



高精密線上同軸滾印系統開發應用於微奈米銀導線陣列滾印研究

Development of a high-precision in-line same-roller printing system for roll-printing the micro-nano silver-wire array

陳順同^{1*}、黃建達²、陳顥景³

^{1,2,3} 國立臺灣師範大學 機電工程學系

*E-mail: xhenyijing123@gmail.com

摘要

具可彎曲、高導電度及高透光率的微奈米銀導線適用於光電產業的觸控面板產品。本研究開發「高精密線上同軸滾印系統(High-precision in-line same-roller printing system)」應用於高細長比微奈米銀導線陣列的電路滾印。線上同軸滾印是指滾軸被切削後不拆卸，直接在相同的系統上進行銀線滾印。此項技術不但能獲得最高同心度的微滾齒模具，使滾印的線寬獲得最窄化，更能藉由同一 CNC 系統的控制，獲得銀導線最高的尺寸精度與幾何精度。同軸滾印系統採「軸對稱式重心設計(Axisymmetric gravity design)」，故可獲得最穩定的切削及滾印製程。銀漿供給機構能透由梳狀微流道陣列，導引微量且定量的銀漿塗佈於微滾齒陣列模具上，確保長距離滾印不會斷漿。實驗也對銀漿觸變性、最適刃地寬度及最小刃地間隙等參數進行設計與討論，並發現改變微滾齒模具的表面粗糙度，可改變銀漿接觸角，進而容易轉印至 PET 膜上；而在 5 μm 的刃地寬度、1 μm 刃地間隙及 Ra6 nm 的表面粗糙度條件下，銀漿液滴的內聚力與附著力可獲得平衡，實現厚度 1 μm ，寬度 5.1 μm 的最細銀線線寬陣列，且能切確地驅動 LED 裝置。證實滾印的銀導線陣列具超高細長比、規律、高筆直度與高一致性。

關鍵詞：線上同軸滾印，微奈米銀導線，軸對稱式重心設計

Abstract

Bendable, highly conductive, and highly transmissive micro-nanometer silver-wires are suitable for touch panel products in the optoelectronic industry. A "high-precision in-line same-roller printing system" for roll-printing the micro-nano silver-wire array with high slenderness ratio is developed in this study. In-line same-roller printing means that the roller is not disassembled after being cut, and the micro-nano silver-wire array printing is performed directly on the same system. This design not only achieves the highest concentricity of the microrolling-tooth array mold cutting, minimizing the wire-width of the roll-printing, but also creates the highest dimensional accuracy and geometric accuracy of the silver-wire array through the control of the same CNC system. The same-roller printing system is developed in the "axisymmetric gravity design", achieving the most stable cutting and roller printing processes. The silver-paste supply mechanism passes through the comb-shaped micro-channel array to guide a small and quantitative amount of silver-paste to be coated on the microrolling-tooth array mold, ensuring that long-distance roll-printing will not break the paste. Experiments are also conducted to design and discuss the parameters such as the silver-paste thixotropy, optimum edge-width and minimum edge-gap. It is found that changing the surface roughness of the microrolling-tooth mold could change the contact angle of the silver-paste, thereby easily transferred to the PET film.

Keywords: In-line same-roller printing, micro-nanometer silver-wires, axisymmetric gravity design

1. 前言

近年來觸控面板需求大增。目前，觸控面板使用的透明導電膜材料為銦錫氧化物(Indium Tin Oxide, ITO)，但 ITO 薄膜的主要材料銦礦稀少，且無法彎曲，故難以應用於可撓式觸控面板。為符合穿戴式裝置的要求，奈米銀線(Silver micro-nanowires)是很好的替代性材料[1]；Phung 等人[2]藉由電動流體力學(Electrohydrodynamic)的印刷技術，可將銀線線寬降至 $4\text{ }\mu\text{m}$ ；Valentine 等人[3]利用壓電-氣動材料噴塗法(Piezoelectric-pneumatic material-jetting)將導電墨水及絕緣墨水同時噴塗以成形 3D 印刷電路。為獲得規律，可控制及更高細長比的微奈米銀線陣列，本研究提出「高精密線上同軸滾印系統(High-precision in-line same-roller printing system)」，由單晶鑽石刀具於滾軸上切削出具奈米表面粗糙度的凸型微滾齒陣列(Convex microrolling-tooth array)當模具，配合精確入漿量控制，直接以此微滾齒模具陣列(Microrolling-tooth mold array)對 PET 膜進行線上滾印，此項技術滾軸無需被拆卸，具最高同軸精度，故可獲得最高同心度的微滾齒模具，實現超高細長比且高一致性的微奈米銀線陣列，為微奈米銀線電路製作，提供另一項優異且快速的成形技術選擇。

2. 實驗方法

2.1 同軸滾印製程設計

製程技術如圖 1 所示。滾軸素材為黃銅(圖 1(a))；外徑車製完後，表面鍍厚度 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的鎳磷合金(Nickel-phosphorus alloy)(圖 1(b))；並於同軸滾印系統上，利用單晶鑽石原鼻刀和單晶鑽石 V 型刀具切削出奈米級表面粗糙度的外徑(圖 1(c))和微滾齒陣列(圖 1(d))。微滾齒陣列便是高同心度的凸型微條紋陣列模具(Convex microstripe array mold)；在精確的銀漿控制下(圖 1(e))，直接由模具將銀漿滾印於 PET 膜上(圖 1(f))，最後烘烤而成微奈米銀線電路。過程中，微滾齒陣列沒有任何偏擺，所以滾印的銀線陣列能獲得最細化、高平行度、高筆直度與高一致性(圖 1(g))，且是規律的，可控制的微奈米銀線；相反的，若將滾軸轉移至其他系統上滾印，因滾軸位置精度已被改變，所以滾製的銀線線寬便很難獲致最細化與高一致性的效果(圖 1(h))。

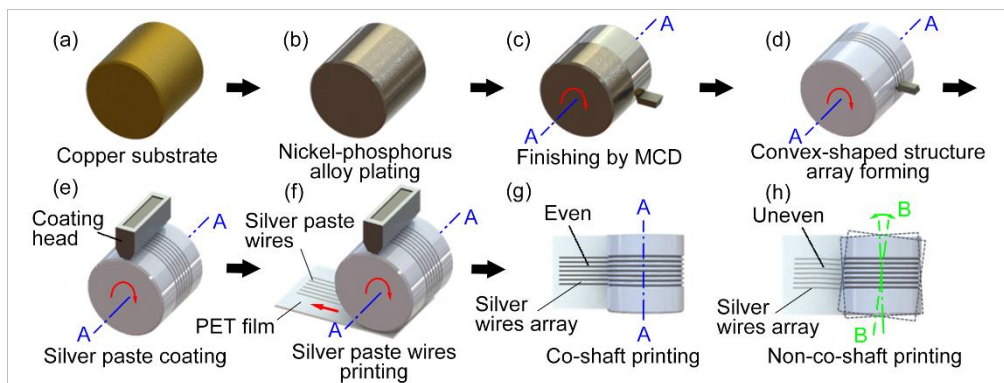


圖 1 同軸滾印製程設計

2.2 銀漿線滾印設計

本研究採微奈米級粒徑的銀漿，物理性質如表 1 所示。銀漿在微滾齒上及 PET 膜上的表面接觸角(θ_a)，攸關銀漿線能否順利滾印至 PET 膜上。表面接觸角是液滴在平滑表面所形成的夾角(圖 2(a))，可以式(1)的楊氏方程式(Young's equation)描述[4]式中， γ_{SG} 、 γ_{SL} 及 γ_{LG} 分別為平滑表面下，固體與氣體、固體與液體，及液體與氣體間的界面張力， θ_r 為平滑表面接觸角。移項後可得式(2)， w 為濕潤係數，當液體與固體的接觸面積逐漸增加時，界面張力可如式(3)所示，此時的平滑表面接觸角 θ_r 小於 90° ，式(4)為銀線真實表面積(A_r)與其投影面積(A_o)之比，

稱為銀線面積比(r)；粗糙度曲線比(R_{Lo})可由表面粗糙度曲線(R_c)與評估長度(R_o)之比求得(式(5))[5]，因此，銀線面積比(r)與粗糙度曲線比的關係可如式(6)所示。若 γ'_{SG} 與 γ'_{SL} 分別為粗糙表面下的固體與氣體，和固體與液體的界面張力，則平滑表面與粗糙表面的界面張力關係可如式(7)所示。若 θ'_r 為粗糙表面接觸角，則粗糙表面與平滑表面的接觸角關係可如式(8)所示。本研究藉由表面粗糙度的差異性，創造出銀漿與滾軸的接觸角略大於銀漿與 PET 膜的接觸角的條件，且兩者均小於 60° ，如此，銀漿便容易脫離滾軸模具，順利滾印於 PET 膜上。

表 1 銀漿物理性質 (GA-6407 ITK)

Parameters	Conditions
Silver particle size	$< 3\mu\text{m}$
Solid content	$75 \pm 2(\text{wt}\%)$
Adhesion	4B (3M tape #600)
Hardness	2H (ASTM D3363)
Surface resistance	$\leq 40 \text{ m}\Omega/\text{sq}/\text{mm}$ (ASTM D257-78)
Viscosity	$70,000 \pm 10,000\text{cps}$
Heating temperature	150°C
Heating time	30 mins

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cos \theta_r \quad (1)$$

$$\cos \theta_r = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} = w \quad (2)$$

$$0 < \theta_r < \frac{\pi}{2}, -1 < w < 0, 0 < \gamma_{SG} - \gamma_{SL} < \gamma_{LG} \quad (3)$$

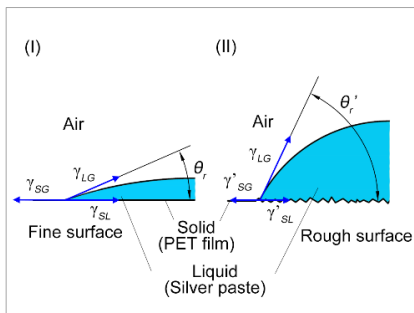
$$r = \frac{A_r}{A_o} \quad (4)$$

$$R_{Lo} = \frac{R_c}{R_o} \quad (5)$$

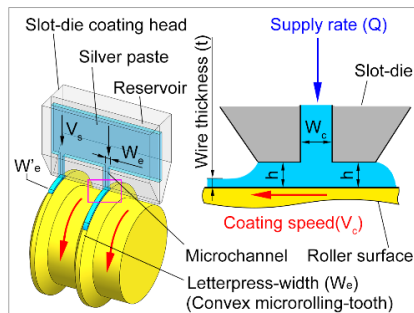
$$r = 1 + \frac{R_{Lo}}{100\%} \quad (6)$$

$$\gamma'_{SG} = r \gamma_{SG}, \gamma'_{SL} = r \gamma_{SL} \quad (7)$$

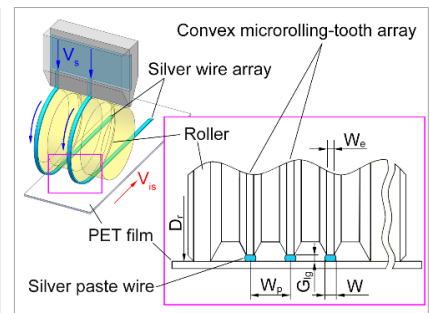
$$\cos \theta'_r = \frac{r(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LG}} = r \cos \theta_r \quad (8)$$



(a) 接觸角示意圖



(b) 狹縫塗佈頭設計



(c) 銀線厚度控制

圖 2 銀漿線滾印設計

2.3 狹縫塗佈頭設計

為使銀漿能連續且均勻地塗佈於滾軸上，本研究設計一具有儲漿槽的狹縫塗佈頭(Slot-die coating head)(圖 2(b))。銀漿由外部輸入儲漿槽，儲漿槽目的在緩衝銀漿流向滾軸的衝擊能量，並能穩定塗佈及避免斷漿發生。為使銀線具良好的導電度及高透光性，銀線厚度(t)被設計僅為 $1\ \mu\text{m}$ 。Ding 等人(2016)[6]推導出銀線厚度(t)(式(9))，式中， H 與 Ca 分別為塗佈頭與滾軸表面間的高度及界面張力；本研究透過三道程序控制 $1\ \mu\text{m}$ 的銀線厚度，狹縫寬度(W_c)可視需求由精密厚薄規調整，若 W_c 為微滾齒的刃地寬度，則在恆定的銀漿流速(V_s)下，單位時間從塗佈頭輸出的銀漿量(Q)可被精密控制(式(10))；銀漿塗佈於滾軸表面後，經由刮板刮除多餘的銀漿，使銀漿層僅塗佈於微滾齒陣列表面；最後，透過微滾齒與 PET 膜間的刃地間隙(G_{lg})及正確的塗佈速度 (V_c)，便可精密控制厚度 $1\ \mu\text{m}$ 的銀線的一致性(圖 2(c))。

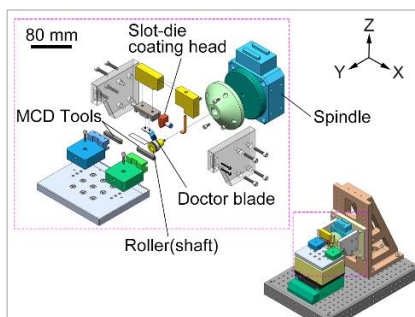
$$0 \leq \frac{1}{t} \leq \frac{1.49}{h} Ca^{\frac{-2}{3}} \quad (9)$$

$$Q = V_s \times W_c \times W_e \quad (10)$$

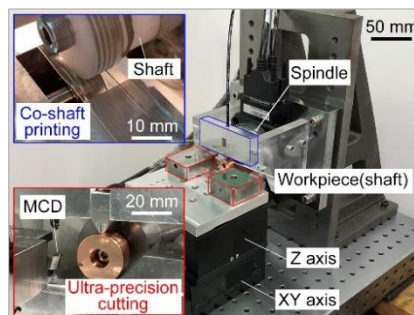
3. 實驗硬體設計

3.1 線上同軸滾印系統設計

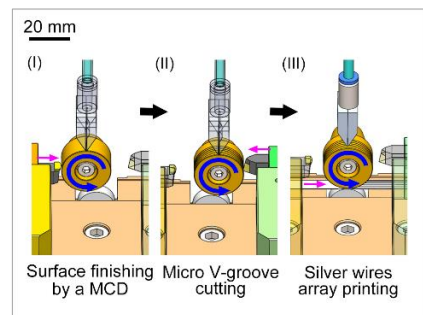
「線上同軸滾印系統(High-precision in-line same-roller printing system)」採軸對稱式重心設計(Axisymmetric gravity design)及簡單精實設計，如圖3(a)所示，系統包括切削與滾印兩主要機構(圖3(b))，滾軸模具被切削及滾軸滾印銀漿線均在同系統上進行。切削機構的刀具被對稱式地安置於滾軸兩側，提供滾軸外徑與微滾齒陣列的超精密切削。V型鑽石刀具被倒裝安置於圓鼻刀具的對面側，所以滾軸被切削或滾印銀漿線，主軸均只以單一方向轉動(圖3(c))，因此，主軸沒有反轉精度誤差，且切屑能因重力而快速排出。因滾軸中心從切削至滾印都沒被改變，微滾齒陣列沒有偏擺與振動，滾印的銀線線寬能達最細化，規律化與高一致性的品質。



(a) 同軸滾印系統設計



(b) 同軸滾印系統完成



(c) 同軸切削及線上滾印

圖 3 同軸線上滾印系統設計

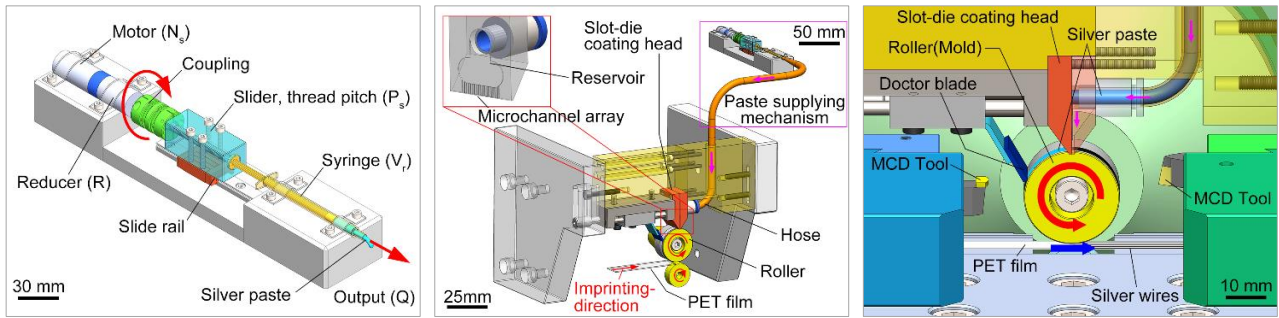
3.2 銀漿供給機構設計

精密的銀漿供給機構如圖4(a)所示。精密直流步進馬達帶動齒輪減速機構與聯軸器驅動精密導螺桿以便推動滑塊前進，能精密地推動唧筒內部的銀漿。式(11)為銀漿供給率(Q)計算，式中， N_s , R , P_s 與 V_r 分別為直流步進馬達轉速，齒輪減速比(1:989)，滑塊節距(0.8 mm)以及唧筒容積比(0.02 mL/mm)。銀漿從唧筒輸出後，經軟管流入銀漿塗佈機構，此機構由狹縫塗佈頭、凸型微滾齒陣列及刮板所組成。狹縫塗佈頭內部設計有梳狀陣列微流道(Comb microchannel array)(圖4(b))，銀漿由儲漿槽輸出後，能精準流入此陣列微流道，並塗佈於每道

凸型微滾齒(Convex microrolling-tooth)表面及轉印至PET膜上(圖4(c))。若A為滾印成形的銀線斷面積， V_{is} 為滾印速度(mm/min)，則實際銀漿輸出率(Q_r)可由式(12)求得，式中， N_p 為滾印的銀線數。由此設計便可回推銀漿供給率，進而精準求得直流步進馬達的轉速。

$$Q = N_s \times R \times P_s \times V_r \quad (11)$$

$$Q_r = (A \times 10^{-6} \times N_p) \times V_{is} \times 10^{-3} \quad (12)$$



(a) 定量微量銀漿供給機構

(b) 狹縫塗佈頭設計

(c) 銀漿塗佈與轉印

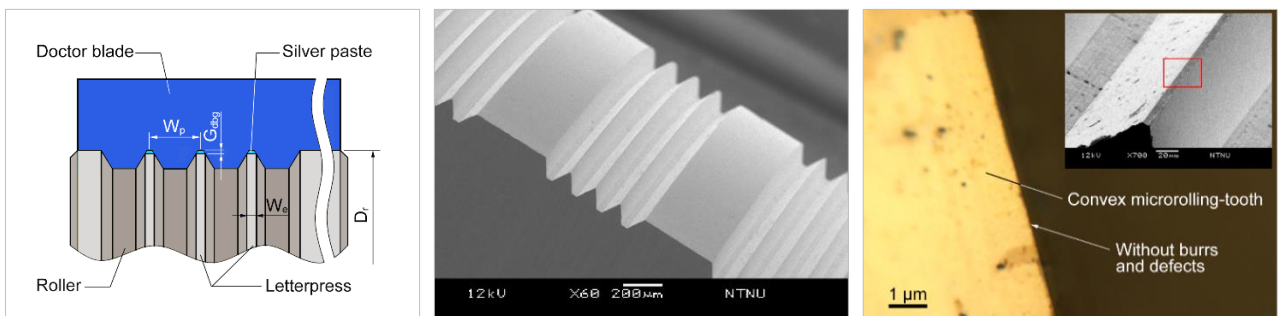
圖 4 銀漿供給機構設計

4. 實驗

4.1 微滾齒陣列切削實驗

經電鍍鎳磷合金的滾軸素材以「桌上型同軸滾印系統」進行線上切削成形實驗(參考圖3(b))。為獲得最小的銀線厚度，刮板與微滾齒間的刮板間隙(G_{dbg})(圖5(a))，及滾齒與PET膜間的刀地間隙(G_{lg})(圖2(c))均設計為 $1 \mu m$ 。為符合此項設計，微滾齒的表面粗糙度(Ra)需達奈米等級，微滾齒陣列與刮板才能完全嚙合(Engagement)並產生所需的刮板間隙。表面粗糙度與進給率(F)及刀尖半徑(N_t)的關係如式(13)[7]所示，愈大的刀尖半徑及愈低的進給率，愈能創造出愈小的表面粗糙度值，實驗證實在刀尖半徑($1 \mu m$)、轉速(1500 rpm)以及進給率(0.1 mm/min)的切削條件下，微滾齒可獲致 $Ra6 \text{ nm}$ 的表面粗糙度(圖5(b))，且能創造出所需的刮板間隙。另外，由於鎳磷合金的破斷伸長率低，切屑容易脫離母材，故微滾齒刀地能達完整的形狀精度，且不易生成毛邊(圖5(c))。

$$Ra = \frac{F^2}{32N_t} \quad (13)$$



(a) 刮板間隙設計

(b) 微滾齒陣列成形

(c) 微滾齒表面性狀

圖 5 微滾齒陣列切削實驗

4.2 接觸角實驗

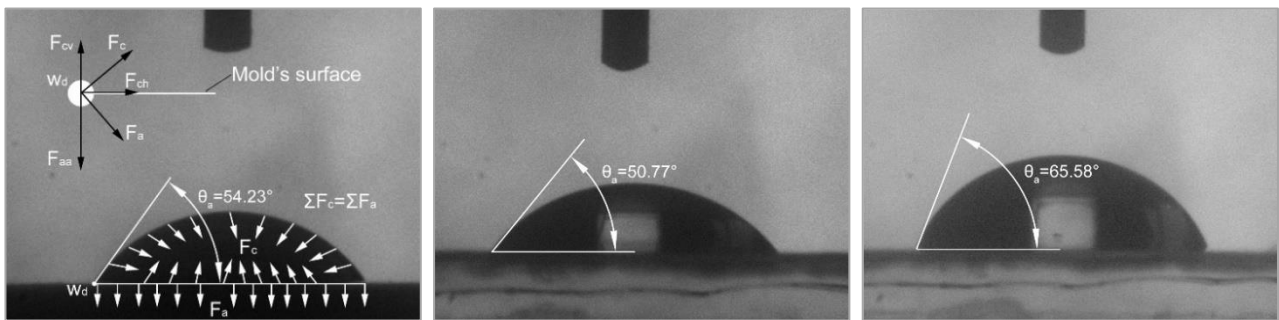
Santhosh 與 Somashekhar (2019)[8]報導，接觸面的粗糙度受刀痕方向(Direction of scratch marks)影響，進而影響銀漿塗佈於接觸面的接觸角，如式(14)所示，式中， R_{mr} 為表面粗糙度波峰與波谷的相對材料比。由切削實驗得知，微滾齒模具的表面粗糙度達奈米等級時，銀漿塗佈於微滾齒模具表面的接觸角便不受刀痕方向影響。圖 6(a)為純水在微滾齒模具表面上的親水性實驗。若此水滴為靜止，則其角落的水分子(w_d)在 45° 方向，存在著一受週邊水分子引力(Attractive forces)作用的內聚力 F_c ， F_c 可分解成水平分量(F_{ch})與垂直分量(F_{cv})，彼此的關係可如式(15)所示。水分子(w_d)受模具表面作用的引力為 F_{aa} ，基於力的平衡，水分子(w_d)也將受 -45° 方向的附著力 F_a 作用，可以式(16)表示，這便是水滴在模具表面呈現弧狀的原因。在此平衡條件下，水分子具有最小表面積的傾向。由不同界面實驗得知，純水(Pure water)在微滾齒模具($Ra6\text{ nm}$)上及在具電暈處理的 PET 膜上的接觸角分別為 54.23° (圖 6(a))及 50.77° (圖 6(b))，意謂純水與模具表面間的介面濕潤性(Wettability of interface)優於純水與具電暈處理的 PET 膜的介面濕潤性，表示純水在微滾齒模具上的附著力小於純水在電暈處理的 PET 膜的附著力，所以純水容易脫離微滾齒模具並附著於電暈處理的 PET 膜上。當純水在一般的 PET 膜上，其接觸角(θ_a)達 65.58° (圖 6(c))，這是因為一般的 PET 膜，表面未被極化，表面能低，導致接觸角大，所以親水性低，如式(17)所示，式中， S 為表面能(Surface energy)。

$$\cos \theta_a = (1 + \frac{R_{Lo}}{100\%}) \times (\frac{R_{mr}}{100\%}) \times (\cos \theta_r + 1) - 1 \quad (14)$$

$$F_{ch} = \frac{F_c}{\sqrt{2}} = F_{cv} \quad (15)$$

$$F_a = \sqrt{(F_{aa} - F_{cv})^2 + F_{ch}^2} \quad (16)$$

$$S = \frac{W}{W_{H_2O}} = \frac{\cos \theta_a}{0.014} \quad (17)$$



(a) 微滾尺模具上

(b) 電暈後的 PET 膜上

(c) 未經電暈處理的 PET 膜上

圖 6 接觸角實驗

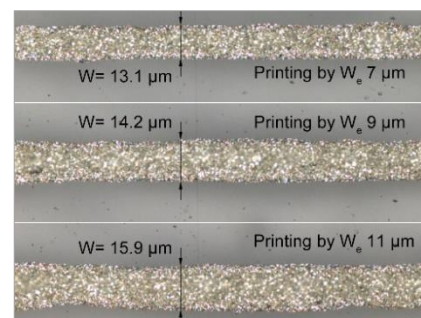
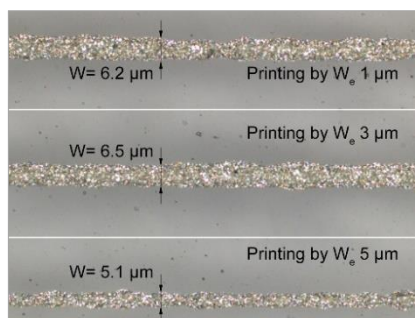
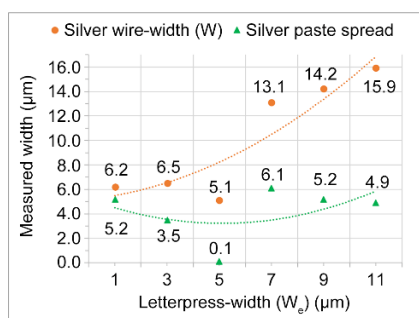
4.3 刀地寬度與滾印線寬關係

為使 PET 膜上的銀線寬度(W)獲致最細，銀漿在微滾齒上的線寬(W'_e)扮演重要的角色。當通過梳狀微流道的銀漿供給率(Q)固定時，影響微滾齒上的線寬(W'_e)的變數有二，即微滾齒的刀地寬度(W_e)與刀地表面粗糙度(Ra)(式(18))，此兩變數主宰銀漿在 PET 膜上的附著力(F_a)與銀

漿分子自身的內聚力(F_c)，意謂在適當的刀地寬度與刀地表面粗糙度條件下，定量的銀漿液滴之內聚力合力(Resultant of cohesive force)與附著力合力(Resultant of adhesive force)能獲得平衡(參考圖6(a))，本研究稱為銀漿的內力平衡特性(Internal force balance characteristic)(式(19))，藉此特性，銀漿分子具有最小表面積的傾向，能阻擋銀漿液滴往外擴散。刀地寬度以1, 3, 5, 7, 9, 11 μm 進行滾印實驗。發現滾印成形的銀線之擴散量(Amount of spread)呈非線性(Non-linear)關係(圖7(a))，並以5 μm 的刀地寬度具最窄線寬(約5.1 μm)，如前述，刀地以5 μm 的寬度及Ra6 nm的表面粗糙度恰能提供定量銀漿最佳的附著力，並在內聚力與附著力達平衡時，銀漿分子具有最小表面積的傾向，即銀漿分子具最窄及最佳的匯集效果(Convergent effect)或最小的擴散程度(Degree of spread)，滾印的銀線能達最細線寬；小於5 μm 的刀地寬度，銀漿在滾軸的270°位置受重力影響而有些微下墜，滾印瞬間滾齒以極窄的刀地對銀漿下壓，迫使銀漿塌陷並往兩側擴散，導致銀線變寬(圖7(b))；刀地寬度大於5 μm 後，更寬的刀地提供了銀漿往橫向擴散的機會，銀線也變寬(圖7(c))。

$$W'_e = f(W_e, Ra) \quad (18)$$

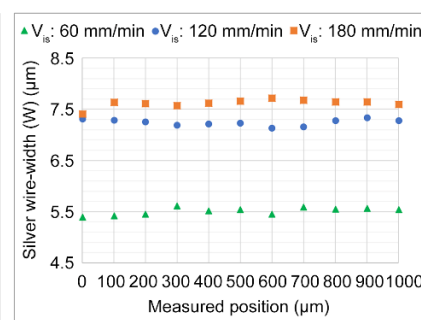
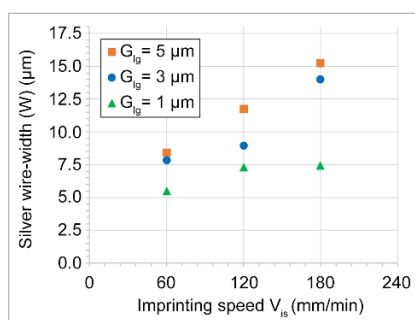
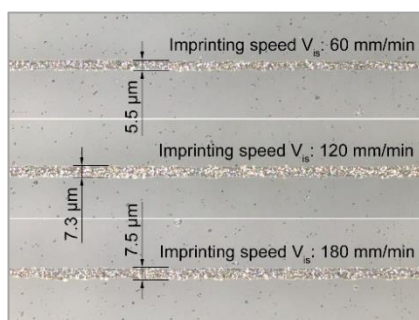
$$\sum F_c = \sum F_a \quad (19)$$



(a) 刀地寬度對滾印線寬影響 (b) 滾印線寬(W_e : 1, 3, 5 μm) (c) 滾印線寬(W_e : 7, 9, 11 μm)
圖 7 刀地寬度與滾印線寬關係

4.4 滾印速度對線寬的影響

銀漿的觸變性影響銀漿自身的黏度，進而影響其流動性。愈低的滾印速度(V_{is})，觸變性愈低，可得愈窄的線寬(圖 8(a)的最上圖)，但滾印效率不高；過快的滾印速度，提高了銀漿的觸變性，銀漿易往線的兩側擴散，使線寬變寬(圖 8(a)的中間與最下圖)；實驗結果顯示，愈低的滾印速度及愈小的刀地間隙(G_{ig})，擾動愈少，兩者都足以降低銀漿的觸變性，故可獲得愈窄的線寬(圖 8(b))；而愈快的滾印速度，不但因觸變性提高，銀漿容易擴散變寬(圖 8(c))，更易使刮板於滾軸表面發生振動(Vibration)，造成銀漿供給不穩定，因而降低了線寬的均勻度。



(a) 滾印速度的影響

(b) 刀地間隙的影響

(c) 線寬均勻度

圖 8 滾印速度對線寬的影響

5. 驗證與討論

為確認滾印銀線的實用性，驗證的微奈米銀導線陣列之長度規劃超過6,000 μm ，滾印參數如表2所列。滾印成形的銀線陣列，各自的長度均超過6,000 μm (圖9)，由結果得知每條銀線都呈現高完整性、高筆直度、高平行度與高一致性的外觀，這是因為這項技術所設計的滾軸無需被拆卸，具最高同軸精度，故可獲得最高同心度的微滾齒模具，每一微滾齒都能維持在精確的5 μm 的刀地寬度(圖10(a))，Ra6 nm的表面粗糙度，以及極高的且相同的同心精度；這證實本研究所提「高精密線上同軸滾印系統(High-precision in-line same-roller printing system)」能因微模具的高同心精度而成形最細且極薄的微奈米銀線陣列，使銀線在PET膜上的可視性變得非常低。將滾印成形的銀線與LED裝置銜接(圖10(b))，並以碳化鎢探針進行導電度測試，發現LED能切確地被點亮(圖10(c))，顯示銀線沒有任何斷漿或接觸不良的問題。

表 2 線上滾印製程參數

Parameters	Conditions
Roller diameter (D_r)	20 mm
Letterpress-width (W_e)	5 μm
Letterpress gap (G_{lg})	1 μm
Doctor blade gap (G_{dbg})	1 μm
Placement design function	$f(z_2) = f(150^\circ, 60^\circ)$
Imprinting speed (V_{is})	60 m/min (1 mm/sec)
Imprinting length	> 6,000 μm
Imprinting method	Co-shaft
Roller mold	Convex microrolling-tooth
Roller's surface roughness	Ra: 6 nm
PET surface treatment	With Corona treatment
Viscosity of silver paste	70,000 $\pm$ 10,000 cps
Percentage by weight	75 $\pm$ 2 wt%
Heating time	30 mins
Material of roller	NiP (Nickel-phosphorus alloy)

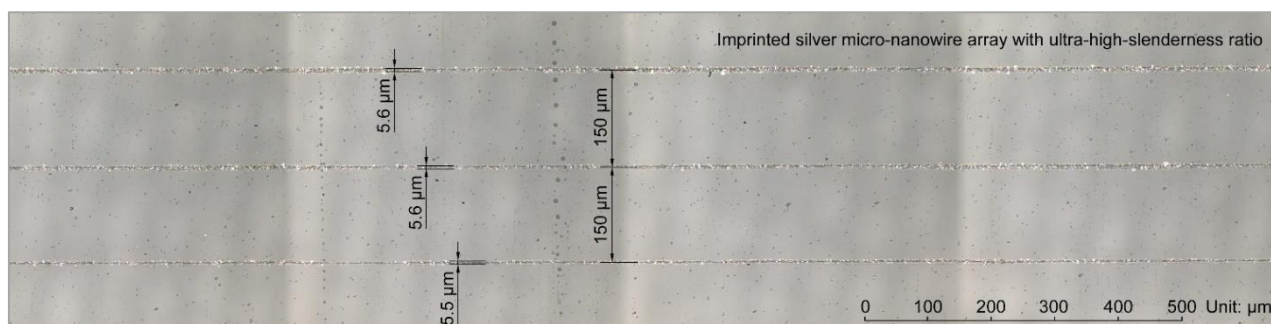


圖 9 微奈米銀線陣列滾印驗證

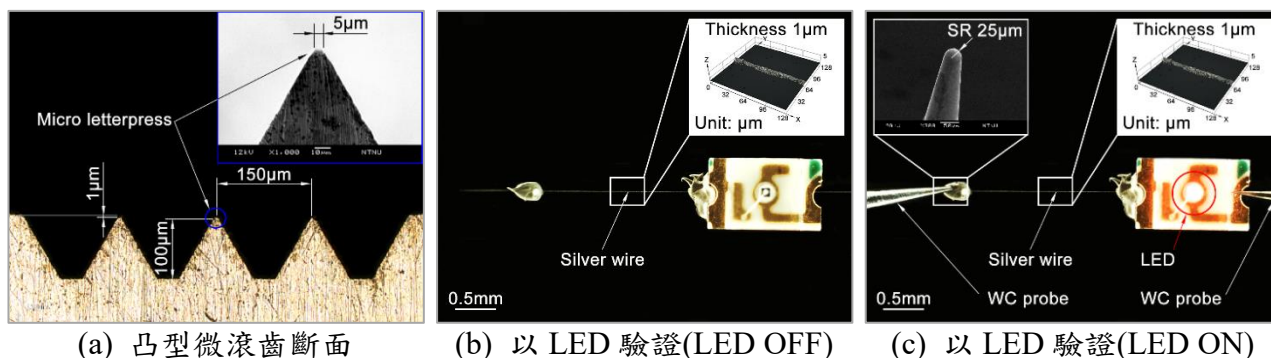


圖 10 滾印成形之微奈米銀線驗證

6. 結論

本研究提出「同軸滾印技術」，所設計的滾軸沒有被拆卸，具最高同軸精度，故此項技術可獲得最高同心度的微滾齒模具，能應用於滾印具規律性的超高細長比微奈米銀導線陣列，並證實能成功驅動 LED 裝置。所設計的同軸滾印系統，滾軸模具不需拆卸，切削和滾印都在同一座標系統及同一軸心精度下進行，微滾齒陣列沒有偏擺的問題。這項新技術的研發，期望能貢獻於光電產業相關場合，以下是本研究結論摘要：

- (1). 同軸滾印技術包含線上車削與線上滾印，使凸型微滾齒模具陣列具有最高的同心精度，故滾印的銀線陣列可達最細化，規律性，高平行度，高筆直度與高一致性的品質。
- (2). 銀漿供給機構能精密供給銀漿，儲漿槽設計具緩衝銀漿衝擊的能量及穩定塗佈效果，確保超高細長比微奈米銀線陣列電路滾印時，沒有斷漿問題。
- (3). 透過切削技術改變微滾齒模具的表面粗糙度，可創造出銀漿在微滾齒模具上的接觸角大於銀漿在 PET 膜上的接觸角，讓銀漿容易脫模並轉印至 PET 膜表面。
- (4). 基於銀漿內力平衡特性，本研究提出「銀漿在內聚力與附著力達平衡時，銀漿分子具有最小表面積的傾向」的論點，它能阻擋銀漿線寬的擴散，此項論點已獲本實驗證實。
- (5). 刀地在 $5\mu\text{m}$ 的寬度及 $Ra6\text{nm}$ 的表面粗糙度條件下，銀漿液滴的內聚力與附著力能獲得平衡，銀漿分子具有最佳的匯集能力，可得最窄的滾印線寬，證實上述所提的論點。
- (6). 實驗結果顯示，低速及小間隙的滾印，可獲得窄線寬，這是因為愈低的滾印速度及愈小的刀地間隙，銀漿的擾動愈少，兩者都足以降低觸變性，故可獲得愈窄的線寬。

7. 參考文獻

1. S. De, T.M. Higgins, P.E. Lyons, E.M. Doherty, P.N. Nirmalraj, W.J. Blau, J.J. Boland, J.N. Coleman, Silver nanowire networks as flexible, transparent, conducting films: extremely high DC to optical conductivity ratios, ACS Nano 3(7) (2009) 1767-1774.
2. T.H. Phung, S. Kim, K.S. Kwon, A high speed electrohydrodynamic (EHD) jet printing method for line printing, Journal of Micromechanics and Microengineering 27 (2017) 095003.
3. A.D. Valentine, T.A. Busbee, J.W. Boley, J.R. Raney, A. Chortos, A. Kotikian, J.D. Berrigan, M.F. Durstock, J.A. Lewis, Hybrid 3D Printing of Soft Electronics, Advanced Materials 29(40) (2017) 1703817.
4. T. Young, An Essay on the Cohesion of Fluids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 95 (1805) 65-87.



5. K.J. Kubiak, M.C.T. Wilson, T.G. Mathia, Ph. Carval, Wettability versus roughness of engineering surfaces, *Wear* 271 (2011) 523-528.
6. X. Ding, J. Liu, T.A.L. Harris, A Review of the Operating Limits in Slot Die Coating Processes, *AIChE Journal* 62(7) (2016) 2508-2524.
7. M.P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing* 4th, Wiley (2010).
8. W. Sha, X. Wu, K.G. Keong, Applications of electroless nickel–phosphorus (Ni–P) plating, *Electroless Copper and Nickel–Phosphorus Plating* 15 (2011) 263-274.