

紫外光雷射於鋁摻雜氧化鋅薄膜電極圖案化與退火製程研究

Study of Electrode Patterning and Annealing Processes of Aluminum-Doped Zinc Oxide Films Using an Ultraviolet Laser

蕭文澤、曾釋鋒、鍾健愷、黃國政、蔣東堯

Wen-Tse Hsiao, Shih-Feng Tseng, Chien-Kai Chung, Kuo-Cheng Huang, Donyau Chiang

本研究提出了複合式雷射處理技術 (同時具有電極圖案化與雷射退火製程效果)，針對鋁摻雜氧化鋅 (aluminum-doped zinc oxide, AZO) 透明導電薄膜材料於一個製程步驟中完成。雷射聚焦光斑直徑為 30 μm ，而正離焦光束直徑為 1 mm，藉由紫外光雷射系統進行調整。AZO 透明導電薄膜以濺鍍法沉積於康寧 Eagle 2000 玻璃基板，厚度約為 200 nm。加工後的薄膜表面性質分別藉由原子力顯微鏡 (AFM) 觀察薄膜表面粗糙度、場發射掃描式電子顯微鏡 (FE-SEM) 與三維雷射共焦顯微鏡觀察薄膜表面形貌、四點探針量測儀分析薄膜電性和電阻率變化情形，而分光光譜儀量測光穿透率。實驗結果得知，脈衝重複頻率增加其雷射剝蝕深度也隨之增加。當振鏡掃描速度增加時其雷射剝蝕深度隨之降低。雷射退火後在薄膜穿透率光譜略有變化，在可見光光譜範圍內其平均光穿透率約 83%。經由雷射電極圖案化與雷射退火製程後，薄膜電阻率明顯下降。在雷射退火後的結構分析中，使用 X 光繞射光譜 (X-ray diffraction, XRD)，搭配 Scherrer 公式計算退火後晶粒大小，得知隨著掃描速度降低，其薄膜晶粒尺寸明顯變大。此外，固定掃描速度為 500 mm/s，調整雷射脈衝重複頻率為 40 kHz、55 kHz 與 70 kHz，所得到薄膜表面粗糙度分別為 1.1 nm、1.2 nm 與 1.8 nm。

An ultraviolet (UV) laser system performs simultaneously the electrode patterning and annealing on the aluminum-doped zinc oxide (AZO) films in this study. The diameters of the focused laser beam and the positive defocused laser beam in the system employed were 30 μm and 1 mm, respectively. Both beams were adjusted using a UV laser-processing system. AZO films prepared by the magnetron sputtering technology were deposited on Corning Eagle 2000[®] optical glass sheets. The thickness of the deposited films was approximately 200 nm. The optoelectronic properties of laser treated AZO films strongly depend on the laser pulse frequency and galvanometer scanning speed. The surface morphology, roughness, optical transmittance, and resistivity of the films after the laser patterning and annealing processes were respectively measured using an atomic force microscope (AFM), a field-emission scanning electron microscope (FE-SEM), a three-dimensional confocal laser scanning microscope, a four-point probe instrument, and a spectrophotometer. Experimental results indicate that the ablation depth increased as the pulse repetition frequency increased and decreased with the galvanometric scanning speed increase. The transmittance spectra of the film changed slightly after the laser annealing, and the average transmittance in the visible region was approximately 83%. All resistivity values after the laser-treated AZO films decreased

significantly compared to that of as-sputtered films. The grain sizes of the annealed films were calculated from the X-ray diffraction (XRD) spectra using the Scherrer's equation. The calculated grain sizes increased from 7.4 nm to 12 nm as the annealing scanning speed decreased from 800 mm/s to 400 mm/s. The roughness in the root mean square (RMS) values of annealed AZO films treated with a fixed laser scanning speed of 500 mm/s and with pulse repetition frequencies of 40 kHz, 55 kHz, and 70 kHz were 1.1 nm, 1.2 nm, and 1.8 nm, respectively.

一、前言

隨著人機介面多元化與操作簡單的需求，觸控面板未來將可取代鍵盤、滑鼠等輸入裝置，成為重要的人／機溝通橋樑。尤其以蘋果公司開發之 iPhone、iPad 觸控螢幕系列商品受到全球民眾瘋狂搶購，帶領觸控面板邁向新風潮，且微軟新型作業系統 Windows 7 與 Windows 8 在 2009 年與 2012 年相繼問世，也帶動另一波觸控螢幕新風潮。這些軟體皆打破傳統作業系統溝通方式，讓人機介面操作更人性化、更便利。觸控面板依感應原理可分為電阻式、電容式與光學式等。觸控面板結構主要係由上下兩組透明電極疊合而成，利用手指按壓壓力使得上下電極導通，經由感測器得知面板壓力變化，進而計算點的位置來輸出其相對座標位置與功能。除此之外，將書本捲起來帶著走的電子書、電子地圖等與薄膜太陽能電池皆須使用透明導電薄膜電極材料。市售透明導電薄膜材料大多以氧化物半導體如氧化銦 (In_2O_3)、氧化錫 (SnO_2) 和氧化鋅 (ZnO) 居多。圖 1 為透明導電薄膜應用實例，電子書與多點觸控螢幕手機⁽¹⁻³⁾。

雷射電極圖案化製程技術可分為 (a) 雷射光罩投影製程與 (b) 雷射直寫圖案化製程。圖 2 為利用

雷射光源經由光罩投影加工示意圖⁽⁴⁾。此方法利用雷射光束先行進行擴束與均質化處理，光束再經由設計完成之光罩圖案投射於透明導電薄膜材料上。使用光罩投影加工技術需考量以下幾點事項：(1) 在大面積的投射過程中，光束首先需進行勻光動作。(2) 光罩的材質是否因為過高的雷射能量密度造成破壞，甚至使得雷射功率透過光罩後能量衰減。(3) 設計不同電極圖案，其遮罩處需進行不同設計。隨著面板尺寸朝大型化發展，光罩係採用高透光率、熱膨脹率小的石英玻璃製作，相對地光罩的開發成本也隨之提升⁽⁵⁾。Rumsby 等人利用準分子 (excimer) 雷射對於厚膜與薄膜基材以光罩投影方式進行畫素電極製作，以同步 (synchronized) 掃描投影方式在 50 mm^2 範圍內製作感測元件，所使用雷射能量大小為 300 mJ/cm^2 ，可製作電極尺寸為 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ⁽⁶⁾。

Soliman 等人提出低成本、簡便的紫外光雷射光束加工於氧化銦錫 (ITO) 薄膜製程⁽⁷⁾。使用照射平均時間與平均能量密度分別為 48.75 秒與 2 J/cm^2 ，加工後表面粗糙度大於 20 nm。當固定雷射能量為 100 mW 與掃描速度 0.05 mm/s 條件下，線寬隨著能量上升而增加。在導電特性量測部分，使用雷射能量為 80 mW/cm^2 ，照射時間從 0 至 12

圖 1. 透明導電薄膜應用實例：電子書與多點觸控螢幕手機⁽¹⁻³⁾。



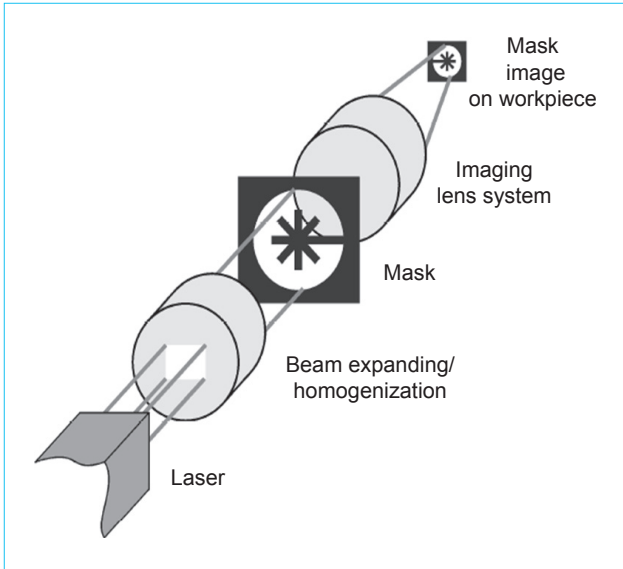


圖 2. 雷射光罩投影示意圖⁽⁴⁾。

分鐘，其電阻值由原先的 100 kΩ/□ 降低至小於 10 kΩ/□。由電阻值量測結果可知，隨著雷射照射時間增加，其電阻值將持續下降。以光譜儀量測加工前後的薄膜穿透率可發現，其雷射照射前、後光譜趨勢一致。Yoo 等人利用 Nd:YAG 雷射於雙層薄膜合金 (Ag/Au、Au/Al、Al/Au、Ag/Al 與 Al/Ag) 進行移除實驗⁽⁸⁾。首先以理論分析探討雙層薄膜經由雷射加工過程中受力情況，當雷射能量小於薄膜破壞能階，則薄膜與基板將不會被剝蝕。Venkat 與 Dunskey 提出平面顯示器雷射電極圖案化直寫技術，介紹三種不同雷射源 Nd:YVO₄、Nd:YLF 與 Nd:YAG 對於透明導電薄膜直寫技術簡介⁽⁴⁾。Yavas 等人利用具有 Q-switch 之 Nd:YLF 雷射與閃光燈激發之 Nd:YAG 雷射對於 ITO 薄膜進行材料移除，研究中發現使用較短波長的雷射源具有較好的表面品質^(9, 10)。Ghandour 等人利用 XeCL 準分子雷射 (308 nm) 針對 ITO 薄膜進行圖案化製程，最後利用 CO₂ snow 將雷射燒蝕所產生的邊緣翹曲現象進行清除⁽¹¹⁾。研究中發現，使用過高的輔助氣體壓力將使得玻璃基板產生過度剝離現象。Okmoto 等人利用二倍頻 Nd:YAG 雷射，針對液晶顯示器與電漿平面顯示器面板上之 ITO 薄膜進行劃線蝕刻⁽¹²⁾，探討雷射平均功率、脈衝重複頻率與平台進給速度對於雷射蝕刻的影響。Tanaka 等研究學者利用飛秒 (femtosecond) 雷射進行 ITO 薄膜劃線

乾式蝕刻製程，由於飛秒雷射加工機制為冷加工機制，因此可有效降基板與薄膜邊緣破損現象⁽¹³⁾。此外，並探討進給平台速率對薄膜蝕刻線寬與劃線邊緣隆起高度分析。Park 等人提出超快雷射移除 ITO 薄膜在有機發光二極體元件上的應用，當脈衝數與雷射能量增加，其薄膜移除深度與寬度隨之提高⁽¹⁴⁾。Booth 提出透明導電薄膜 (ITO) 於玻璃基板上以雷射進行電路製作⁽¹⁵⁾。此外，利用蝶形領結掃描方式 (bow tie scanning, BTS)，搭配移動平台與振鏡完成高速且具大面積加工，此技術可運用於電漿平面顯示器上。

在透明薄膜雷射退火製程技術中，Lee 等人以 KrF 準分子雷射 (波長 248 nm) 於 AZO 薄膜表面進行退火實驗，分析其薄膜結構、表面形貌和光電特性⁽¹⁶⁾。實驗參數包括：雷射能量密度固定 160 mJ/cm²、頻率為 10 kHz，雷射脈衝 (pulse) 數調整從 600 發至 3000 發。由表面特性量測結果得知，當雷射能量密度在 160 mJ/cm² 和脈衝數為 1800 發時，經 SEM 觀測知晶體獲得能量後可使表面一些孔隙變小且晶界變大，導電性因此得到了提升。在薄膜結構特性研究方面，係利用 XRD 量測薄膜結晶特性，當脈衝數上升時，繞射峰強度有變大趨勢，可知結晶特性變得更好。藉由 Scherer 公式可求得晶粒大小 (grain size)，發現晶粒大小有明顯增大的現象。在導電性的探討中發現當脈衝數往上累積時，從霍爾量測儀量測中發現載子濃度和載子遷移率有明顯增加，而電阻率明顯往下降，因為載子濃度和遷移率的增加，使得導電性獲得提升。

Tsang 等人以溶凝膠法製備 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⁽¹⁷⁾。相關雷射調變參數如下：雷射脈衝數為 1、3、5 發 (shots) 條件下與雷射能量在 150、200 與 250 mJ。在薄膜結構分析方面，當脈衝數為 5 發且雷射能量分別為 150、200 與 250 mJ 時，可從材料 XRD 圖得知當脈衝數固定時，隨著雷射能量提高，其量測的繞射峰值強度有變大趨勢。當雷射能量固定於 250 mJ 時，隨著脈衝數的增加，也得到相同的效果。Chung 等人利用 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⁽¹⁸⁾。實驗結果顯示：當雷射能量密度由 50 至 175 mJ/cm² 且脈衝數

為 10 發，其片電阻由退火前的 $190 \Omega/\square$ 下降為 $33 \Omega/\square$ 。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。

本研究利用紫外光雷射加工系統，採用聚焦雷射光斑與離焦雷射光斑針對透明導電薄膜 AZO 進行複合式加工 (雷射電極圖案化與雷射退火製程)。藉由調變不同雷射脈衝重複頻率與振鏡掃描速度，探討透明導電薄膜光電特性、表面形貌與晶粒大小變化情形。藉由雷射源搭配振鏡掃描系統可大幅縮短微小電極製作時程。本技術開發有助於開創國內產業設備技術自主化之應用，並提升設備開發於國際間競爭力。

二、雷射電極圖案化與雷射退火製程

1. 雷射加工系統

紫外光雷射加工系統係由 Nd:YVO₄ 雷射源、掃描振鏡系統、光路系統與 XY 雙軸伺服控制平台所組成。雷射源為美國 Coherent 公司生產的 AVIA 355-14 之固態雷射，規格說明如下：其雷射波長為 355 nm、最高輸出功率為 14 W、空間模態為 TEM₀₀ ($M^2 < 1.3$)、脈衝重複頻率為 1–400 kHz、出口端雷射直徑為 3.5 mm 與脈衝寬度為 28 ns (當脈衝重複頻率為 100 kHz 時)。掃描振鏡系統為德國 Raylase 公司生產 SS-15 型之 XY 雙軸振鏡系統，此系統前端架設可控制之光束擴束器，可控制雷射聚焦點位置 ± 15 mm 位移量。振鏡系統出口端則架設遠心鏡頭，其焦長和掃描範圍分別為 110 mm 與 40 mm × 40 mm，透過伺服控制平台移動可進行大面積雷射退火實驗。

表 1. Corning Eagle 2000[®] 玻璃基板物理特性⁽¹⁹⁾。

材料	密度 (g/cm ³)	楊氏係數 (GPa)	剪力模數 (GPa)	熱膨脹係數 (0–300 °C)	軟化點 (°C)
Glass	2.37	70.9	28.9	$31.8 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	985

表 2. AZO 透明導電薄膜光電特性。

基板	薄膜厚度 (nm)	穿透率 (400–700 nm) (%)	電阻率 ($\Omega\cdot\text{cm}$)
Corning Eagle 2000 [®]	200	83.5	2.126×10^{-2}

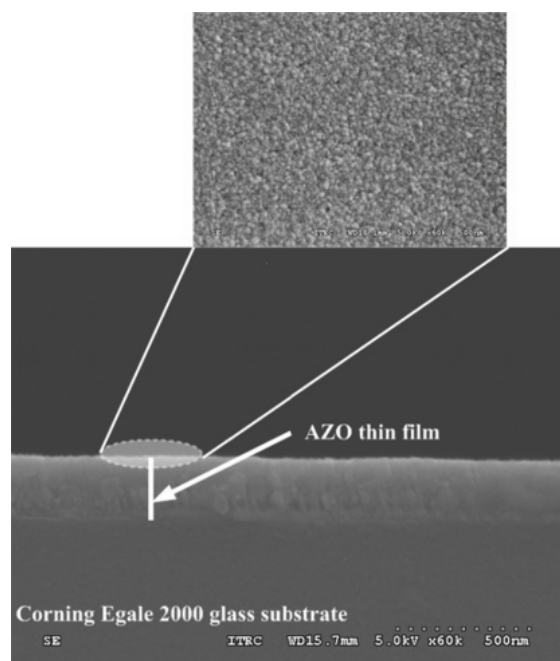


圖 3. AZO 透明導電薄膜 SEM 剖面圖與其表面形貌。

2. 鋁摻雜氧化鋅 (AZO) 透明導電薄膜材料製備

本實驗使用濺鍍法沉積 AZO 透明導電薄膜於 0.7 mm 厚度之 Corning Eagle 2000[®] 玻璃基板，其特性如表 1 所示⁽¹⁹⁾。為了獲得相同尺寸的樣品試片，藉由鑽石輪刀將玻璃試片切割成 30 mm²，再經由去離子水 (distilled water) 與酒精之混合溶液於超音波清洗機中進行清潔。圖 3 為 AZO 透明導電薄膜 SEM 剖面圖與其表面形貌，其 AZO 薄膜厚度約為 200 nm。藉由原子力顯微鏡 (AFM, Veeco Dimension 3100) 與場發射掃描式電子顯微鏡 (FE-SEM, Hitach S-4300) 進行薄膜表面形貌與斷面膜厚分析。在薄膜電特性量測部分係以四點探

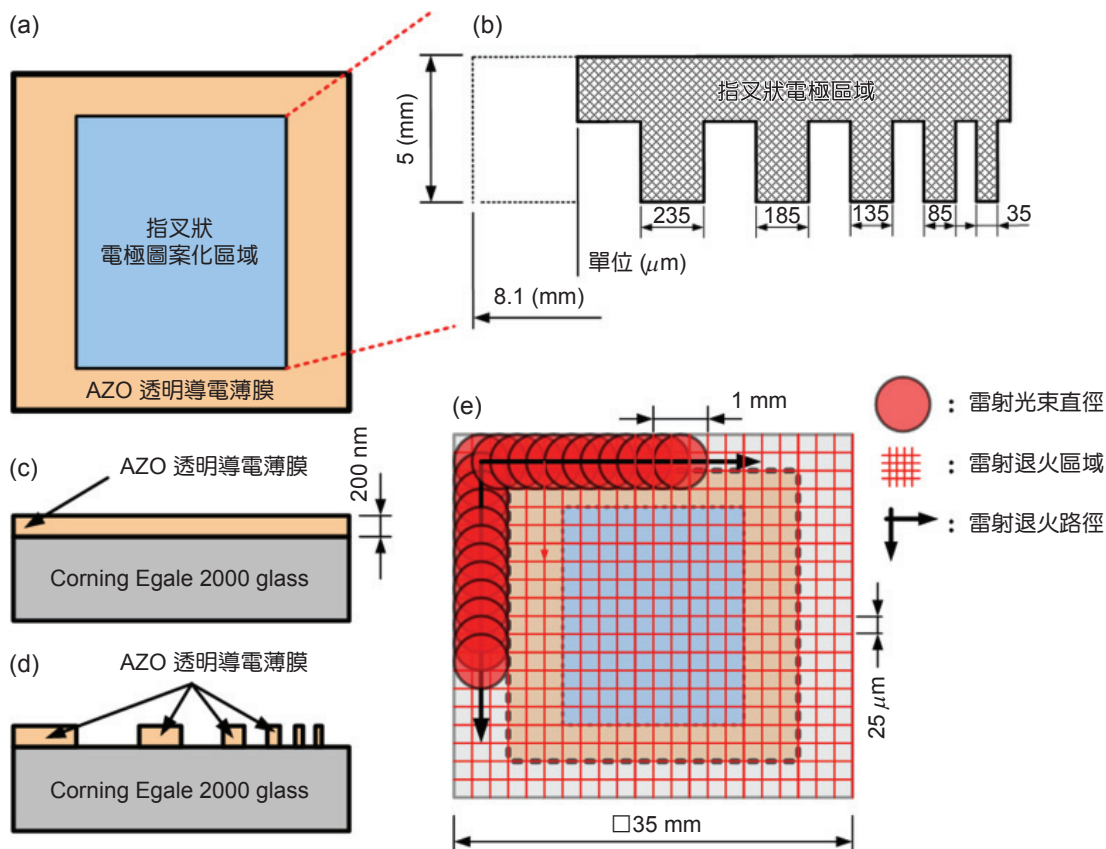


圖 4. 雷射電極圖案化／雷射退火區域與設計之指叉狀電極尺寸。

針(QUATEK CH-5601Y) 進行薄膜電阻值量測。此外，透明導電薄膜穿透率量測係由 UV/Vis/NIR 分光光譜儀 (Jasco V-670) 進行量測，其量測範圍從 400–700 nm。在薄膜結晶特性量測部分使用 X 光繞射儀 (X-ray diffractometry)。表 2 為 AZO 薄膜光電特性，在可見光範圍的光穿透率為 83.5%，電阻率為 $2.126 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

3. 實驗設計

如圖 4(a) 與圖 4(b) 為雷射電極圖案化區域與設計的指叉狀電極尺寸。指叉狀電極面積大小為 $8.1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。每個指叉狀電極尺寸分別為 $35 \mu\text{m}$ 、 $85 \mu\text{m}$ 、 $135 \mu\text{m}$ 、 $185 \mu\text{m}$ 及 $235 \mu\text{m}$ 。圖 4(c) 與圖 4(d) 分別為雷射電極圖案化前後示意圖。圖 4(e) 紅色棋盤狀為雷射退火區域 (35 mm^2)，採正離焦光斑直徑 (1 mm) 與交叉等間距 ($25 \mu\text{m}$) 掃描，雷射退火區域涵蓋整個電極圖案化位置。

為了獲得最佳化 (基板無微裂痕與破損情況下) 的雷射電極圖案化結果，其雷射脈衝能量固定為 $61.2 \mu\text{J}$ ，調整雷射脈衝重複頻率為 40 kHz、55

kHz、70 kHz，調整雷射振鏡掃描速度為 600 mm/s、800 mm/s、1000 mm/s、1500 mm/s，在材料移除路徑上選擇交叉等間距 ($1 \mu\text{m}$)。

此外，在雷射退火前測試過程中，固定雷射光束直徑為 1 mm 與雷射脈衝能量 $61.2 \mu\text{J}$ ，調整雷射脈衝重複頻率與振鏡掃描速度。測試結果發現，AZO 薄膜在脈衝重複頻率超過 70 kHz 與掃描速度低於 400 mm/s 條件下將產生薄膜燒蝕。因此，雷射退火的脈衝重複頻率與振鏡掃描速度將分別設定為 40 kHz、55 kHz、70kHz、400 mm/s、500 mm/s、600 mm/s、700 mm/s 與 800 mm/s。

三、結果與討論

1. 指叉狀電極圖案表面形貌與剝蝕深度分析

圖 5 分別顯示利用三維共焦顯微鏡所拍攝的指叉狀電極圖案，包括完整圖案化區域 (5a)、局部區域 (5b) 與三維結構影像 (5c)。由圖 5 中可明顯發現，在雷射蝕刻區域已將 AZO 透明導電薄膜完全移除，且無損壞到下方的玻璃基板。在局部區域

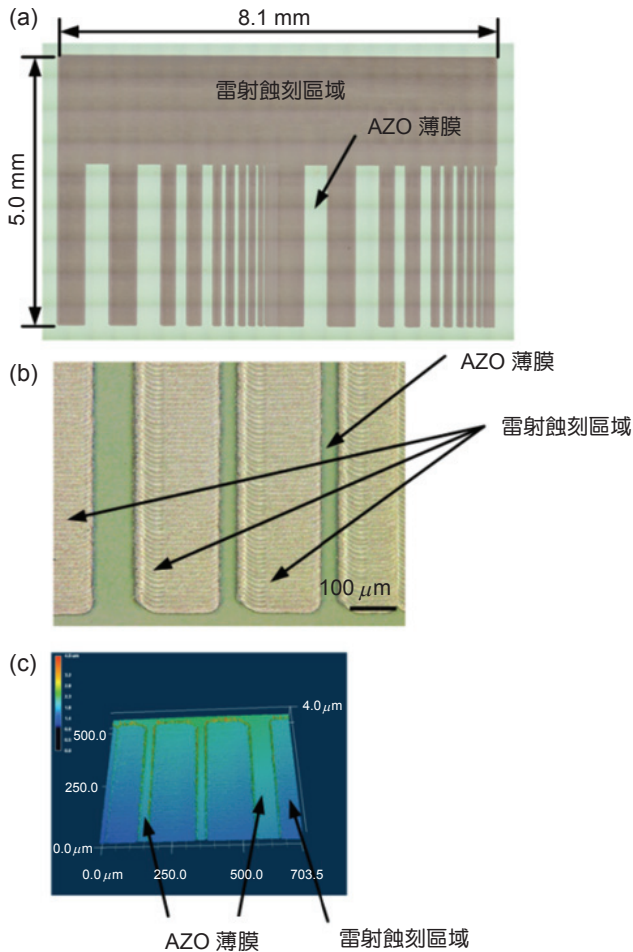


圖 5. 指叉狀電極圖案，(a) 完整圖案化區域、(b) 局部區域與 (c) 三維結構影像。

與三維結構所拍攝的影像中，在 AZO 薄膜雷射剝蝕邊緣皆有隆起的現象產生。在固定射脈衝能量為 $61.2 \mu\text{J}$ 條件下進行調變各種振鏡掃描速度與雷射脈衝重複頻率，探討其相對應的關係，如圖 6(a) 與圖 6(b) 所示。實驗後分析結果顯示，其雷射剝蝕深度隨著振鏡掃描速度的增加而降低。此外，在雷射脈衝重複頻率、振鏡掃描速度與雷射剝蝕深度的關係圖可發現，當雷射脈衝重複頻率增加，其雷射剝蝕深度也隨之提升。

2. AZO 透明導電薄膜雷射退火前後光穿透率分析

本研究使用分光光譜儀量測雷射退火前後 AZO 薄膜光穿透率，探討不同雷射退火參數條件下對 AZO 薄膜的光學特性影響。圖 7 為 AZO 薄

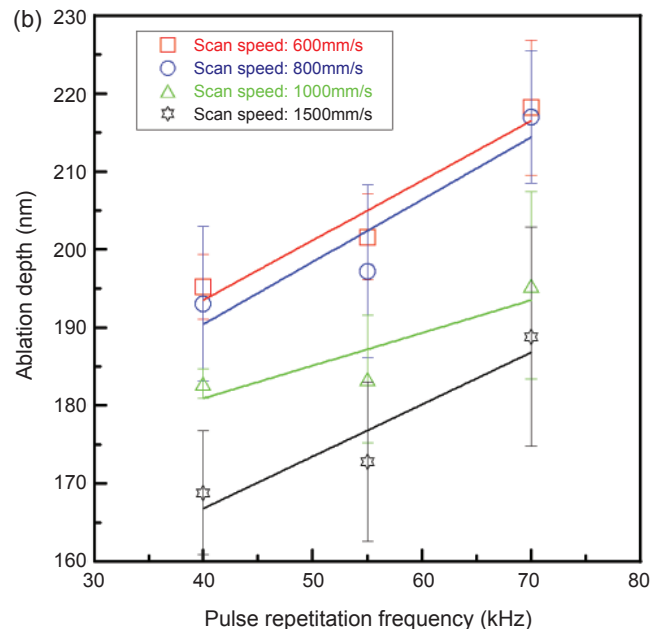
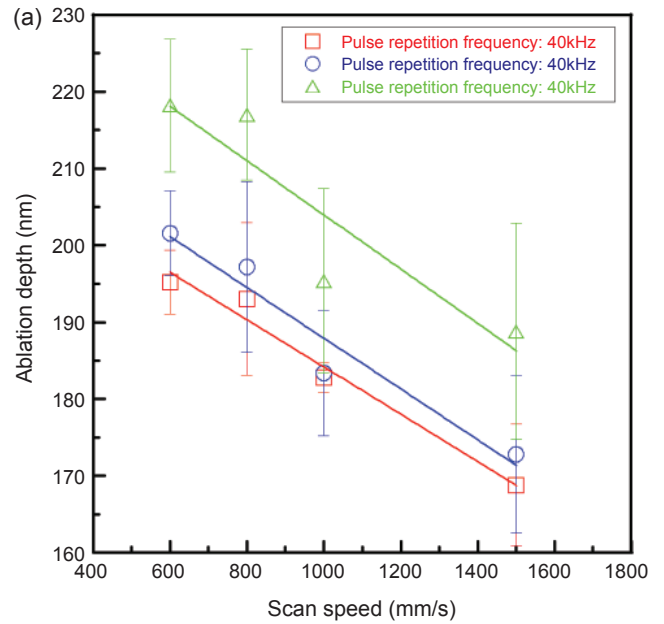


圖 6. 振鏡掃描速度與雷射脈衝重複頻率對於雷射剝蝕深度關係。

膜退火前後的光穿透率曲線。圖 7(a) 光穿透曲線為固定雷射脈衝重複頻率 (40 kHz、55 kHz 與 70 kHz) 改變振鏡掃描速度 (400 mm/s、500 mm/s、600 mm/s、700 mm/s、800 mm/s)。由圖 7(a) 與 7(b) 中可明顯發現，當雷射脈衝重複頻率固定為 40 kHz 與 55 kHz 時，其穿透率隨著掃描速度的增加而降低。由於在高速掃描的情況下無法提供 AZO 適當的溫度，導致穿透率下降。由圖 7(c) 可

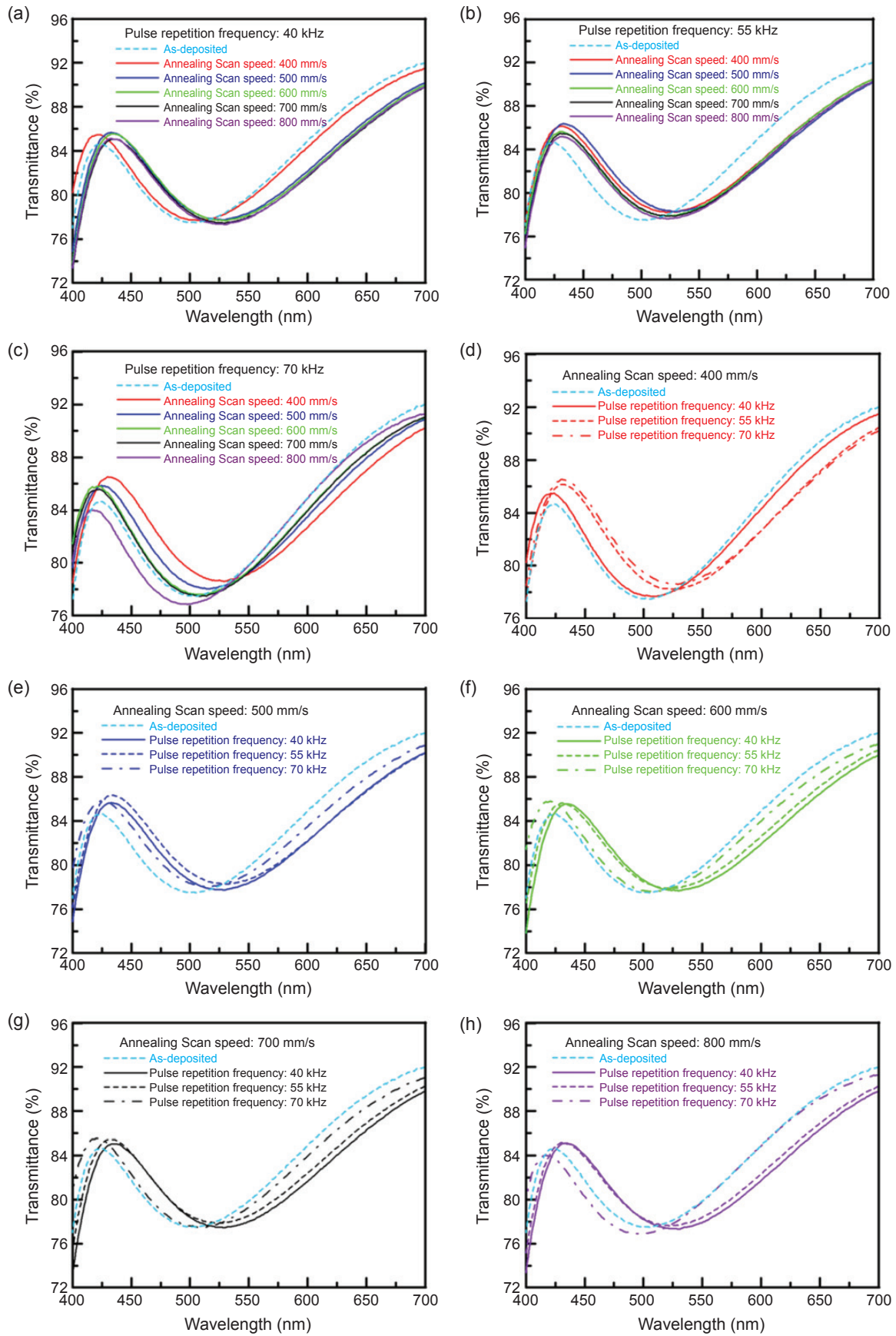


圖 7. AZO 薄膜退火前後的光穿透率曲線 (400–700 nm)。

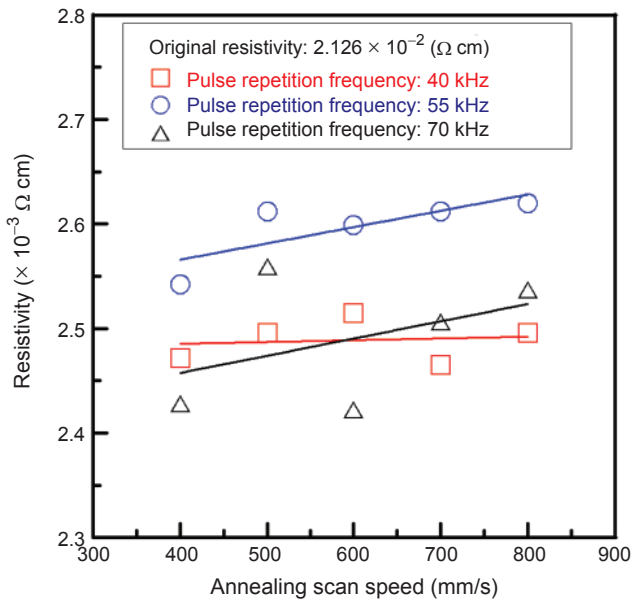


圖 8. 不同雷射掃描速度與脈衝重複頻率之雷射退火後電阻率。

發現，在脈衝重複頻率為 70 kHz 時，薄膜穿透率隨著振鏡掃描速度減少而下降。較大的雷射能量結合較低的振鏡掃描速度可使得 AZO 薄膜上產生足夠的熱能，導致薄膜穿透率下降。圖 7(d) 至圖 7(h) 顯示，為固定振鏡掃描速度為 400 mm/s 至 800 mm/s 下調整雷射脈衝重複頻率為 40 kHz、55 kHz 與 70 kHz 下的薄膜穿透率。由圖中可明顯發現，穿透光譜隨著脈衝重複頻率減少而些微降低。

3. AZO 透明導電薄膜雷射退火前後電特性分析

雷射脈衝重複頻率與掃描速度明顯影響 AZO 透明導電薄膜的電特性。圖 8 為不同雷射掃描速度與脈衝重複頻率之雷射退火後的電阻率。由圖 8 中可明顯的發現，所有的 AZO 薄膜經由雷射退火

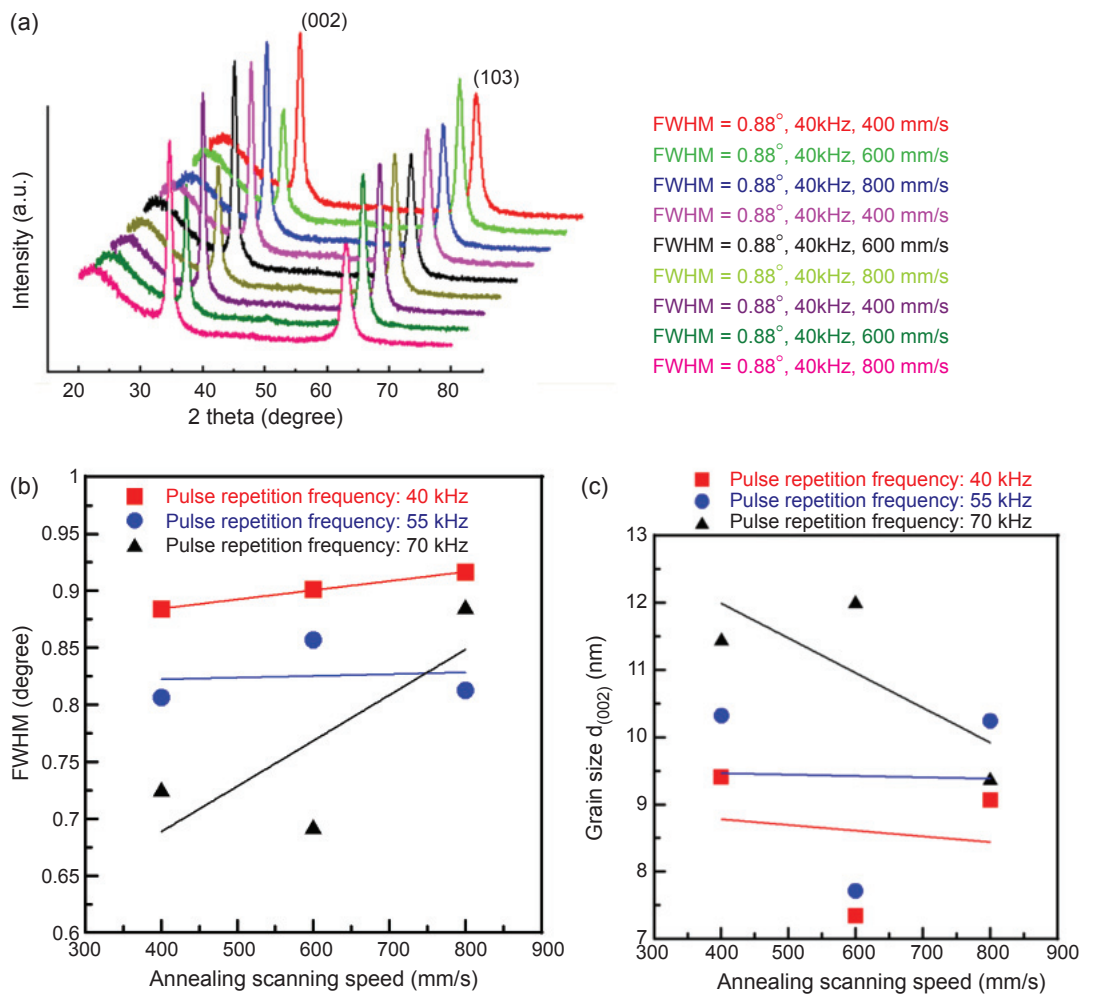
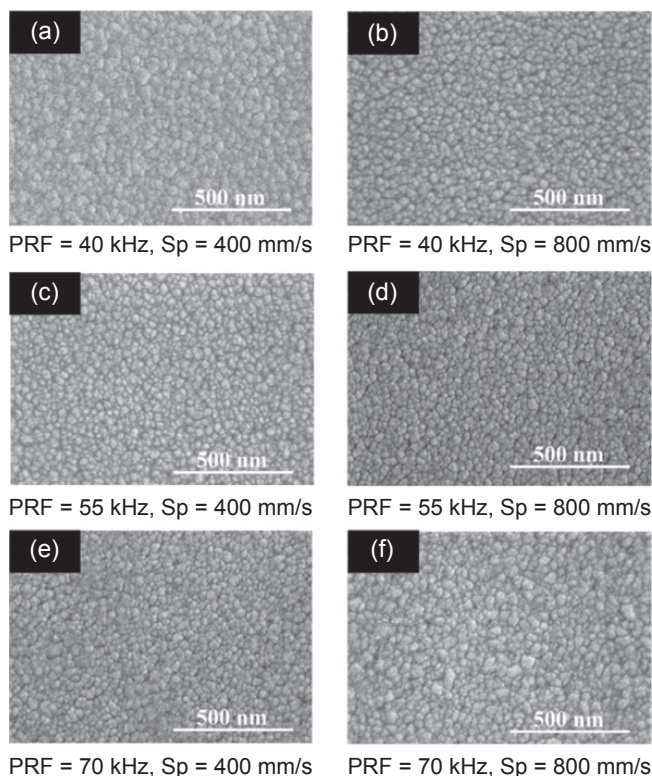


圖 9. AZO 透明導電薄膜雷射退火。(a) XRD 圖譜，(b) 半高寬值與掃描速度關係，(c) 晶粒尺寸與掃描速度關係。

後，其電阻率皆顯著下降。從 $2.126 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 降低至 $2.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。此外，電阻率隨著掃描速度的增加而提升。由於退火後的 AZO 薄膜表面溫度的增加使得兩相鄰晶界間的距離增加，進而獲得較低的電阻率⁽²⁰⁾。

4. AZO 透明導電薄膜雷射退火後結晶特性分析

圖 9(a) 為 AZO 透明導電薄膜沉積於 Corning Eagle 2000[®] 玻璃基板在不同退火掃描速度及雷射脈衝重複頻率為 40 kHz、55 kHz 與 70 kHz 下 XRD 繞射圖譜。在 XRD 繞射圖譜中可以發現兩個明顯的氧化鋅 (ZnO) 薄膜的繞射峰值，分別為 (002) 與 (103)。隨著雷射脈衝重複頻率的增加，在 (002) 方向上的強度明顯增加。藉由 (002) 繞射圖譜的半高寬值 (FWHM) 與 Scherrer's 公式計算晶粒尺寸⁽²¹⁾。由圖 9(b) 顯示，退火後的 AZO 薄膜半高寬值隨著退火掃描速度增加而提升。由於退火後的 AZO 薄膜晶粒尺寸決定於雷射脈衝重複頻率與振鏡掃描速度。圖 9(c) 顯示，當退火掃描速度由 800 mm/s 下降至 400 mm/s 時，其晶粒尺寸從 7.4 nm 增加至 12 nm。圖 10(a) 至 10(f) 為雷射脈衝重複頻率與掃描速度分別為 40 kHz、55 kHz、70 kHz、400 mm/s、500 mm/s、600 mm/s、700 mm/s 與 800 mm/s 下 AZO 薄膜退火後經由 SEM 觀測的表面形貌。由圖中可明顯發現，經由退火過後的薄膜晶粒尺寸有明顯的變化。圖 11(a) 至圖 11(c) 為固定雷射退火掃描速度為 500 mm/s 下調變三種雷射脈衝重複頻率為 40 kHz、55 kHz、70 kHz 的薄膜 AFM 量測結果。其均方根值 (RMS) 分別為 1.1 nm、1.2 nm 與 1.8 nm⁽²²⁾。



Note:
PRF 為雷射脈衝重複頻率
Sp 為振鏡掃描速度

圖 10. AZO 薄膜退火後 SEM 觀測的表面形貌。

四、結論

本研究提出了一種複合式處理技術 (雷射電極圖案化與雷射退火製程)，針對鋁摻雜氧化鋅 (AZO) 透明導電薄膜材料於一個製程步驟中完成使用自動聚焦與離焦的雷射光束照射。本研究所提出的技術無須使用傳統的熱處理系統，可減少加工所需花費的時間與成本。在雷射電極圖案化製程技術

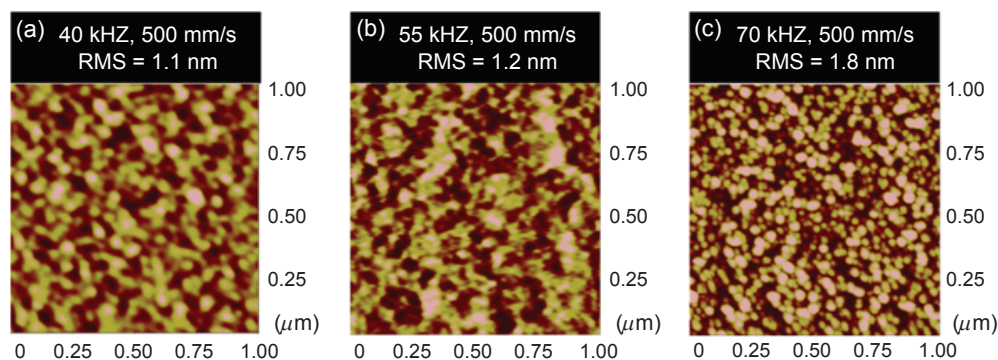


圖 11. AFM 表面形貌量測結果。

中其剝蝕的深度隨著雷射脈衝重複頻率增加而上升，且隨著振鏡掃描速度的提升其剝蝕深度隨之下降。退火後的穿透率在可見光光譜範圍內 (400 – 700 nm)，其平均穿透率約為 83%。在電阻率量測部分，在雷射電極圖案化與雷射退火製程後有明顯的下降。此外，晶粒尺寸隨著退火掃描速度的減少而增大。本研究成功完成 AZO 薄膜的電極圖案化與退火製程，未來可應用於製作各種類型的透明導電薄膜。

誌謝

本研究承蒙國科會產學計畫 (編號 NSC-101-2622-E-492-002-CC3)、國科會一般型計畫 (編號 NSC-101-2221-E-492-011 與 NSC-101-2221-E-492-009) 和毓翔企業有限公司經費補助支持，在分析量測部分感謝南台科技大學機械系林克默教授、儀器科技研究中心奈微米加工製作廠朱念南小姐與蘇健穎先生的協助，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. http://4.bp.blogspot.com/_CC2SDIFisOo/Sr-hddWtprI/AAAAAAAAABqE/uuSR9aQzfc/s1600-h/sony-reader.jpg
2. www.eefocus.com
3. <http://www.apple.com/tw/iphone/>
4. S. Venkat and C. Dunskey, *Photon Processing in Microelectronics and Photonics V, Proceeding of SPIE*, **6106**, 610602 (2006).
5. 盧素涵, FPD 專用大型光罩之技術動向—達成大型 TFT-LCD 成本縮減, ITIS 產業評析專欄 (2008).
6. P. Rumsby, E. Harvey, D. Thomas, and N. Rizvi, *Microelectronic Packaging and Laser Processing, Proceeding of SPIE*, **3184**, 176 (1997).
7. A. Solieman, A. H. Moharram, and M. A. Aegerter, *Applied Surface Science*, **256**, 1925 (2010).
8. H. Yoo, H. Shin, and M. Lee, *Thin Solid Films*, **518**, 2775 (2010).
9. O. Yavas and M. Takai, *Journal of Applied Physics*, **38**, 2553 (1999).
10. O. Yavas and M. Takai, *Journal of Applied Physics*, **85**, 4207 (1999).
11. O. A. Ghandour, D. Constantinide, and R. Sheets, *Proc. SPIE*, **4637**, 90 (2002).
12. Y. Okamoto, Y. Uno, and Y. Hirao, *Third International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Proc. SPIE*, **4830**, 40 (2003).
13. R. Tanaka, T. Takaoka, H. Mizukami, T. Arai, and Y. Iwai, *Fourth International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Proc. SPIE*, **5063**, 370 (2003).

14. M. Park, B. H. Chon, H. S. Kim, S. C. Jeoung, D. Kim, J. I. Lee, H. Y. Chu, and H. R. Kim, *Optics and Lasers in Engineering*, **44**, 138 (2006).
15. H. J. Booth, *Thin Solid Films*, **453-454**, 450 (2004).
16. S. Lee, J. Seong, and D. Y. Kim, *Journal of the Korean Physical Society*, **56**, 782 (2010).
17. W. M. Tsang, F. L. Wong, M. K. Fung, J. C. Chang, C. S. Lee, and S. T. Lee, *Thin Solid Films*, **517**, 891 (2008).
18. W. Chung, M. O. Thompson, P. Wickboldt, D. Toet, and P. G. Carey, *Thin Solid Films*, **460**, 291 (2004).
19. www.corning.com/displaytechnologies.
20. G. Goncalves, E. Elangovan, P. Barquinha, L. Pereira, R. Martins, and E. Fortunato, *Thin Solid Films*, **515**, 8562 (2007).
21. H. P. Klug and L. Alexander, *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials*, 2nd ed., New York: John Wiley and Sons (1974).
22. W.-T. Hsiao, S.-F. Tseng, K.-C. Huang, and D. Chiang, *Optics and Lasers in Engineering*, **51**, 15 (2013).



蕭文澤先生為國立彰化師範大學機電工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Wen-Tse Hsiao received his Ph.D. in mechatronics engineering from National Changhua University of Education. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



曾釋鋒先生為國立交通大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Shih-Feng Tseng received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



鍾健愷先生為國立彰化師範大學機電工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究助理。

Chien-Kai Chung received his M.S. in mechatronics engineering from National Changhua University of Education. He is currently a researcher assistant at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃國政先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼任組長。

Kuo-Cheng Huang received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蔣東堯先生為美國 Rochester 大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Donyau Chiang received his Ph.D. in mechanical engineering (Material Science Program) from the University of Rochester, USA. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.