm 厚之薄膜沉積。導電高分子混合奈米銀線 (PEDOT:PSS+AgNW) 薄膜係以 Heraeus® Clevious HY E (PEDOT:PSS+AgNW) 溶液以旋塗 (spin coating) 方式將薄膜覆蓋至玻璃基板上。其製備後試片表面形貌與斷面結構經由場發式掃描式電子顯微鏡拍攝 (FE-SEM, Hitachi Corp. model S-4300)，如圖 10 所示。此外，導電薄膜熱元件之電性量測係以四點探針搭配數位電錶 (Keithley 2400) 進行表面處理前與表面處理電性量測。表 3 為三種熱元件用薄膜材料薄膜厚度與製備後電阻值。透過奈秒脈衝高頻紫外光雷射與遠紅外線波段二氧化碳雷射進行表面改質，藉以改變導電薄膜電阻率。

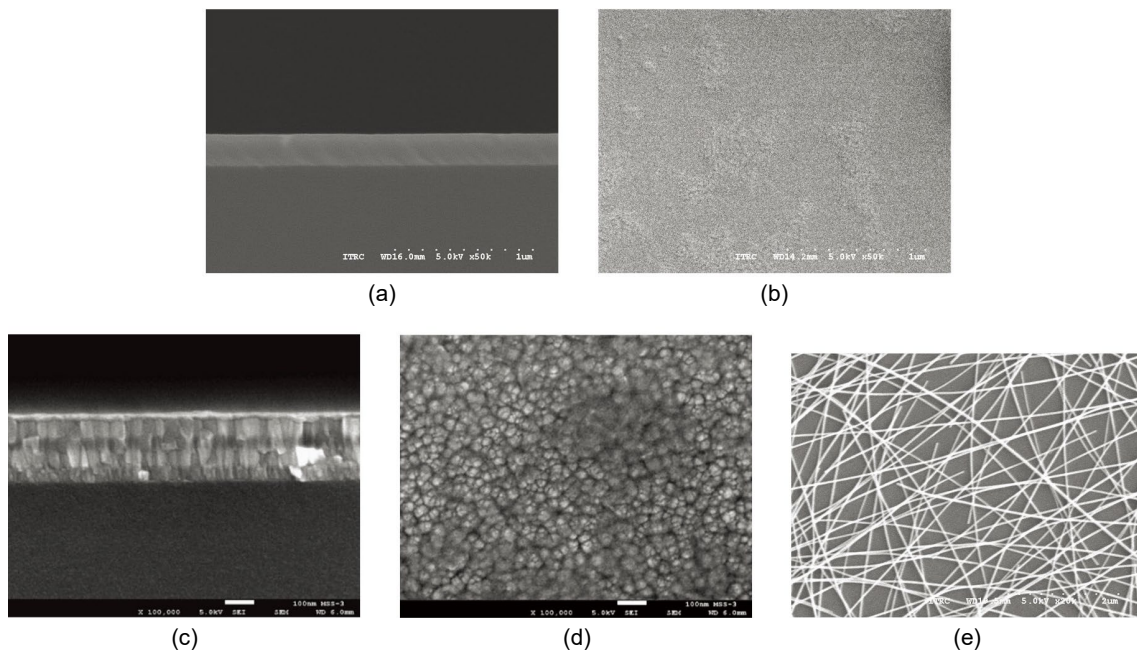


圖 10. 三種導電薄膜材料掃描式電子顯微鏡拍攝後形貌 (a) ITO 薄膜材料斷面、(b) ITO 薄膜材料表面、(c) GZO 薄膜材料斷面、(d) GZO 薄膜材料表面、(e) 導電高分子聚合物混合奈米銀線薄膜 (Heraeus® Clevious HY E (PEDOT:PSS+AgNW)) 材料表面形貌。



表 3. 三種面型熱元件用薄膜材料規格。

基板	導電薄膜材料	薄膜厚度 (nm)	初始電阻值 (ohm/square)	製備方法
Soda lime glass (1.1 mm)	ITO	200	22	Sputter
	GZO	200	76	Sputter
	PEDOT:PSS+AgNW	300	18180	Spin coating

圖 11 所示為面型熱元件薄膜使用雷射進行改質示意圖與面型熱元件加熱過程中使用遠紅外線熱影像儀 (CHCT P384 series) 進行熱元件在不同操作電壓下之溫度偵測。在雷射表面改質製程部分則採用試片上方離焦 3 mm，分別將雷射照射於面型熱元件薄膜上，其照射在試片上的雷射光斑直徑分別為 2 mm (UV雷射) 與 1 mm (CO<sub>2</sub>雷射)。在雷射功率與雷射操作頻率設定方面，其中 UV 雷射功率為 10 W、6 W 與 2 W，雷射操作頻率固定在 80 kHz。CO<sub>2</sub> 雷射功率為 15% (0.75 W)、40% (2 W) 與 60% (3 W)，其雷射操作頻率固定在 1 kHz。在面型熱元件薄膜雷射改質之振鏡掃描速度在 UV 雷射使用 1000 mm/s、500 mm/s 與 100 mm/s 掃描速度下進行。CO<sub>2</sub> 雷射使用 200 mm/s、100 mm/s 與 50 mm/s 掃描速度下進行改質，其掃描路徑採用等間距平行路徑，每個光斑與光斑間距為 0.02 mm。實驗環境位於室溫 (24 ± 2 °C)、濕度 (60 ± 5%) 與大氣環境下 (air atmosphere) 進行熱元件表面改質，上述所設置之參數條件並不會造成面型熱元件薄膜剝蝕現象，詳細實驗參數條件如表 4 所示。

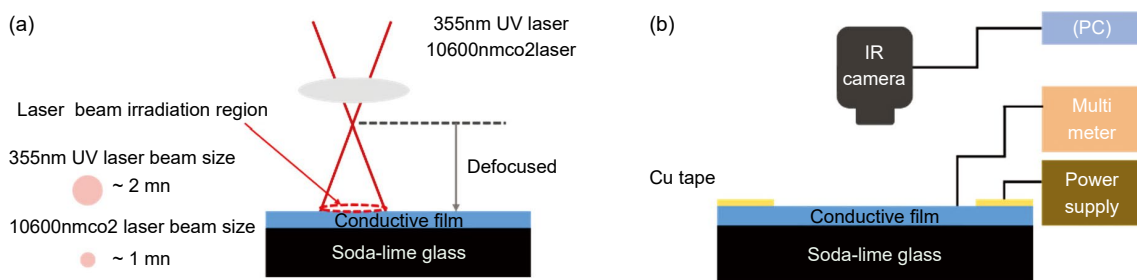


圖 11. 面型熱元件 (a) 表面改質製程與 (b) 熱元件量測示意圖。

表 4. 本研究使用之奈秒脈衝高頻紫外光雷射與遠紅外線波段二氧化碳雷射表面改質參數。

參數條件	雷射種類	
	UV laser	CO <sub>2</sub> laser
雷射功率 (Watt)	2	0.75
	6	2
	10	3
掃描速度 (mm/s)	100	50
	500	100
	1000	200
雷射光斑直徑 (mm)	2	1

經由四點探針量測三種面型熱元件薄膜 (GZO, ITO, PEDOT:PSS+AgNW) 分別使用 UV 雷射與 CO<sub>2</sub> 雷射改質前/後電阻值數據，如圖 12(a-c) 所示。在 GZO 薄膜在使用奈秒脈衝高頻紫外光雷射與遠紅外線波段二氧化碳雷射表面處理後，其電阻值皆低於原始電阻值。在 ITO 薄膜使用奈秒脈衝高頻紫外光雷射與遠紅外線波段二氧化碳雷射進行改質後，其電阻率皆低於原始電阻值。僅在使用奈秒脈衝高頻紫外光雷射 10 W 與掃描速度 100 mm/s 條件之下，其電阻率高於初始電阻率。

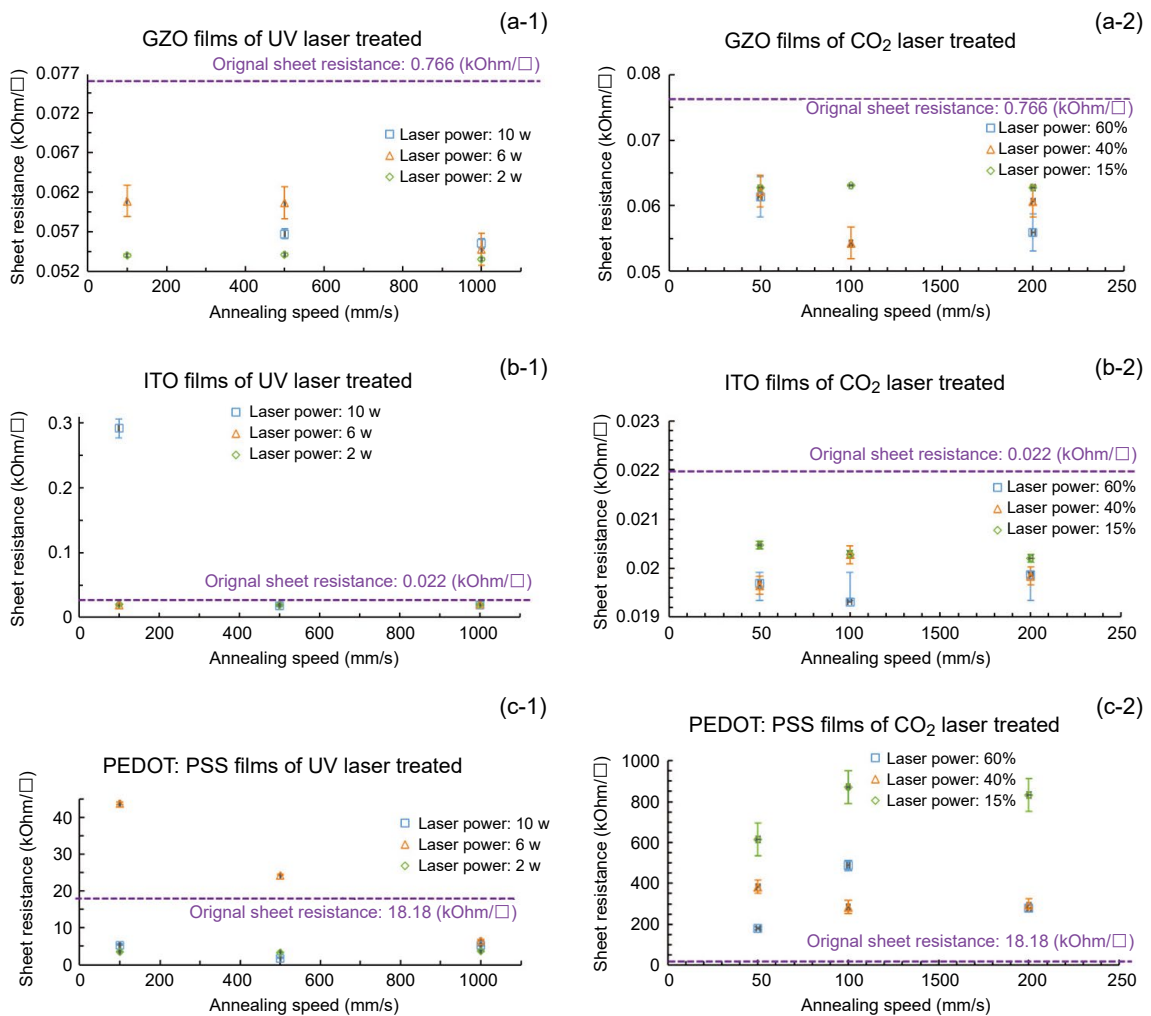


圖 12. 三種面型熱元件薄膜 (GZO, ITO, PEDOT:PSS+AgNW) 分別使用 UV 雷射與 CO<sub>2</sub> 雷射改質前/後電阻值數據趨勢 (a-1) GZO 薄膜使用 UV 雷射改質、(a-2) GZO 薄膜使用 CO<sub>2</sub> 雷射改質、(b-1) ITO 薄膜使用 UV 雷射改質、(b-2) ITO 薄膜使用 CO<sub>2</sub> 雷射改質、(c-1) PEDOT:PSS+AgNW 薄膜使用 UV 雷射改質、(c-2) PEDOT:PSS+AgNW 薄膜使用 CO<sub>2</sub> 雷射改質。

在 PEDOT:PSS+AgNW 薄膜使用奈秒脈衝高頻紫外光雷射與遠紅外線波段二氧化碳雷射進行改質後，使用奈秒脈衝高頻紫外光雷射，分別在雷射功率 6 W 與 掃描速度 100 mm/s、500 mm/s 條件下，其電阻值高於初始值。使用遠紅外線波段二氧化碳雷射，其雷射表面改質後其電阻值皆高於初始電阻值，這是由於過高的雷射能量的熱累積所導致。表 5 為經由雷射改質三種熱元件用薄膜所獲得最低電阻率的加工條件。

表 5. 獲得最低電阻率之雷射表面改質參數。

導電薄膜材料	UV laser		CO <sub>2</sub> laser	
	雷射功率 (W)	掃描速度 (mm/s)	雷射功率 (W)	掃描速度 (mm/s)
GZO	2	1000	2	100
	電阻率		電阻率	
	5.3 ohm/square		5.4 ohm/square	
ITO	10	500	3	100
	電阻率		電阻率	
	18 ohm/square		19 ohm/square	
PEDOT:PSS+AgNW	10	500	3	50
	電阻率		電阻率	
	1712 ohm/square		179640 ohm/square	

圖 13 所示使用雷射表面改質參數後最低電阻率之三種面型熱元件薄膜透過直流電源供應器固定驅動電流為 0.5 A 條件之下改變操作電壓分別為 10 V、20 V 與 30 V。透過熱像儀擷取溫升 60 秒 (每次取樣時間 0.05 秒) 後資訊。經由實驗結果顯示，當直流驅動電壓固定在 30 V 時，比較三種導電薄膜熱元件材料，其中 GZO 薄膜擁有近 160 °C 溫升結果 (圖 13(a))，其次為 ITO 薄膜擁有 > 100 °C 溫升結果 (圖 13(b))。PEDOT:PSS+AgNW 在 30 V 直流電源驅動下，其溫升約為 35 °C (圖 13(c))。其溫升無法顯著提升的原因係因電阻值過高導致，符合焦耳定律之公式，如方程式 (8) 所示

$$Q = VIt = \frac{V^2}{R} \times t \quad (8)$$

其中， $Q$  為熱元件產生之熱能， $V$  為供給的直流電壓， $R$  為電阻值， $t$  為工作時間。因此，熱元件的加熱溫度隨著直流驅動電壓成正比關係與電阻值成反比關係。相較於三維堆疊式薄膜熱元件<sup>(34)</sup>，其需要較高的操作電壓方能使熱元件溫度提升。此外，薄膜的尺度效益<sup>(35, 36)</sup>將影響到熱元件溫升效果。

#### 四、結論

感測器用熱元件薄膜材料係為金屬氧化物半導體氣體感測器中重要的組件，可作為氣體吸附後進行脫附之用途。然而，在感測元件越做越小的當下，熱元件的功耗問題將被凸顯。本研究發展多種氧化物半導體薄膜與複合式導電薄膜搭配雷射改質技術進行元件效能提升。以加熱溫度作為區隔，氧化銻錫 (ITO) 薄膜材料經實驗測試，雖擁有大於 100 °C 的加熱溫度，其次為氧化鋅鎘 (GZO) 薄膜材料與導電高分子混合奈米銀線 (PEDOT:PSS+AgNW) 複合材料。同時觀測其操作電壓，三種薄膜須達 10 V 以上才有顯著的加熱效果，其功耗明顯大於三維堆疊式電極結構。為此，發展針對熱元件用薄膜材料雷射改質方法，藉以提升薄膜特性，對於發展低功耗微型感測器將有所助益，並可直接應用於氣體感測器元件當中。

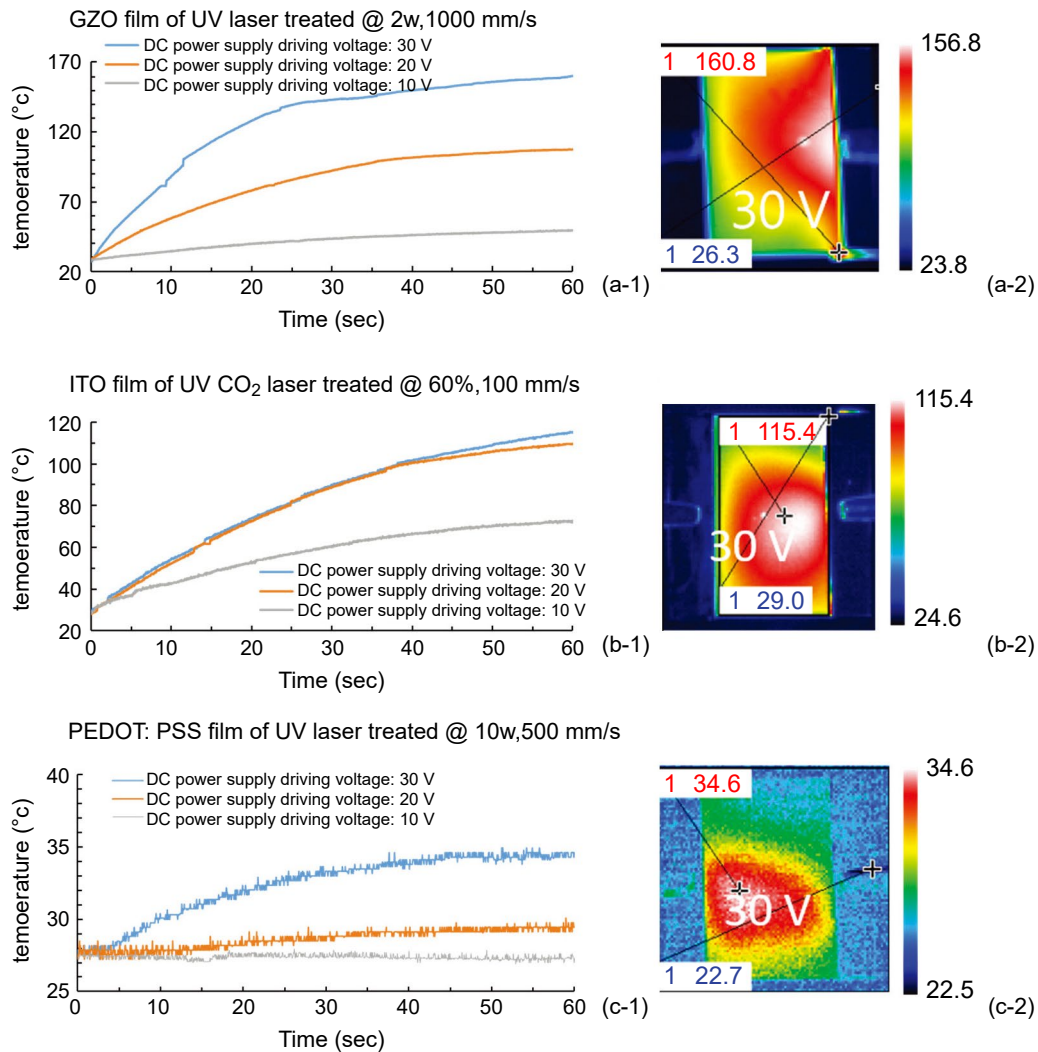


圖 13. 面型導電薄膜熱元件溫升曲線與紅外線熱影像，(a) GZO 薄膜熱元件、(b) ITO 薄膜熱元件、(c) PEDOT:PSS 薄膜熱元件。

## 誌謝

本論文為科技部計畫編號 MOST-106-2221-E-492-012 之計畫，以及台灣儀器科技研究中心真空鍍膜與光元件組朱念南助理技術師的電顯實驗室 SEM/EDS 技術支援特此致謝。

## 參考文獻

1. J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami, *Future Generation Computer Systems*, **29**, 1645 (2013).
2. Please refer to the web site: <http://www.ctimes.com.tw/>
3. Please refer to the web site: <http://www.mem.com.tw/>
4. Please refer to the web site: <http://big5.china.com/>
5. Please refer to the web site: <http://www.idtechex.com/>
6. K. Sugioka, et al., *Appl. Phys. A.*, **77**, 251 (2003).
7. M. Aminuzzaman, A. Watanabe, T. Miyashita, *Thin Solid Films*, **517**, 5935 (2009).
8. O. Yavas, M. Takai, *J. Appl. Phys.*, **85**, 4207 (1999).

9. O. Yavas, M. Takai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 7131 (1999).
10. H.J. Booth, *Thin Solid films*, **453**, 450 (2004).
11. J.X. Wang, S.J. Kwon, E.S. Cho, *Microelectronic Engineering*, **95**, 107 (2012)
12. W.M. Tsang, et al., *Thin Solid Films*, **517**, 891 (2008).
13. W. Chung, M.O. Thompson, P. Wickboldt, D. Toet, P.G. Carey, *Thin Solid Films*, **460**, 291 (2004).
14. Y. Zhou, et al., *Adv. Mater.*, **21**, 1 (2009).
15. M. Acuautla, et al., *Sensors and Actuators B*, **203**, 602 (2014).
16. C. Molpeceres, et al., *J. Micromech. Microeng.*, **15**, 1271 (2005).
17. Y.H. Do, M.G. Kang, J.S. Kim, C.Y. Kang, S.J. Yoon, *Sensors and Actuators A*, **184**, 124 (2012).
18. B. Wojakowski, U. Klug, J. Düsing, R. Kling, *Physics Procedia*, **5**, 301 (2010).
19. H. Nguyen, et al., *Thin Solid Films*, **563**, 36 (2014).
20. W.J. Hwang, K.S. Shin, J.H. Roh, D.S. Lee, S.H. Choa, *Sensors*, **11**, 2580 (2011).
21. S. Kim, J. Park, K. Kang, C.O. Park, I. Park, *J. Micromech. Microeng.*, **25**, 015002 (2015).
22. S. Takamatsu, K. Kurihara, T. Yamashita, T. Itoh, *J. Micromech. Microeng.*, **24**, 045024 (2014).
23. B. Hsia, et al., *Nanotechnology*, **25**, 055401 (2014).
24. T. Ribeiro, C. Baleizão, J.P.S. Farinha, *Materials*, **7**, 3881 (2014).
25. M. Zamfirescu, R. Dabu, M. Dunitru, G. Sajin, F. Craciunoiu, *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, **3**, 5 (2008).
26. J.Y. Cheng, M.H. Yen, W.C. Hsu, J.H. Jhang, T.H. Young, *J. Micromech. Microeng.*, **17**, 231 (2007).
27. S.H. Park, G. Yang, N. Madduri, M.R. Abidian, S. Majd, *Adv. Mater.*, **26**, 2782 (2014).
28. C.F. Hu, W.S. Su, W. Fang, *J. Micromech. Microeng.*, **21**, 115012 (2011).
29. J. Huang, Q. Wan, *Sensors*, **9**, 9904 (2009).
30. G. Gutierrez-Heredia, et al., *Thin Solid Films*, **545**, 458 (2013).
31. F. Zacharatos, et al., *Optics & Laser Technology*, **79**, 108 (2016).
32. S.H. Ko, H. Pan, D. Lee, C.P. Grigoropoulos, H.K. Park, *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**, 05EC03 (2010).
33. H. Lee, et al., *J. Mater. Chem. A*, **3**, 8339, (2015).
34. 謝宇辰, 林奕成, 丁健芳, 蕭文澤, 蕭育仁, “氣體感測器用微型加熱器研製”, 中國機械工程學會第三十六屆全國學術研討會, 臺灣師範大學, 6月14日 (2019).
35. S. Y. Lee, J. Y. Hwang, *Scientific Reports*, **10**, 9697 (2020).
36. N. Kwon, K. Kim, J. Heo, I. Yi, I. Chung, *Nanotechnology*, **25**, 265702 (2014).

## 作者簡介

陳柔甄小姐為南台科技大學電子工程系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理研究員。

Rou-Jhen Chen received her M.S. in Department of Electronic Engineering from Southern Taiwan University of Science and Technology. She is currently a research assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

林奕成先生為國立虎尾科技大學飛機工程學系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理研究員。

Yi-Cheng Lin received his M.S. in Department of Aeronautical Engineering from National Formosa University. He is currently a research assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

楊智仲先生為國立臺灣師範大學機電工程所碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副工程師。

Chih-Chung Yang received his M.S. in Mechatronics Engineering from National Taiwan Normal University. He is currently an associate engineer at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蕭育仁先生為國立成功大學材料科學與工程所博士，現為南臺科技大學機械工程系副教授。

Yu-Jen Hsiao receive his Ph.D. in Material Engineering from National Cheng Kung University. He is currently an associate professor in Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.

蕭文澤先生為國立彰化師範大學機電工程所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Wen-Tse Hsiao received his Ph.D. in Mechatronics Engineering from National Changhua University of Education. He is currently a research fellow at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.