

採用噴墨印刷與壓合技術製作多層濾波器於液晶聚合物基板之研究

Multilayer Bandpass Filter on Liquid Crystal Polymer Substrates Using Inkjet Printing and Lamination Bonding Technologies

卓政霖、高瑄苓

Cheng-Lin Cho, Hsuan-ling Kao

噴墨印刷技術有別於傳統黃光微影製程，將數位化的圖案直接寫入於基板上，具備新型態工業製造之低成本、製程快速及低汙染等優點，同時對於基板的選擇性廣，特別是軟板上的電路整合，此外，可利用熱壓合技術進行多層堆疊，以達到整合與封裝的目的。本研究利用噴墨印刷與熱壓合技術製作射頻濾波器於液晶聚合物基板，利用表面形貌與電性來萃取製程參數，包括基板表面親疏水性、噴墨及多層壓合參數與烘烤溫度等，根據最佳化參數製作高頻濾波器，以驗證開發之噴墨印刷與熱壓合技術。

Inkjet printing technology, unlike the traditional photolithography technique, has been adopted for digital images to direct write layered patterns into substrate. The advantages of inkjet printing are cost-efficient, fast, and environmentally friendly make it as an emerging industrial technique. Moreover, inkjet printing technology provides wider selections of substrates, particularly integrated circuit on flexible substrates. Additionally, combining inkjet printing and lamination bonding technologies achieves multilayer integrated circuit for system-on-package technologies. This study developed inkjet printing and lamination bonding technologies to realize radio frequency filters on liquid crystal polymers substrates. The process conditions including surface wettability, inkjet printing and lamination bonding parameters, and sintering temperature were examined surface morphologies and electrical properties. Based on the optimal parameters, multilayer bandpass filter was fabricated to demonstrate the inkjet printing and lamination bonding technologies.

一、前言

軟性電子 (flexible electronics) 一詞出現於 2005 年 proceedings of the IEEE 會議中⁽¹⁾，並於該會議中定義了軟性電子為一建置於塑膠或金屬薄片並兼

具彎曲可撓特性之元件或材料，突破傳統電子元件使用硬梆梆的矽基板或玻璃基板的製作限制，使產品設計具備可彎曲、輕薄、低成本、自由度高、製程便宜、耐摔與耐衝擊等特性，創新概念在電子產品應用上進行無窮的發揮，如：天線⁽²⁻⁴⁾、無線

射頻識別系統 (radio frequency IDentification, RFID)⁽⁵⁾、感測器⁽⁶⁻⁷⁾ 及薄膜電晶體 (Thin-Film Transistor, TFT)⁽⁸⁾ 等。軟性電子產品的製造上大多採用印刷技術，如噴墨印刷 (inkjet printing)、凹版印刷 (Intaglio printing)、絲網印刷 (screen printing) 與膠版印刷 (gravure Printing) 等，主要在於印刷技術可提供大面積製作，且適用於各式基板，包括紙和塑料，同時印刷技術本身低成本的優勢，可達到客製化少量特殊產品的需求，有別於矽製程產品必需採用以量制價的方式來壓低製程成本，然而在印刷技術中，噴墨印刷技術是採用加法製作 (additive manufacturing) 的概念，有別於其他印刷方式，在製作上無需採用傳統微影與蝕刻等減法製程 (subtractive manufacturing)，利用數位化的圖案方式將材料直接寫入 (direct writing) 至所需要的位置上，不但降低材料的用量且減少污染產生，具備綠色製程的優點，近年來相關文獻已發表噴墨印刷技術製作無線感測器應用物聯網⁽⁹⁾，而在高頻應用上噴墨薄膜的特性更為嚴格，因此本文將針對噴墨印刷技術的相關製程參數進行最佳化並利用熱壓合方式來製作多層濾波器，以驗證噴墨印刷技術與熱壓合封裝技術的可行性。

二、背景知識

噴墨印刷技術在 1976 年首次被引入，其中的主要貢獻者為發展噴墨印表機的公司，噴墨印刷技術能快速地將精確體積的微量液滴，以電腦驅動控制方式放置於精確的特定位置，進行直接成形之金屬化製程，由於無電鍍之氧化還原反應僅在具有活性物質的表面發生，故不受限於被鍍物的形狀與材質，只需將基板表面做活化處理，具備良好的附著力，因此可以在各式基材上沈積金屬導線，是一種相當便利的方式。近年來，由於噴墨印刷技術的不斷改良及進步，逐漸呈現取代目前主流的黃光微影製程技術，噴墨印刷是一種可直接於基板上定義出圖案之技術，具有快速、低成本、高材料使用率、低溫沈積、非接觸式、無需微影製程與有利於環保等諸多優點，因此在電子產業上具有極大的應用潛力，符合現階段產業發展的需求，特別是針對

平面及軟性基材。發展至今大致差異可分為控制系統及驅動硬體兩大部份，控制系統方面分為連續型印刷 (continuous mode) 及控制型印刷 (drop-on-demand mode)，驅動硬體部份則是分為氣膠噴印 (aerosol Jet)、磁控式 (electromagnetic jet)、壓電式 (piezoelectric inkjet) 及熱氣泡式 (thermal bubble)，其中又以控制型之壓電印刷技術最為穩定⁽¹⁰⁾。圖 1 為控制型壓電印刷系統原理，主要利用電壓脈衝 (voltage waveform) 驅動壓電晶體 (piezo crystal)，由壓電晶體對壓電薄膜 (piezoelectric film) 進行動作後，使壓電薄膜產生形變導致內部產生一壓力來源，並藉由該壓力源控制通道內之墨水由噴頭進行噴墨動作，噴墨動作之次數則由電壓脈衝激發次數所主導。

熱壓合方式則採用自製的熱壓合機，圖 2 為熱壓合機照片及功能說明所示，熱壓合機主要分為壓力控制、加熱模組及時間控制等，其中加熱模組部份分為溫度控制器及上下各一組獨立之加熱塊，藉由各溫度控制器可分別對所屬之加熱塊進行溫度控制，其壓合方式則是利用固定的面積下施予扭力來換算對元件的壓合力，即單位面積受力。首先調整壓力控制器至適當之壓力，接著將試片放置於兩加熱塊間，並於溫度控制器中調整各組加熱塊之預計

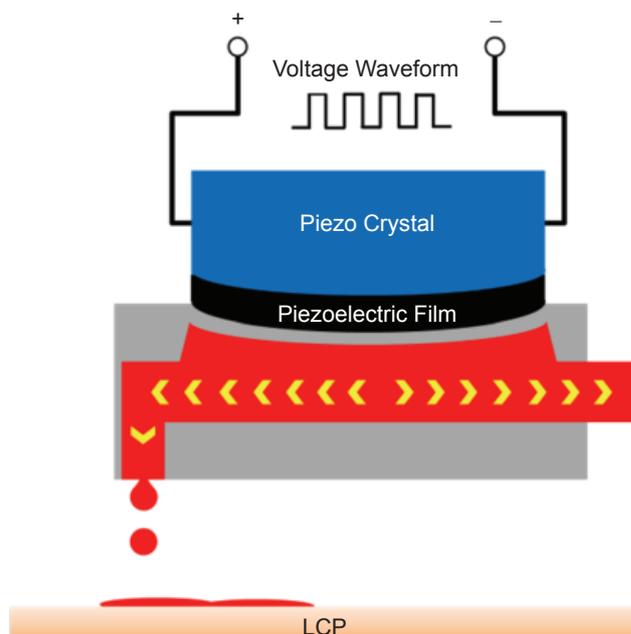


圖 1. 控制型壓電印刷系統示意圖。

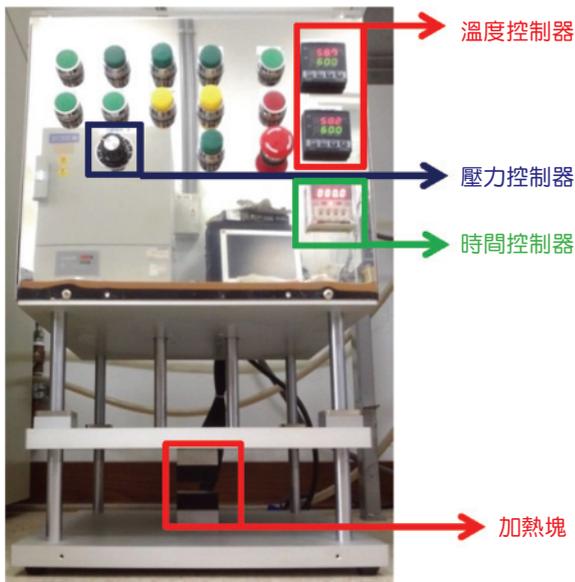


圖 2. 熱壓合機照片及功能說明。

溫度，最後設定熱壓合所需時間後，熱壓合機即自動將壓力由上至下傳導至兩加熱塊間，以進行熱壓合動作。

噴墨印刷製程是採用墨滴來沉積於基板的表面，以達到薄膜的連續性，然而墨滴與基板間相互作用即所謂的濕潤性 (wettability) 為噴墨印刷製程

的關鍵之一，濕潤性與液滴於基板上之附著度相關，適當的濕潤性有助於印刷圖型的解析率及薄膜沉積的連續性與均勻度，對於噴墨印刷圖型的完整性具有極大的影響，因此近年來研究基板表面處理來改善濕潤性，主要可分為濕式處理與乾式處理兩種，濕式改質即是將基板浸入或塗佈液態化學溶劑中，藉由化學溶劑於基板表面進行改質，常用的試劑為高錳酸鉀溶液或乙醇溶液⁽¹¹⁾ 等，然而濕式處理必須用到大量的化學藥品，對環境造成的傷害很大，因此有別於濕式處理之乾式處理如：使用氬氣和氧氣電漿⁽¹²⁾ 及臭氧法⁽¹³⁾ 等方式，主要目的為改變基板的表面活化能，藉此改善基板的附著力，具有低污染、低成本的優點，才能符合市場需求，因此本研究也選用此種方式進行基板的表面改質，並藉由水接觸角系統 (water contact angle, WCA) 測試來量測基板表面的濕潤性。

三、噴墨印刷與熱壓合流程

圖 3 為本實驗室建立之噴墨印刷及多層貼合實驗流程圖⁽¹⁴⁾，噴墨印刷則是採用美商 Dimatix 提供之 DMP-2800 材料噴墨印刷機，搭配 1 pL 卡

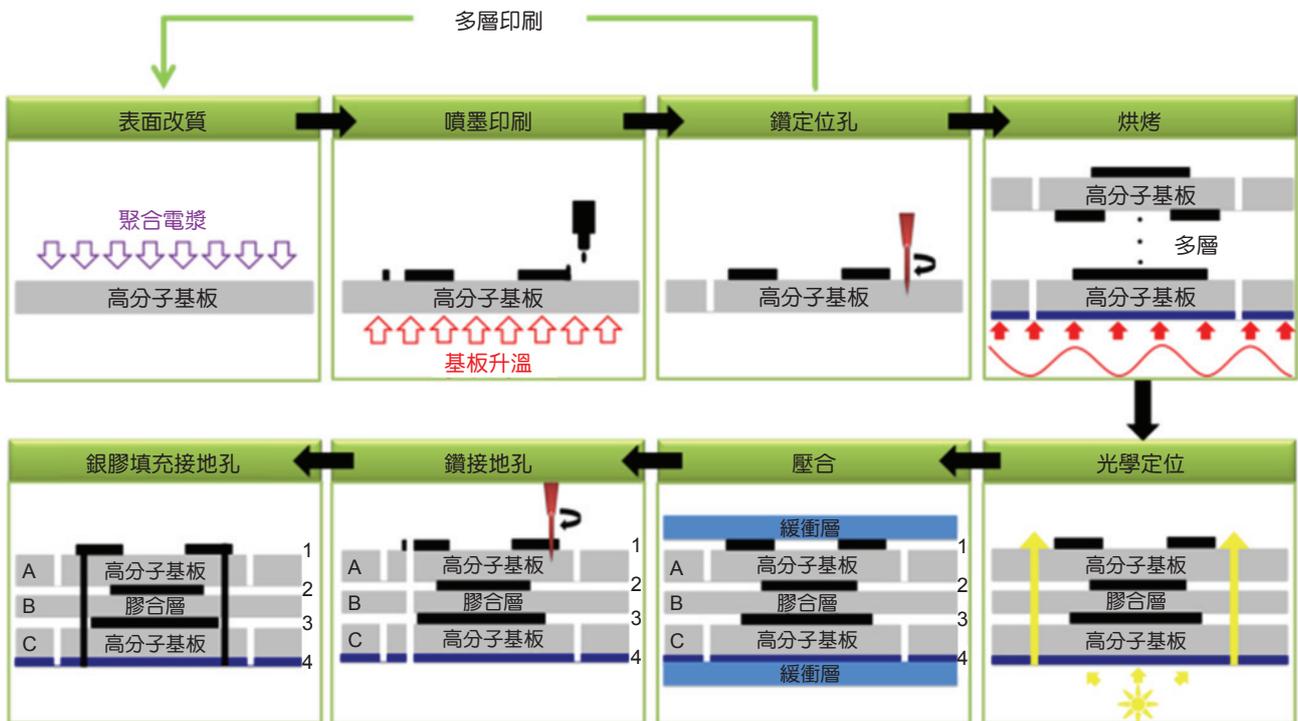
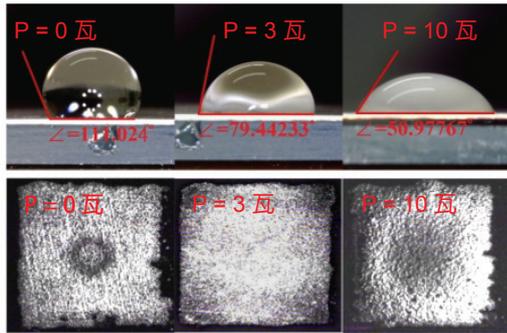
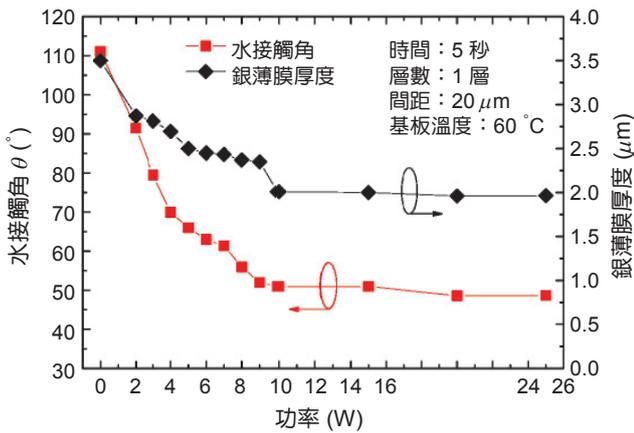


圖 3. 噴墨印刷與熱壓合流程。



(a)



(b)

圖 4. (a) 聚合電漿功率於 0, 3, 10 W 改質後之水接觸角及銀薄膜表面形貌。(b) 聚合電漿功率對水接觸角及銀薄膜厚度關係。

匣使用由韓國 Advanced Nano Products 公司提供之 DGP-40LT-15C 奈米銀墨水進行金屬層的印刷製作。基板的選擇則是以美商 Rogers Corporation 提供之 ULTRALM 3850 液晶高分子聚合物基板 (liquid crystalline polymer, LCP) 及多層壓合使用之膠合層 ULTRALAM 3908，根據製造商提供之數據表現⁽¹⁵⁾，LCP 基板及膠合層為同性質之材料，因此具有優異的材料表現及相互匹配特性，該材料之介電常數 (ϵ_r) 為 2.9，損耗正切角 ($\tan \delta$) 為 0.0025，基板厚度為 $100 \mu\text{m}$ ，膠合層厚度則為 $50 \mu\text{m}$ 。本研究透過以下步驟噴墨印刷銀薄膜於 LCP 基板，並以多層貼合技術進行封裝，各步驟說明如下所述：步驟一為以聚合電漿 (plasma polymerization) 參數電漿功率 3 W、操作時間 5 秒及氧氣氣氛環境下為基板表面進行改質。步驟二為

在基板溫度 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下噴墨印刷多層奈米銀墨水作為各金屬層使用。各金屬層重複步驟一與二於各基板上製作。步驟三為在各金屬層實施定位孔鑽孔，以作為後續光學定位壓合使用。步驟四將各完成定位孔鑽孔之基板置於烘箱中進行熱固化處理，以燒結奈米銀墨水，並使其藉由溫度揮發墨水內之化學藥劑，以提高金屬層之導電率。步驟五為光學對準，利用步驟三完成之定位孔定位各層。步驟六為 LCP 多層貼合，利用適當的溫度及壓力，並分別於最上層及最下層置放緩衝層以保護銀薄膜避免壓合過程造成損壞影響品質。步驟七為進行接地訊號鑽孔作業，將所設計表面訊號層需施以接地之位置以 $200 \mu\text{m}$ 之鑽針進行通孔作業。步驟八則是將完成通孔作業之接地孔以銀膠填充完成接地步驟。噴墨完成之銀微帶線及帶通濾波器元件將以 HP E8364C 網路分析儀量測其 S 參數特性。薄膜表面形貌部份則以日本 JEOL 公司提供之 JSM6701F 場發射掃描式電子顯微鏡 (field-emission scanning electron microscope) 以加速電壓 5 KV 進行銀薄膜表面及壓合力之品質影響檢測。

四、噴墨印刷與熱壓合參數

1. 表面改質方式

為使銀墨水液滴與 LCP 基板表面形成良好匹配之親疏水性，本階段實驗將以水接觸角系統測試 LCP 基板於不同聚合電漿功率下的濕潤性，圖 4 為聚合電漿功率於 0–25 W 處理後之 LCP 基板表面之水接觸角變化以及噴墨銀之厚度⁽¹⁶⁾，其中聚合電漿內通入氣體為氧氣且操作時間固定 5 秒，由結果得知，未進行電漿聚合改質之水接觸角為 111° ，此時的薄膜厚度為 $3.5 \mu\text{m}$ ，主要在於基板過於疏水性 (hydrophobic)，導致銀薄膜無法連續。當電漿功率提高到 10 W 時，水接觸角為 51° ，且接觸角將不在隨功率增加而減小，因此水接觸角達到飽和，隨著噴墨印刷 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 之銀薄膜 10 層作為量測試片，導電度水接觸角的變化導致銀薄膜厚度也隨之變薄，當電漿功率為 10 W 的銀薄膜厚度為 $1.96 \mu\text{m}$ ，但因為過於親水性 (hydrophilic) 導

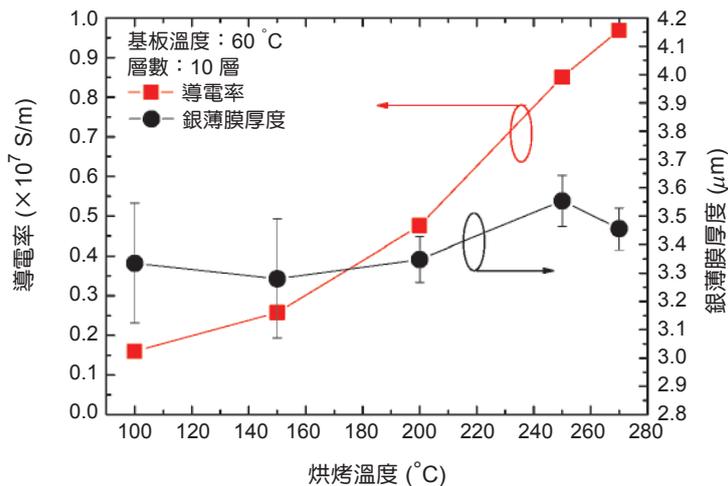


圖5. 不同烘烤溫度之銀薄膜導電率及厚度之關係。

致圖案失真以及邊緣處破裂，因此考量銀薄膜表面均勻性，最佳參數為電漿功率 3 W 及操作時間 5 秒，其水接觸角為 79° ，銀薄膜厚度為 $2.8 \mu\text{m}$ 。

2. 熱固化處理

在噴墨印刷過程中將基板升溫可有效加速銀墨水中的溶劑蒸發速率外，促進墨珠流動以獲得均勻性較高的銀薄膜，除此之外，噴墨印刷完成後的熱固化處理，也可以提高銀薄膜之導電率，然而考量 LCP 及膠合層熔點分別為 315 及 280°C ，根據實驗結果當 LCP 烘烤溫度在 280°C 時，表面色澤開始由米白色轉褐色，因此我們選擇最高烘烤溫度為 270°C 進行實驗，圖五為不同烘烤溫度下的銀薄膜導電度以及厚度關係，以 $20 \mu\text{m}$ 噴墨點距噴墨印刷 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 之銀薄膜 10 層作為量測試片，導電度隨著溫度增加而增加直到 270°C 以後則飽和，而銀薄膜的厚度則與溫度不相關， 270°C 燒結後之銀薄膜導電率為 $1.2 - 2.0 \times 10^7 \text{ S/m}$ ，厚度為 $3.0 - 3.6 \mu\text{m}$ ⁽¹⁶⁾。

3. 多層噴墨印刷技術

利用多層噴墨方式可有效改善薄膜均勻度，並可根據不同層數來選擇薄膜的厚度，對於金屬薄膜而言也可以改善導電度，是目前常見的噴墨印刷參數之一，圖 6 為多層印刷 (5-20 層) 之銀薄膜表面形貌以及導電度和厚度⁽¹⁷⁾，明顯可見，多層噴墨

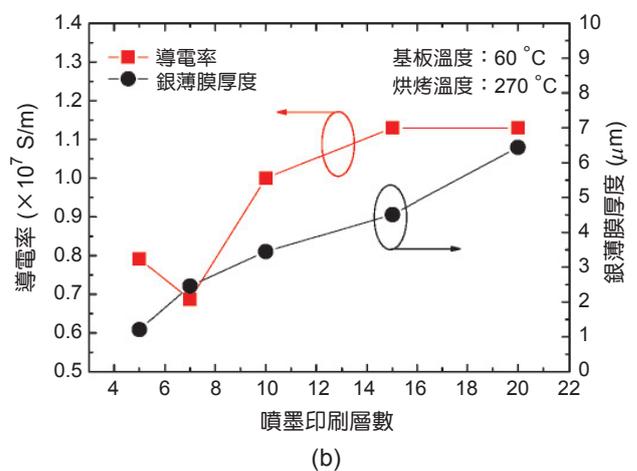
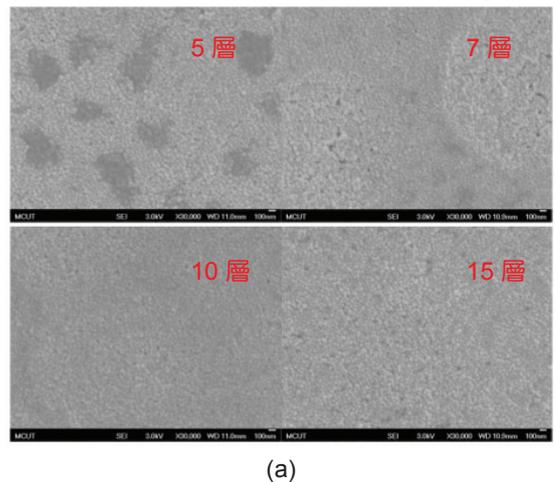


圖 6. 多層噴墨印刷之 (a) 銀薄膜表面形貌及 (b) 導電率與厚度關係。

可以有效改善薄膜的均勻度，多層印刷較單層印刷之均勻性佳，因此導電度也隨印刷層數的增加而上升，在 15 層以後導電度則開始飽和，而銀薄膜厚度與印刷層數呈現正相關性，然而多層印刷雖具有較佳均勻性，但噴墨層數太多也會導致圖案精確度難以控制，甚至導致圖案倒塌，根據導電度與層數的關係，我們選用 10 層噴墨印刷銀薄膜，其導電率為 $1.2 \times 10^7 \text{ S/m}$ ，厚度為 $3.4 \mu\text{m}$ 。

4. 熱壓合製程

平面貼合封裝技術主要用於多層電路壓合使用，該技術在壓合過程中需於適當之高溫及高壓環境中，以熱壓合方式進行多層電路壓合，溫度的高低取決於材料的熔點，因此會受到限制，固定的溫

度下越大的壓合力雖然具有較好的貼合效果，但是會造成銀薄膜表面產生破裂進而影響薄膜特性，若壓合力不足，導致 LCP 基板無法有效貼合，使得封裝後之基板整體介電常數 (ϵ_r) 與損耗正切角 ($\tan \delta$) 產生誤差，因此適當之壓合力對於元件之封裝貼合具有關鍵性影響，本研究討論以不同扭力施加於面積 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 的試片上來計算壓合力，根據肉眼可見， $0.69\text{--}0.87 \text{ MPa}$ 之壓合力介於無效貼合與薄膜斷裂的兩種狀況之間，在此範圍內的壓合力則更進一步地針對表面微結構與微帶線高頻特性進行分析。圖 7(a) 為寬度為 $100 \mu\text{m}$ ，長度為 $4,000 \mu\text{m}$ 噴墨印刷於 LCP 基板之上銀微帶線照片，其中微帶線左右為 Ground-Signal-Ground 的探針襯墊，其間距分別各為 $250 \mu\text{m}$ ，做為量測高頻訊號用。圖 7(b) 為量測不同壓合力後微帶線的插入損耗 (S_{21})，每個壓合力以 10 顆微帶線樣品進行測試，其中插入損耗的萃取可由 S 參數圖中選取共振頻率點對應之插入損耗獲得，其微帶線的共振頻率約為 22 GHz 。當壓合力為 0.69 MPa ，銀微帶線之平均 S_{21} 為 -0.64 dB ，相當接近壓合前之銀微帶線 $S_{21} -0.63 \text{ dB}$ ，而壓合力增加至 0.75 MPa 時，該銀微帶線之平均 S_{21} 為 -0.88 dB ，當壓合力持續增

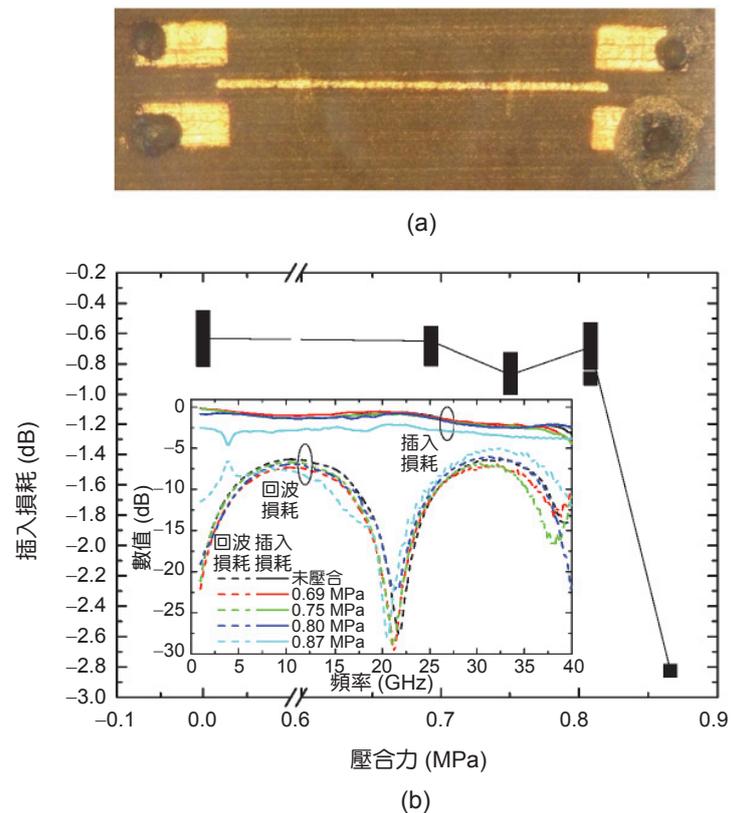


圖 7. 噴墨印刷銀微帶線 (a) 元件實圖及 (b) 不同壓合力下之插入損耗 (S_{21}) 特性，小圖為不同壓合力後銀微帶線量測之 S 參數圖。

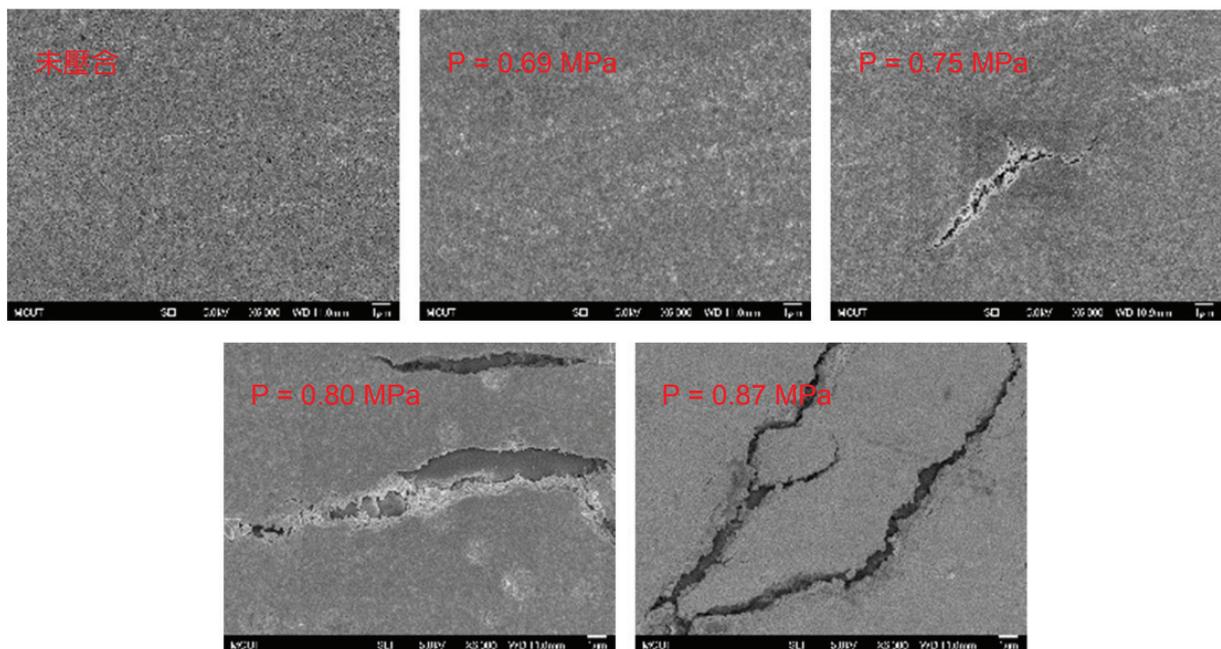


圖 8. 各壓合力施加於銀薄膜之 SEM 表面形貌圖。

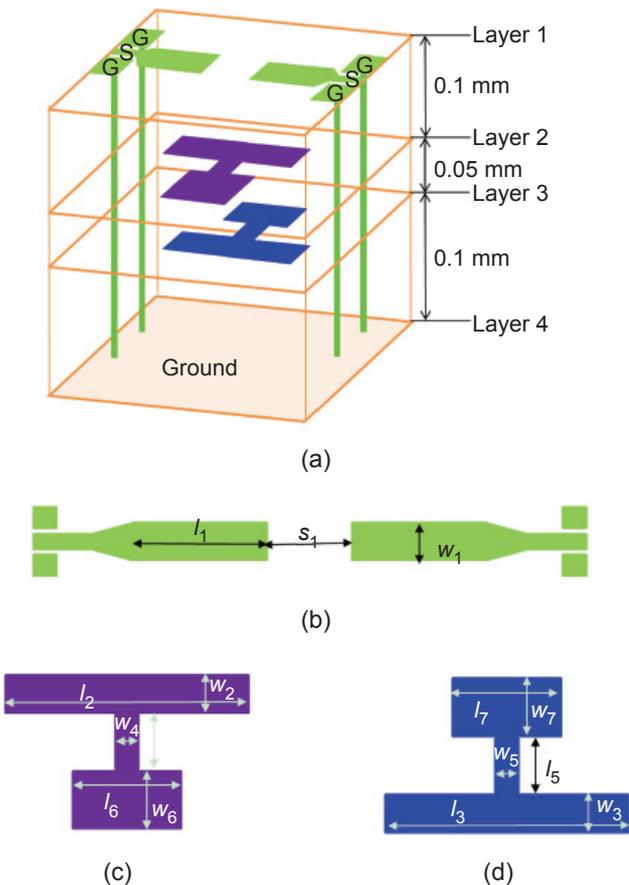


圖 9. (a) 多層帶通濾波器架構，(b) 第一層，(c) 第二層及 (d) 第三層布局與尺寸。

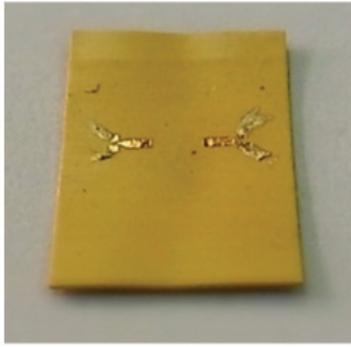
加至 0.8 MPa 時，該銀微帶線之平均 S_{21} 為 -0.69 dB，雖相較於 0.75 MPa 時有較佳的 S_{21} ，但卻發覺所量測的樣品數之 S_{21} 較為分散，且甚至數量減少，數量減少的原因在於試片無法量測，因此進一步分析銀薄膜表面形貌。圖 8 為透過放大倍率至 6,000 倍之 SEM 圖，可看出由於壓合力的提升對於銀薄膜表面的品質影響，壓合力為 0.69 MPa 的表面形貌與無施與壓合力之表面形貌相似，在 0.75 MPa 下觀察到銀薄膜表面產生輕微的裂紋，隨著壓合力分別增加至 0.8 及 0.87 MPa 後，可觀察到銀薄膜表面產生的裂紋越趨於明顯，由該表面形貌圖顯示之結果與 S_{21} 一致，0.75 MPa 壓力下開始有裂痕導致 S_{21} 變大，0.80 MPa 壓力下所量測之 S_{21} 有好有壞，主要在於裂痕發生多寡，平均值較低的原因在於 S_{21} 較為分散，而 0.87 MPa 壓力下的試片裂痕導致只剩下一個試片可量測到 S 參數，根

據上述結果，0.69 MPa 之壓合力具有最佳銀薄膜特性且能達到有效壓合⁽¹⁸⁾。

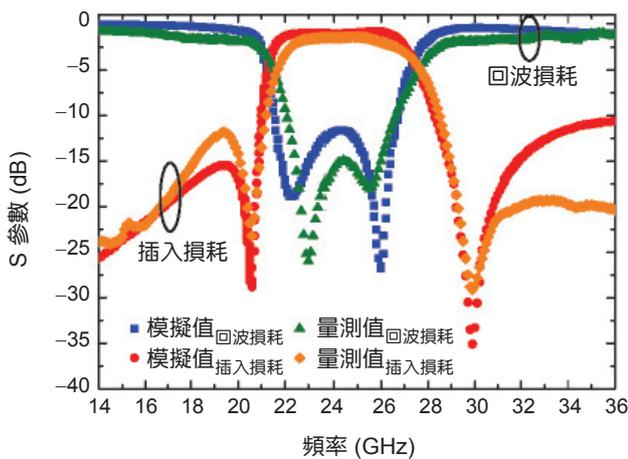
五、多層帶通濾波器

圖 9 為微型化之三維多層帶通濾波器之架構與各層尺寸，濾波器由 LCP/膠合層/LCP 三層基板組成，其厚度分別為 0.1、0.05 及 0.1 mm，金屬層為四層，第一層為信號饋入線作為耦合至第二層用，第二層及第三層分別為兩組四分之一波長之微帶諧振器，第四層為參考地。由於諧振頻率 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ，所以串聯型式之微帶線 (L) 及電容 (C) 減少了微帶線長度，而電容與電感互為反比，然而四分之一波長之微帶線具有減少串聯電容所需要之尺寸，因此為了實現微型化之濾波器，透過多層 LCP 封裝貼合技術是必需的，在帶通濾波器之模擬採用 Advanced Design System，其中相關 LCP 與膠合層參數採用介電常數為 2.9 和損耗正切角為 0.0025，噴墨銀導電率為 2×10^7 S/m，噴墨銀厚度為 $3.4 \mu\text{m}$ 。設計之帶通濾波器相關尺寸如下： $l_1 = 1.1$ 、 $l_2 = l_3 = 3.2$ 、 $l_6 = 1.3$ 、 $l_7 = 1.45$ 、 $w_6 = 1$ 、 $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = w_7 = l_4 = l_5 = 0.5$ 及 $s_1 = 1.85$ mm，設計完成之多層帶通濾波器元件面積尺寸為 $4.2 \times 3 \times 0.25 \text{ mm}^3$ 。

圖 10(a) 為噴墨印刷之該微型化帶通濾波器元件實圖，根據上述 LCP 各層與膠合層採用 270 °C 與 0.69 MPa 的壓合力進行多層之製作，並量測多層濾波器之特性，圖 10(b) 所示為多層濾波器壓合完成之相片以及量測與 EM 模擬之 S 參數比較⁽¹⁴⁾，該濾波器操作頻率於 24.5 GHz 時，頻帶寬為 23.1%，模擬及量測之最小插入損耗 (S_{21}) 於 25 GHz 時分別為 -0.98 和 -1.4 dB，而回波損耗 (S_{11}) 則是在通帶內皆低於 -11.7 dB。開路殘段連接電容器部份產生之兩個傳輸零點分別為 20.6 和 29.8 GHz，這提高了帶通濾波器之選擇度及阻帶抑制能力。噴墨印刷之墨滴大小約為 $30 \mu\text{m}$ ，而噴墨之液滴間距為 $20 \mu\text{m}$ ，因此噴墨印刷之解析度誤差約為 $50 \mu\text{m}$ ，而應用於多層定位用之光學定位孔之定位孔徑為 $100 \mu\text{m}$ ，而對準誤差約為 $50 \mu\text{m}$ ，因此模擬與實際量測存在之微小差異，主要在於噴墨印刷



(a)



(b)

圖 10. (a) 噴墨印刷濾波器元件實圖及 (b) 模擬及量測帶通濾波器之特性。

之解析度及多層貼合封裝之各層間的光學對準誤差。由模擬數據與實際量測數據比較來看，模擬和量測的 S 參數相似。

六、結論

本研究討論藉由以電漿聚合對 LCP 基板表面改質之親疏水性及銀薄膜於不同壓合力之表面形貌及電訊號等特性分析，開發多層 LCP 貼合技術以實現多層帶通濾波器，該濾波器於 25 GHz 時最小 S_{21} 值為 -1.4 dB。多層 LCP 貼合封裝技術具備能夠實現電子產品之可行性外，並可應用於可攜式電子。透過結合噴墨印刷與多層貼合封裝未來可作為軟性電子開發之技術。

致謝

本研究承蒙科技部計畫 NSC103-2221-E-182-009 及長庚大學高速智能通信研究中心贊助，特此感謝。

參考文獻

1. A. Nathan, B. R. Chalamala, *Proceedings of the IEEE*, **93** (7), 1235 (2005).
2. S. Ahmed, F. A. Tahir, A. Shamim, and H. M. Cheema, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **14**, 1802 (2015).
3. H. F. Abutarboush, M. F. Farooqui, and A. Shamim, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **15**, 20 (2015).
4. D. Unnikrishnan, D. Kaddour, S. Tedjini, E. Bihar, and M. Saadaoui, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **14**, 1125 (2015).
5. V. Lakafofis, A. Rida, R. Vyas, L. Yang, S. Nikolaou, and M. M. Tentzeris, *Proceedings of the IEEE*, **98** (9), 1601 (2010).
6. A. Vena, L. Sydänheimo, M. M. Tentzeris, and L. Ukkonen, *IEEE Sensors journal*, **15** (1), 89 (2015).
7. M. D. Dankoco, G. Y. Tesfay, E. Benevent, and M. Bendahan, *Materials Science and Engineering B*, **205**, 1 (2016).
8. E. Sowade, E. Ramon, K. Y. Mitra, C. M. Domingo, M. Pedró, J. Pallarès, F. Loffredo, F. Villani, H. L. Gomes, L. Terés, and R. R. Baumann, *Scientific Reports*, **6**, (2016).
9. J. G. D. Hester, J. Kimionis, and M. M. Tentzeris, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **1** (99), 1 (2017).
10. S. B. Fuller, E. J. Wilhelm, and J. M. Jacobson, *Journal of Microelectromechanical System*, **11** (1), 54 (2002).
11. G. Shaker, M. M. Tentzeris, S. S. Naeini, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, (2010).
12. F. Arefi, V. Andre, P. M. Rahmati, and J. Amouroux, *Pure & Appl. Chem*, **64** (5), 715 (1992).
13. A. Delplanquea, E. Henrya, J. Lautrub, H. Leha, M. Bucklea, and C. Noguea, *Applied Surface Science*, **314**, 280 (2014).
14. H.-L. Kao, C.-L. Cho, L.-C. Chang and Y.-H. Wu, *Thin Solid Films*, **584**, (198) 2015.
15. <https://www.rogerscorp.com/index.aspx>
16. H.-L. Kao, C.-L. Cho, and L.-C. Chang, *IEEE Electron Device Letters*, **34** (12), 1584 (2013).
17. H.-L. Kao, C.-S. Yeh, X. Y. Zhang, C.-L. Cho, X. Dai, B.-H. Wei, L.-C. Chang, and H.-C. Chiu, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, **4** (7), 1128 (2014).
18. C.-L. Cho, H.-L. Kao, L.-C. Chang, Y.-H. Wu, and H.-C. Chiu, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, **6** (4), (622) 2016.



卓政霖先生現為國立清華大學工程與系統科學系博士班學生。

Cheng-Lin Cho received his M.S. degree from the Department of Electronic Engineering, Chang Gung University. He is currently studying Ph.D. in the Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University.



高瑄苓女士為國立交通大學電子工程博士，現任長庚大學電子工程系教授。

Hsuan-Ling Kao received her Ph.D. in electronics engineering from National Chiao Tung University. She is currently a professor in the Department of Electronics Engineering, Chang Gung University.