



國立中山大機械與機電工程研究所

碩士論文

Department of Mechanical and Electro-mechanical Engineering

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

創新高精度印刷之微鋼版結構設計暨製程技術開發

Design and Development of a Novel Micro-structured Stencil

for High Precision Printings

研究生：陳必軒

Pi-Hsuan Chen

指導教授：林哲信 博士

Dr. Che-Hsin Lin

中華民國 103 年 7 月

July 2014

# 審定書

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校機械與機電工程學系碩士班

研究生陳必軒（學號：M013020028）所提論文

創新高精度鋼版印刷之微結構設計暨製程技術開發

The design and development of a novel micro-structured stencil for high precision printings

於中華民國 103 年 7 月 22 日經本委員會審查並舉行口試，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

召集人 潘正堂 潘正堂

委員 林哲信 林哲信

委員 莊承鑫 莊承鑫

委員 李佳言 李佳言

委員 林世偉 林世偉

委員 \_\_\_\_\_

指導教授(林哲信) 林哲信 (簽名)

## 致謝

首先誠摯感謝指導教授林哲信博士，於專題及碩士共三年的悉心指導，使我得以盡心盡力的學習及成長，在我對於研究與學習失去目標時，即時將我拉往正確的方向前進。再來要感謝的是我的家人，在我離家的六年之中無時無刻的支持我完成學業，同時也感謝潘正堂教授、莊承鑫教授、李佳言教授與林世偉博士，願意於百忙之中抽空擔任學生的畢業口試委員，修正學生的論文並且加以改進，使學生的論文更為完善。另外也要感謝金屬中心的黃博士、劉經理與曾經理，在提供研究計劃的同時，無償給予我許多知識的補充與研究材料，讓我在沒有學長研究論文參考情況下，使我能夠快速對於研究主題上手。

記得當初懵懵懂懂的考進中山大學，不懂考上的系所教得是什麼，更無法體會中山大學的夕陽是如何遠近馳名。轉眼間六年過去，我也將從中山離開，當初一起入學及畢業的同學們不知道還好嗎？過去一起讀書、熬夜、一起打球的情景仍然歷歷在目。記得大三時看著同學紛紛找到教授製作專題，一時之間也想跟風，於是便找上林哲信老師，但是由於專題名額已滿所以慘遭打槍！大四暑假時我抱著最後希望，再次找上老師，我依然清楚地記得當老師問我為何要來製作專題時，我不假思索回答：「我想要學習東西。」，只見老師：「呵呵！」笑了兩聲，接著便告訴我要參加 LAB 的新生訓練課程，也開始了我於實驗室的生活。

三年的實驗室生活，受到許多學長姐與學弟妹的協助，大家一起共同維護實驗室，讓大家的研究得以順利進行。如果沒有大家一起分擔事情，共同維護實驗室，那麼也沒有今天這篇文章的產生。我很高興能在老師的指導下，除了知識得到充足的成長，更學習到許多做事的態度，研究也相當幸運地順利進行，使這篇論文得以完成，再次對於以上過去幫助過我的同學、家人、老師及好友，至上無比的敬意及謝意，沒有你們就沒有今天的我。

## 中文摘要

本研究提出創新高精度印刷之微鋼版結構製程，利用超薄多層金屬鋼版於不同基板進行印刷測試。印刷技術是目前最主要生產電路板的製程技術之一，由於其便宜且快速，於電子產業中相當重要。然而，傳統的印刷技術受到線徑與鋼版厚度的限制，使傳統印刷技術很難印刷出低於 50  $\mu\text{m}$  尺度之圖案。隨著科技的發展與需求，輕、薄且短小的電子產品需求越來越高，代表必須要印刷更精細圖案或是印刷薄膜。本研究除了開發製程之外，同時也進行印刷測試，藉由三種不同表面能之印刷基板，比較印墨的厚度與線寬的改變。

透過結合黃光微影與精密電鑄系統成型印刷鋼版，電鑄基板選擇便宜的市售載玻片，為了進行電鑄製程，必須要先於玻璃基板上濺鍍電鑄種子層，厚度各 50 nm 的鈦與金沉積於平整的玻璃基板上，使玻璃基板帶有導電特性。黃光微影部份分別使用正光阻 AZ4620 與負光阻 SU-8，其精細且薄的入墨孔結構由 AZ4620 定義，而需要長時間電鑄與厚的儲墨槽結構，則利用側壁垂直性相當好 SU-8 光阻定義。SU-8 光阻會完全覆蓋於入墨孔結構上，使第一層結構不會因二次電鑄而受到損壞，具高光穿透性的 SU-8 光阻使光罩的對位工作更容易進行。進行二次電鑄前，同樣利用表面電漿系統改質鍍物表面，除了提升鍍層品質外，更重要的是可以增加金屬層之間的附著力，使多層結構可以結合。最後將所有光阻去除，利用氫氟酸將鈦金屬層蝕刻，使鋼版結構脫模。

本研究之印刷鋼版，其主要結構可分為儲墨槽與入墨孔，由於入墨孔相當薄，利於印刷精細圖案，而儲墨槽的設計，提供充足與均勻的入墨情況，並且降低入墨孔所承受的印刷應力，增加印刷鋼版的使用壽命。此外，由於過於密集的入墨孔，會使鋼版結構強度下降，為了有效提升結構強度，另外添加了橋樑支架於入墨孔結構上，避免細長結構之間產生吸附效應，同時也增強了印刷鋼版的強度。

印刷結果顯示，本研究之多層結構鋼版，成功地將印刷尺度縮小至 15  $\mu\text{m}$ ，印刷厚度僅有 1  $\mu\text{m}$ ，印刷圖案的間距也可降至 20  $\mu\text{m}$ ，相較於傳統印刷技術，其

改善效果超過 50%。從垂直線條圖案可以知道，儲墨槽確實提供均勻且穩定的入墨量，精細圖案不會因為遮蔽效應而產生斷線，改善傳統印刷技術所遇到問題。透過便宜且快速的製程，高精度的印刷鋼版有效降低印刷尺度，表現其高印刷解析度與低成本製作，相當適合應用於高科技電子產業當中。

關鍵字:精細印刷、黃光微影、精密電鑄、AZ4620、SU-8



# Abstract

This work developed a novel micro-structured stencil for high precision printings. Printing technology are the major techniques for producing printing circuit board in electronic industry. Because, printing process are usually in low-cost and mass production for producing products. However, it is difficult to produce small patterns using conventional printing technique due to the limitation of the woven mesh or stencil's thickness. Therefore, the critical dimension for typical printing process is limited between 50  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$ . The electronic products are tending to smaller, thinner and light for the consumer market. In other words, the printing methods are tending to smaller line width, thinner printing layer and higher printing resolution. This study developed a double layer structure stencil for printing ultra-fine line and thin film on three kind substrate. Each substrate has different surface energies. The printing test result compare the printed paste width and thickness from different printing condition. To understand the influence of surface energy for printed paste.

This work successfully developed a novel process for fabricating ultra-thin stencil with a buffer reservoir utilizing the combination of AZ4620 positive photoresist (PR) and SU-8 negative PR as the electroplating molds. The fabrication process include multi- photolithography and electroplating process. A low-cost microscope glass slide was used as the substrate for producing the stencil. In order to meet the requirement for metal electroplating and structure releasing, the Ti/Au layers of 50 nm in thickness were coated on the substrate by sputtering. The injection hole is defined by the AZ4620 PR since AZ4620 can well sustain the nickel plating bath in a short electroplating time. On the contrary, the SU-8 PR can sustain long electroplating time of the nickel plating bath then prevented the first metal layer damage in second electroplating process. The high transparency of SU-8 PR also makes it easy to align

the two PR plating molds. Prior to the nickel plating process, the patterned substrate was activated with CCP to enhance the surface wettability. The plasma treatment in order to further enhance the adhesion and the roughness for nickel layer. The metal structure was then released from the glass substrate using a diluted HF solution.

The buffer reservoir was used to provide the necessary strength and uniform paste extrusion. Moreover, the buffer reservoir also reduced printing pressure from the injection hole. And the bridge structure to avoid the microstructure in stiction. Improved the stencil printing lifetime.

Results showed that the developed stencil successfully printed silver paste with the pattern of around 15  $\mu\text{m}$  in width and 1  $\mu\text{m}$  in thickness. And the printing pitch also down to 20  $\mu\text{m}$ . The complete right angle patterns confirmed that the developed stencil was capable for printing patterns with desired orientations. The blocking issued was excluded for the stencil and the printed pattern. The method develop in the present study will give substantial impact on the modern printing technology.

**Keywords:** High precision printings, Photolithography, Electroplating, AZ4620, SU-8

# 目錄

審定書 .....	i
致謝 .....	ii
中文摘要 .....	iii
Abstract .....	v
目錄 .....	vii
圖目錄 .....	x
表目錄 .....	xiii
符號表 .....	xiv
簡寫表 .....	xv
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 印刷技術的重要性 .....	1
1.3 印刷技術種類 .....	2
1.3.1 網版印刷技術 .....	2
1.3.2 銅版印刷技術 .....	6
1.3.3 噴墨印刷技術 .....	10
1.3.4 滾輪印刷技術 .....	12
1.4 印刷漿料 .....	13
1.5 印刷基板表面能 .....	15
1.6 論文架構 .....	17
第二章 動機目的及原理 .....	19
2.1 超細線寬印刷術之挑戰 .....	19
2.1.1 網版印刷技術限制 .....	19



2.1.2	鋼版印刷技術限制.....	22
2.2	研究動機與目的.....	23
2.3	光學微影.....	24
2.3.1	光阻.....	24
2.4	電鑄基本原理.....	26
2.4.1	氨基磺酸鎳.....	28
2.5	鋼版製作方法.....	29
2.6	設計原理.....	30
2.7	製程挑戰.....	31
第三章 實驗與方法 .....		32
3.1	雙層印刷鋼版製作.....	32
3.1.1	LIGA-like 製程.....	33
3.2	創新橋式輔助入墨印刷鋼版製作.....	36
3.3	表面電漿改質系統.....	39
3.4	精密電鑄系統.....	40
3.4.1	電鑄系統設備與鍍液配製.....	41
3.5	接觸角量測系統.....	42
3.6	表面粗糙量測儀.....	43
3.7	印刷器具與材料.....	45
3.7.1	印刷平台.....	45
3.7.2	刮刀與銀膠.....	46
3.7.3	印刷基板.....	47
3.8	實驗架構流程.....	48
第四章 實驗結果與討論 .....		50
4.1	印刷鋼版實驗結構分析.....	50
4.1.1	入墨孔與儲墨槽結構.....	50

4.1.2 橋樑結構分析.....	52
4.2 接觸角量測實驗分析.....	54
4.2.1 基板改質電鑄結果分析.....	55
4.2.2 基板接觸角分析.....	58
4.2.3 表面電漿改質分析.....	61
4.3 印刷結果實驗分析.....	63
4.3.1 超精細圖案印刷分析.....	64
4.3.2 印刷銀膠線寬分析.....	68
4.3.3 印刷銀膠厚度分析.....	72
4.3.4 超小間距印刷分析.....	76
第五章 結論與未來展望 .....	79
5.1 結論.....	79
5.2 未來展望.....	80
參考文獻 .....	82
自述 .....	86
附錄 .....	87

## 圖目錄

圖 1-1 網版印刷品質影響因子。 .....	3
圖 1-2 網版印刷原理示意圖。 .....	4
圖 1-3 網版印刷製作流程圖。 .....	4
圖 1-4 感光乳膠與鋼絲網電子顯微鏡圖。 .....	5
圖 1-5 鋼版印刷原理示意圖。 .....	7
圖 1-6 化學蝕刻法示意圖與鋸齒狀金屬蝕刻圖。 .....	8
圖 1-7 雷射切割法示意圖與熔渣殘留圖。 .....	8
圖 1-8 電鑄成形步驟示意圖與電鑄側壁電子顯微鏡圖。 .....	9
圖 1-9 階梯印刷鋼版結構示意圖。 .....	10
圖 1-10 噴墨印刷原理示意圖。 .....	11
圖 1-11 滾輪印刷示意圖。 .....	12
圖 1-12 印墨於入墨孔內受力示意圖。 .....	14
圖 1-13 印墨印刷前後形貌示意圖。 .....	15
圖 1-14 液體接觸角示意圖與液珠表面與內聚力作用圖。 .....	16
圖 2-1 傳統網版印刷超細線寬之遮蔽效應。 .....	20
圖 2-2 傳統網版印刷點狀圖之遮蔽效應。 .....	21
圖 2-3 傳統網版印刷技術之波浪紋。 .....	22
圖 2-4 AZ4620 光阻轉速與厚度關係圖。 .....	25
圖 2-5 SU-8 光阻轉速與厚度關係圖。 .....	26
圖 2-6 儲墨槽與入墨孔之印刷鋼版剖面圖。 .....	31
圖 3-1 雙層結構印刷鋼版製程示意圖。 .....	33

圖 3-2 橋樑結構印刷鋼版製程示意圖。 .....	38
圖 3-3 表面電漿改質系統示意圖。 .....	40
圖 3-4 氨基磺酸鎳電鑄槽示意圖。 .....	41
圖 3-5 氣動式水中過濾器示意圖。 .....	42
圖 3-6 接觸角量測系統圖。 .....	43
圖 3-7 探針式表面粗度量測示意圖。 .....	44
圖 3-8 平均粗度( $R_a$ )、最大高度粗糙度( $R_y$ )與十點平均粗度( $R_z$ )示意圖。 .....	45
圖 3-9 手印台與印刷器具。 .....	47
圖 3-10 實驗架構流成圖。可 .....	49
圖 4-1 印刷鋼版結構圖。 .....	51
圖 4-2 印刷鋼版正反面側視圖。 .....	52
圖 4-3 橋樑支架結構。 .....	53
圖 4-4 接觸角量測流程圖。 .....	54
圖 4-5 電漿改質電鑄粗糙度分析圖。 .....	55
圖 4-6 金屬鍍層氣泡圖。 .....	56
圖 4-7 電鑄速率量測圖。 .....	57
圖 4-8 水滴接觸角於不同基板分析圖。 .....	58
圖 4-9 銀膠接觸角固化前後分析圖。 .....	59
圖 4-10 基板表面能對於固化銀膠厚度影響。 .....	60
圖 4-11 不同瓦數改質效果分析圖表。 .....	62
圖 4-12 電漿改質時效性分析圖。 .....	63
圖 4-13 印墨變形示意圖。 .....	64
圖 4-14 超精細圖案印刷結果。 .....	65
圖 4-15 鋼版入墨孔結構與實際印刷結果比較圖。 .....	65
圖 4-16 精細點陣圖與棋盤圖印刷結果。 .....	66
圖 4-17 傳統網版印刷之遮蔽效應改進效果。 .....	67

圖 4-18 利用三種厚度與基板之印刷線寬統計圖表。 .....	70
圖 4-19 厚度 2 $\mu\text{m}$ 入墨孔之印刷線寬誤差數據圖。 .....	71
圖 4-20 利用三種厚度與基板之印刷厚度統計圖表。 .....	74
圖 4-21 厚度 2 $\mu\text{m}$ 入墨孔之印刷線寬誤差數據圖。 .....	75
圖 4-22 超細間距印刷結果圖。 .....	76
圖 4-23 鋼版微結構溼式離型後所造成結構沾黏與光阻剝落。 .....	77
圖 4-24 超小間距連續長條圖案印刷結果。 .....	788

# 表目錄

表 1-1 各式製作印刷鋼版方法 .....	9
表 3-1 電鑄配方與條件表 .....	42

## 符號表

$cP$ : 動力黏度( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )

$D_{\text{wire}}$ : 鋼絲網線徑

$F$ : 法拉第常數

$H(\%)$ : 印刷厚度誤差百分比

$I$ : 電流

$M$ : 分子量

$M_c$ : 網目數

$n$ : 價電子數

$Q$ : 電荷量

$R_a$ : 算數平均粗糙度

$R_y$ : 最大高度粗糙度

$R_z$ : 十點平均粗糙度

$T$ : 電鑄層厚度( $\mu\text{m}$ )

$t$ : 時間(s)

$W$ : 電鑄沉積重量(g)

$W(\%)$ : 印刷線寬誤差百分比

$\gamma_S$ : 固-氣表面張力

$\gamma_L$ : 液-氣表面張力

$\gamma_{LS}$ : 固-液表面張力

$h'$ : 實際印墨厚度

$w'$ : 實際印墨線寬

$\eta$ : 電流效率

$\theta$ : 接觸角

## 簡寫表

AR: Aspect Ratio, 高深比

ASD: Ampere per Square Decimeter, 電流密度

CCP: Capacitively Coupled Plasma, 電容式耦合電漿

HF: Hydrogen fluoride, 氫氟酸

MEMS: Micro Electro Mechanical System, 微機電系統

OLED: Organic Light-Emitting Diode, 有機發光二極體

OM: Optical Microscopy, 光學顯微鏡

OP(%): Open area rate, 開口率

OTFTs: Organic thin film transistors, 有機薄膜電晶體

PCB: Printing circuit board, 印刷電路板

PET: Polyethylene terephthalate, 聚對苯二甲酸乙二酯

PR: Photo Resist, 光阻

PTFE: Polytetrafluoroethene, 聚四氟乙烯(鐵氟龍)

RF: Radio Frequency, 射頻

SEM: Scanning Electron Microscope, 掃描式電子顯微鏡

SMT: Surface mount technology, 表面焊貼技術

UV: Ultraviolet, 紫外線



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

印刷術是一門具有五千年歷史的生產技術，儘管是一項古老的技術，至今仍然與我們生活息息相關。從前，印刷術是為了傳遞文字與圖像所需求，縱使到了今日，舉凡看得見的報章雜誌、衣服、產品標籤甚至於鈔票，都是藉由印刷技術所生產，如此可見其重要性。然而，更多看不見的印刷產品，卻無時無刻被我們使用著，如印刷電路板 (Printing circuit board, PCB)、表面焊貼技術(Surface mount technology, SMT)、觸碰面板(Touch panel)與積體電路薄膜等眾多電子產品，難以想像具有千年歷史的技術，不但沒有凋零，反而更蓬勃發展。千年前，靠著印刷術傳遞各種「訊息」至全球各地，使人類的知識與思想得以發展；如今，印刷術也是傳遞各種「訊息」，只不過是看不見的電氣訊號，使人類享受到創新的科技產品。或許，未來會有更新的製程技術發明，逐漸取代印刷技術，但是可以確定的是，印刷術對人類的影響，是永恆不變的，並且持續進行當中。

## 1.2 印刷技術的重要性

以目前電子產業蓬勃發展來看，更多創新的產品會不斷地被製造出來，電子產品不但要輕薄短小，更重要的是其效能與新穎度。雖然目前半導體製程技術還是主流的生產技術，但是其昂貴的製程與龐大的污染物，也是我們享受科技同時必須承受的代價，人們必須尋求更環保且更有效率的生產方法。印刷技術廣泛的應用於電子產業，要追溯至二次大戰期間，對於軍事設備的需求，印刷科技具有快速批量生產與耗材少優勢，可以大幅降低生產成本。發展至今七十餘年的電子印刷技術，因為科技與潮流的趨勢，也逐漸從原本生產低階電子產品，轉型成生產更精密的電路圖案與光電產品。原因無他，就是因為印刷科技可以有效降低生產成本，快速且大面積生產，極少的污染產物，傳統的薄膜或是金屬化製程，

必須藉由多重步驟或是真空環境下才能進行，印刷製程相比之下，僅需要印刷與固化等簡單步驟，配合自動化的對位系統，其印刷精度也可以很精準。此外，印刷機台相較半導體製程設備，更為簡易且保養方便，在兼具優勢成本與環保的情況下，且只要是流體材料皆可當作印刷油墨，代表其應用更為廣泛，使得電子產業對於印刷產業的需求日漸俱增。印刷術的另一個好處在於，只要是流體物質都可以被當作印墨，而且印刷面不侷限於平面，可以印刷於非平面物體上，使得其應用性又更為廣泛。而一些未來具有發展潛力的科技，如軟性電子材料，受限於材料成分，使得製程更為複雜且昂貴，但是透過結合印刷技術，使得生產製程更為簡單且快速，讓高科技產品更為普及。

### 1.3 印刷技術種類

本節將介紹較有代表性的四種印刷技術，最基礎的印刷術，又可分為凹版印刷、凸版印刷、平版印刷、孔版印刷與無版印刷，簡單來說，就是以其印刷版形貌來做區分。凹版印刷與凸版印刷是相對的印刷技術，凹版印刷最早為金屬或木製雕版，用來印刷美術品，油墨從凹下的區域轉移至基板；而凸版印刷最具代表的物品就是印章，凸起的結構就是欲轉移圖案。平版印刷則是在印刷版上做出疏水區(Hydrophobic)與親水區(Hydrophilic)，使特定區域的印墨轉移至基板上。孔版印刷則是最為常見的方法，印刷版上開孔的地方就是印刷區域，利用刮板將印墨推至開孔處後，印墨就轉移至基板上。無版印刷又稱為非接觸式印刷，是日常生活最容易看見的印刷科技，噴墨式印表機即是無版印刷的代表，現今更有雷射印刷技術，亦是一種無版印刷。

#### 1.3.1 網版印刷技術

最基本的印刷技術其中之一便是網版印刷技術，透過其批量生產與便宜製程被業界廣泛使用[1]，除了印刷衣物與書籍之外，網印技術也被電子產業大量使用

當中。除了常見的印刷電路板[2, 3]與太陽能電池(Solar cell)[4, 5]，近年來，網印技術亦可用來印刷射頻(Radio Frequency, RF)裝置[6]、金屬電極(Electrode)[7, 8]與有機發光二極體(Organic Light-Emitting Diode, OLED)[9]等眾多產品。影響網印品質的參數相當多[10-12]，其眾多影響因子如圖 1-1 所示，所以印刷作業往往都是依據經驗法則，先初步試印後，再慢慢調整各種參數，最後得到最佳的印刷參數。

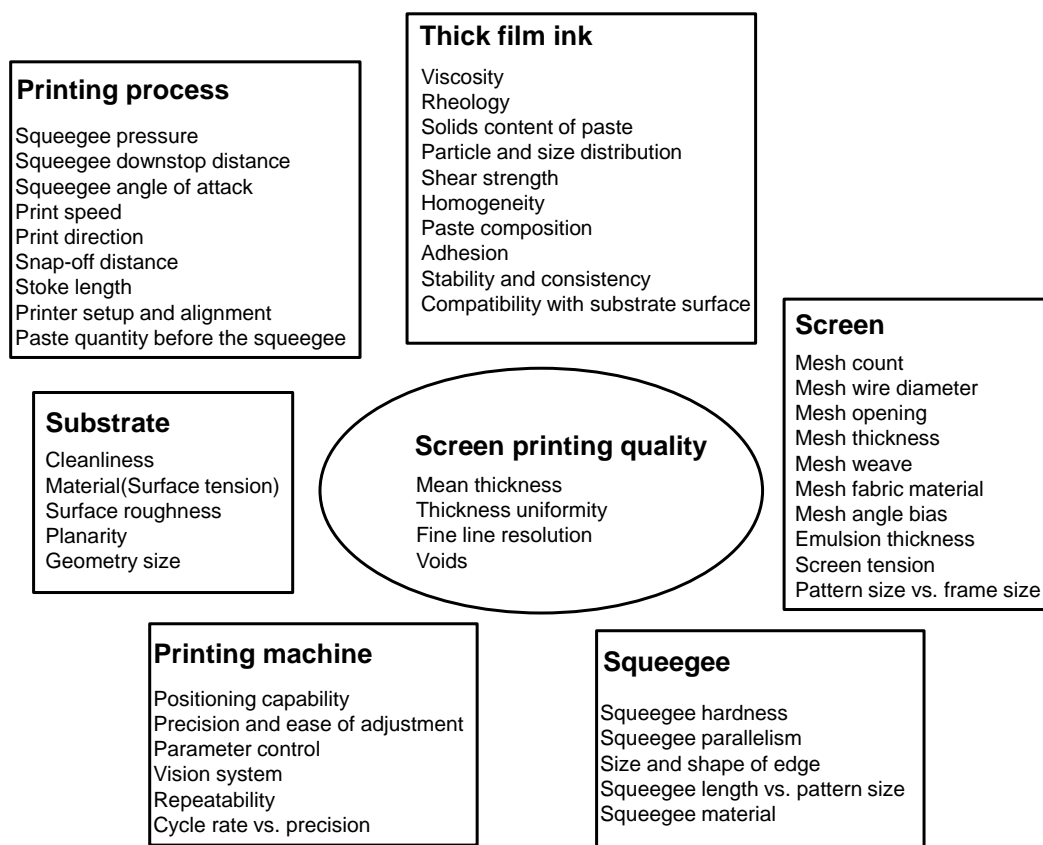


圖 1-1 網版印刷品質影響因子。眾多參數會影響到網版印刷之品質，許多因子亦適用於其他種類印刷技術。[10]

網版顧名思義是由編織而成的網布與感光乳膠組成，其印刷示意圖如圖 1-2，感光乳膠黏附至網布上，經過曝光顯影製程定義出印刷孔，網布上乳膠所擋住的部分便無法入墨，如圖 1-2 所示，相反地，開孔的區域就可以透過刮刀，將印墨轉印至基板上。感光乳膠的厚度與印墨的厚度成正相關，藉由調整感光乳膠的厚度，印刷出不同厚度的印墨，印墨厚度同時也與印刷線寬和印墨種類有關係，網印技術另一個優點是其印墨可以很厚，印刷厚度從 10  $\mu\text{m}$  至 40  $\mu\text{m}$ 。

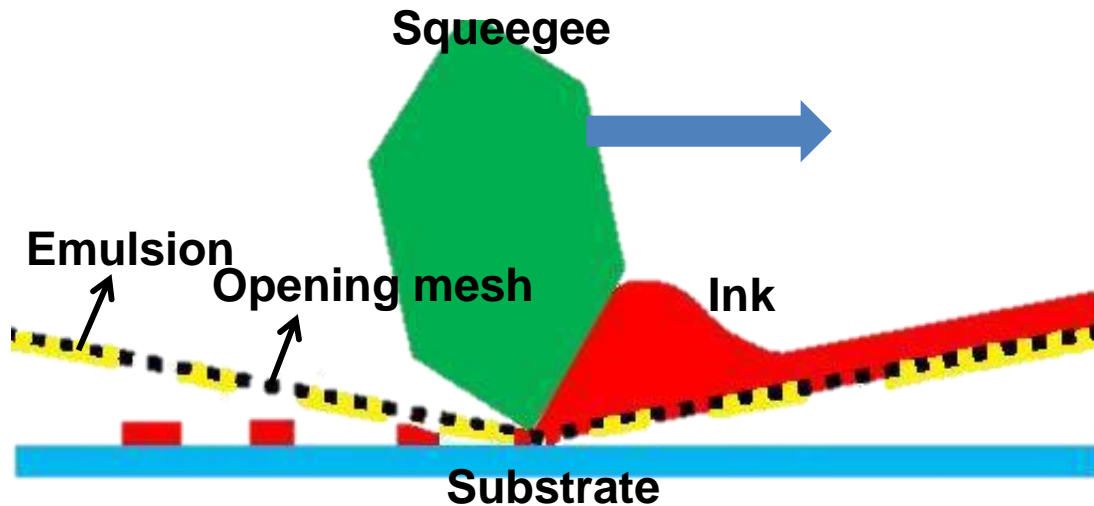


圖 1-2 網版印刷原理示意圖。利用感光乳膠於鋼絲網上定義開孔處，當刮刀將印墨刮至網目時，印墨便會從乳膠開孔處穿過轉移至基板上，完成印刷作業。

傳統的網版製作流程如圖 1-3，首先，將鋼絲網利用張網機張開，並且將其固定於一矩形框架上，經過脫脂烘烤清洗後，塗佈一層感光乳膠於鋼絲網上，由於感光乳膠的厚度和印墨厚度成正相關，所以乳膠層的厚度必須精確控制，接著如同微影製程，乳膠烤乾後便對位曝光，透過洗板顯影步驟，完成印刷孔的定義，最後修補未顯影乾淨的毛邊，完成的網版便可以進行印刷測試。

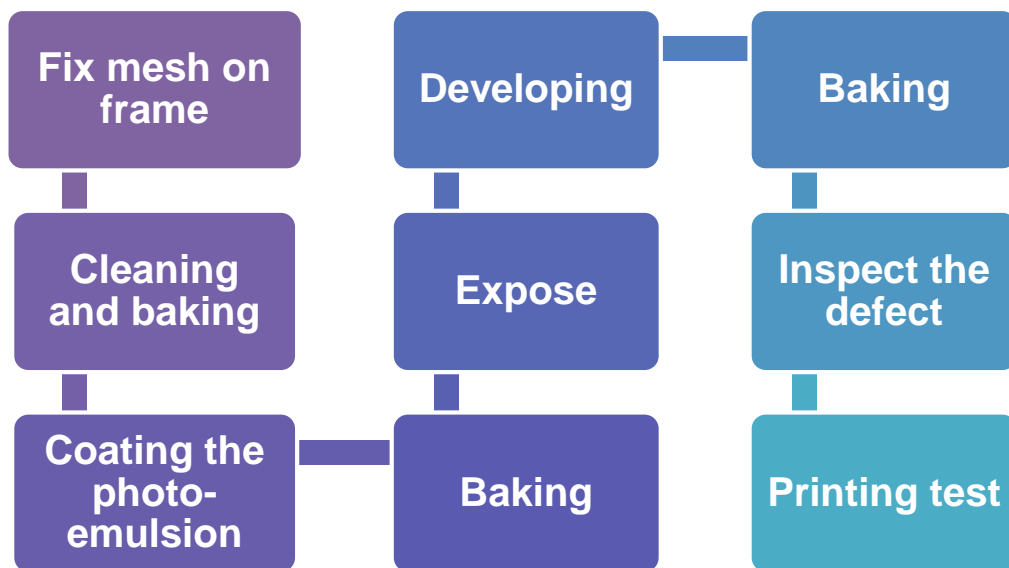


圖 1-3 網版印刷製作流程圖。網版製作之九大步驟，重點在於鋼絲網的張網與固定，以及感光乳膠的定義解析度。

由於最早的網布成分是蠶絲，所以網版印刷又稱為絲網印刷，隨著印刷尺度的縮小，絲網已無法符合印刷電子產業尺度需求[1]，為了能印刷尺度更精細的圖案，線徑更小且強度足夠的不銹鋼(Stainless steel)絲網，成為印刷小尺度圖案的關鍵。藉由不銹鋼線所編織而成的網布，圖 1-4(A)清楚地顯示乳膠與鋼絲網形成的網版，乳膠附著於鋼絲網上，開孔處則為入墨孔，圖 1-4(B)為市售的平織型不銹鋼絲網布，其線徑(Wire diameter)約為 20  $\mu\text{m}$ ，網目數(Mesh count)為 290，「目」為網布的計算單位，代表每英寸有多少線數，而兩條線徑中間的間距則稱為開口寬度(Opening)，線徑與網目數關係到網布的開口率(Open area %)，其影響到印刷的解析度[13]，開口率越大代表其印刷解析度越好，開口率公式如式(1-1)，然而實際上網布需要張網固定於網框上，且印刷時受到刮刀下壓力量產生變形，使鋼絲網與感光乳膠產生拉扯，造成網布與乳膠產生變形，使得印刷精度下降，更可能會使網版造成疲勞破壞，使網版於印刷時損壞。

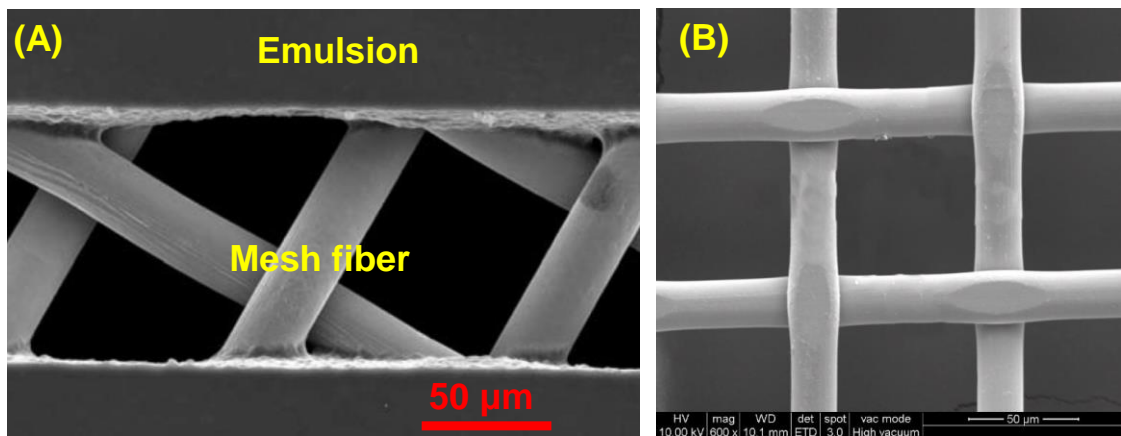


圖 1-4 感光乳膠與鋼絲網電子顯微鏡圖。(A)開口率為 52.5%與線徑 25  $\mu\text{m}$  之網目，乳膠開口 100  $\mu\text{m}$  所形成的印刷網版，乳膠與鋼絲線形成的入墨孔，提供印墨轉移至基板之空間。(B)網目數為 290 目，線徑為 20  $\mu\text{m}$  的市售網布，由鋼絲線交錯所編織而成的平織網布。[13]

平織型網布開口率計算公式如下:

$$OP (\%) = (1 - M_c \times D_{wire})^2 \times 100\% \quad (1-1)$$

$OP$ :開口率(Open area%)

$M_c$ :網目數(Mesh count)

$D_{wire}$ :鋼絲網線徑(Wire diameter)

而隨著電子元件的微型化，印刷尺度無法無限制的縮小，意指傳統的網印技術面臨到其印刷瓶頸，最主要原因是因為，網布的線徑無法過小，目前最小的直徑大約是 15  $\mu\text{m}$ ，然而，雖然印刷解析度可以提高，但是線徑過小導致網布強度不足，無法支持印刷下壓之力道。根據業界印刷的經驗，網印的極限印刷特徵解析度，約為該網布線徑的三倍左右，也就是說，目前網版印刷所能印刷的有效最小線寬，大約為 50  $\mu\text{m}$ ，尺度低於 50  $\mu\text{m}$  的圖案很難被印刷出來[14]，印墨的品質難以被控制，為了能夠提高印刷解析度，除了使用新型網布，或是調整印墨的成分之外，還可以對於印刷基板做改質處理[15]，使印刷解析度能提升一些，但效果有限，另外有文獻指出[16]，當印刷尺度小於 75  $\mu\text{m}$  時，其印墨會有 20  $\mu\text{m}$  至 40  $\mu\text{m}$  的印刷誤差，使印刷最小線寬無法有效縮小，對於網印的印刷限制，將於後續章節做更詳細的探討。

### 1.3.2 鋼版印刷技術

為了能夠印刷更小尺度的圖案，鋼版印刷(Stencil printing)為另一種可行的方法[17, 18]，其印刷示意圖如圖，在薄板上開孔處為印刷區域，直接透過刮刀將漿料轉印至基板上，和網印不同的地方是，由於鋼版印刷沒有網布結構，所以鋼印沒有開口率的問題，印刷解析度可以更好，另外，鋼版為於印刷時，結構不會因為拉扯而產生變形，使得印刷精度可以維持較高，且鋼版清洗更為簡易，相當適合印刷高黏滯性的漿料，在封裝產業占有舉足輕重的地位[19-22]。雖然鋼版印刷尺

度可以很低，但是市面上大部份鋼版印刷，還是印超過 200  $\mu\text{m}$  的圖案為主，因為受限於鋼版厚度的關係，若是要印更精細的圖案，鋼版的厚度勢必要減少，但是這樣會使鋼版無法承受印刷的力道，近年也有許多關於鋼版印刷的研究，使其印刷最小尺度可達 100  $\mu\text{m}$  以下，另外印刷間距也可縮小至 70  $\mu\text{m}$ [18, 23-29]，未來對於印刷高密度的精密圖案，仍然具有相當潛力。但是鋼版印刷技術無法印刷封閉圖案，是其重大缺點之一，這也是為什麼鋼印技術，多為印刷焊錫位(Bond pad)等點狀圖案的原因，圖 1-5 為鋼版印刷示意圖。

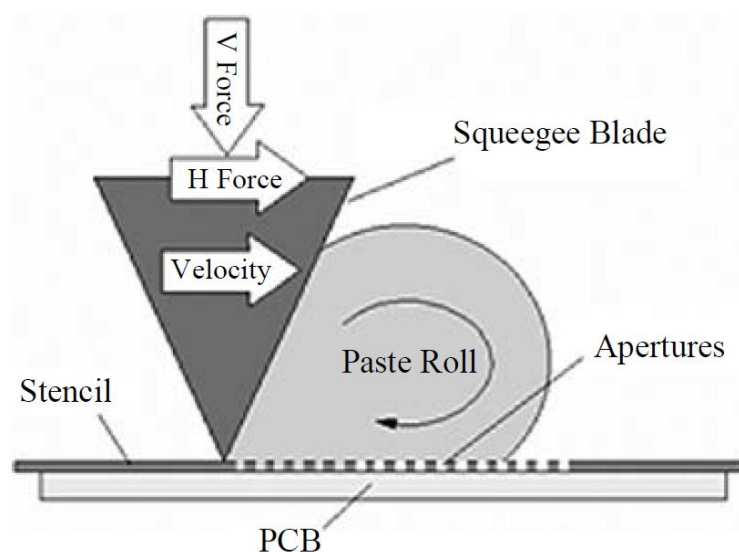


圖 1-5 鋼版印刷原理示意圖。於金屬薄版特定區域開孔，開孔區域即為印刷圖案，透過刮刀將印墨推擠至基板上，傳統印刷鋼版之印刷尺度受限於鋼版厚度。[17]

一般來說，製作印刷鋼版有三個方法，化學蝕刻法、雷射切割法與電鑄成型法[23, 30]。化學蝕刻法為利用阻擋層附著於金屬上下兩層，接著利用化學藥劑將金屬石刻出孔洞，其示意圖如圖 1-6(A)，由於化學蝕刻為等向性(Isotropic)蝕刻，透過雙層阻擋層的方法可以使蝕刻誤差減少一些，然後，蝕刻時會沿著金屬晶介面蝕刻，在孔隙邊緣產生鋸齒狀結構，如圖 1-6(B)所示，且側壁也因蝕刻關係粗糙度很差，影響到漿料的入墨。化學蝕刻法的成本最低，且處理時間快，但也因為蝕刻等向性的關係，使其精確度最差，雖然可以透過電化學拋光改善粗糙度，但是其精度約 200  $\mu\text{m}$ ，而圖形之間間距更是不能小於 500  $\mu\text{m}$ 。

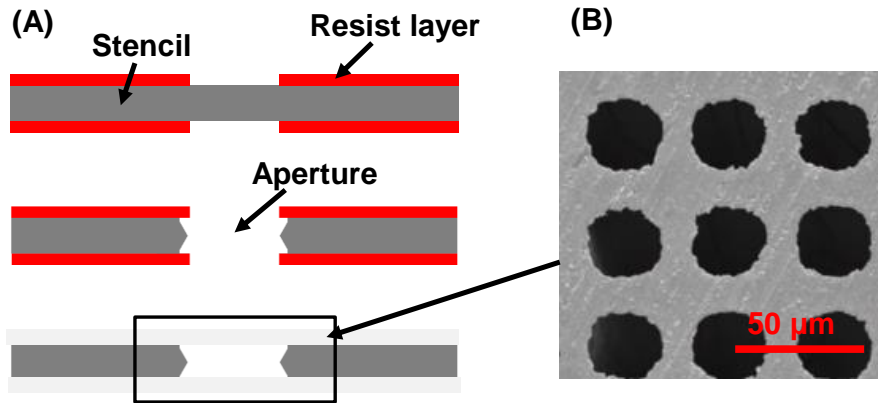


圖 1-6 化學蝕刻法示意圖與鋸齒狀金屬蝕刻圖。(A)化學蝕刻鋼版流程圖，利用雙層光阻定義蝕刻區域，同時蝕刻上下兩層金屬減少誤差，最後移除光阻得到開孔金屬薄版。(B)金屬因化學蝕刻所造成的不平整圖案，需後加工處理改善粗糙度。

雷射切割法透過高能光束，在金屬板上切割出印刷孔洞，其最小孔徑可以達  $10\ \mu\text{m}$ ，其加工示意圖如圖 1-7(A)，加工毛邊較化學蝕刻小。但是雷射切割為利用高溫熔切金屬，熔渣會殘留在孔隙側壁如圖 1-7(B)，影響印刷品質，雖然可以利用電化學拋光法(Electropolishing)改善側壁粗糙度，但是大幅增加成本與處理時間。另外一項考量的重點便是成本，雷射切割雖然解析度雖然高，但是加工速度太慢，對於精細圖案，只能慢慢切每一個微孔洞，此外，精密雷射切割不利於加工過薄的金屬，一般來說厚度至少要  $100\ \mu\text{m}$  才能加工維持品質。

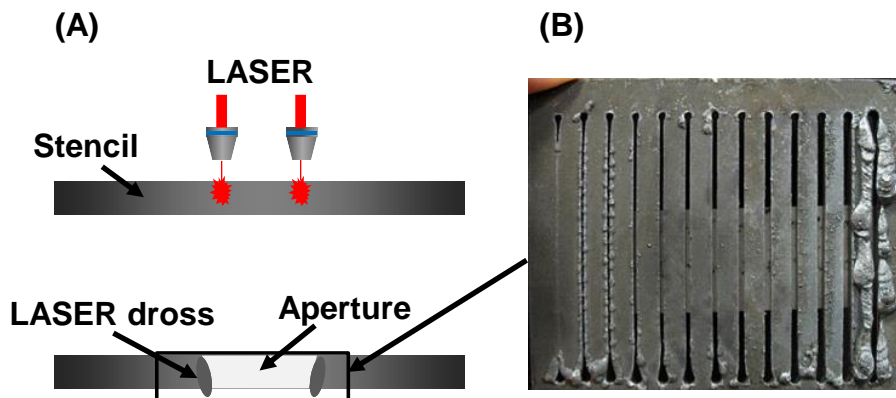


圖 1-7 雷射切割法示意圖與熔渣殘留圖。(A)利用高能雷射加熱金屬，使局部金屬熔化便切割圖案。(B)高溫切割之下，可能會殘留熔渣於金屬上，須透過額外加工處理去除。[23]



最後一項方法是電鑄成型法，利用黃光微影製程來定義圖案，之後靠微電鑄系統成型微結構，步驟圖如圖 1-8(A)，由於黃光微影製程精度可達  $0.5\ \mu\text{m}$ ，只要微電鑄系統控制得宜，可以輕鬆成型低於  $50\ \mu\text{m}$  的結構，此外，電鑄成型的側壁形貌取決於光阻結構，不需要昂貴的拋光後製程，從圖 1-8(B)可以觀察到，利用電鑄所得到側壁平滑的鋼版結構，對於印墨的進入相當有幫助。然而，為了製造良好與足夠強度的鋼版結構，其電鑄時間相當冗長，其電鑄條件與鍍液成份格外重要[31-34]，相對的製造成本便提高許多，但是反過來說，如果將電鑄厚度減少至  $50\ \mu\text{m}$  以下，不但可以得到薄且精度高的印刷鋼版，更可以降低製作成本與時間。對於三種不同製作鋼版的方法，整理於表 1-1。

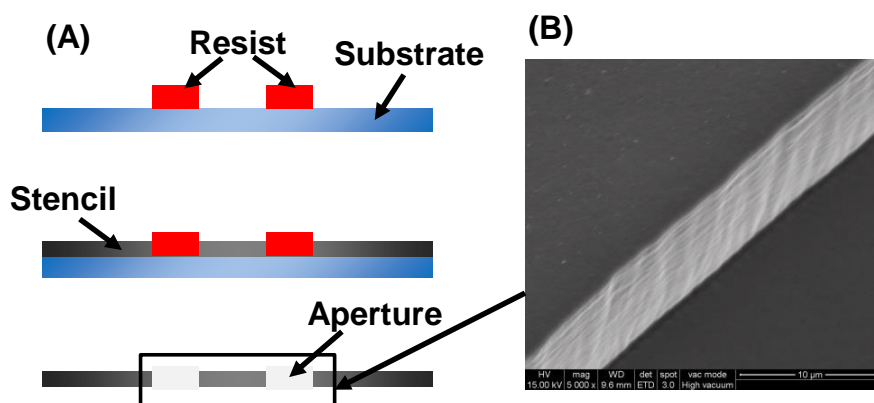


圖 1-8 電鑄成形步驟示意圖與電鑄側壁電子顯微鏡圖。(A)利用光阻定義鋼版開孔結構於基板上，接著沉積金屬薄版，最後將光阻去除，並完成離型作業，得到一高精度之印刷金屬薄版。(B)電鑄側壁形貌取決於光阻結構，因此可以得到平滑且均勻的側壁，利於印墨的進入與離版。

表 1-1 各式製作印刷鋼版方法

方法	精準度	成本	加工厚度	側壁粗糙度
濕式蝕刻法	$100\ \mu\text{m}$	便宜快速	超過 $150\ \mu\text{m}$	崎嶇不平
雷射切割法	$10\ \mu\text{m}$	昂貴耗時	超過 $100\ \mu\text{m}$	熔渣殘留
電鑄成型法	$1\ \mu\text{m}$	昂貴耗時	低於 $100\ \mu\text{m}$	直條平滑

鋼版印刷另一項優點是，可以創造階梯狀鋼版(Step stencil)[30, 35]，如示意圖 1-9，若是印刷基板上已固有元件，則可以利用階梯狀結構來閃避該結構，使印刷時不會印到該區域圖案，也可以在特定區域設計高密度開孔，讓細微結構也可以被印刷，使鋼版印刷的應用更為廣泛。

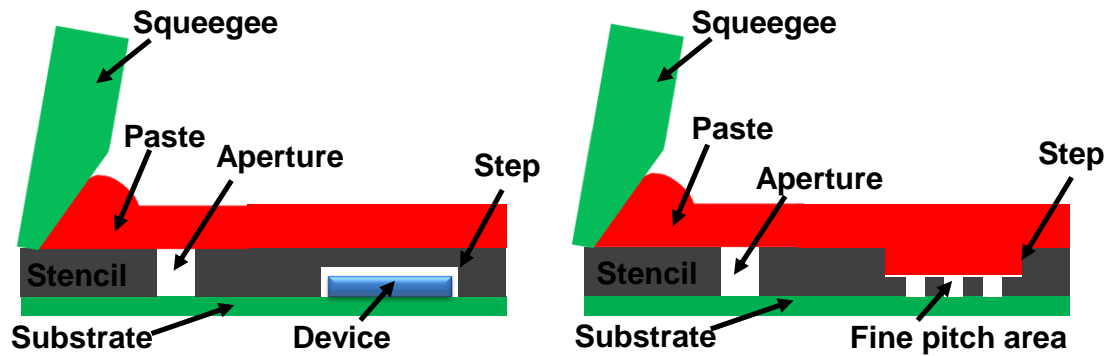


圖 1-9 階梯印刷鋼版結構示意圖。利用特殊製程去製作多層結構鋼版，可以利用其階梯結構去閃避基板上的結構，或是印刷特定區域的精細圖案。

### 1.3.3 噴墨印刷技術

噴墨印刷為一種非接觸印刷技術，最常見的噴墨印刷就是印表機，透過電腦輸出訊號，利用印表機的系統控制器與噴頭(Nozzle)控制，將油墨噴印至被印物上，其無接觸、無壓力的印刷方式，且作業準備時間短，小量生產快速，在工業界也可以廣泛的應用，圖 1-10 為噴墨印刷原理示意圖。噴墨技術發展 100 餘年，但是其技術已經相當純熟，其可分為熱氣泡式與壓電式兩種方法產生微液珠[36]，簡單來說，熱氣泡式技術透過加熱墨水，將部分墨水從噴頭擠出，噴印至被印物上；而壓電式技術則是利用壓電材料特性，當給予電壓會產生形變，使得少量的墨水從噴頭噴出。由於其墨滴產生原理，是藉由噴頭噴出，所以噴頭的大小，直接影響到墨珠的直徑大小，越小的噴頭其產生的墨珠也越小，再配合適當的系統控制，印刷解析度也可以提高[37]，由於微機電製程興起，透過整合黃光微影、薄膜沉積、電鑄成型與矽基板體加工等製程，其加工精度與體積皆優於傳統機械加工方法，由於其參數修改方便且可以批次製造，微機電製程能夠有效的縮小元件體積。而

噴頭亦可以藉由微機電製程來製作，J.Chen 與 Wise 兩位學者利用蝕刻矽基板[36]，其高精度噴嘴僅僅只有 20  $\mu\text{m}$  寬，單點的噴墨解析度可以達 20  $\mu\text{m}$ 。除了用矽基板加工之外，Lee *et al.*(1999)[38]利用電鑄成型方法製作噴頭，其噴嘴直徑為 50  $\mu\text{m}$ ，其工作頻率高達 11 kHz，且液珠只有 100  $\mu\text{m}$ 。除了噴頭的大小之外，墨水的黏度也是一項問題，通常噴墨印刷都是使用黏稠度低的墨水，通常為 2 cP 至 100 cP，相較於網印與銅印使用的漿料，其黏稠度是低於數千倍，由於墨水的黏度低，導致噴墨印至基板表面時，受到基板表面張力的影響，使得墨水會自動攤開，使印刷線寬遠大於液珠直徑大小，且印墨厚度很薄。近年有學者利噴墨技術於 PTFE(鐵氟龍)基材上，由於鐵氟龍是極疏水材料，所以其印墨點可縮小至直徑 30  $\mu\text{m}$ [39, 40]，然而，當印刷線條圖案時，為了避免墨滴之間無法串連，必須要提高墨滴印刷密度，使墨滴可以成為連續性圖案，連續的噴墨使得線徑擴大至 50  $\mu\text{m}$  以上。雖然噴印技術尺度受限於墨水與基板材質，但由於其非接觸特性，在噴印有機薄膜電晶體(Organic thin film transistors, OTFTs)與生物分子塗佈等薄膜製程，仍然是有其優勢與發展性。

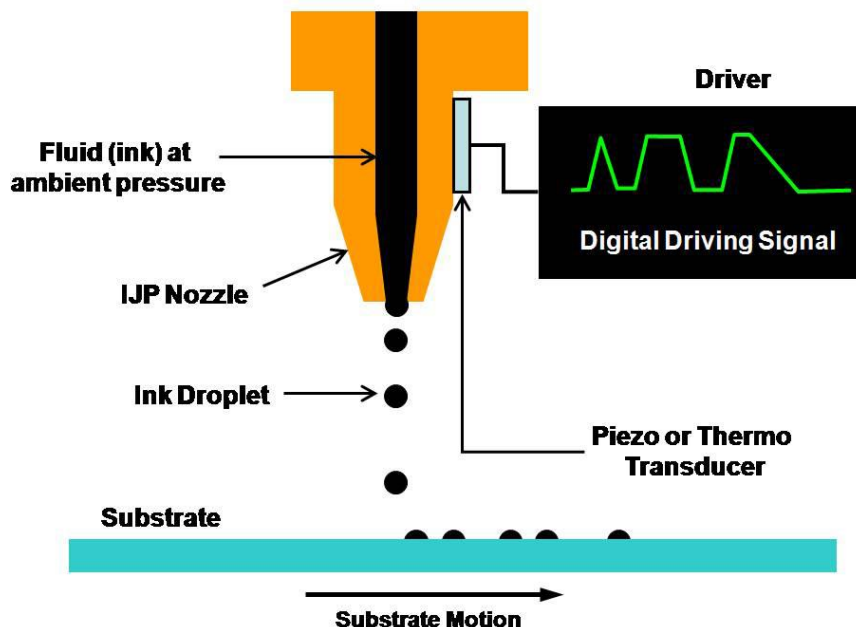


圖 1-10 噴墨印刷原理示意圖。利用壓電或是熱氣泡產生液珠，經由噴嘴噴出將墨水轉移至基板上。

### 1.3.4 滾輪印刷技術

滾輪印刷技術其應用相當廣泛，不管是薄膜塗層還是印刷技術，利用 Roll-to-Roll 製程，可以快速將印墨轉移至薄版上，滾輪印刷藉由多個滾輪作用，來達成印墨轉移的目的，滾輪印刷技術其定義相當廣泛，意指滾輪印刷技術可以涵蓋凹版(Gravure)、凸版(Letterpress)與孔版印刷，孔版印刷就如同先前所介紹的鋼版印刷，而凸版與凹版印刷則是兩個概念類似的印刷技術，圖 1-11(A)為滾輪凸版印刷示意圖，藉由滾輪轉動，使印刷輪凸出表面沾上印墨，同時印刷基板也往同方向運送，當印刷輪接觸到印刷基板時，印墨便轉印至印刷基板上。而圖 1-11(B)為滾輪凹版印刷示意圖，利用轉動滾輪使凹槽處填充印墨，接著將凹槽內的油墨轉印至印刷基板上。滾印技術若是控制得當，其印刷精度可以很高，2003 年 Pudas 研究團隊[41]，利用凹版滾輪成功轉印 20  $\mu\text{m}$  的超細線寬圖案，但是成功率仍然偏低，有效的印刷尺度約為 75  $\mu\text{m}$ 。由於凸版與凹版印刷，是利用油墨與基板接觸的瞬間轉印，所以其印刷品質取決於油墨與基板表面能的關係，印墨並不會 100% 轉移至基板上，會有部分印墨殘留在凹槽或表面，造成印刷情況的改變，另外一個問題是，印墨的高度無法太高，一般來說印墨厚度最厚只能達 10  $\mu\text{m}$ 。

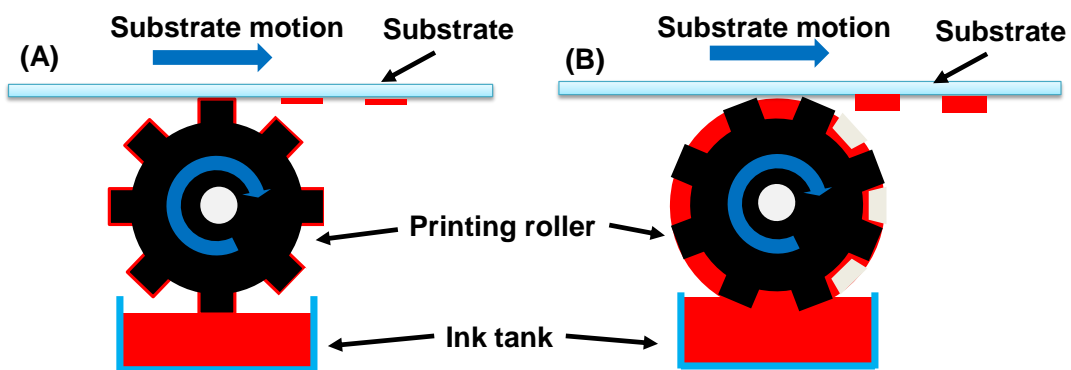


圖 1-11 滾輪印刷示意圖。(A)滾輪凸版印刷示意圖，(B)滾輪凹版示意圖，都是利用滾輪與印刷基板接觸，使圖案轉移至基板上。

## 1.4 印刷漿料

先前有介紹過印刷技術，只要是流體的物質，都可以被當作印墨，一般來說，電子工業所使用的印墨可分為溶劑性印墨、UV 印墨與熱固化印墨，溶劑型印墨的好處是，可以自行添加有機溶劑，去調整印墨的黏度，但是其缺點為，有機溶劑可能會於印刷中揮發，使得印刷條件改變。UV 印墨與熱固化印墨，則因為不含有機揮發物，降低印刷汙染，另外印墨的固化也較為迅速，且印刷時印墨條件不會改變，提升印刷的穩定度。

若是要印刷電子電路圖案的話，由於印刷尺度變得更精細，所以印墨的黏度也必須提高，印刷之最小線寬，與印墨成分與基板種類有極大關係，由於印刷基板基本上除了做表面改質，很難做其他參數調整，所以目前來說有許多研究，是關於印膠的成分改善以及添加物下手。最常見的導電印膠利用樹脂與金屬粉末調成印膠，一般來說，金屬粉末其顆粒大小從  $1\ \mu\text{m}$  至  $10\ \mu\text{m}$ ，由於金屬粉末與樹脂調配混合，金屬粉末並沒有互相接觸，使得印墨並沒有導電特性，印刷後必須再經高溫烘烤步驟，將多餘溶劑去除並且使銀粉燒結，使印墨恢復導電性，這種印刷漿料黏滯性高，所以其特性有別於普通的印墨，對於印刷漿料的挑選，需要考慮其流變性與觸變性。流變性是形容，漿料在刮印時的特性，由於漿料為非牛頓流體，其印刷時漿料的流動特性亦會改變，在受到剪切應力刮印時，其黏度會下降使得漿料可塑性變高，使漿料被刮印至印刷孔內，當漿料要轉印至印刷基板上時，其在與印刷孔脫離時，會受到印刷孔側壁粗糙度所影響，如果側壁粗糙度良好，則印墨可以順利離版，若是離版不順利，除了可能會造成入墨量不足外，印墨邊緣受到太大的磨擦剪應力，使得印墨往外塌陷，降低印刷品質。另外，當印刷尺度小於  $50\ \mu\text{m}$  時，也必須考慮側壁所造成的附著力，附著力太高會造成入墨困難，使油墨無法順利推擠至印刷基版上，圖 1-12 為印墨於入墨孔內受力示意圖，隨著印刷尺度的縮小，側壁所造成的摩擦力與吸附力影響也越大，使漿料在印刷時，無法順利通過入墨孔，達到轉移圖案的效果。

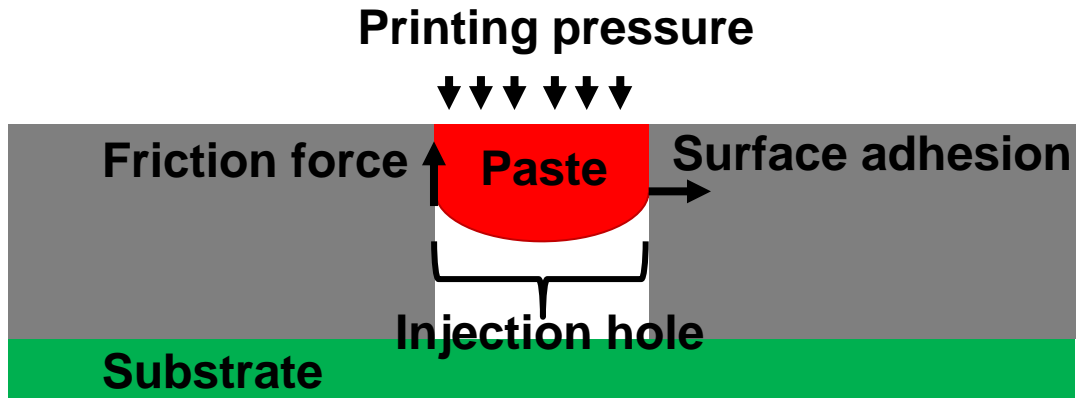


圖 1-12 印墨於入墨孔內受力示意圖。印墨受到印刷力量推擠進入入墨孔中，其會受到表面張力及側壁摩擦力影響，隨著入墨孔尺度越來越小，印墨所受到的影響也會大，造成入墨困難之問題。

當漿料轉移至基板時，接下來就是漿料觸變性的問題，簡單來說就是，印墨在印上基板時，後續的形貌變化，將會受到基板表面能的影響，若漿料的表面張力無法維持原有輪廓，那麼墨層就會塌陷並外擴，圖 1-13 顯示印墨於印刷前後之差異，所以如果印刷基板的表面能低，使得漿料表面張力可以維持住印墨層，等漿料黏度恢復為原本高黏稠型態時，其印墨結構經過固化步驟後，即可定形，漿料不會再流動。具有良好觸變性的漿料，其印刷形貌較接近原本預期樣子，使得印刷精度可以更高，如果基板表面能過高，使得印墨塌陷過於嚴重的話，會導致印刷解析度下降，且印刷厚度與線寬會與預期設定相差不少，形成印刷誤差。也就是說，印刷之最小解析度，與印墨的成份與印刷機版之表面能有極大關聯，除了要成功將圖案轉印於基板上外，印墨必須維持其原本形貌，否則嚴重的擴線情況會產生，導致印刷作業失敗，可以想見，線寬越精細之圖案，其印墨所能維持的最大高度也越低。

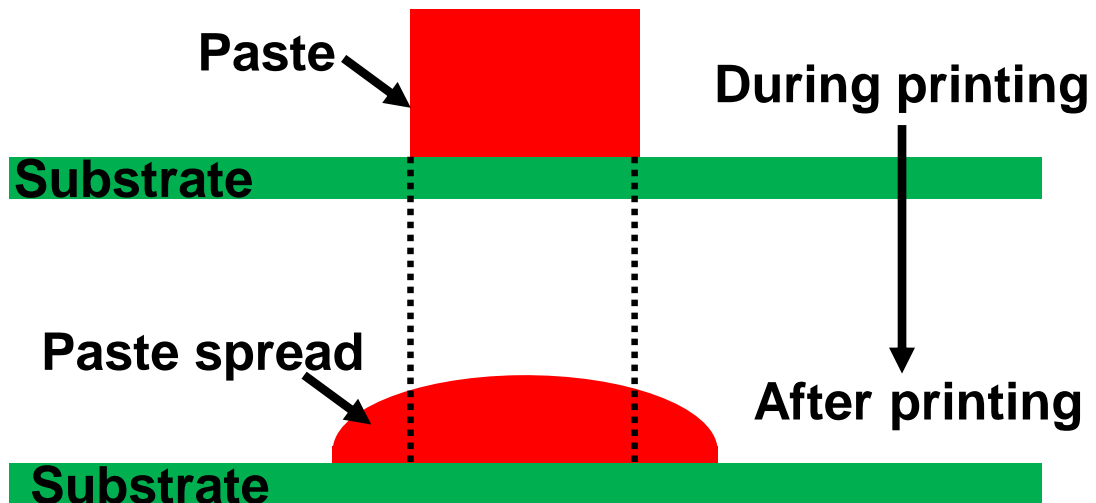


圖 1-13 印墨印刷前後形貌示意圖。印刷時印墨形貌應要與入墨孔一樣，為矩形且側壁垂直之結構，隨著固化及受到基板表面能影響，墨層會塌陷外擴，使印刷圖案與原先預期產生誤差。

## 1.5 印刷基板表面能

另一個印刷需要考慮的因素，便是基板的表面能，若不考慮粗糙度和印墨與基板產生反應，其完完全全就是單純的物理行為，表面能越低的材質，代表材料越疏水，相反地，若是親水性高的材料，其性質越親水。圖 1-14 為液體接觸角示意圖，與液體表面與內部分子內聚力示意圖，透過接觸角量測系統，可以量測到固體面與液體面之切線角度  $\theta$ ，而其大小量值可以利用楊氏公式求得：

$$\gamma_S = \gamma_L \cdot \cos \theta + \gamma_{LS} \quad (1-2)$$

$\gamma_S$ : 固-氣表面張力

$\gamma_L$ : 液-氣表面張力

$\gamma_{LS}$ : 固-液表面張力

$\theta$ : 接觸角



由於分子在不同介面所受的合力不為零，產生表面張力，而由於在無外力作用下，系統會趨向最低能量，表面的分子勢能較高，為了達到低能量的穩定狀態，使表層分子有向內部移動趨勢，所以促使液體縮小其表面積，這也是液珠表面為球形的原因。如果基板表面能夠高，液體與固體之間的附著力提升，使液珠的表面被基板吸引，液珠最後攤平至基板上。由於印刷尺度的減少，當印刷漿料推擠至只有數十微米的印刷孔之中時，會因為側壁所造成的表面張力，大於基板的附著力，導致漿料無法完全離版，使得入墨量不足。若印刷基板的表面能高於印刷孔，印墨自然而然的附著於基板上，以及使更多的印墨附著於基板上，然而，雖然入墨量增加，卻也可能使印墨攤至基板上，導致印刷線寬比預期大，造成印刷誤差，所以為了避免類似事情發生，一般來說印墨之間的間距，都會保持至少一個線徑的間距。而如果印刷基板的表面能，遠低於印刷網版，雖然可能造成入墨量不足，但是因為表面能低，所以印墨不會塌陷，印墨的線徑會與預定相似，使得印刷解析度可以提高，所以如何選擇印刷基板，必須考慮其印刷需求與印墨特性，在印刷解析度與入墨量之中取得最佳值。而藉由接觸角(Contact angle)量測，可以量得液體與固體之間的夾角，利用接觸角可以判斷該固體表面親水或疏水特性，一般來說，接觸角大於  $90^\circ$ ，表示固體表面為疏水特性，而接觸角低於  $30^\circ$ ，則為親水表面。

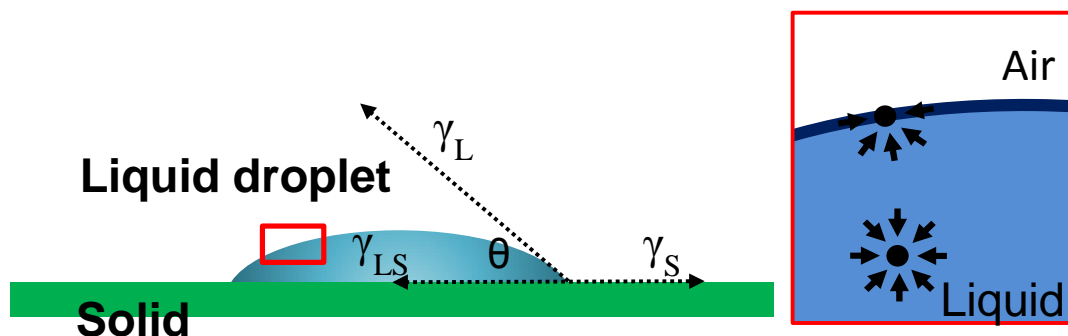


圖 1-14 液體接觸角示意圖與液珠表面與內聚力作用圖。液體滴於固體基板時，當表面能及表面張力平衡時，自然形成接觸角，透過接觸角的量測，可以得知固體基板之表面能大小。



## 1.6 論文架構

### 第一章 緒論

本論文第一章節略述印刷科技的應用，說明目前電子產業仍需要發展歷史相當悠久的印刷科技，透過介紹網版印刷、銅版印刷、噴墨印刷與滾輪印刷四個常見的印刷技術，藉由現有文獻來描述各式技術的優勢與限制。之後，會簡單探討印刷基板表面能與印墨的關係。

### 第二章 動機目的及原理

本章節承接第一章節所介紹的印刷方法，分析現今印刷術所遇到的瓶頸與限制，使得印刷尺度和精度無法有效的下降至 50  $\mu\text{m}$  以下。因此，本研究提出一創新製程結合兩種光阻創造三維電鑄結構，簡單介紹光學微影與電鑄原理，透過設計理念的說明，利用儲墨槽槽和入墨孔結構設計，使得低於 50  $\mu\text{m}$  圖案可以被印刷出來，此外，添加橋樑結構設計，使封閉圖形已能在銅版印刷架構下被印出，改善傳統印刷術所遇到的問題。

### 第三章 材料與實驗方法

本研究利用 LIGA-like 製程來製作印刷用銅版，結合 AZ4620 與 SU-8 兩種正負光阻創造三維結構，利用自行架設噴泉式電鑄槽電鑄鍍結構，並使用實驗室所開發的電漿系統清潔基板表面和增加親水性，使電鑄鍍物表面保持濕潤並減少氣泡產生，且增加兩層電鑄結構之間的接合力，電鑄完成後將銅版上的光阻去除以及打磨側邊不需要的金屬，最後可以利用化學蝕刻方式或是手動完成脫膜步驟。之後，會介紹本研究所使用的印刷機台以及印刷設備和使用的油墨，利用手印的方式在不同的基板上進行試印。

## 第四章 實驗結果與討論

第四章節介紹本實驗的結果，利用掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察鋼版結構，本研究除了利用電鑄製成製作雙層結構鋼版之外，對於微結構進行橋樑支架補強，其拱形開口提供印墨進入，使高密度精細圖案亦可被印刷。此外，分析本研究所電鑄之鍍層品質與電鑄速率，比較有無表面電漿改質之差異，同時利用接觸角系統，分析不同基板之表面能，及表面電漿改質功用。最後利用實際印刷所得到數據，對於印刷線寬 50  $\mu\text{m}$  以下之圖案，進行厚度與寬度的分析，比較於不同基板上的印墨誤差值，與利用橋樑結構印刷鋼版，所印製的超小間距印刷圖案分析。

## 第五章 結論

第五章節將第四章節的實驗結果加以統整，以本研究所開發之高精度印刷鋼版，與傳統印刷技術極限作為比較。最後為未來展望，整理待改善項目及分析未來應用。

## 第二章 動機目的及原理

### 2.1 超細線寬印刷術之挑戰

隨著科技微小化與輕薄短小的趨勢，產品性能亦需要提高，如何在縮小體積的情況下，放入原本固有甚至更多的電子電路元件，便是一項難題，透過昂貴的微機電製程，可以將產品有效縮小，但是成本太高且產量低，無法商品化，透過第一章節對印刷技術的介紹，知道印刷技術其印刷尺寸，可以精細至微米( $\mu\text{m}$ )等級，又由於印刷技術相當快速且便宜，相當合適製造市場千變萬化的消費性電子產品。然而，印刷技術並非如此萬能，傳統印刷技術遇到了瓶頸，傳統印刷所能保證的印刷精度約  $100\ \mu\text{m}$ ，而目前成功商業化的印刷最小尺寸約  $50\ \mu\text{m}$ ，但是要再印刷低於  $50\ \mu\text{m}$  圖案時，遇到許多問題。從第一章節可知道，噴印技術雖然可以利用微機電製程，製作超小孔徑的噴頭，但是受限於其噴墨墨水黏度不能太高，導致印墨層外擴且墨厚太薄等限制。同樣的問題也發生在滾印技術，利用基板表面能將印墨轉移，同樣地印墨層不能太厚，而且其滾輪之間的速度與間距，需要高精度的設計與配合，相較網印與鋼印機台複雜許多。所以，本實驗從探討網印與鋼印技術瓶頸為出發，透過分析兩種印刷技術的限制，提出改善與解決之方法。

#### 2.1.1 網版印刷技術限制

傳統網版印刷技術其最大的瓶頸，就是網布的線徑無法無限制縮小，與先前介紹的開口率有關係，當線徑越小或是開口寬度越大，則可以獲得更好的開口率，其印刷解析度也較好，然而，線徑過小與開口寬度過大，會導致網布強度下降，無法承受印刷時的力量。另外，網版印刷是藉由感光乳膠，附著於網布上來定義印刷孔，線徑過小時，連帶著影響乳膠的附著力，使乳膠結構亦可能在印刷時脫落。除此之外，隨著印刷尺寸越來越小，意味乳膠的開孔區域也越小越密，其結構可能於印刷時受損，同時，也考驗著感光乳膠的曝光解析度，由於乳膠的厚度

無法太薄，所以是否能完美定義超精細圖案，也是一項課題。網版的印刷解析度不佳，代表印刷出來的圖案，會有部分區域圖案不完整，由於受到鋼絲線的阻擋，使得入墨量不足，造成部分區域印刷斷線，若是為印刷導電線路的話，區域斷線等同斷路，所以在印刷作業裡不樂意見到的這種情況，圖 2-1 很清楚的指出線徑的遮蔽效應，當印刷線寬越接近網布線徑時，會有部分區域被網布擋住，當被阻擋區域太多時，印墨便無法轉印至基板，最極端的例子就是，直線圖案的開孔區域，完全被網線所擋住，導致整條線路都無法被印出，另外也可以從印墨立體圖得知，印墨的厚度崎嶇且不平整，也是因為網布的阻擋，雖然印墨成功滲入，但是由於上方有網布，導致印墨層高度不均勻。雖然可以透過事前設計，減少這類問題產生，但是仍無法完全避免部分區域阻擋的問題。

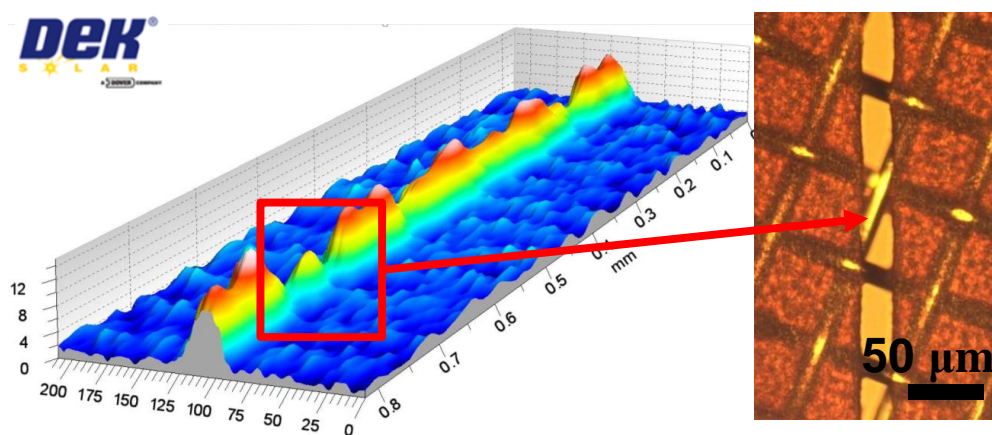


圖 2-1 傳統網版印刷超細線寬之遮蔽效應。當印刷尺度縮小至  $50\ \mu\text{m}$  以下時，鋼絲線便可能會阻擋入墨，造成印刷斷線結果。[42]

精密長條圖雖只有少部分區域會造成斷線問題，但某些特徵圖案，卻無法避免網線阻擋的問題，圖 2-2 為利用線徑  $20\ \mu\text{m}$  與開孔率 58% 的市售網布，其開孔結構為感光乳膠，厚度為  $20\ \mu\text{m}$ 、直徑  $50\ \mu\text{m}$  與間距  $100\ \mu\text{m}$  的  $20\times 20$  點陣圖型，從圖 2-2(A) 可以明顯觀察到，接近 10% 數量的印刷孔受到網布節點阻擋，圖 2-2(B) 點狀圖也告訴我們，單純直線的圖案，可以藉由與網布對位來減少印刷缺陷，但若是印刷區域為轉角、斜線、點狀圖與圓環開孔的話，其印刷缺陷是不可避免的，除非使用更細且開口寬度更大的網布。

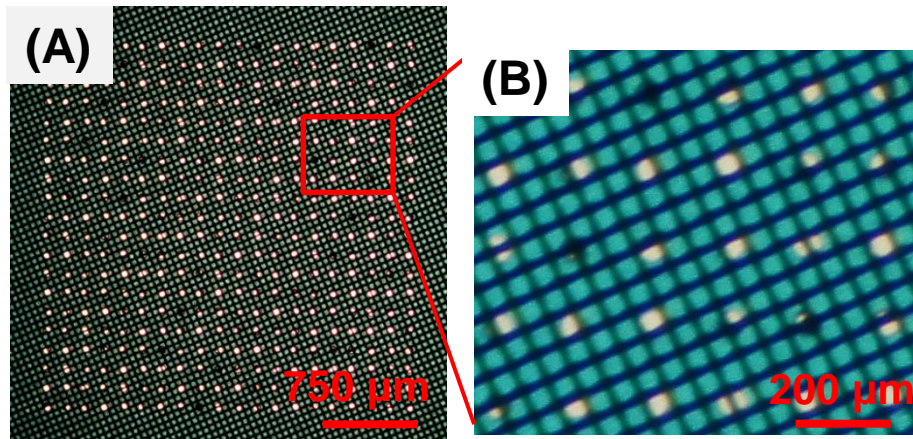


圖 2-2 傳統網版印刷點狀圖之遮蔽效應。(A)直徑 50  $\mu\text{m}$  的 20 $\times$ 20 點陣圖，受到鋼絲線所阻擋，使約有 10% 數量的圖案無法被印出，(B)局部放大圖，顯示鋼絲線的遮蔽效應。

另外一項網印所面臨的問題，是印墨均勻度的問題，從圖 2-3(A)可以觀察到，市售 50  $\mu\text{m}$  線寬與間距 100  $\mu\text{m}$  的標準網版，其印刷結果如圖 2-3(B)表示，很明顯的觀察到印墨至少外擴 20  $\mu\text{m}$  之外，可以發現原本設定為直線的圖案，其印刷結果呈現規律波浪狀，很明顯波浪紋的圖案，是來自不均勻入墨所造成。由於印墨透過網線之間的開口入墨，圖 2-3(A)兩紅圈處觀察到，上方紅圈處的直線開口邊緣，有少部分區域可以入墨，然而，下方紅圈處的直線邊緣，卻剛好被網布所擋住，使得入墨量有了差異，造成波浪狀圖紋的產生。這也是為什麼網版印刷技術，其印刷間距無法有效縮小的原因，由於入墨量的不均勻，會有週期性區域產生擴墨，為了避免擴墨彼此之間連接，其印刷間距必須要設計大一點，才能保證其印刷作業順利完成。乳膠邊緣與網布所形成的小開口，除了會造成印墨不均勻之外，同時也可能會殘留印墨，再清洗網版時候不易清除乾淨，導致下次印刷時印刷精度下降，甚至造成塞版，使印墨無法通過。



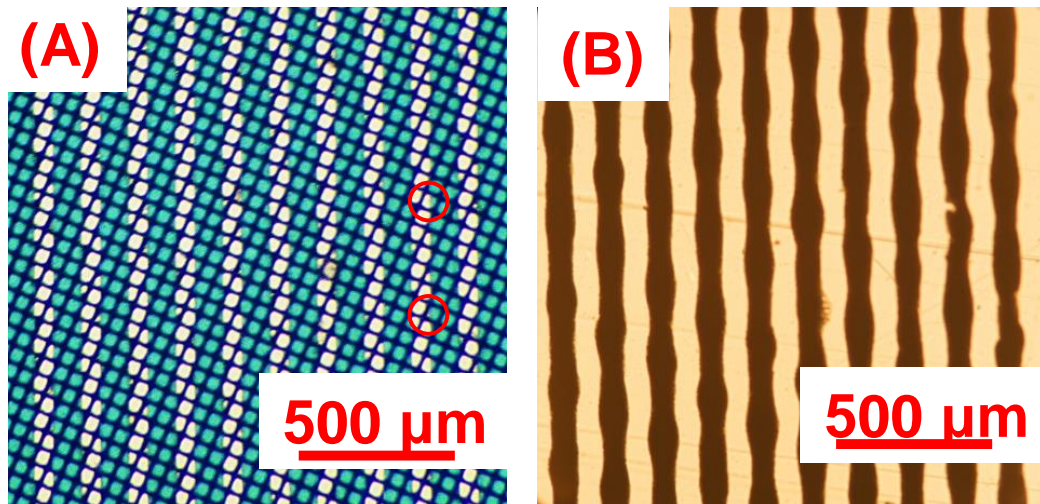


圖 2-3 傳統網版印刷技術之波浪紋。(A)市售線徑  $20\ \mu\text{m}$  之網布，其乳膠開口寬度為  $50\ \mu\text{m}$ ，印刷間距為  $100\ \mu\text{m}$ ，(B)為實際印刷結果，波浪紋的產生來自於網布的入墨不均勻。

### 2.1.2 鋼版印刷技術限制

鋼版印刷技術由於沒有網布，所以其印刷時不需要考慮開口率問題，理論上其印刷解析度優於網版印刷，但是，鋼版印刷的最小線寬與間距仍然只有  $100\ \mu\text{m}$ ，最主要原因，是因為印刷鋼版的厚度，為了能夠支撐印刷的應力，普遍的印刷鋼版厚度必須為  $100\ \mu\text{m}$  以上，相較印刷的線寬大上許多。首先，鋼版越厚，印墨高度也就越高，厚墨導致墨層塌落，使得印刷解析度下降，再來，過小的線寬可能無法被印出，因為隨著孔隙越來越小，入墨也跟著越來越困難，受到細孔當中的表力張力影響，使得墨層無法有效的通過，造成漿料塞孔之現象，一般來說，開孔寬度必須要大於鋼版厚度，印刷漿料才能順利通過印刷孔，使用稀釋過的漿料可以減少入墨難度，但同時也犧牲了印刷解析度會。另外一個鋼版印刷的限制，便是無法印刷封閉圖案，因為沒有結構的連結，所以如同心圓這類圖案無法有效被印出，而鋼版印刷技術另一個限制，便是其製程費用相較網印貴上許多，普遍來說都是印刷厚且簡單的圖案，過於精細且薄的鋼版，因為其使用壽命低，考量其成本效益，較少被業界使用。而鋼版印刷還有一個致命缺點，由於金屬之表面

能相對於高分子材料高，所以在印刷過程當中，印墨會更容易滲入鋼版底部，使得印刷圖案線寬會比預期大很多，必須要停止印刷作業，重新清洗印刷鋼版底部才能進行印刷作業，若能有效對印刷鋼版底部進行疏水改質，有利於提升印刷精度與印刷壽命。

## 2.2 研究動機與目的

傳統的印刷技術於精密尺度印刷，其最小線寬與解析度只能到 50  $\mu\text{m}$ ，噴墨技術雖然透過縮小噴嘴，使印墨液珠縮小至 10  $\mu\text{m}$  大小，但是由於其墨水黏度不能太高，墨層會外擴且不利於厚墨沉積，而噴墨技術的印刷速度，相較網印與鋼印的大面積印刷，其產量是完全無法相比。網版印刷技術則是受限於網布線徑，為了維持網布的平整度，印刷前必須將網布繃緊，使得印刷時網布可以維持其張力，一旦有網線斷裂，可能會造成網布張力失衡，導致網布整片被撕裂，其使用壽命有限，雖然能藉由特殊金屬鋼絲網，編織線徑更細的網布，但是仍無法有效解決阻擋效應，此外，超精細圖案印刷時入墨量不足外，印出圖案邊緣容易觀察到波浪紋理，解析度不甚理想。且印刷孔徑縮小，感光乳膠層強度亦需要考量，其附着力與光感度都有待加強，由於乳膠厚度不能太薄，使得網版印刷很難印出薄膜結構，是其另一項缺點。而鋼版印刷因為沒有網布限制，所以理論上印刷精度最高，然而傳統印刷鋼版較厚，導致無法印刷精細圖案，其製作成本高和無法印刷封閉圖案，也是其問題之一。

本研究利用創新製程，結合兩種光阻與電鑄製程，製作多層結構印刷鋼版，分別利用 AZ4620 與 SU-8 兩種光阻，定義入墨孔與儲墨槽結構，創造階梯印刷鋼版，幫助印墨均勻入墨與提升印刷精度，其印刷鋼版總厚度只有 30  $\mu\text{m}$ ，透過精密電鑄系統，電鑄成型低應力鎳金屬薄版，其表面平整且孔徑側壁粗度佳，而鎳金屬的機械性質良好，使印刷鋼版可以抵抗刮印力量，因為電鑄厚度不高，所以大量減少其製程花費與時間。此外，本實驗添加橋樑結構於階梯鋼版當中，對於高

密集與封閉圖案進行支架補強，連接密集線路與封閉圖案，增強結構強度，使得印刷鋼版使用壽命提升。最後利用手印方式，於 PET、鐵氟龍與玻璃上印刷圖案，驗證本研究印刷鋼版之印刷精度。透過此研究提供一個簡單、快速且低成本的創新製程，製作一超薄高精度印刷鋼版，提升入墨效率與印刷解析度，達成更小線寬與圖案間距之印刷，並且印刷微米等級薄膜。

## 2.3 光學微影

光學微影(Photolithography)可以說是半導體製程與微機電製程當中，最重要且不可或缺的製程之一，其目的在於將設計之圖案如電路導線，轉移至基板上，待後續製程完成時即可移除，此外，光阻除了當作犧牲層功能外，亦可以當作為結構主體，如微透鏡或微製動器。光學微影之基本三大步驟為:光阻覆蓋、曝光與顯影，透過光阻(Photo-sensitive material)、光罩(Photo mask)與光源(Light source)定義結構圖案，供後續蝕刻、金屬化、電鍍與薄膜沉積製程得以進行。

### 2.3.1 光阻

光阻為一種感光材料(Light-sensitive material)，利用光罩阻擋不分區域短波長光源，使光學圖案轉移至基板上，與照像用的底片類似，值得注意的是，光阻雖然對光很敏感，但是其不會與黃光反應，進行光學微影時，室內都使用黃光照明，故稱為黃光微影技術。

一般來說，光阻可以分為正光阻(Positive photoresist)與負光阻(Negative photoresist)兩種，以正光阻而言，其成分主要為酚醛樹脂，曝光前就已經是交鏈狀的聚合物，經由紫外光照射之後，曝光區域的聚合鏈結便被打斷，使光阻更容易被顯影劑所溶解，而未曝光的區域便保留於基板上。而負光阻其特性與正光阻相反，只有曝光區域才會建立光阻內部鏈結，負光阻顯影液成分主要為二甲苯，能夠溶解未曝光區域之光阻，負光阻成分多為環氧樹脂型，固化後的負光阻其結構



強度且耐化學溶劑，可直接當作為結構元件由於顯影時交鏈區光阻會吸收顯影劑，使得光阻結構膨脹而影響解析度，所以若要定義精細圖案，正光阻解析度會略優於負光阻。本研究使用兩種光阻，正光阻 AZ4620 與負光阻 SU-8 50，AZ4620 光阻其最小線寬可達 2  $\mu\text{m}$ ，旋塗厚度可從 1  $\mu\text{m}$  至 20  $\mu\text{m}$ ，圖 2-4 為 AZ4620 光阻轉速與厚度關係表，因光阻附著力好，製程簡單又快速，非常適合定義精細微結構，然而，AZ4620 光阻不耐浸泡於有機溶劑與鹼性溶液中，在長時間的酸性溶液中浸泡，也會使其光阻結構受損，但也代表，AZ4620 光阻相當容易被去除乾淨。

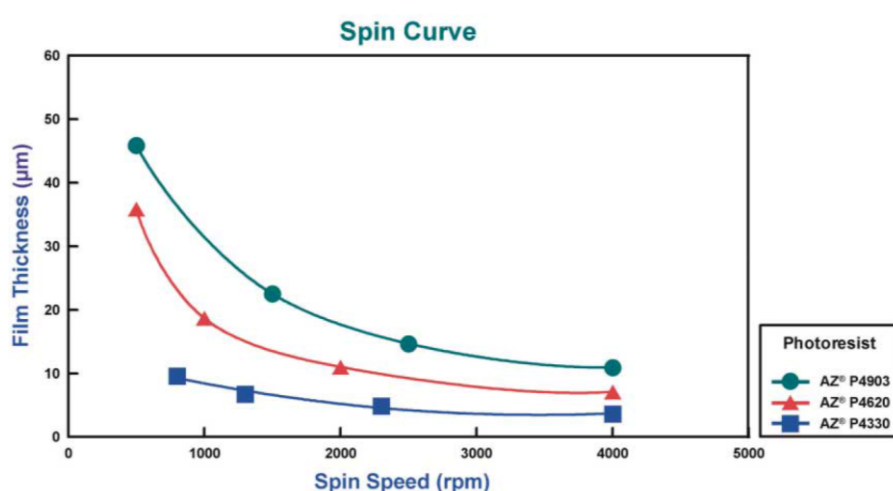


圖 2-4 AZ4620 光阻轉速與厚度關係圖。調整塗佈機的轉速，控制光阻之厚度。[43]

SU-8 為一種環氧樹脂形的負光阻，其具有良好的機械性質，其 Young's modulus 高達 4 GPa，以及良好的抗化學腐蝕，透過改變 SU-8 內部的固體含量，調整光阻黏度大小，使 SU-8 光阻塗佈厚度可從數百奈米至微米等級，圖 2-5 為 SU-8 光阻轉速與厚度關係表。SU-8 曝光前的玻璃轉移溫度約為 50°C，光阻塗佈於基板上後，加溫至超過其玻璃轉移溫度時，SU-8 光阻便會緩慢的攤平，使光阻表面相當平整且平滑，由於 SU-8 具有極佳的光穿透性，代表縱使光阻很厚，但是整體光阻都可以均勻受到的曝光，使其可以創造出高深寬比且側壁垂直性佳之結構，然而，其良好的附著力與抗化學腐蝕力，卻也是其一大缺點，那就是非常不容易被去除，除了用外力去強制剝除外，很難有化學溶劑能有效溶解固化後的 SU-8 結構。

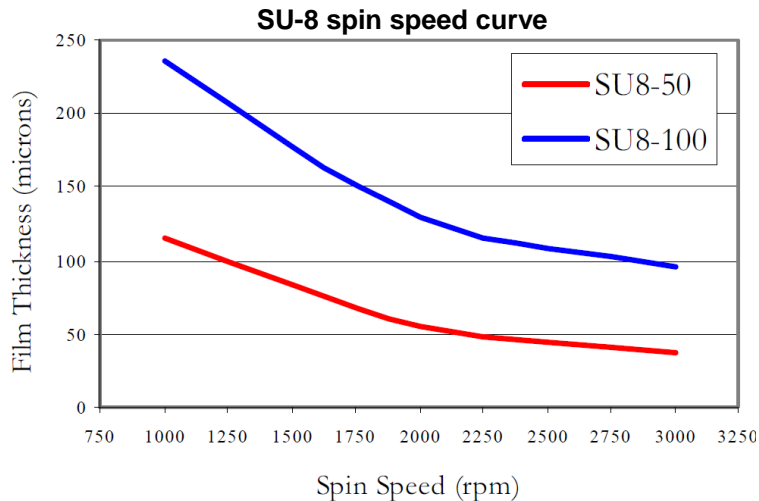


圖 2-5 SU-8 光阻轉速與厚度關係圖。調整塗佈機的轉速，控制光阻之厚度。[44]

## 2.4 電鑄基本原理

電鑄的基本原理為，將被鍍物夾持於陰極，而陽極則為欲鍍金屬，於電鍍液通與電流，使鍍液當中的帶正電的金屬離子，還原至被鍍物上，而鍍槽內的金屬離子則由陽極金屬補充。當電鑄尺度縮小至微米等級時，鍍液會因為內聚力的關係，無法完全浸潤至微結構內，導致電鍍效率低落，鍍物表面產生大量氫氣泡，使電鑄結構品質下降，且可能產生氣穴結構。傳統上有兩種解決方法，1.在電鍍液當中添加介面活性劑，降低鍍液表面張力，幫助鍍液更容易滲入微結構當中，但是可能會影響電鑄性質，以及增加鍍槽維護困難。2.則是可以利用攪拌或是超音波震盪機，幫助鍍液滲入細孔之中，另外也可以幫助氫氣泡離開被鍍物表面，提升鍍層品質。由於本實驗電鑄最小線寬達  $10\ \mu\text{m}$ ，為使減少氫氣泡的產生，必須要增加電鑄物表面的濕潤性(Wettability)，藉由大氣電漿對鍍物表面的親水改質，不必添加額外界面活性劑即可達到濕潤效果。此外，電鑄前除了確保鍍物表面濕潤性外，溫度也是一項重要的參數，電鑄時若鍍物與鍍液溫度落差太大，亦會影響電流效率與品質，所已將鍍物浸入鍍槽內時，要等待鍍物與槽內溫度相等，再進行電鑄程序。

電流密度則是另外一項重要的電鑄參數，直接關係到金屬沉積速率和電鑄品

質，電流密度高雖然沉積速率快，但是會因為氫氣泡的產生，造成電鑄物表面產生氣穴。為了縮短製程時間與兼顧電鑄品質，開始電鑄時，先以 0.5 ASD 緩慢沉積一層品質良好且緻密的金屬層，然後，慢慢將電流提升至 1.0 ASD、2.0 ASD 與 3.0 ASD，藉由漸進式的提升電流，確保不會因為突然加大電流而產生氫氣泡。不同的金屬電鑄速率亦不同，與金屬的原子量及價數有關係，透過法拉第電解定律得知，電鑄沉積量與電極的電量成正比，可以推算其沉積重量，方程式如下：

$$Q = I \times t \quad (2-1)$$

Q:電荷量(C)

I:電流(A)

t:時間(s)

承 2-1 式，接著利用法拉第電解定率：

$$W = \frac{I \times t \times M}{n \times F} \quad (2-2)$$

W:電鑄沉積重量(g)

M:分子量 (鎳:58.7)

n:價電子數 (鎳:2)

F:法拉第常數 96487 C/mol

鎳的分子量為 58.7、價電子數為 2、密度約為 8.9 g/cm<sup>3</sup>，將已知數帶入後，可以推算其理論電鑄厚度，而電鑄鎳的沉積速率公式可簡化如下：

$$T = 0.034 \times \eta \times ASD \times t \quad (2-3)$$

T:電鑄層厚度(μm)

η:電流效率

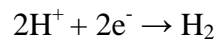
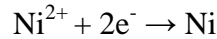
ASD:電流密度(Ampere/dm<sup>2</sup>)

t:時間(s)

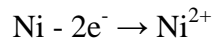
良好的電流效率約為 0.95，可以大約推得，當電流密度為 1 的時後，其每小時可以沉積約 12 μm 厚的鍍層於基板上。

## 2.4.1 氨基磺酸鎳

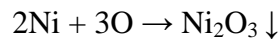
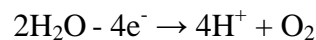
鎳為具有銀白色光澤的金屬，其硬度相當高且耐磨耗，具些微延展性，最重要的是，鎳金屬其鈍化能力很強，會在表面迅速生成鈍化層，使鎳金屬非常穩定且抗化學腐蝕能力強，因為其鍍層均勻度好，電鍍結晶小，鍍面可以做拋光處理，適合用於表面電鍍處理，與電鑄高深寬比的結構。其陰極基本反應式如下：



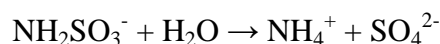
陽極使用可溶性純鎳板(>99.98%)，理想情況下，電解時陽極鎳板會溶解成鎳離子，以補充電鍍槽內所消耗的鎳離子，其陽極反應式如下：



但是由於鎳板會於電鍍時鈍化，於鎳板表面沉積一層褐色氧化膜，導致無法有效補充鎳離子，並且析出氧氣，其反應式如下：



一般來說，硫酸鎳電鍍與氨基磺酸鎳電鍍最為常見，硫酸鎳電鍍又稱為瓦茲浴鎳(Watts nickel plating)，因為其便宜且鍍槽維護簡單而廣受使用，但是由於其鍍液雜質含量高，導致鍍層內應力較高。內應力的殘留，可能會使微結構產生變形，導致結構無法如原本預期成型，而氨基磺酸鎳電鍍(Nickel sulfamate)所沉積的鍍層，其內應力低、硬度高與較柔軟具高延展性，由於其能提供高鎳離子濃度，所以沉積速率快且具較佳的深度能力，藉由添加藥品或改變操作條件，使電鍍層特性改變，所以氨基磺酸鎳相當適合用於微結構之電鑄，其缺點為鍍槽對雜質敏感，日常的鍍槽維護保養相當重要。氨基磺酸鎳電鍍的最佳操作條件以及添加物，當溫度提升時，可以減小液體表面張力，當溫度高於 $50^{\circ}\text{C}$ 表面張力便無明顯減少，溫度高於 $70^{\circ}\text{C}$ 容易使氨基磺酸根離子水解，其水解方程式為：



造成鎳層內應力提高，而溫度低於 27°C 時，其鍍層含氫量會提高，造成氫脆，導致金屬層破裂，所以一般氨基磺酸鎳電鍍溫度控制為 50°C 左右。而 pH 值則需要控制在 3.5~4.5 之間，才能得到較好的低應力鍍層，當 pH 小於 3 時同樣容易使氨基磺酸根離子水解，而 pH 值高於 5.5 時容易沉澱氫氧化鎳，影響鍍層性質，透過添加硼酸，可以使其變成緩衝溶劑，使 pH 值可以有效控制，維持鍍層析出特性與品質，另外，硼酸於電鍍作業時會慢慢流失，硼酸含量過低時，會造成鍍物生成霧狀表面，所以要適當的補充硼酸。另外還會添加少量溴化鎳至鍍槽內，鹵素元素如 Cl、Br 與 I 可以有效抑制陽極鈍化，同時可以增加導電度並提高拋光力。最後便是雜質的影響，有機雜質可以利用過濾系統進行清除，大部分會影響鍍層品質的是金屬雜質，其會影響到電流效率以及鍍物表面形貌，使鍍物表面粗糙度差，甚至有可能產生鍍層剝離。

## 2.5 鋼版製作方法

本研究利用黃光微影與精密電鍍系統製作高精度印刷鋼版，其原因有三，首先，黃光微影製程利用光阻定義圖形於基版上，其最小尺度結構可達次微米等級，相當適合定義印刷孔結構，利用市售玻璃當作基版，小面積製作高精度印刷鋼版，並使用解析度達 10  $\mu\text{m}$  的便宜膠片光罩，大幅降低其製程時間與成本，透過自行設計光罩圖案，於鋼版上定義不同線寬與形狀之印刷孔，使後續印刷測試時，一次印刷便得到許多數據回饋，做為下次光罩設計參考，節省許多時間與金錢花費。再者，微電鍍系統完美的將微結構成型，其具有良好的表面粗糙度與機械性質，且因為本研究之印刷鋼版厚度只有 30  $\mu\text{m}$ ，印刷鋼版輕薄短小並具可撓性，提供絕佳印刷條件。相較於雷射切割與化學蝕刻法，電鍍法其設計條件更為彈性且更為精準，透過調整微影製程與電鍍參數，自由創造出不同幾何形狀與深寬比的結構，更重要的是，可以輕易的創造出多層結構印刷鋼版，因此本研究選用電鍍法成型高精度印刷鋼版。

## 2.6 設計原理

為了能改善傳統印刷限制，本研究透過階梯鋼版來提升印刷精度，其結構剖面圖如圖 2-6，可以從剖面圖觀察到，本研究印刷鋼版可分為四層結構，最底層為玻璃基板，待印刷鋼版主體完成後，便會從玻璃上離型，脫離玻璃基板，原則上玻璃基板經過清洗後可以重複利用，節省材料使用。第二層為利用磁控濺鍍系統，所沉積的電鑄種子層，平整的玻璃基板提供絕佳濺鍍平面，厚度約 200 nm 的種子層得以連續成金屬膜，降低總阻抗，以利後續電鑄製程進行。接下來是入墨孔與儲墨槽結構的設計，入墨孔又可稱為印刷孔，其定義了印刷圖案及印刷厚度，從先前的印刷限制可知，當印刷尺度越小時，其印墨能否順利入墨是一大課題，入墨孔厚度越厚會產生兩個問題，其一，印墨會受到側壁表面張力影響，無法順利入墨，其二，印墨孔的高度與印墨高度成正相關，當印墨越高時，墨層越容易塌陷，使印墨線寬變粗，影響印刷精度。而傳統的印刷鋼版，印刷鋼版厚度至少要達 100  $\mu\text{m}$ ，才能維持其必要強度，大幅限制了印刷解析度，本研究採用階梯式鋼版結構，利用 AZ4620 光阻定義精細入墨孔結構，入墨孔厚度控制在 2  $\mu\text{m}$  至 6  $\mu\text{m}$ ，且使得印墨層可以很薄，提升印刷精度，另外，利用 SU-8 光阻定義較厚的儲墨槽結構，透過儲墨槽的設計，印墨先填滿至儲墨槽內，藉由刮刀推擠作用，使儲墨槽內的印墨，均勻且緩慢的推入入墨孔當中，更可以保護精細的入墨孔結構，印刷時刮刀只會與儲墨槽表面接觸，避免刮印時造成入墨孔結構損壞。如此簡單的設計，使印刷鋼版不但精細且薄，更可以維持其結構強度，延長其使用壽命。而本研究增加一橋樑結構設計，於連結入墨孔結構之設計，除了增加結構強度之外，藉由橋樑結構來連接封閉圖案結構，使得印刷鋼版也能印刷出封閉圖案。

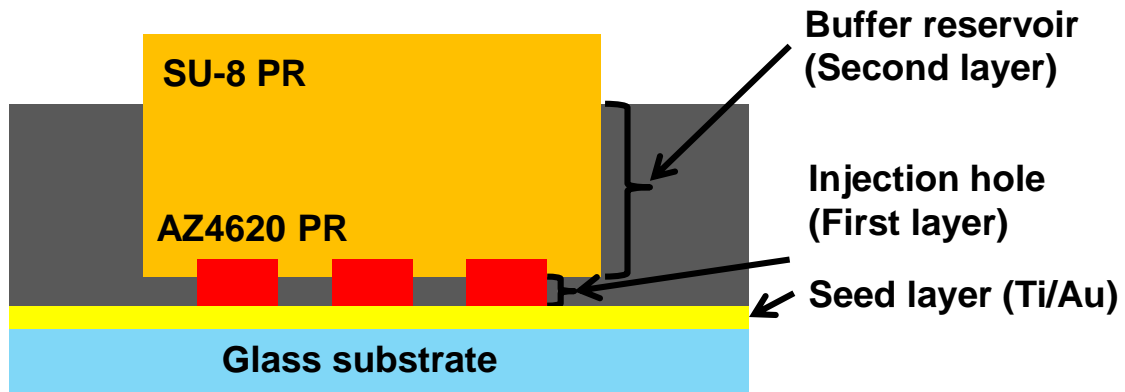


圖 2-6 儲墨槽與入墨孔之印刷鋼版剖面圖。藉由兩種光阻分別定義儲墨槽與入墨孔結構，超薄之入墨孔利於印刷超精細圖案，儲墨槽的設計可以提升入墨效率，並且提供均勻且充足的入墨量，更可以保護入墨孔結構，減少入墨孔印刷時所承受的應力，增加印刷鋼版使用壽命。

## 2.7 製程挑戰

本研究其目的為改善傳統印刷技術所遇瓶頸，發展一創新製程，結合兩種光阻與電鑄成型階梯狀印刷鋼版，微結構成型製程技術已發展一段時間，目前要創造微米甚至奈米等級的結構並非難事，但是要將不同光阻堆疊起來，創造多層結構那便是一大挑戰，考慮到其操作條件以及光阻接合力，傳統研究都採用相同成分光阻，進行多層結構製作[45-47]。另外，多層微結構電鑄亦是一大難題，需要考量氫氣泡產生以及鍍層內應力，避免氣泡產生的氣穴造成微結構損壞，金屬內應力也會影響到微結構的成型，若其內應力過大，在釋放結構的同時，會導致結構產生翹曲，使結構受到影響，另外一項問題則是，多層金屬之間的附著力，若多層金屬之間的附著力不佳，同樣地在釋放結構時，會導致金屬層之間剝落，造成結構的損毀[48]，如何能夠完美的使金屬結構剝離(Lift-off)亦是一大考驗，光阻必須要完全的去除，才能確保結構不被影響，且由於本研究的微結構，多為精細長條金屬結構，必須避免吸附(Stiction)效應的產生[49, 50]，否則一旦產生吸附效應，那麼印刷鋼版將會損壞。

## 第三章 實驗與方法

本章節將介紹實驗的創新 LIGA-like 製程、大氣電漿系統、接觸角量測系統與印刷所使用器具與材料；其中本實驗藉由自行設計多種的光罩圖案，利用多次的黃光微影以及電鑄成形去創造不同種類多層結構，利用手印方式將銀膠印至不同基板上，將一併描述之。

### 3.1 雙層印刷鋼版製作

本節介紹的利用 LIGA-like 製程所製作的印刷鋼版，LIGA 微加工技術是利用光刻、電鑄與模造成型技術製作微機電系統元件。為了使非導電玻璃基板能進行電鑄製程，本實驗使用磁控濺鍍(Sputter)系統沉積電鑄種子層，首先於市售載玻片 ( $76 \times 26 \times 1.2 \text{ mm}^3$ , 詠欣儀器, 台灣) 基板上濺鍍膜厚 50 nm 的鈦(Ti)金屬當作附著層，此鈦金屬也可作為最後脫模步驟使用的犧牲層，濺鍍完附著層後隨即濺鍍一層 50 nm 的金(Au)當作電鑄種子層，其良好的導電特性可以使後續為電鑄製程得以順利進行。黃光微影製程先以正光阻 (AZ4620, 安智電子材料, 台灣) 定義約 8  $\mu\text{m}$  高的光阻微結構後，利用微電鑄系統電鑄成型第一層微結構，接下來使用負光阻 (SU-8 50, Micro-chem Inc. USA) 定義更寬且高約 50  $\mu\text{m}$  的光阻結構，第二層 SU-8 結構會完全覆蓋住第一層光阻結構，並且再次進行電鑄製程，可以得到如概念設計圖之雙層結構，利用 PG remover (Micro-chem Inc. USA) 去除掉光阻。最後可以利用濕蝕刻或是剝除法來進行脫模，得到雙層結構的印刷鋼版。實驗以結合兩種光阻來電鑄成型雙層印刷鋼版，其步驟於 3.1.1 節所詳述，其製程圖如圖 3-1 所示。



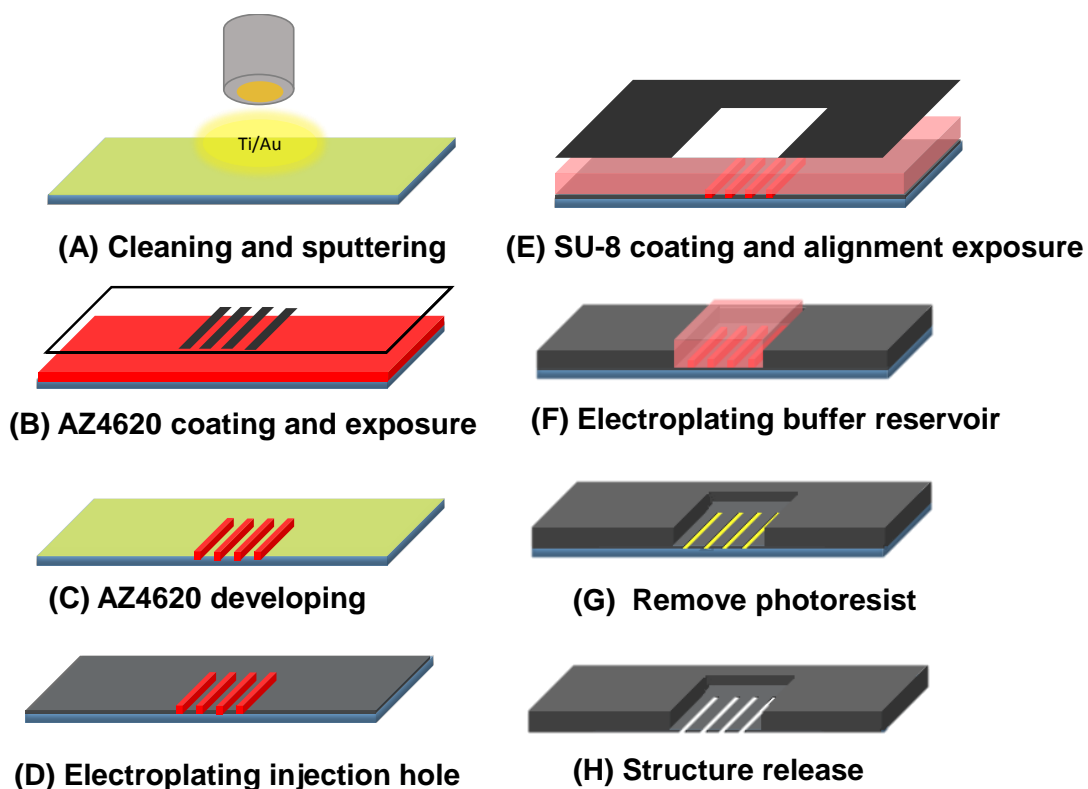


圖 3-1 雙層結構印刷鋼版製程示意圖。(A)於清洗完畢之玻璃基板濺鍍電鍍種子層，(B)塗佈光阻並用膠片光罩定義入墨孔結構，(C)利用顯影液將曝光區域的光阻顯影，並且利用電漿改質與清潔表面，(D)電鍍第一層金屬結構，即入墨孔，(E)旋塗 SU-8 光阻定義儲墨槽結構，經過軟烤後利用光罩對準後曝光，並利用顯影液移除未曝光區域光阻，(F)同樣先以電漿清潔與改質表面，之後進行第二層金屬結構電鍍，(G)使用 Remover PG 移除 SU-8 光阻，用丙酮清洗表面及移除 AZ4620 光阻，(H)將完成結構從玻璃基板脫離。

### 3.1.1 LIGA-like 製程

#### 1. 基板清洗與濺鍍

將市售玻璃基板以 Piranha 溶液清洗，其成分為硫酸(96%，景明化工，台灣): 雙氧水(31%，景明化工，台灣)為 3:1 之體積比調配而成，確認沒有玻璃互相堆疊後將溫度升至 200°C，在煮沸的 Piranha 溶液中靜置約 15 分鐘後撈起，以去離子水 (DI water) 完全沖洗表面後，利用氣槍將玻璃基板表面的水滴吹去。之後，將玻璃

基板放置於溫度 110 度°C 的加熱盤上靜置 5 分鐘，藉此完全去除表面之水氣。

接著將清洗完畢的玻璃基板置入磁控濺鍍腔體中進行濺鍍步驟，為確保鍍膜品質，腔體會先抽真空至  $6 \times 10^{-6}$  Torr 後才進行濺鍍動作，濺鍍時通入氬氣(Ar)並維持在 5 mTorr 壓力環境下，先濺鍍一層厚度約 50 nm 之鈦金屬附著層，之後再鍍上一層厚度約 50 nm 的金薄膜作為電鑄種子層。

## 2. 第一道黃光微影：

入墨孔結構選擇利於定義精細長條結構的 AZ4620 光阻，其為一種正光阻，照到 UV 光的區域將被顯影液去除。首先，將鍍好種子層的玻璃基板以旋轉塗佈機旋塗上 AZ4620 光阻。利用滴管汲取適量光阻滴至玻璃基板上，並以軟刮刀均勻塗抹光阻使其在玻璃基板上平均分佈，其目的在於減少邊珠效應(Edge bead effect)以及使光阻旋塗時厚度更能平均，如果表面有氣泡產生則以滴管將氣泡吸走。旋塗分為兩階段，第一階段以 1500 rpm 維持 10 秒，再以 2500 rpm 維持 30 秒，藉此達到預期的均勻厚度。光阻塗佈完成後，將基板靜置於 100°C 的加熱盤上 3 分鐘進行軟烤步驟，烤去光阻內大部分的有機溶劑並且建立曝光特性，之後將加熱盤溫度慢慢降至室溫，即可進行曝光動作。曝光時將光罩正面蓋於玻璃基板上，並且用一塊透明玻璃壓於光罩上方，使光罩與基板完整貼合減少繞射現象。之後將曝光後的基板浸泡於顯影液 (AZ400K, 安智電子材料, 台灣):去離子水體積比為 1:3 的溶液當中，顯影完成後將基板撈起用去離子水清洗並用氣槍將水氣吹除，最後將基板置於 150°C 的加熱盤上進行硬烤 10 分鐘，除了將剩餘水氣與有機溶劑烤除外，也可以增加光阻結構與基板之間的附著力。

## 3. 第一層電鑄結構

將精細的正光阻結構定義於基板上後，便開始進行微電鑄製程，本實驗使用噴泉式電鑄系統來電鑄鍍金屬結構，電鑄前處理為利用本實驗室的大氣電漿系統進行基板的清潔及親水改質，使基板浸泡在電鑄液時可以增加其濕潤性，電鑄槽溫度控制在 50°C，電鑄前將電鑄物浸泡至電鑄槽內約 15 分鐘，待電鑄物與電鑄槽溫度平衡時才開始施加電流。本實驗的電鑄電流都是先以 0.5 ASD 的參數慢慢上

升至 3.0 ASD，其目的在減少氫氣泡產生又能得到高品質電鑄成果，電鑄厚度可依不同設計所調整約 2  $\mu\text{m}$  至 6  $\mu\text{m}$ 。電鑄完成後將電鑄物撈起置入去離子水容器內清洗，經氣槍吹去水滴後，再加熱至 100°C 去除表面水氣，方可進入下一個步驟。

#### 4. 第二道黃光微影

結束了第一層金屬結構電鑄程序後，基板再次進行黃光微影製程，本實驗使用 SU-8 光阻來定義儲墨槽結構，旋塗光阻前同樣使用刮刀將 SU-8 均勻塗抹在基板上，之後一樣使用兩段轉速來旋塗厚度 50  $\mu\text{m}$  的光阻。然後將旋塗完光阻的基板置於 50°C 的加熱盤上，以 3°C/min 的速率將溫度緩慢的上升至 95°C，靜置 4 小時完成，然後將加熱盤電源關閉，使其自然降溫至室溫 25°C 完成軟烤步驟，SU-8 在軟烤的時候表面會自然的攤平，不需額外平坦化步驟。接下來將光罩對位後曝光，SU-8 曝光後需要曝後烤程序，將曝完光的基板放置於 60°C 的加熱盤上 30 分鐘，讓光阻固化更完整並且消除駐波效應(Standing wave effect)，使顯影後的光阻結構附著性佳而且具有垂直側壁，顯影完畢後利用丙酮(Acetone)、酒精(Ethanol)和去離子水清洗顯影液，使用顯微鏡觀察光阻是否有對準，如果沒有沒有如預期中對準，則將光阻洗掉重新定義圖案。確認 SU-8 結構對準後，以超劑量的曝光量將剩餘光阻固化，並以 100°C 加熱 10 分鐘使水氣與有機溶劑去除。

#### 5. 第二層電鑄結構

與電鑄第一層結構相同，電鑄前處理為大氣電漿的清潔與改質，使電鑄表面相當乾淨且富親水性，同樣地將電鑄物置入電鑄槽內 15 分鐘，電鑄時同樣先從低電流(0.5 ASD)開始沉積品質良好之鍍膜，接下來慢慢將電流提高至 3.0 ASD 開始快速沉積，此步驟之電鑄厚度約為 20  $\mu\text{m}$ 。電鑄完成後將電鑄物撈起清洗烤乾，進入光阻去除與銅版脫模步驟。

## 6. 光阻去除與結構離型

SU-8 光阻雖然具有相當好的深寬比且結構強健，但是要去除確相當不易，本實驗利用 Micro-chem 公司所生產的 PG remover 來去除 SU-8 光阻，將光阻結構浸泡至 PG remover 溶液內並加溫至 75°C，浸泡時間為一至三天視光阻結構而調整，可利用超音波震盪機來震落 SU-8 結構，若無法震落則需再繼續浸泡。待光阻完全剝除後，使用丙酮沖洗基板表面帶走 PG remover，同時丙酮也可以將第一層光阻 AZ4620 完全去除，之後再用酒精及去離子水沖洗即完成光阻去除動作。鋼版離型前，利用旋轉砂紙機將金屬邊緣磨光，移除溢鍍於基板側邊的金屬，使後續離型製程可以順利進行。本實驗的離型步驟可以利用化學蝕刻和直接剝除兩種方法，濺鍍製程有提到使用鈦金屬當作金屬附著層，同時也可以當作離型用的犧牲層，利用稀釋(1.0M)的 HF(氫氟酸)溶液來快速蝕刻鈦金屬層，使電鑄模具與基板可以分離；而另外一種剝除法則是直接利用夾子將金屬模具從玻璃基板上撕起，雖然相較化學蝕刻法簡單且安全，但是若撕起的力道不均勻可能會使微結構受損。兩種方法都可已成功離型，取決於該鋼版微結構強度之強度來取捨。

## 3.2 創新橋式輔助入墨印刷鋼版製作

本研究除了成功製造雙層結構的印刷鋼版之外，同時也對於製程加以改良，由於第一層入墨孔結構強度相對不足，若是印刷圖案需要密集且精細的話，入墨孔結構強度可能會不足，造成微結構之間的吸附效應。同時，先前提到的鋼版印刷技術的限制，包含了不能印封閉圖案，透過三次黃光微影與三次電鑄製程，橋樑結構的加入，加強微結構強度與連結封閉結構，使密集與封閉的精細結構也可以被印刷出來。然而，橋樑結構的增加，卻有可能對於印刷圖案造成影響，由於支架成長於入墨孔上，由於印墨相當黏稠，印刷時橋樑結構可能會阻擋入墨，造成斷線的產生，為了要避免橋樑結構阻擋入墨，橋樑結構除了其寬度必須要細之

外，必須要將橋樑結構拉高，使其成為一個類似拱門的結構，加大開孔面積使油墨可以順利進入入墨孔，另外一個問題是，橋樑結構其強度是否能支撐印刷力道，由於橋樑結構短小且是附著於入墨孔上，在刮印時可能會因為其強度不足，導致刮印時結構損壞。其製作原理是利用二次濺鍍系統使光阻表面與側壁也擁有導電度，藉由第一金屬層與第一層光阻之間的高度差，電鑄時金屬結構會慢慢將光阻結構覆蓋住，最後將光阻結構移除時就可以得到具有孔洞的橋樑結構。

擁有橋樑結構的鋼版製作為雙層印刷鋼版的改良，各增加一次微影製程與電鑄製程，使原本的入墨孔結構上面再多一層橋樑結構。圖 3-2 為橋樑結構印刷鋼版製作流程圖，電鑄完第一層金屬結構後，第一層光阻先不去除，再次利用濺鍍系統在表面濺鍍一層較薄電鑄種子層，這裡濺鍍一層 20 nm 厚的鉻(Cr)金屬當作附著層，金的厚度同樣為 50 nm，透過第二次的濺鍍程序，原本不導電的光阻結構上濺鍍一層金屬後，也可以電鑄結構。濺鍍完成後，再次進行黃光微影製程，橋樑結構的圖案仍然是使用 AZ4620 光阻來定義，製程參數都與常規作法相同，不同的地方是，此步驟的光阻結構只有少部分區域有開孔，大部分區域不會被顯影液去除，光阻旋塗厚度約為 6  $\mu\text{m}$ ，完成顯影工作後用 150°C 硬烤 10 分鐘。

接下來進行橋樑結構的電鑄程序，同樣地在電鑄前利用大氣電漿對表面做清潔與改質，將電鑄物放入電鍍槽內 15 分鐘後，因為電鑄區域較小，為了避免電流效率不佳產生氫氣泡，導致電鑄失敗，先以 0.5 ASD 緩慢沉積鎳金屬持續 40 分鐘，再以 1.0 ASD 電鑄 40 分鐘，完成厚度約 6  $\mu\text{m}$  橋樑支架結構。完成了橋樑結構的電鑄後，接下來以丙酮洗掉第二層正光阻結構，使第一層電鑄金屬表面露出，由於第一層光阻結構上有一層電鑄種子層，所以再清洗第二層光阻結構時，第一層光阻結構仍然保留，之後程序如同儲墨槽製程一樣，利用 SU-8 光阻與第三次電鑄製程製作出厚約 20  $\mu\text{m}$  儲墨槽結構。最後將光阻去除後，進行離型步驟，及可得到擁有橋樑結構的雙層印刷鋼版。

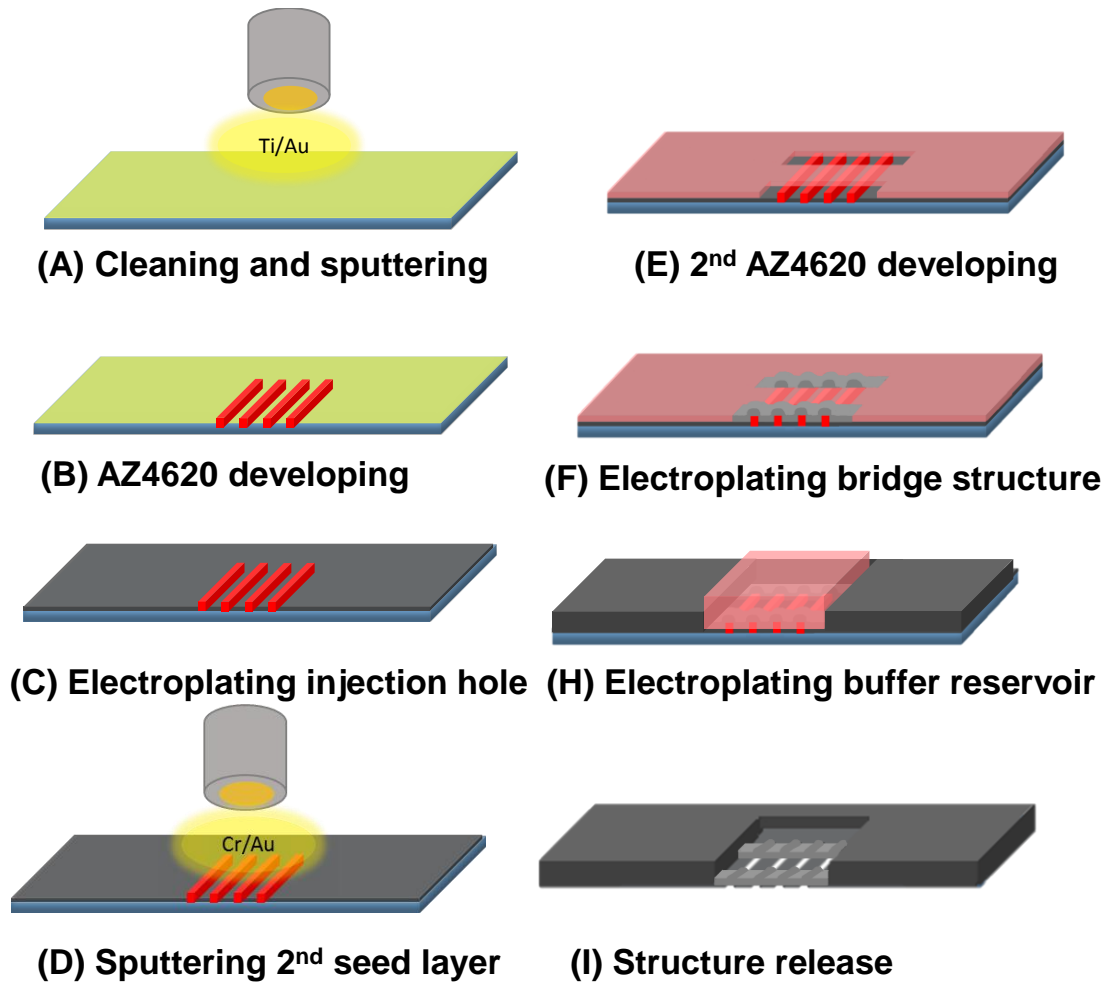


圖 3-2 橋樑結構印刷鋼版製程示意圖。電鑄完入墨孔結構後，(D)不移除第一層 AZ4620 光阻，並且進行第二次電鑄，黏著層為鉻金屬，導電層使用金，(E)塗佈第二層 AZ4620 光阻，對位曝光後顯影，定義橋樑結構，(F)電鑄前一樣使用電漿對表面做清潔與改質，之後電鑄厚度 6  $\mu\text{m}$  之橋樑結構，(H)利用丙酮洗掉第二層光阻結構，之後用 SU-8 光阻定義儲墨槽結構，並電鑄成形，(I)最後將所有光阻去除，並將金屬結構從基板上脫離。

### 3.3 表面電漿改質系統

電漿技術於各種工業領域廣泛應用，如基板清潔、表面改質、薄膜沉積及半導體蝕刻製程，產生電漿的方式一般為施加外加電場或電磁場激發氣體，使氣體解離成電子與帶電離子，又真空環境中加大電子平均自由路徑，使電子更有效率地撞擊其他氣體分子，產生更多的電子與離子形成連鎖反應，產生穩定的輝光放電(Glow discharge)。本實驗大氣電漿系統為一種電容耦合電漿(Capacitively Coupled Plasma, CCP)，其構造如圖 3-3，在其中一電極連接射頻電源另一電極接地，當壓力夠低且兩電極之間的電場達到崩潰電壓時，可激發氣體並且使反應持續產生穩定電漿。而本實驗藉由低真空電漿，利用電漿的高能離子轟擊清潔以及於處理表面產生官能基(Functional groups)，對電鑄基板與印刷基板做表面清潔與親水改質工作。本實驗利用大氣當中的氮( $N_2$ )與氧( $O_2$ )當作反應氣體，利用氮氣電漿轟擊基板表面做物理性清潔，而氧氣電漿更可以將基板表面的有機分子氧化，藉由真空幫浦抽走達到清潔效果，更重要的是，氧氣電漿可以於基板表面產生羥基(Hydroxyl)，使基板表面成為親水性。

本實驗使用 300W 的 RF 電源供應器(TRUMPF Huttinger, German)，真空幫浦為 Edwards RV12(Edwards, U.K.)其每分鐘排氣量可達每分鐘 230 公升，電極與載台間距約 6 公分。做電鑄前處理時，首先將樣品置於 100°C 加熱盤上去除水氣，之後放入腔體抽真空，待真空抽至 500 mTorr 時將 RF 電源供應器打開施加電場，成功產生輝光電漿後，輸出功率固定為 100 W，電漿處理為 10 分鐘後，關閉電源供應器並且破真空取出樣品；而印刷基板的改質則將輸出功率降為 50 W，處理時間為 5 分鐘，雖然降低功率與處理時間，但是親水性質仍然顯而易見。對於電漿處理的相關數據，將會於第四章一併詳述之。

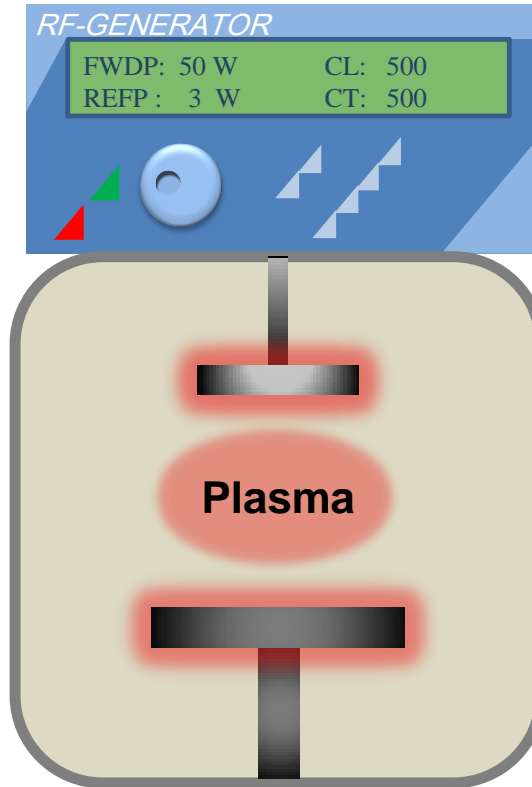


圖 3-3 表面電漿改質系統示意圖。利用電極與載台所形成的感應式耦合電漿，當腔體壓力降至 500 mTorr 時，施加電壓產生電漿，游離腔體內剩餘的氣體分子，並對載台上的樣品進行表面清潔與改質。

### 3.4 精密電鑄系統

精密電鑄製程由於其耗時且成本高，通常多為結合其他製程技術，達到提高產能與降低成本效果，例如藉由電鑄模具其良好機械特性，模具可以大量翻模重複利用所以精密電鑄物的品質與精度格外重要。然而，電鑄物之特性與相當多的參數有關，如電流密度、溫度、酸鹼值(pH)、電鍍液配方與電源供應種類等眾多參數，為了降低成本，本實驗自行架設精密電鑄槽，並使用氨基磺酸鎳配方，電鑄內應力低且高強度的鎳金屬鋼版結構。



### 3.4.1 電鑄系統設備與鍍液配製

本實驗之精密電鑄系統，利用容量約 6 公升的矩形玻璃缸(25×18×16cm<sup>3</sup>)做為電鑄槽，使用可定電流的直流電流供應器，圖 3-4 為其示意圖，為了增加槽內電鍍液的鍍液流動，加裝一組氣動式水中過濾器，打氣幫浦將空氣打入過濾器底部，氣泡往上移動時，會帶動周遭鍍液的流動，並且兼具過濾效果，形成一種噴泉式電鑄設備，圖 3-5 為氣動式水中過濾器示意圖。電鑄時，金屬離子於陰極產生還原，造成金屬離子濃度下降，會使電鑄效率降低，藉由鍍液的流動，改善槽內金屬離子濃度梯度問題，過濾棉將鍍液中的雜質去除，使鍍槽更容易管理且更穩定，鍍液為購買市售氨基磺酸鎳原液(合呈實業，台灣)。原液的鎳離子含量過高，電鑄層內應力會提高，必須稀釋後再使用，首先將三公升去離子水加入至電鑄槽內，利用加熱盤將鍍槽加熱至 50°C，接著，再依序加入適量硼酸與溴化鎳，硼酸功用為調配酸鹼質以及當做緩衝溶液，溴化鎳增加鍍槽導電度，提升電鑄效率。接著利用空氣攪拌將所有粉末溶解，接下來便加入氨基磺酸鎳原液，利用去離子水比原液為 2.4:1 的比例添加，將電鑄鎳離子濃度調配至 76 g/L，打開氣動式過濾氣幫浦，便可開始進行電鑄作業，表 3-1 為本實驗電鑄配方與條件表格。

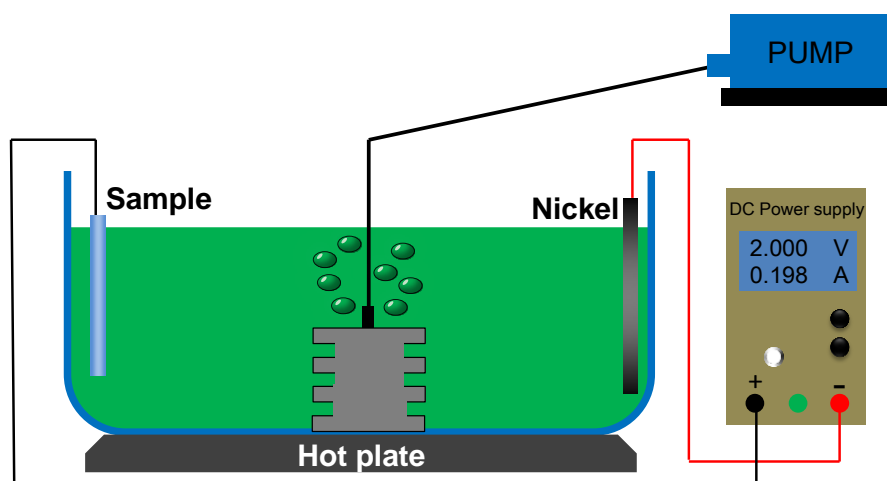


圖 3-4 氨基磺酸鎳電鑄槽示意圖。電源供應器之陰極連接純鎳板，而陽極則夾持待電鑄樣品，利用空氣幫浦推動氣動式過濾器，使鍍槽內的鍍液產生流動，提高電鑄品質。

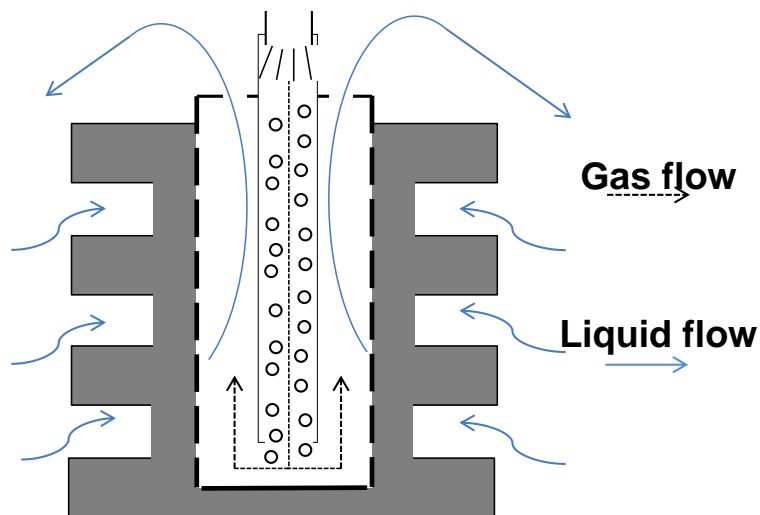


圖 3-5 氣動式水中過濾器示意圖。虛線為氣流方向，由上方往過濾器底部吹送，氣流所形成的氣泡因浮力而往上帶動，形成低壓區域，連帶著將過濾器四周的液體與雜質吸往過濾器中，達到帶動水流與過濾的效果。

表 3-1 電鑄配方與條件表

鎳	76 g/L
硼酸	45 g/L
溴化鈉	5 g/L
電流密度	0.5 – 3.0 ASD
攪拌	氣動式水中過濾器
酸鹼值	3.5 – 4.5
溫度	50°C

### 3.5 接觸角量測系統

由於本實驗探討到表面能相關問題，良好的接觸角量測系統是不可或缺的，利用光學桌板、升降台、數位相機與高倍率變焦微距鏡(百特產業，台灣)組成的自製量測系統如圖 3-6，本實驗所使用高倍率變焦鏡頭，其具有放大 0.7 倍至 4.5 倍

的調整鏡組，另外，透過加裝接寫環，增加總鏡筒長度，放大拍攝影像，另外，加裝接寫環會使實際光圈較原本小，因此讓景深提高，利於拍攝球型液珠相片。量測時，將磨平滴管前端夾持於升降台上方，通入待測液體，在滴管開口處形成約 20  $\mu\text{L}$  的液珠，接著將升降台緩慢地上升，當基板與液珠接觸時，液珠便會受到基板表面能影響，吸附至基板上，即可得到所需接觸角數據。此架構的好處在於，可以量測到真實的接觸角大小，液珠不會因為外在力量影響，而使量測結果產生偏差。

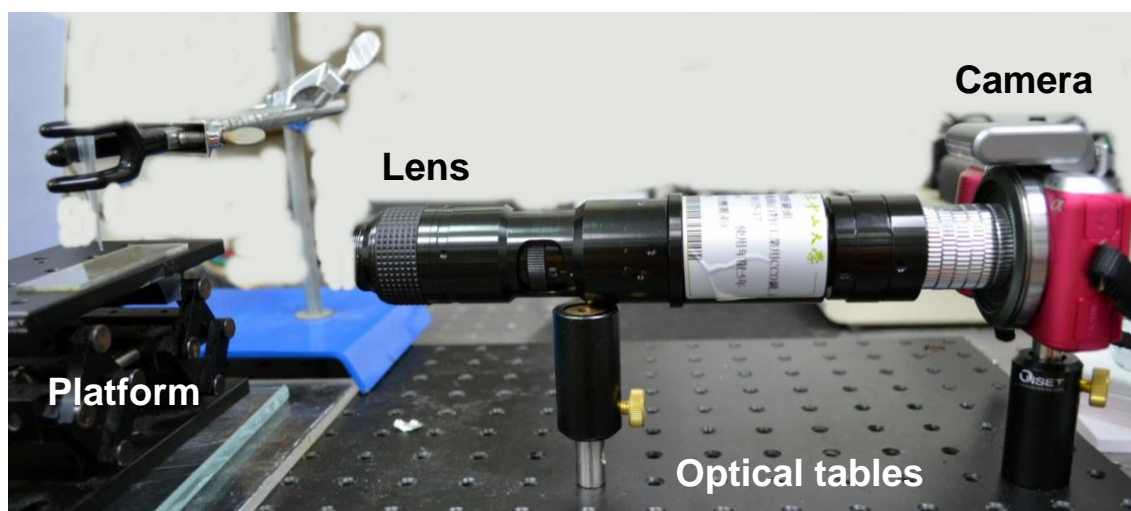


圖 3-6 接觸角量測系統圖。於光學桌板上固定配件與升降平台，利用夾持器具固定滴管，並移動升降平台使基板與液珠接觸。

### 3.6 表面粗糙量測儀

本實驗使用探針式粗度量測儀(SJ-400，三豐儀器，日本)，圖 3-7 為其量測示意圖，透過 USB 纜線將資料於電腦上輸出，利用驅動器移動探針，探針沿著工件表面量測，探針隨著表面形貌上下震動，並且轉換成電氣訊號輸出，經過放大訊號以及濾波之後，再經迴路計算其粗糙度或是表面輪廓，最後輸出圖形於螢幕上。本研究使用 60°角與直徑 2  $\mu\text{m}$  的低測力型鑽石探針頭，其量測力只有 0.75 mN，量測範圍達 48 mm 且最小分辨率達 0.01  $\mu\text{m}$ ，量測速度從 0.05 mm/s 至 1 mm/s。

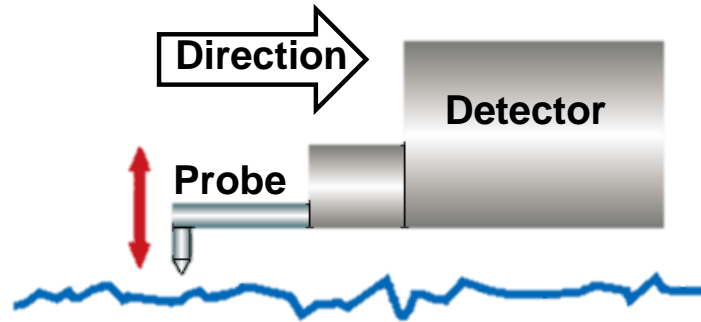


圖 3-7 探針式表面粗度量測示意圖。透過驅動器移動探針去量測工件表面，探針隨表面輪廓起伏移動，透過接收器轉換後將訊號傳給檢出器，透過計算將訊號轉換，藉此量測粗糙度或是表面輪廓。

代表性的表面粗糙度求法可分為算數平均粗糙度( $R_a$ )、最大高度粗糙度( $R_y$ )與十點平均粗糙度( $R_z$ )如圖 3-8 所示， $R_a$  又稱為中心線平均粗度，最為常用表示粗糙度的方法之一，其從物件表面量測長度  $L$  之距離，橫坐標為  $x$  軸，縱座標為  $y$  軸，其粗糙曲線可用  $y = f(x)$  表示。其定義為將中心線為基準，將中心線下方區域扣除中心線上方區域，將剩餘區域除以量測長度  $L$ ，即可得到  $R_a$  值，單位為  $\mu\text{m}$ ，其數學定義為如下：

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (3-1)$$

$R_y$  則稱為最大高度粗糙度，顧名思義是取其表面輪廓最大高度差當作粗糙度，於物件表面量測長度  $L$ ，以平均線為基準線，分別取輪廓線峰頂和谷底值為  $R_p$  與  $R_v$ ，兩者相加即可得到  $R_y$  值，其數學式如下：

$$R_y = R_p + R_v \quad (3-2)$$

十點平均粗糙度  $R_z$  也是常用的粗糙度之一，物件量測長度  $L$  後，以粗糙中心線為準，上下各取前五高之波峰絕對數值，將十點數值絕對值相加後算出其平均數，即為  $R_z$  值，其數學式如下：

$$R_z = \frac{|Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}| + |Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5}|}{5} \quad (3-3)$$

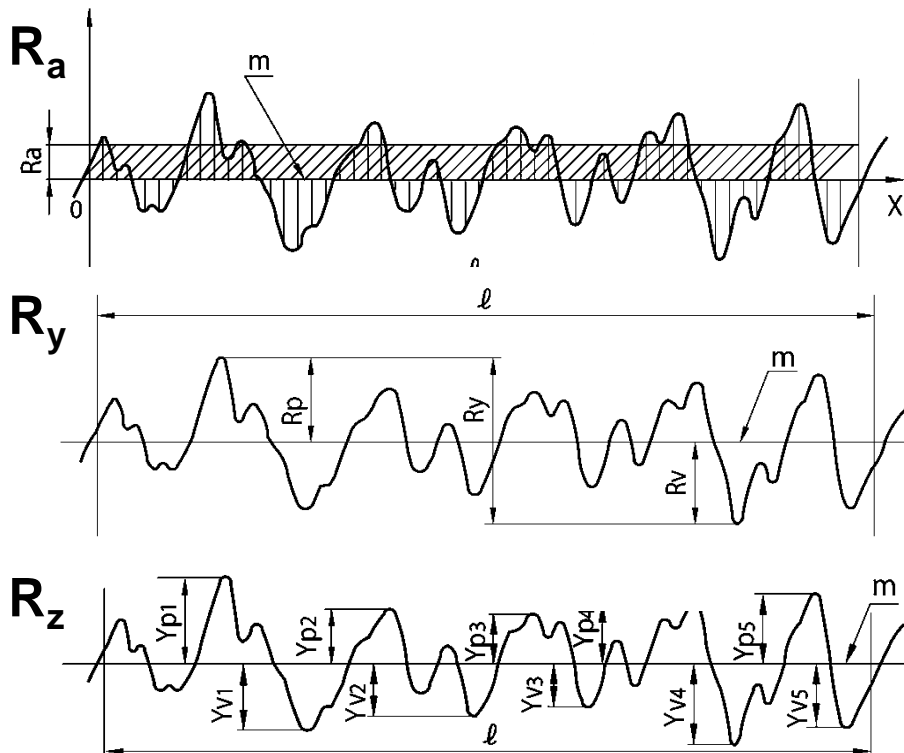


圖 3-8 平均粗度( $R_a$ )、最大高度粗度( $R_y$ )與十點平均粗度( $R_z$ )示意圖。三種常用的粗度度計算法，用來表示物件表面之粗糙度。

### 3.7 印刷器具與材料

印刷鋼版製作完成後，最後要進行印刷步驟，利用便宜且快速的手印方式，進行印刷鋼版之印刷測試，油墨使用市售的銀膠，藉由在印刷不同的基板，來比較不同基板所印刷出來的結果。

#### 3.7.1 印刷平台

印刷平台為市售手印台(明聖網版，台灣)，鋼製平台提供穩定且平整的印刷平面，使印刷時基座不容易震動或位移，提升印刷精度。印刷平台都會有一個夾持具，其作用在於將繃緊的網版固定，印刷完畢後可以將網版水平抬起，使油墨不會二次接觸到網版而產生變形。

### 3.7.2 刮刀與銀膠

介紹完印刷平台後，接下來要介紹印刷技術另一項重要的設備，那就是印刷刮刀，在一般俗稱孔版印刷的技術，都需要藉由刮刀，將油墨推動至入墨孔當中，來達成圖形轉移的目的，刮刀通常為天然橡膠(Rubber)、合成橡膠(Neoprene)與聚氨酯(Polyurethane)三種材料，而某些鋼版印刷的刮刀會使用金屬材質，刮刀的材質決定刮刀的強度與耐久性，刮刀最重要的就是保持刀口的銳利度，若刮刀的刀口邊緣產生缺口或鈍化，刮刀便無法均勻地將印墨推送至入墨口內，不均勻的入墨會造成印刷品質下降。另一項重要參數便是刮刀的開口角度，開口角度越大，下墨量也就越大，通常刮刀角度約從 45°至 75°，而本實驗使用開口角度 60°的合成橡膠刮刀，硬度約 70 A(邵氏硬度)，其好處是耐化學溶劑侵蝕，同時也可以提供充足的入墨量，印刷時，下刀力道約為 15 N，刮刀速度則為 15 cm/s，太快的刮印速度會使入墨量不足，導致斷線結果，而印刷速度太慢則可能會使入墨量太大，造成溢墨使印刷工作失敗。印墨則是選擇市售的銀膠(TEC-PA-060, Inktec, Korea)，其黏度高達 65000 cP，且銀粉末直徑僅僅只有 1 μm，適合印刷 50 μm 以下的圖案，且由於其固體銀例子含量達 70%，其印墨烤乾之後仍然能維持一定高度。洗板劑則是使用二甲苯，雖然有毒性且味道重，但是其溶解銀膠效果佳，且不易殘留，相當適合清洗印版與刮刀，圖 3-9 為本實驗所使用的印刷平台、刮刀與市售網版。

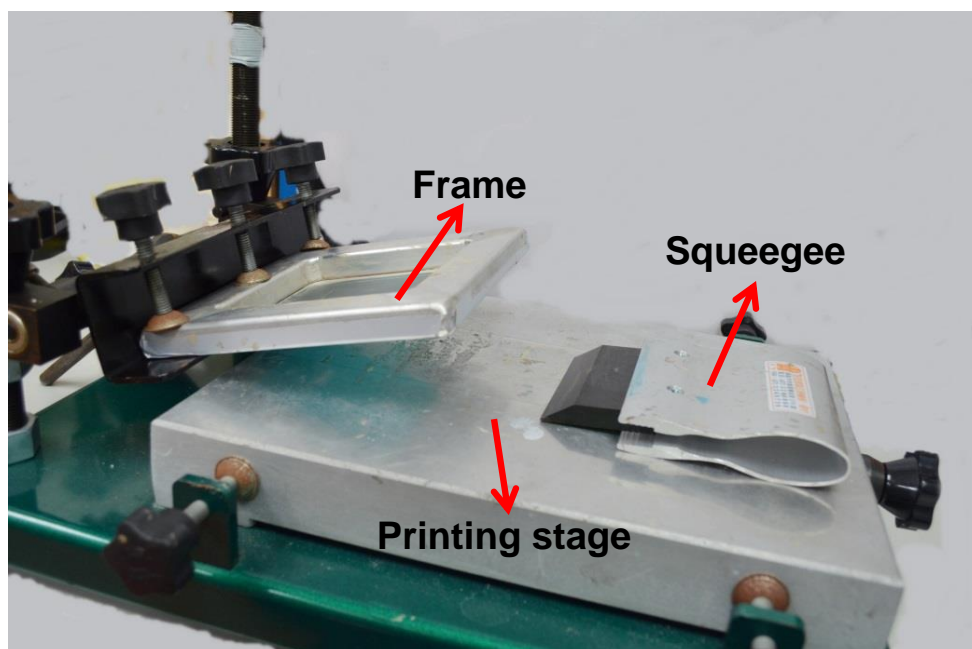


圖 3-9 手印台與印刷器具。透過旋鈕調整平台水平度，夾持具將框架固定後，手持合成橡膠刮刀刮印油墨，使油墨透過印刷版將圖案轉移至印刷基板上。

### 3.7.3 印刷基板

最後則是介紹印刷用基板，為了方便觀察基板表面能與印墨的關係，本實驗選用鐵氟龍(Teflon)、PET(TORAY, Japan)與玻璃當作印刷基板。鐵氟龍的表面能相當低，意味著其表面特性為超疏水，其結構為氟與碳所組成，材料相當穩定，使鐵氟龍幾乎不受化學溶劑所影響，可耐高溫至 260°C，長期暴露於大氣當中，表面特性保持不變。PET 膜則是日本東麗公司所生產，其有良好的剛性以及透光性，做為良好的軟性電子材料，更重要的是其可耐化學溶劑，並可耐高溫至 180°C，印刷後烘烤油墨時，產生的熱應力不會使基板變形，PET 基板為高分子材料，其表面能相對金屬材料低，算是一種疏水材料，但是透過電漿處理，可以變成親水材質。最後一個印刷基板是玻璃，玻璃的表面能高，屬於親水性質表面，藉由印刷於三種不同表面能之基板，了解印墨的品質以及形貌的相對關係。

### 3.8 實驗架構流程

完成鋼版的製作後，便可進行鋼版之印刷測試，印刷流程圖如圖 3-10 所示，其可分為三個主要步驟，印刷鋼版之封裝、印刷過程與印墨的固化與量測，個別詳細步驟描述如下。

1. 將成功離型的印刷鋼版前後端 20 mm 處，利用壓克力板做為夾持裝具，壓克力板厚度約 3 mm，再以 UV 膠上下黏著。
2. 拉緊鋼版兩側使其成水平面，利用夾具將印刷鋼版固定於印刷平台上，完成印刷前的準備作業。
3. 利用滴管將適量銀膠塗抹至拉平的鋼版上，再使用刮刀將銀膠刮至儲墨槽內，使銀膠均勻塗佈於鋼版上。
4. 將欲印刷基板固定於印刷鋼版下方，基板與印刷鋼版間距約 5 mm，確認基板完全對準與固定後，即可開始印刷。
5. 雙手持刮刀下壓於鋼版前端，施加約 15 N 下壓力，並以 15 cm/s 速度印刷，印刷完畢後立即將刮刀抬起，避免晃動到印刷基板導致印刷失敗。
6. 將完成印刷作業之基板從鋼版下方取出，並先使用顯微鏡觀察是否有滲墨產生，若產生滲墨則需將鋼版背面以有機溶劑清洗，之後重複印刷步驟，視情況補充印墨或是清洗鋼版。
7. 利用加熱盤加熱印刷基板至 110°C 持續 20 分鐘，之後緩慢降至室溫。
8. 完成印墨固化後，及可利用顯微鏡或表面粗糙儀量測印刷結果。
9. 印刷作業結束時，將印刷鋼版從印刷平台上移除，利用二甲苯清洗刮刀與印刷鋼版。



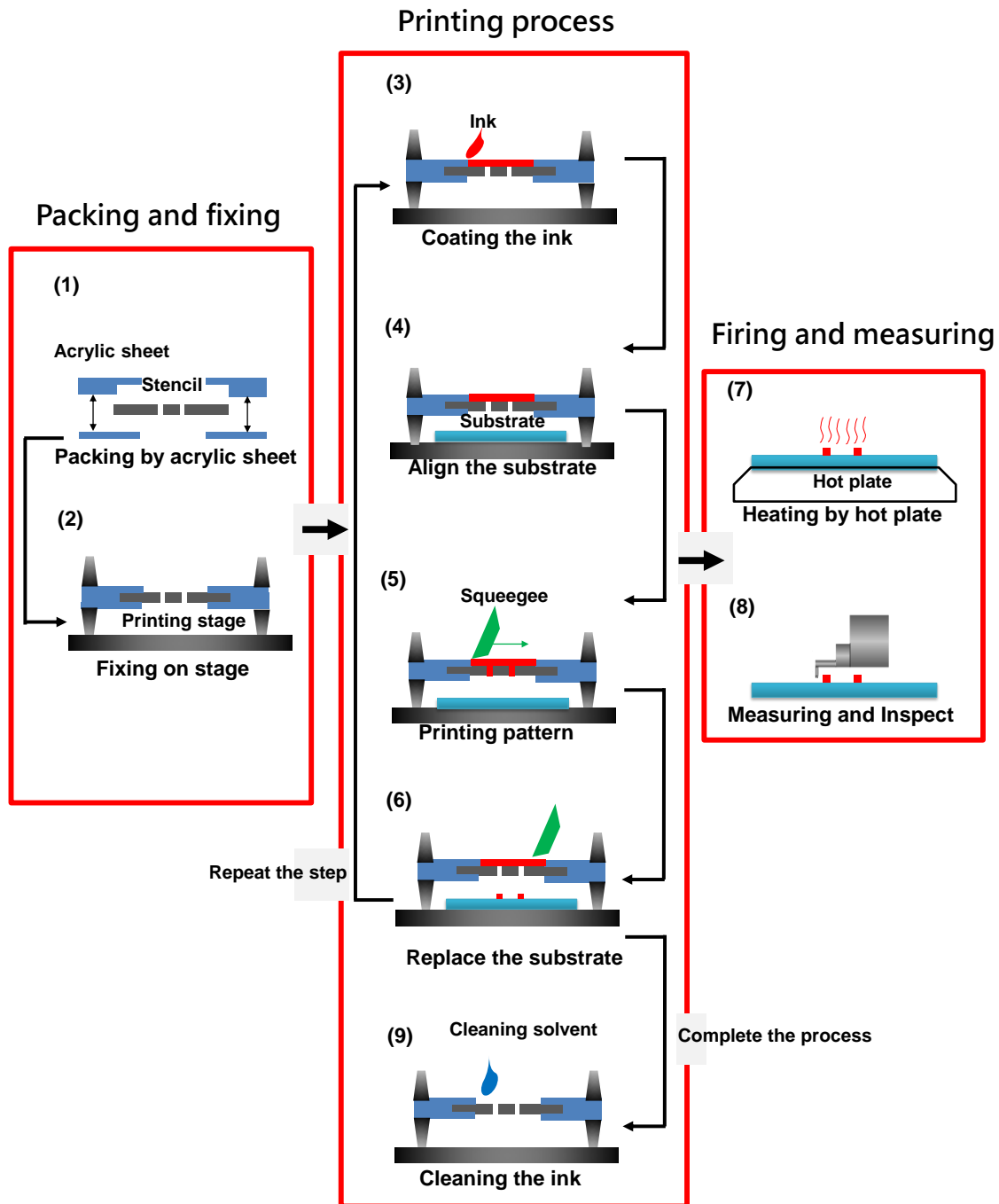


圖 3-10 實驗架構流成圖。可分為印刷鋼版之封裝、印刷作業與後端結果量測，由於金屬鋼版很薄，必須先將其封裝並固定，方能使印刷作業進行，手印台提供一平整且穩定之印刷基座。印刷前先將印墨均於塗抹與覆蓋，印刷基板固定於印刷鋼版正下方，使用適當力道與速度進行印刷作業，完成印刷作業後，對印墨進行固化步驟，固化完成後可利用接觸式探針量測其印墨厚度與線寬。

## 第四章 實驗結果與討論

本研究內容包含鋼版製作，以及鋼版的印刷測試。透過掃描式電子顯微鏡 (SEM)、光學顯微鏡(OM)及表面粗度儀觀察鋼版結構，探討鋼版的形貌及粗糙度。基本的電鑄參數分析及接觸角量測，利用表面電漿改質，使基板表面能提高，增加親水性以及電鑄品質。本研究開發的高精度印刷鋼版，於不同基板上印刷超精細圖案，針對不同材質的基本上印刷銀膠，量測其印刷寬度與高度，探討表面能對於印墨的影響，同時，改善傳統印刷技術所遇到之問題，提升印刷解析度以及降低印刷最小線寬。

### 4.1 印刷鋼版實驗結構分析

本節針對電鑄鋼版的結構形貌進行分析，利用 SEM 影像觀察階梯鋼版結構，以及增強結構的橋樑支架;量測電鑄速率以及金屬表面的粗糙度，比較有無電漿處理後電鑄的差異。

#### 4.1.1 入墨孔與儲墨槽結構

圖 4-1 為鋼版結構之 OM 與 SEM 圖，圖 4-1(A)為正、負光阻組成的結構圖，外圈部分由八條寬 200  $\mu\text{m}$ ，長 20.1 mm 的 SU-8 光阻結構組成，而每條光阻結構當中，分別有三條間距都為 20  $\mu\text{m}$  的 AZ4620 光阻結構，其線寬為 10  $\mu\text{m}$ ，長為 20 mm，從圖 4-1 (A)可以觀察到 SU-8 光阻透過對準曝光顯影，使其完全覆蓋於 AZ4620 光阻結構上，電鑄儲墨槽結構時，保護第一層的入墨孔金屬結構，最後得到一階梯狀電鑄鋼版。圖 4-1(B)-(D)則為 SEM 結構圖，圖 4-1(B)為成功離型的鋼版正視圖，可以觀察到儲墨槽與入墨孔結構，均被成功地電鑄成型，且兩種光阻均完全移除乾淨，其放射狀圖案與圖 4-1(A)相比幾乎一樣，顯示光阻於電鑄當中均維持原結構，沒有觀察到有溢鍍與氣穴產生，使金屬微結構完美地成型。圖 4-1(C)

為雙層結構鋼版側視圖，透過兩次電鑄使兩層金屬結構成型，2  $\mu\text{m}$  厚的入墨孔，及 30  $\mu\text{m}$  厚的儲墨槽結構，清楚地從儲墨槽側壁，觀察到經典的直條電鑄紋理，顯示光阻具有相當良好的垂直性，而入墨孔結構的側壁也相當平滑，利於印墨的入墨以及離版。圖 4-1(D)則是入墨孔結構的近照圖，三條線寬 10  $\mu\text{m}$  的入墨孔成功地被定義出來，由於入墨孔即為定義印刷圖案之結構，代表著本實驗之印刷最細線寬可低至 10  $\mu\text{m}$ 。

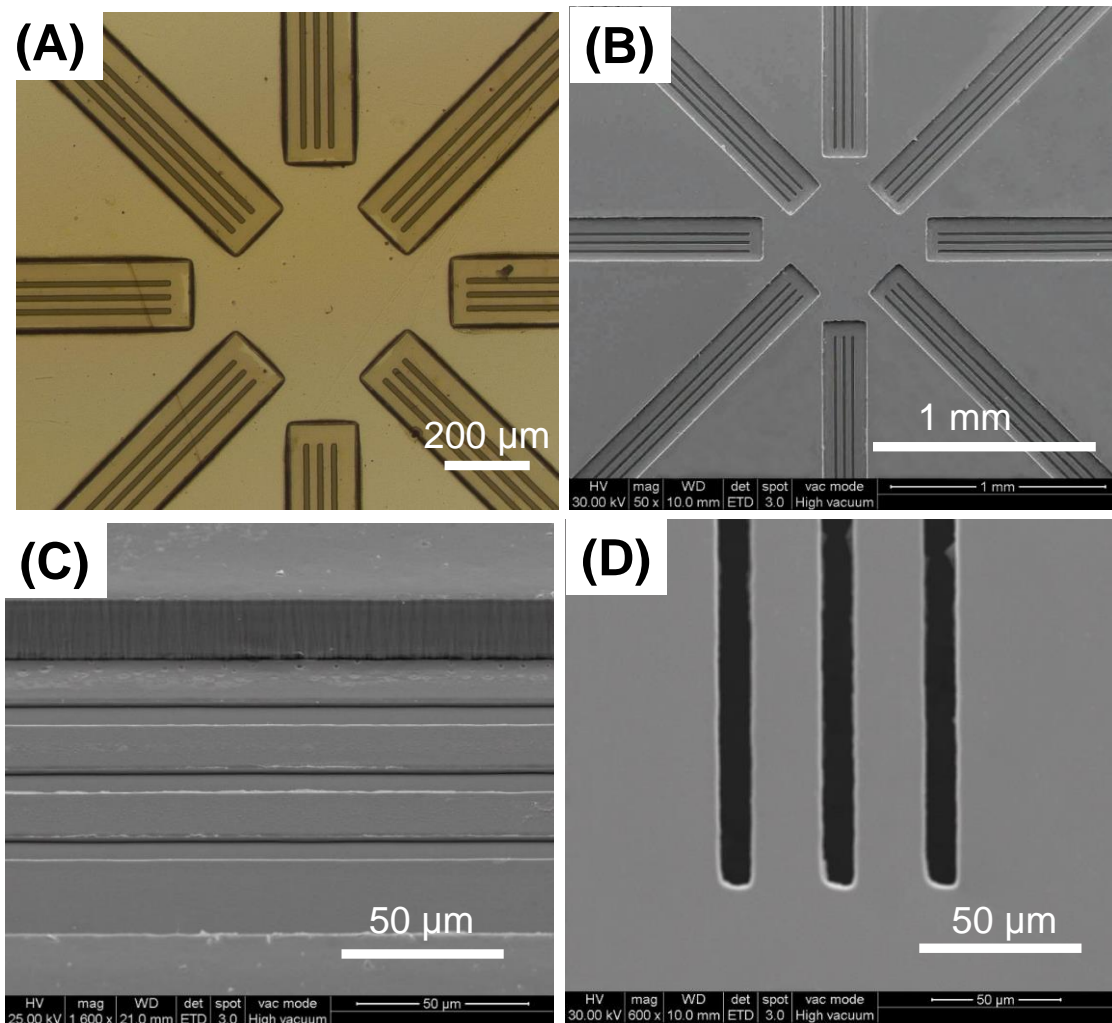


圖 4-1 印刷鋼版結構圖。(A)SU-8 光阻經對準曝光後，顯影後其結構覆蓋住 AZ4620 光阻結構，使電鑄儲墨槽時保護入墨孔結構，(B)電鑄成型並成功離型之鋼版結構正視圖，(C)儲墨槽結構側視圖與電鑄紋理，(D)10  $\mu\text{m}$  開孔之電鑄結構。

圖 4-2 分別為雙層結構鋼版的正面與反面 SEM 圖，比較圖 4-2(A)與 4-2(B)可以觀察到，入墨孔的正反兩面的線寬均相等，顯示第一層光阻結構側壁相當垂直，並無過度曝光和過度顯影的情況發生，而且在電鑄成型後，光阻也完全被去除掉，並無光阻殘留於微結構當中，影響到印刷品質，此外，由於本實驗是利用平整的玻璃當作電鑄基板，從圖 4-2(B)可以觀察到，背面金屬表面相當平整與平滑，印刷時，印刷鋼版可以完全貼附至印刷表面上，如果印刷鋼版背面不平整，容易導致印墨擴散，且殘留少量印墨於鋼版孔洞之中，具有良好的金屬表面平整度，有助於提升印刷品質與精度。

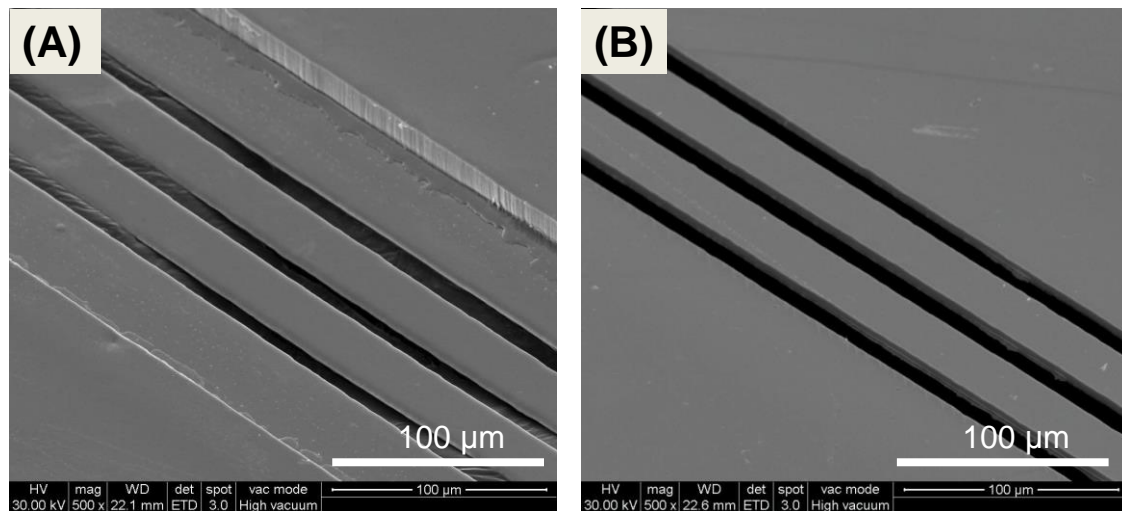


圖 4-2 印刷鋼版正反面側視圖。(A)完成且附著在一起的雙層鋼版結構，(B)擁有極度平整的印刷背面，利於印刷作業的進行。

#### 4.1.2 橋樑結構分析

從上一小節得知，雙層鋼版結構成功的被製作出來，然而，在幾次的實驗當中發現，入墨孔結構會產生黏附效應(Stiction)，其成因是來自表面張力，當結構尺度縮小至微米等級時，表面張力會影響到微結構，會使結構之間黏附住造成永久破壞。本實驗會於兩步驟遇到黏附問題，第一是金屬鋼版要離型時，如果需要用到溶液蝕刻來脫模，便可能產生黏附效應，解決方法就是利用低表面張力溶液離型，如酒精或丙酮，然而，一般的細長樑的定義為長寬比約為 10:1，本實驗最小

線寬達 10  $\mu\text{m}$  而長度高達 20 mm，而且厚度僅僅只有數微米而已，縱使鍍金屬機械性質相當好，但是在本研究當中，其金屬結構仍然容易產生彎曲變形，就算利用低表面張力溶液脫模，還是可能會產生黏附效應，另一個方法便是利用超臨界流體(Supercritical fluid, SCF)來脫模，利用無表面張力的流體進行脫模步驟，可以在不傷害結構的情況下完成離型，但是會大幅提高製程時間及花費。另外一個會造成黏附效應的是印刷步驟，由於印墨相當黏稠，且印刷時印墨會推擠入墨孔結構，使結構之間產生黏附效應。幾次的試驗後發現，在線寬與間距 1:1 的情況下，入墨孔長度超過 600  $\mu\text{m}$  時，金屬結構容易互相黏附。因此，本研究在入墨孔結構上方增加橋樑支架，其作用在於提供額外支撐力，使微結構不會因為表面張力而互相黏附。圖 4-3 為橋樑結構 SEM 圖，圖 4-3(A)顯示寬 20  $\mu\text{m}$  的橋樑支架搭於入墨孔結構上，橋樑結構的間距約為 600  $\mu\text{m}$ ，確保金屬結構不會彼此吸附。從 3.2 節可以知道，橋樑支架之間的拱型開口，其高度與大小，取決於第一層 AZ4620 光阻的線寬與厚度，圖 4-3(B)為橋樑支架近攝照，可以觀察到厚度約 4  $\mu\text{m}$  的支架結構，其下方有一總高度約 8  $\mu\text{m}$  的拱型開口，開口主要提供印墨通過，使印墨能通過入墨孔，如果開口太小，印墨可能會無法順利滲入入墨孔，導致印刷圖案產生斷線。

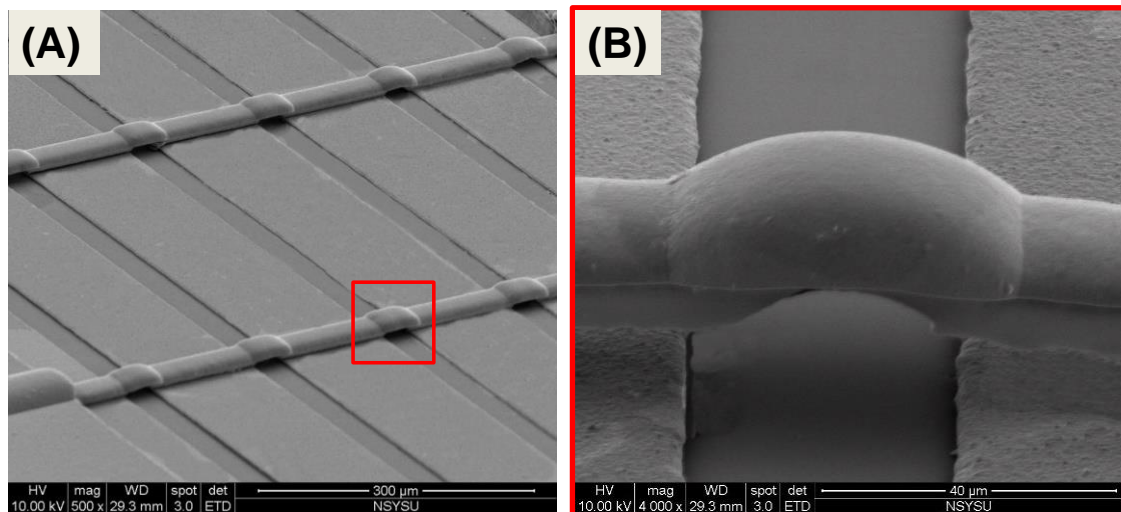


圖 4-3 橋樑支架結構。(A)利用橋樑支架補強高密度圖案區域，(B)拱型開孔提供墨層進入，使印刷時不會因結構阻擋使印墨無法印刷。



## 4.2 接觸角量測實驗分析

印刷基板之表面能是影響印刷解析度要素之一，藉由接觸角量測分析不同材料之表面能，本研究分別選擇具有不同表面能的三種材料，做為印刷用基板，透過電漿改質系統，提升材料表面能。接觸角的形成是由表面張力、重力與基板表面能有關，完全為一種物理行為，因此唯有在去除其他外力因素的情況下，才能量測到正確的接觸角大小。因此本實驗利用光學桌版與垂直升降台來進行接觸角量測，圖 4-4 為接觸角量測流程圖，首先產生約 20  $\mu\text{L}$  的液珠於滴管底部如圖 4-4(A)，球型液珠懸掛於滴管前端，接著將載台慢慢上升直到液珠接觸基板如圖 4-4(B)所示，液珠接觸基板的瞬間，其表面張力受到改變，使液珠會附著於基板上，之後，緩慢地將載台下降至原位如圖 4-4(C)，當液珠與滴管分離時，液珠受到基板表面的吸力所影響，形成接觸角，以高倍率微距鏡拍攝影像，最後利用影像分析軟體得到接觸角，推估基板的表面能大小，藉由此方法避免接觸角因受到外力而改變其角度，得到更為精準之接觸角數據。

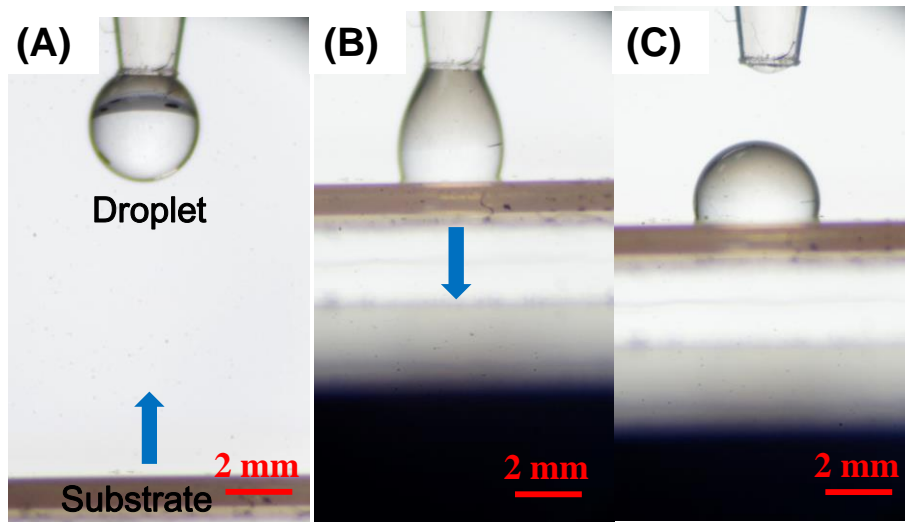


圖 4-4 接觸角量測流程圖。(A)調整升降載台使基板上升，(B)基板碰觸到液珠時，緩慢將載台下降，(C)將基板降至畫面中央，量測其接觸角大小。

#### 4.2.1 基板改質電鑄結果分析

從上一小節可以知道，本實驗之電鑄結構表面相當平整，是因為電鑄前基板透過電漿改質處理，使基板具有良好的濕潤性，電鑄時電流效率提升，減少氫氣泡的產生，而這樣使得電鑄表面粗糙度得到良好的改善。圖 4-5 顯示電漿處理對電鑄表面粗糙度影響，實驗分別以沒有事先做表面處理的基板，及使用功率 150 W 電漿對電鑄基板進行改質 15 分鐘後，將電鑄基板浸泡至 50°C 鍍槽內後靜置 15 分鐘，再以 1.0 ASD 的電流密度電鑄 30 分鐘，接著使用探針式粗度儀量測電鑄表面粗糙度，探針以 0.05 mm/s 的速度量測距離為 4.8 mm 的範圍。從圖 4-5 可以知，經表面電漿改質與清潔過後的基板，其  $R_a$ 、 $R_y$  與  $R_z$  值都比沒有電漿處理的電鑄樣品小，證明電漿改質與清潔，確實有效清潔表面與增加其濕潤性，減少電鑄陰極氫氣泡的產生，提升鍍層品質。

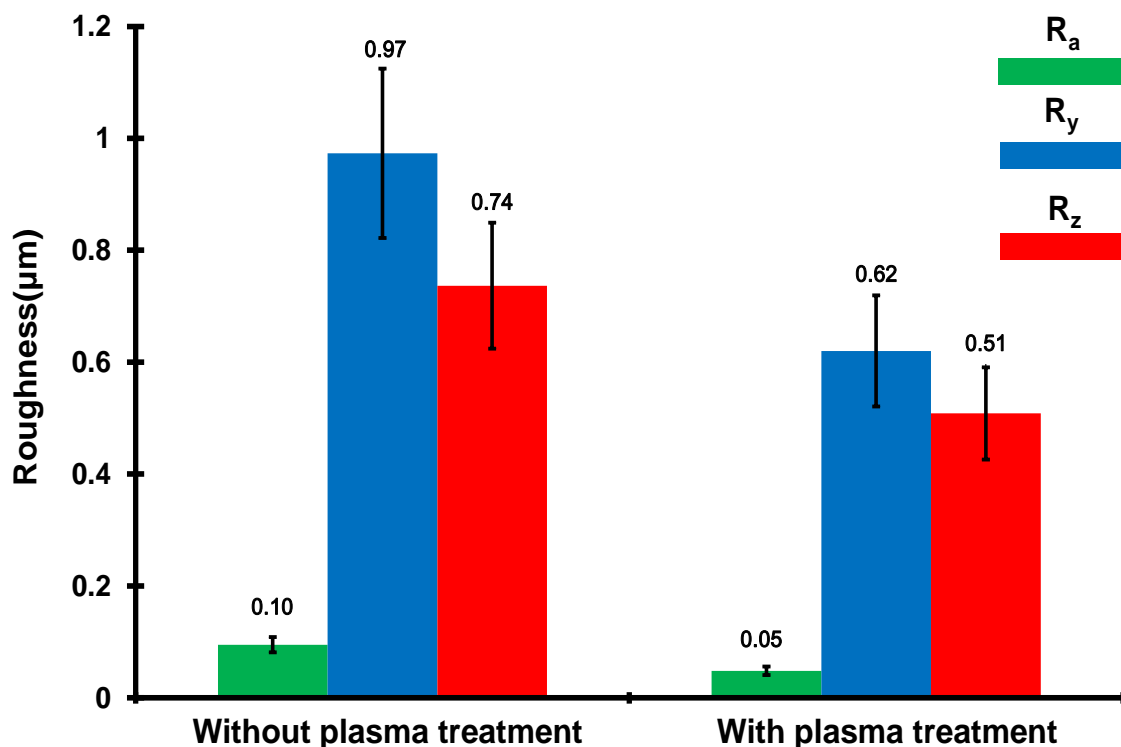


圖 4-5 電漿改質電鑄粗糙度分析圖。經表面電漿改質與清潔，提升電鑄基板之濕潤性與潔淨度，其電鑄結果粗糙度明顯改善許多。

圖 4-6 顯示氣泡產生所形成的氣穴，圖 4-6(A)為經過電漿處理後電鑄表面，結構完整無電鑄缺陷產生，圖 4-6(B)則為沒有使用電漿改質電鑄表面形貌，可以觀察到許多氣穴產生於鍍層表面，鍍層表面光澤較為白濁，此外，氣穴的產生會影響到其鋼版微結構，氣泡的大小遠大於本研究所定義尺度，若氣泡剛好產生於光阻之間的結構上，會使結構無法順利電鑄成形，影響到圖案的定義以及解析度。本研究利用多次電鑄金屬創造多層結構，金屬層之間的附著力相當重要，其會受到表面潔淨度所影響。為了提高金屬層之間的附著力，本研究利用電漿清潔其鍍物表面，藉由電漿氣體離子撞擊與氧化表面有機雜質，達到清潔效果，使鍍層可以完整地附著於金屬層上，增加其附著強度，使金屬層之間不會產生斷裂分層，造成印刷鋼版損壞。

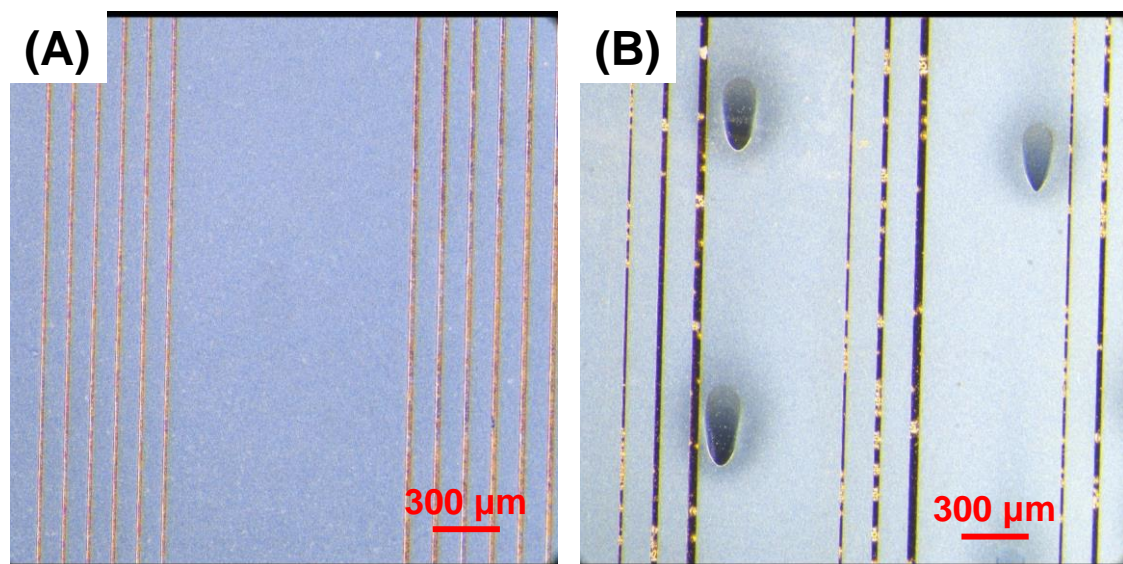


圖 4-6 金屬鍍層氣泡圖。(A)良好的電鑄鍍結果，表面平整且結構如預期成型，(B)氣泡隨機產生，使鍍物表面產生氣穴，影響金屬結構。



圖 4-7 為電鑄速率量測圖，實驗為利用不同電流密度進行電鑄步驟，電流密度從 0.5 ASD 至 3.0 ASD，電鑄時間則固定為 10 分鐘，從圖 4-7 可以知道，電鑄速率隨電流密度增加呈現線性成長，代表電鑄情況相當穩定，從 2-3 式可以得知，在 1.0 ASD 情況下，每小時可沉積約 12  $\mu\text{m}$  厚的鍍鎳層，將本實驗電鑄速率換算後，在鍍槽鎳離子為 76 g/L 的情況下，其電流效率可達到 90%，與理想值相當接近，代表電流效率相當高，其電鑄鍍層品質穩定且缺陷少。

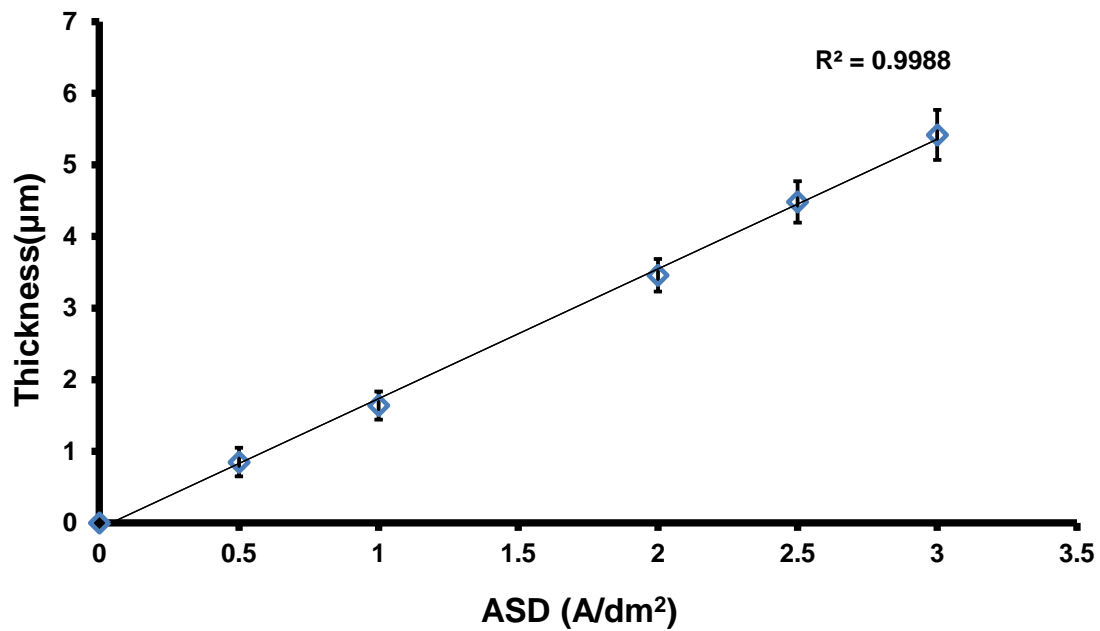


圖 4-7 電鑄速率量測圖。良好的電鑄速率線性度，以便調整印刷鋼版的之厚度，90%的高電流效率，顯示鍍槽狀態良好。

## 4.2.2 基板接觸角分析

圖 4-8 顯示不同材質基板之水滴接觸角量測圖，量測接觸角之前，利用超音波震盪機分別以丙酮、乙醇與去離子水震洗待測基板 10 分鐘，接下來以氣槍將殘留水滴吹除，最後使用加熱盤將剩餘水氣完全烤除，待基板溫度降至室溫即可開始量測水滴接觸角。實驗以去離子水當作測試溶液，並於基板上各區域進行接觸角量測，確保基板的材料均一性降低實驗誤差，從圖 4-8 量測結果可以觀察到，鐵氟龍基板的水滴接觸角高達  $107.3^{\circ} \pm 3.85^{\circ}$ ，顯示其為超疏水材料，PET 薄膜其水滴接觸角亦高達  $75.2^{\circ} \pm 2.44^{\circ}$ ，為一疏水特性材料，由於印刷過程中，需要考慮到印刷鋼版與印刷基板之表面能關係，所以本實驗亦量測電鑄鎳金屬其特性，結果顯是，鎳金屬傾向疏水材料，但是與其他材料相比，金屬材料之表面能相較於一般高分子材料，其特性仍然算是相對親水材料。有別於其他三種疏水材料，玻璃的水滴接觸角最小，液珠均勻的攤平至玻璃基板上，顯示其表面能最高，不需要做表面改質即為親水材料。

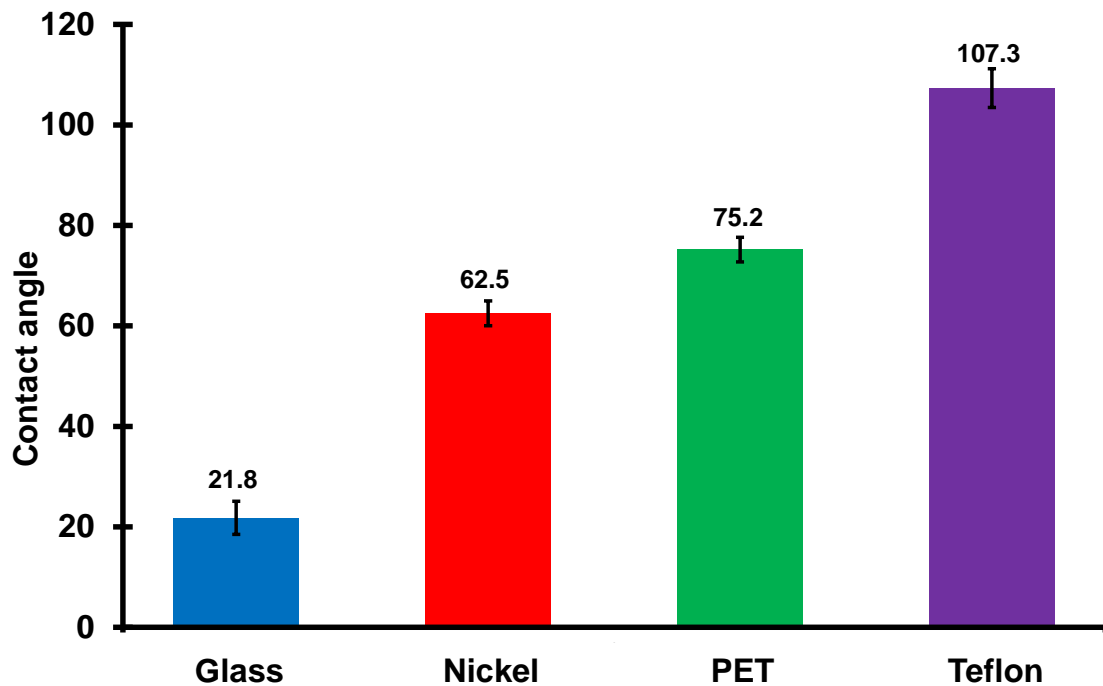


圖 4-8 水滴接觸角於不同基板分析圖。水滴接觸角越大，代表其基板表面能最低。

然而，實際上印刷用的銀漿，其性質與去離子水相差甚遠，必須要確認銀膠與各材料之接觸角關係，圖 4-9 為銀漿與基板接觸角關係表，銀漿其成分為 70% 銀粉末、環氧樹脂與有機溶劑，由於是有機溶劑型的銀膠，所以其狀態會隨有機溶劑揮發而改變，圖 4-9 之實驗分別量測固化與未固化之銀膠接觸角大小，實驗與量測水滴接觸角類似，將定量銀膠沾附於滴管前端，同樣利用升降載台使基板與銀膠接觸，首先量測未固化之銀膠接觸角，未固化之銀膠具有高黏度與良好的觸變性，量測結果顯示未固化銀膠之接觸角，其基板的特性影響不如水滴接觸角明顯，但是從結果仍然可以觀察到，表面能大的基板其與銀膠之接觸角也較小，而表面能最低的鐵氟龍基板其接觸角仍然為最大。量測完未固化銀膠接觸角後，利用銀膠製造商給的固化參數，將銀膠置入 120° 之烘箱，靜置 20 分鐘後，緩將溫度慢降至室溫，之後利用接觸角系統再次量測銀膠接觸角，可以發現固化後銀膠的塌陷，使固化後接觸角大小皆小於固化前數值，表面能最低的鐵氟龍基板其塌陷角度最少。從接觸角的量測結果可知，基板之表面能確實會影響到銀膠接觸角，基板的表面能越高，越容易使銀膠攤於基板上，使其接觸角減少。

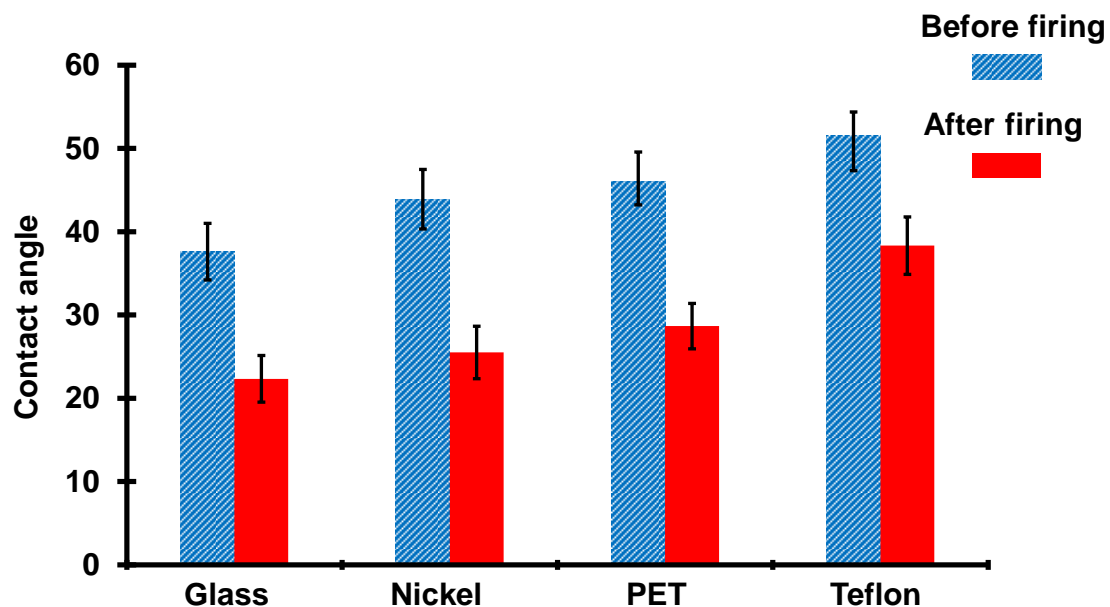


圖 4-9 銀膠接觸角固化前後分析圖。銀膠固化時，會因基板表面能而塌陷，表面能越大之基板，其塌陷程度越大。

圖 4-10 顯示銀膠於鐵氟龍與 PET 兩種基板上的形貌變化，由圖 4-10(A)顯示銀膠於鐵氟龍基板上形貌圖，銀膠高度會因為其觸變性被滴管拉高，在相同條件下，鐵氟龍基板上的銀膠之站立高度，明顯比圖 4-10(B)於 PET 基板上的銀膠高，原因為受到基板表面能所影響，鐵氟龍基板上的銀膠固化後，其塌陷而擴大之面積也最少，也是由於其表面能最低的緣故，使得銀膠塌陷程度最少，然而，PET 基板上之銀膠固化後，近乎完全攤平於基板上，厚度相對原本減少許多，顯示 PET 基板之吸附力仍然大於銀膠的表面張力，導致銀膠之表面張力無法維持其輪廓形貌，最終銀膠慢慢吸附至基板上。

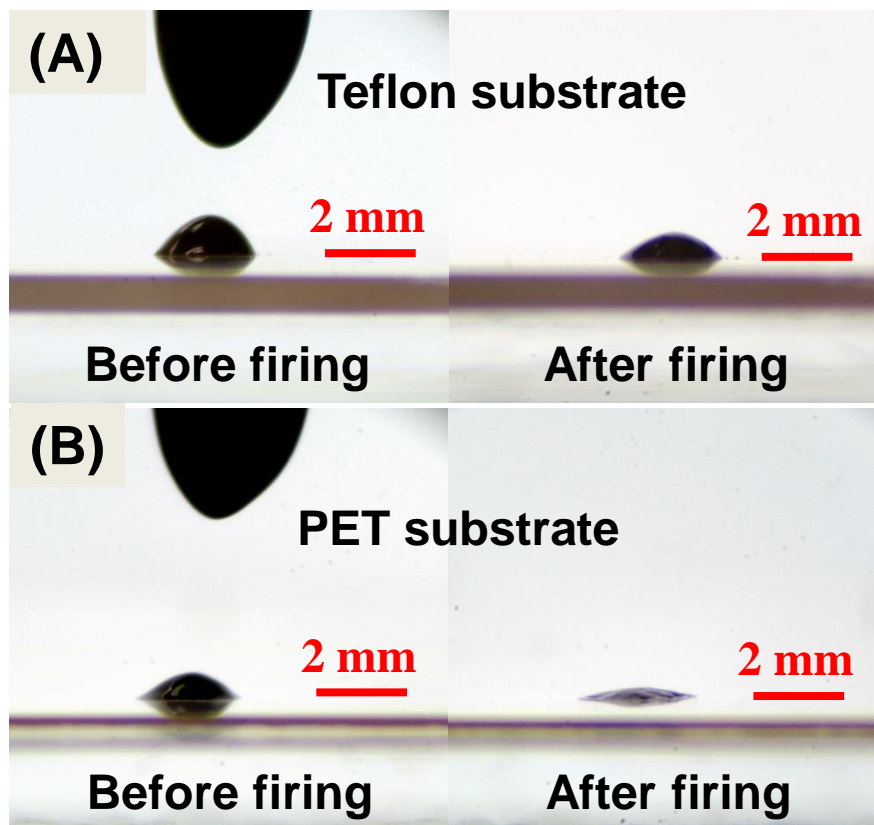


圖 4-10 基板表面能對於固化銀膠厚度影響。(A)鐵氟龍基板表面能低，使銀膠固化後仍然能維持其原本形貌，(B)銀膠於 PET 基板上無法維持原本形貌，會逐漸塌陷直到表面張力與吸附力平衡。

### 4.2.3 表面電漿改質分析

表面電漿改質其主要是利用電漿解離氣體，根據不同的反應氣體，可以產生不同的官能基於物件表面上，使處理基板得到改質效果，本研究利用大氣之中的氮與氧分子當作反應氣體，在基板表面產生羥基，使改質基板之親水性增加。因此，透過表面電漿改質系統，我們可以將疏水材料之基板，改質成為具有親水性質材料。印刷時基板之表面能是影響入墨的一項因素，當印刷尺度縮小至 50  $\mu\text{m}$  時，印墨會受到入墨孔側壁表面張力影響，使得入墨難度提高，印刷基板之表面能的提高，能讓印墨更容易轉移至印刷基板上，使得印刷圖案不會產生缺陷，透過電漿改質系統來提高基板之表面能，有助於入墨量的提升。圖 4-11 為不同電漿功率改質效果水滴接觸角量測分析，實驗使用 PET 材料當作接觸角量測基板，並分別以 25 W、50 W、75 W 與 100 W 的電漿功率去做基板改質，其處理時間與腔體壓力分別固定為 5 分鐘與 500 mTorr，此壓力之下容易產生電漿且均勻度高，並且使用一般機械式幫浦即能達到的真空環境，因此，500 mTorr 是電漿處理常用的壓力指數之一，圖 4-11 清楚地顯示改質前後接觸角的差異，接觸角的改變表示表面張力的改變，意味著表面能的大小變化，藉由 CCP 所產生的電漿進行改質，處理時間僅為 5 分鐘就能將接觸角大小減少近 70%，有無電漿改質處理特性相差甚大，原本為疏水性質的 PET 基板，經由處理後其親水性如同玻璃基板，而隨著功率的提升，其親水性也越來越強，但是效果並無明顯劇烈改善。由於電漿處理時，氣體離子會持續轟擊物件表面，進而產生熱能累積，許多軟性原件都是利用高分子材料當作基板，如本實驗所使用的 PET 基板，其普遍耐熱溫度約 100 $^{\circ}\text{C}$  至 200 $^{\circ}\text{C}$  甚至更低，處理功率與時間不宜過長，避免其因為熱能累積產生熱應力，使高分子物質產生塑性變形，因此，本實驗之印刷基板改質與清潔，其處理時間皆固定為功率 50 W 與處理時間 5 分鐘。

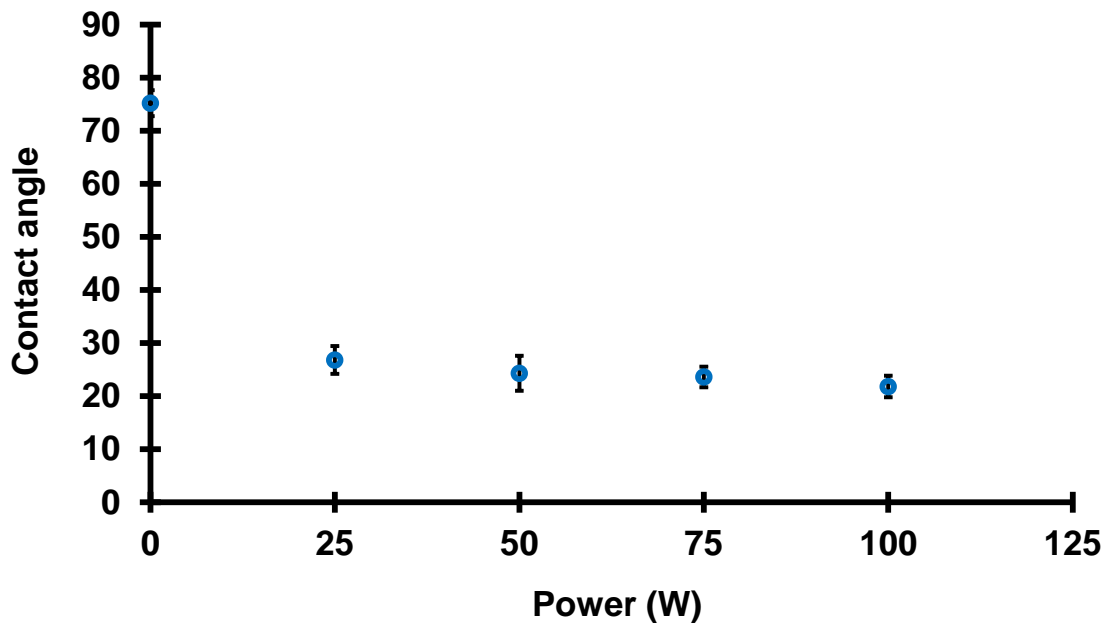


圖 4-11 不同瓦數改質效果分析圖表。改質效果會隨處理瓦數提升而增加，經過表面電漿處理，其改質效果相當顯著。

除了量測改質成效之外，本實驗亦分析其改質時效性，圖 4-12 為表面電漿改質時效性分析數據圖，實驗為為使用功率 50 W 之電漿處理 PET 基板 5 分鐘，之後利用去離子水量測 PET 基板接觸角大小，處理過後的樣品會靜置於常溫常壓下的玻片盒內，經由每日量測接觸角大小，推算其改質衰退率，圖 4-12 顯示了電漿改質時效性量測結果，電漿改質完後所測得之水滴接觸角約  $24.3^\circ$ ，而隨著放置天數增加，其改質效果日益漸少，接觸角會慢慢回彈至原本大小，代表已無改質效果存在，從量測結果得知，在電漿功率 50 W 與時間 5 分鐘，保存於一般室內玻片盒中，其效果約能維持 5 天，由於基板表面暴露於大氣之中，其水氣會慢慢吸附至基板，使得改質效果越來越少，最終基板表面能會恢復至原本狀態。

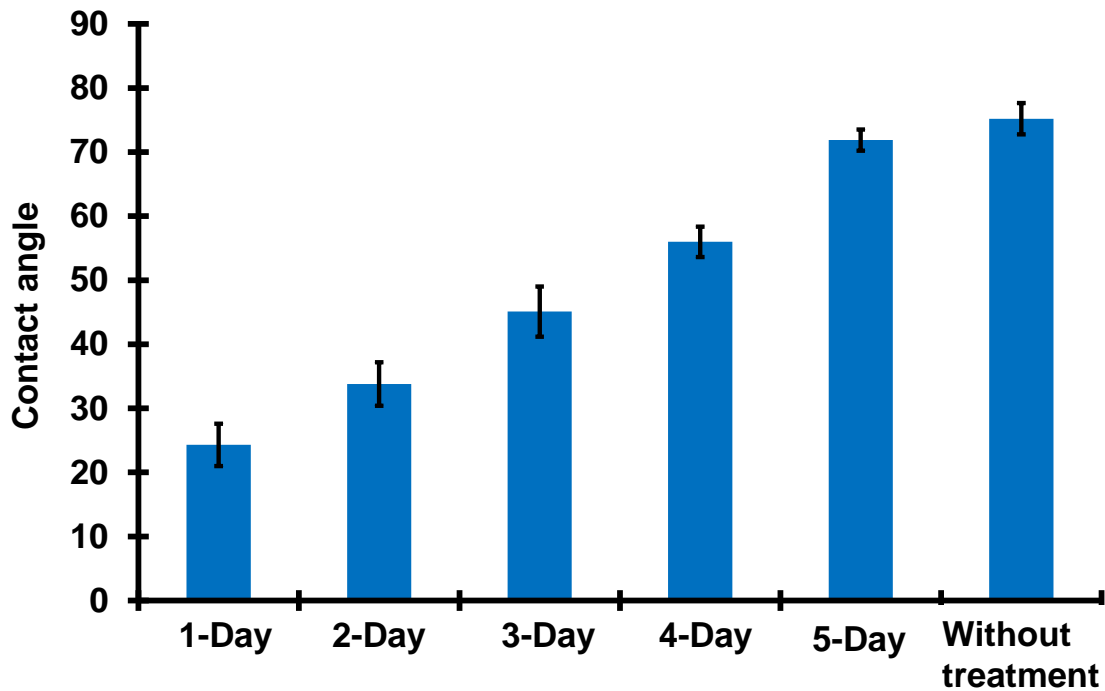


圖 4-12 電漿改質時效性分析圖。基板經電漿改質後，暴露於大氣之中，改質效果會隨時間而遞減，其改質時效性約可以維持 4 天。

### 4.3 印刷結果實驗分析

本節將對於本研究所開發之印刷鋼版，其印刷結果進行分析，藉由使用不同厚度之印刷鋼版，並印刷銀漿於不同基板上，分別量測其印墨之厚度與寬度，比較不同狀態下印墨之形貌與外擴比例。印刷鋼版之入墨孔的厚度與形狀決定了印墨的厚度與寬度，理想情況下，印墨形貌要與入墨孔一樣，然而，印墨會因為其固體含量以及表面張力的關係，在其固化過程中會使印墨厚度下降與墨線外擴，因此我們可以藉由入墨孔的厚度  $h$  與寬度  $w$ ，透過量測固化後的印墨的高度與線寬，量得實際印墨線寬  $w'$  與厚度  $h'$ ，得以計算實際印墨之高寬比，圖 4-13 為其示意圖。印墨形貌變化量計算公式如下：

$$W(\%) = \frac{w'}{w} \times 100\% \quad (4-1)$$

$$H(\%) = \frac{h'}{h} \times 100\% \quad (4-2)$$

$$AR = \frac{h'}{w'} \quad (4-3)$$

$H(\%)$ :印刷厚度誤差百分比

$W(\%)$ :印刷線寬誤差百分比

$AR$ :印刷結構高寬比(Aspect ratio)

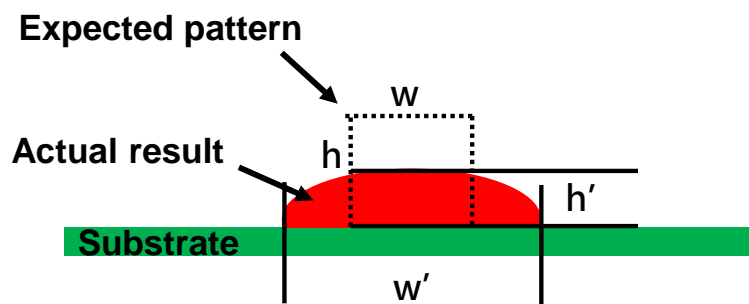


圖 4-13 印墨變形示意圖。印墨受到基板表面能吸附，使墨層厚度下降，墨線外擴。

### 4.3.1 超精細圖案印刷分析

圖 4-14 為使用雙層結構鋼版所印刷出來的超細圖案，實驗為使用本研究所開發之印刷鋼版，利用開口  $60^\circ$  角的合成橡膠刮刀，以約 15 N 力量與 15 cm/s 速度刮印銀膠至 PET 基板上，印刷完畢後，再以  $120^\circ\text{C}$  烘烤 20 分鐘使銀膠固化，固化完成後便結束印刷作業。圖 4-14(A)顯示超細直角印刷圖案，可以觀察到寬度約  $40\ \mu\text{m}$  且長超過 1 mm 的直角圖案，成功地被印刷於 PET 基板上，印刷時刮刀是由固定方向刮印，與刮印方向垂直之圖案，會有更多的入墨產生，但是從本研究之印刷結果可知，橫向圖案相較縱向圖案並無明顯差異，顯示儲墨槽結構確實發揮作用，不但增加入墨效率，同時也提供均勻入墨量。圖 4-14(B)顯示超細線寬圖案的印刷結果， $20\ \mu\text{m}$  寬的細線成功地被印刷於 PET 基板上，突破傳統印刷術之  $50\ \mu\text{m}$  的限制，使得印刷尺度降低 50% 以上，可以觀察到線條邊緣平整，有別於傳統印刷術會產生的波浪紋，利用印刷鋼版所刮印之圖案，其印刷圖案更為精細且準確。



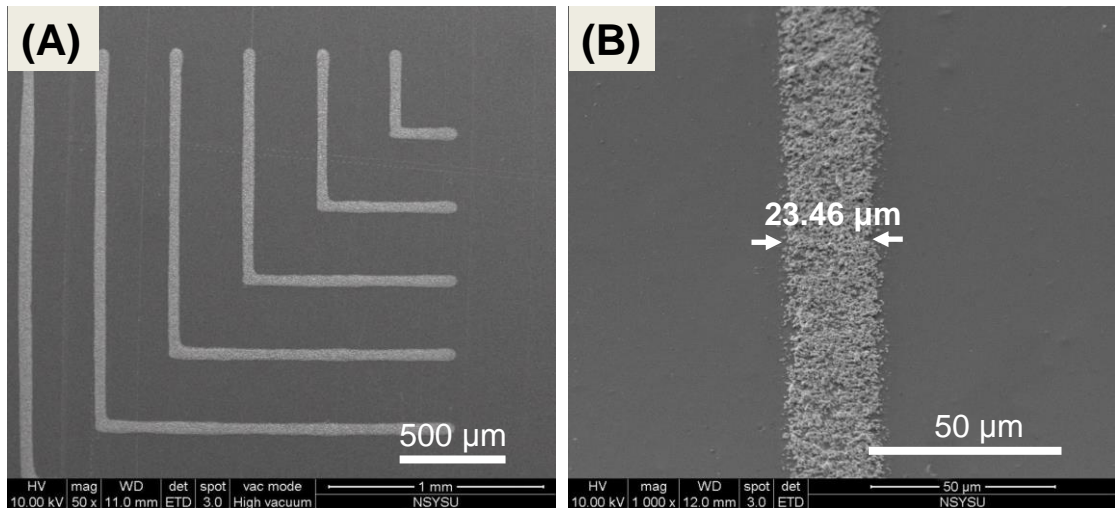


圖 4-14 超精細圖案印刷結果。(A)垂直線條均勻的印於 PET 基板上，無明顯線寬改變，顯示入墨相當均勻。(B)低於 50  $\mu\text{m}$  之線寬也可以被印出。

圖 4-15 為印刷鋼版與印墨圖案比較圖，圖 4-15(A)為線徑 40  $\mu\text{m}$  的直角圖案，而圖 4-15(B)則是線徑 20  $\mu\text{m}$  的直角圖案，由圖 4-15(A)與(B)可以觀察到，印刷圖案與鋼版開口幾乎完全相同，只有少量的滲墨效應產生，但是其影響不大，印墨線條都保持直條，而且並沒有發生斷線情況，顯示印刷作業相當成功，而且印刷鋼版確實發揮其作用，成功使圖案轉移至基板上。

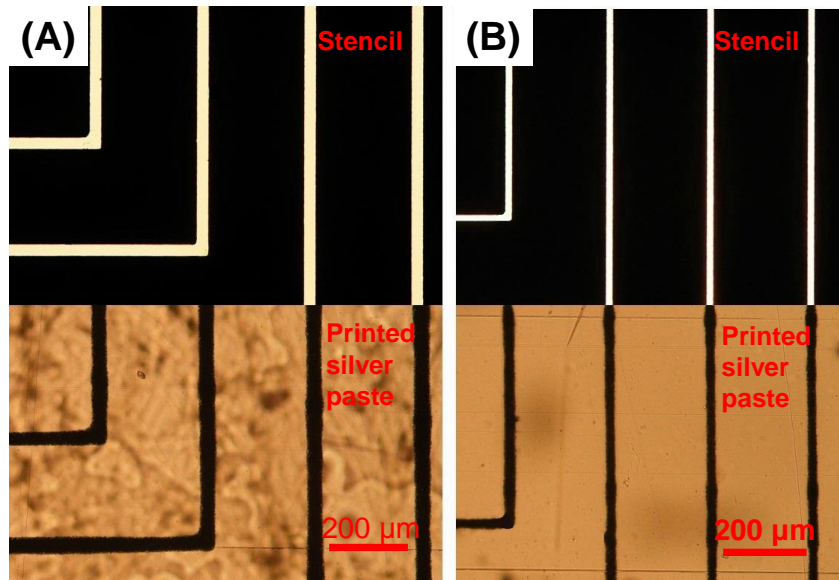


圖 4-15 鋼版入墨孔結構與實際印刷結果比較圖。圖片上方為實際電鑄之鋼版結構，下方圖案則為印刷結果，對照起來兩者並無太大差距，顯示本實驗印刷鋼版，其印刷解析度相當良好。

圖 4-16 為利用銀膠所印刷的點狀與棋盤圖，圖 4-16(A) 直徑 50  $\mu\text{m}$  等間距的 20 $\times$ 20 點陣印刷圖，圖案如預期中轉印至基板上，圓形點陣圖成功印於 PET 基板上，其圓形銀膠結構完整且均勻，無缺陷或是嚴重滲墨情形產生。圖 4-16(B)則為政方型與圓形組成的棋盤圖，可以很明顯的觀察到兩種邊長的矩形圖案，與圍繞在矩形四周的圓形圖案，顯示本研究所開發之印刷鋼版，其印刷圖案解析度相當高，雖然矩形圖案四周仍有導圓角產生，不是預期當中的直角，其是因為黃光微影所定義之光阻結構，無法完美呈現直角狀態，導致後續電鑄結構亦形成導圓角結構，並非是印刷所造成的情況。

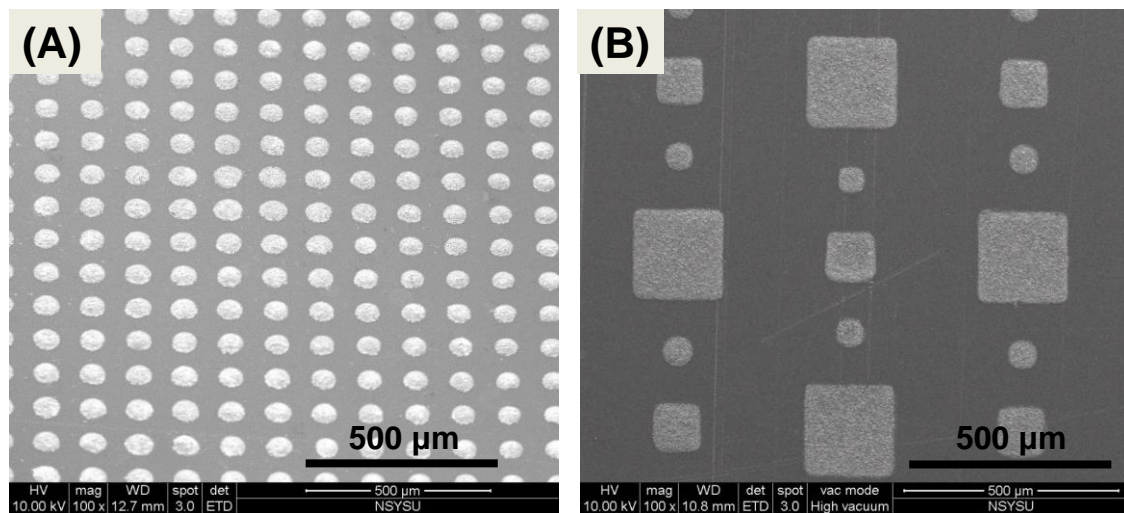


圖 4-16 精細點陣圖與棋盤圖印刷結果。(A)高密度的點陣圖成功地印於 PET 基板上，墨點相當均勻且缺陷，(B)矩形與圓形圖案所組成的棋盤圖，可以輕易的辨識出矩形與圓點圖案，印墨結構邊緣相當平整。

圖 4-17 為網版印刷之遮蔽效應及其實際印刷結果，與本研究開發之雙層印刷鋼版及印刷結果比較圖，圖 4-17(A)為利用線徑 20  $\mu\text{m}$  編織而成的網版，可以看到許多印刷圓孔剛好被鋼絲網所遮蔽，導致圖 4-17(B)其所顯示的印刷結果，許多開孔處因為鋼絲線的遮蔽，印墨無法成功轉移至基板上，圖 4-17(C)為本研究所開發之雙層印刷鋼版，可以看到透過儲墨槽的設計，入墨孔不會被鋼絲線所阻擋，而圖 4-17(D)為印刷結果圖，由於沒有遮蔽效應的問題，所以印墨皆成功地被轉印至印刷基板上，透過儲墨槽的設計，解決了傳統網版印刷技術所遇到的遮蔽問題，使印刷解析度得到提升。

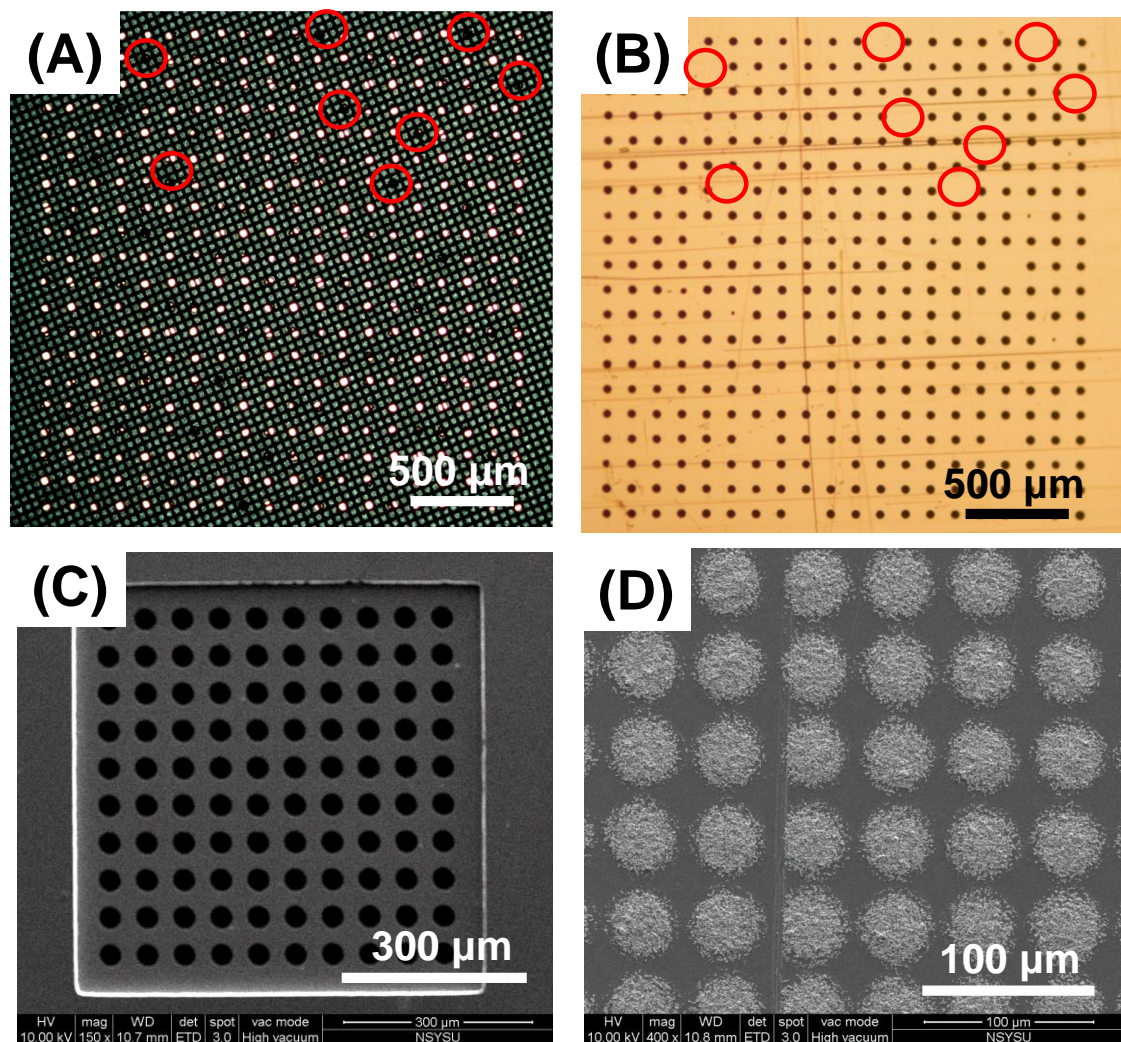


圖 4-17 傳統網版印刷之遮蔽效應改進效果。(A)(B)傳統網印技術受到線徑的限制，低於 50  $\mu\text{m}$  的圖案會受到鋼絲線阻擋，無法被印於基板上，(C)(D)本實驗使用雙層印刷鋼版印刷圖案，入墨孔全部皆順利入墨，改善以往因線徑阻擋所遇到之問題。

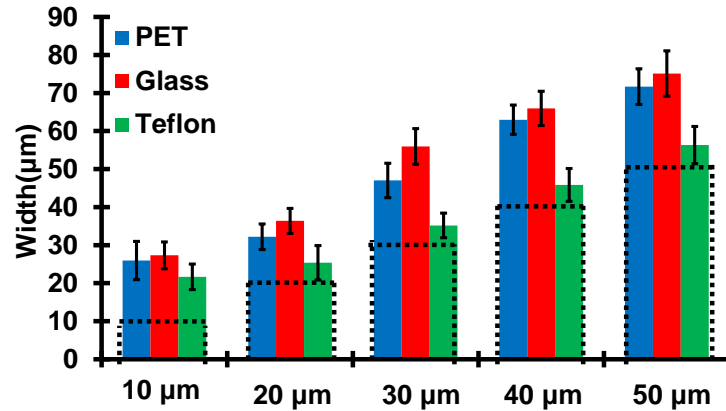


### 4.3.2 印刷銀膠線寬分析

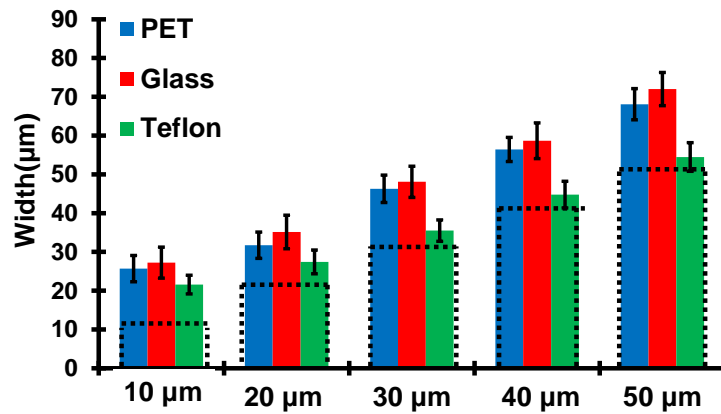
圖 4-18 是實際印刷線條之寬度統計圖表，由於本研究所使用之印墨為有機溶劑形，其狀態會隨時間揮發而改變，因此，印刷時都採用前五印之印刷結果，減少因印墨狀態改變，而產生的印刷誤差，因為剛開始印刷時，銀膠會較為濕潤，所以會產生較為嚴重的滲墨現象。由於目前印刷技術之限制為 50  $\mu\text{m}$  的超細線寬，因此本實驗所設計之印刷線寬，是由線寬 10  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$ 、40  $\mu\text{m}$  與 50  $\mu\text{m}$  的直長條圖案，並且分別使用三種不同厚度的印刷鋼版，其厚度分別為 2  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$  與 6  $\mu\text{m}$ ，比較不同厚度之入墨孔所造成的影響，越厚的入墨孔代表其印墨高度也越高，同時，印刷在三種不同表面能的基板上，本實驗分別選擇表面能極高的玻璃，與表面能極低的鐵氟龍當作印刷基板，另外，由於目前軟性電子印刷需求越來越多，也選擇適用製作軟性電子材料的 PET 當作印刷基板，比較不同表面能之印刷基板，其對於印墨以及印刷精度之影響。圖 4-18(A)為利用 6  $\mu\text{m}$  厚的鋼版入墨孔所印刷之結果，圖 4-18(B)與圖 4-18(C)則是分別利用 4  $\mu\text{m}$  與 2  $\mu\text{m}$  厚的入墨孔。三種顏色長條代表印刷於不同基板上，橫坐標為印刷圖案之線寬尺度，由 10  $\mu\text{m}$  至 50  $\mu\text{m}$ ，黑色虛線代表預期印刷線寬，可以觀察到，全部之印刷結果皆比預期印刷寬度大，印墨皆會產生滲墨效應，這是因為受到基板表面能影響，當銀膠之表面張力無法支撐其結構時，銀膠會慢慢塌落直到與表面能達到平衡，因此，從印刷結果可以得知，印刷線寬越大時，代表入墨量增加，銀膠所滲墨的範圍也會增加，另外一項影響印刷解析度之因素便是基板表面能，從印刷結果可以得知，表面能最低的鐵氟龍基板，其滲墨的距離最少，當印刷線寬為 50  $\mu\text{m}$  時，玻璃基板的銀膠外擴情形最為嚴重，其次是 PET 基板，將近比預期多了 50% 的線寬，也就是銀線兩側各擴大 10  $\mu\text{m}$ ，儘管如此，隨著入墨孔線寬縮小時，銀膠的寬度總寬度也可隨之縮小，因此還是可以印刷出低於 50  $\mu\text{m}$  的圖案。然而，印刷尺度也並非可以無限制縮小，從圖 4-18 可以得知，當印刷線寬為 10  $\mu\text{m}$  時，其滲墨相當嚴重，幾乎外擴兩倍原本預期線寬，換句話說，本實驗所使用銀膠，於玻璃與 PET 基板

上，其印刷最小尺度約為  $20\ \mu\text{m}$ ，如果要在印刷更小尺度的圖案，則須要更換銀膠，或者再降低印墨之高度，使墨層不易塌陷，才有可能印刷出更為精細之圖案。值得注意的是鐵氟龍基板的印刷結果，不管是哪種厚度的鋼版所印刷之結果，其滲墨現象不明顯，幾乎與預期線寬一樣，原因就是鐵氟龍其極低的表面能的關係，在印刷鋼版厚度為  $4\ \mu\text{m}$  以上，印刷線寬  $20\ \mu\text{m}$  以上圖案時，其滲墨距離約為  $2\ \mu\text{m}$ ，顯示銀膠確實能夠站立於低表面能基板上，銀膠較能保持其印墨形貌，同樣在印刷  $10\ \mu\text{m}$  圖案時，仍然不能穩定的印出  $10\ \mu\text{m}$  尺度之圖案，顯示縱使使用表面能極低的基板，當印刷尺度低於一定線寬時，印墨無法完美的站立於基板上。但是，當入墨孔厚度為  $2\ \mu\text{m}$  時，可以由圖 4-18(C)觀察到，於鐵氟龍基板上的  $10\ \mu\text{m}$  圖案，其平均線寬僅有  $16\ \mu\text{m}$ ，與預期之線寬相當接近，由於入墨量是取決於入墨孔之開口寬度、厚度以及印刷基板表面能，當入墨孔厚度減少時，入墨量也跟著減少，因此，印墨的高度會減少，使印墨更容易維持原本形貌，滲墨的影響會較少。

(A) Stencil thickness – 6  $\mu\text{m}$



(B) Stencil thickness – 4  $\mu\text{m}$



(C) Stencil thickness – 2  $\mu\text{m}$

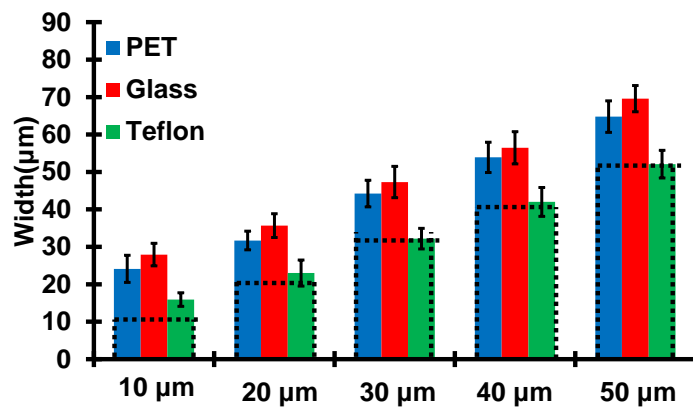


圖 4-18 利用三種厚度與基板之印刷線寬統計圖表。最小的預期印刷尺度為 10  $\mu\text{m}$ ，受到基板表面能影響，使線寬比預期大，隨著使用越薄的鋼版印刷，其印刷解析度也會越來越高，且印於鐵氟龍基板之結果最好。

圖 4-19 為銀膠外擴誤差分析圖，實驗為使用 2  $\mu\text{m}$  厚入墨孔所印刷之結果，利用 4-1 式計算其線寬誤差值，從圖 4-19 中可以得知，銀膠外擴最嚴重的基板是表面能最大的玻璃，其次是 PET 基板，而印刷精度最高的則是鐵氟龍基板，證明具有高表面能之基板，其印墨外擴最為嚴重，而表面能低的基板其墨層越能維持原本線寬，而隨著印刷線寬尺度縮小，表面能的影響也越來越大，可以觀察到，印刷精細圖案時，其在玻璃基板之印墨大約會擴大 20  $\mu\text{m}$  距離，而 PET 基板約為 15  $\mu\text{m}$ ，鐵氟龍更是僅有 6  $\mu\text{m}$  之外擴誤差，顯示基板表面能的吸附力，影響到了印墨的外擴多寡，而隨著線刷線寬尺度的縮小，利用高表面能的玻璃基板印刷時，其影響也從原本的 60% 上升至 180% 之多的外擴比例，而低表面能的鐵氟龍基板外擴比例很少，在印刷尺度低於線寬 30  $\mu\text{m}$  時，其外擴誤差不到 10%，可以注意到，雖然外擴比例上升，但是外擴的線寬距離並沒有增加太多，其為基板與印墨之物理行為，並非是本研究印刷鋼版所造成之印刷誤差。

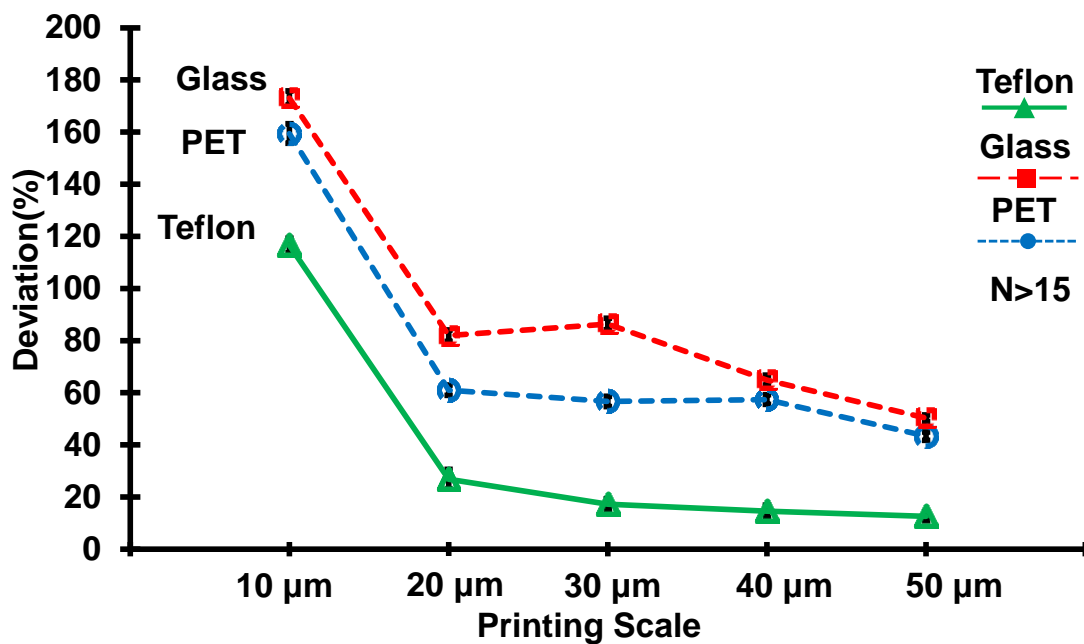


圖 4-19 厚度 2  $\mu\text{m}$  入墨孔之印刷線寬誤差數據圖。印刷誤差隨印刷尺度的縮小而上升，鐵氟龍基板其印刷結果最為精準，最小線寬印刷時，誤差值僅有 60%，相當於可以印出線寬 16  $\mu\text{m}$  之圖案。

### 4.3.3 印刷銀膠厚度分析

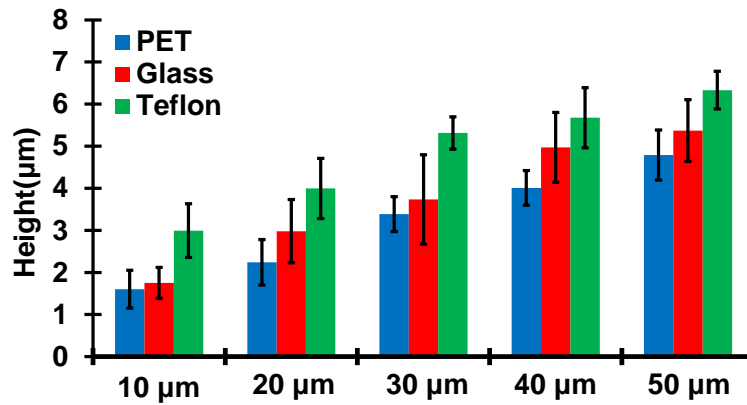
承接印刷銀膠之線寬，印墨的厚度也會受入墨孔所影響，理想狀態下，印墨形貌要與入墨孔一模一樣，由於表面張力以及印墨的固體含量，其印刷結構厚度會略低且寬於預期大小。然而，當印刷尺度縮小至微米尺度時，印刷孔側壁的摩擦力、印墨的表面張力及印刷基板的表面能，其所造成的影響會大上許多，印墨可能會因為其表面張力，使入墨難度增加，小尺度的圖案入墨量會不足，造成印墨斷線產生。圖 4-19 為印墨厚度與入墨孔的關係圖，同樣是利用厚度分別為 6  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$  與 2  $\mu\text{m}$  的入墨孔所印刷不同線寬的結果，其印刷詳細數據於附錄一與附錄二所示，從圖 4-20 可以觀察到，印墨的厚度會隨印刷尺度與鋼版厚度而改變，印刷線寬的縮小使銀膠厚度跟著減少，其入墨量的減少，證明在小尺度情況下表面張力的影響力越來越大，使入墨孔內之銀膠無法完全轉移至印刷基板上。

另外，基板之表面能也會影響到入墨量，表面能最大的玻璃基板，其銀膠印刷寬度與高度，均大於疏水材料 PET 基板，顯示擁有較高表面能之基板，其能吸附更多的銀膠至基板上，增加入墨量，入墨量提高代表墨層也越厚，印墨的表面張力無法維持原本印墨形貌，因此印墨會受到表面能的影響慢慢塌落，直到表面張力與基板吸附力達到平衡才會停止，所以，雖然高表面能的基板增加了入墨量，但是卻也可能減少了印刷解析度。然而，實驗結果卻顯示，擁有最低表面能的鐵氟龍基板其印刷墨層最厚，其原因同樣與表面能有關係，基板表面能低代表吸附能力較差，所以印墨其表面張力較能維持原本印刷形貌，使墨層更不易塌陷，同時我們可以從圖 4-20 觀察到，鐵氟龍基板之印刷墨層厚度，有時候會大於入墨孔厚度，原因是本實驗所使用之銀膠，其黏滯性非常高，印刷過程進行時，銀膠在入墨孔離板時，其高度會再被往上拉起，此現象於玻璃基板與 PET 基板也可以觀察到，然而，鐵氟龍擁有極低的表面能，使銀膠較能維持其原本形貌，使得印墨高度會較其他兩者基板高。表面能低的基板雖然可以獲得較高且較佳的解析度，但是相對來說，低表面能的基板其入墨量可能會不足，導致部分區域墨層轉移失

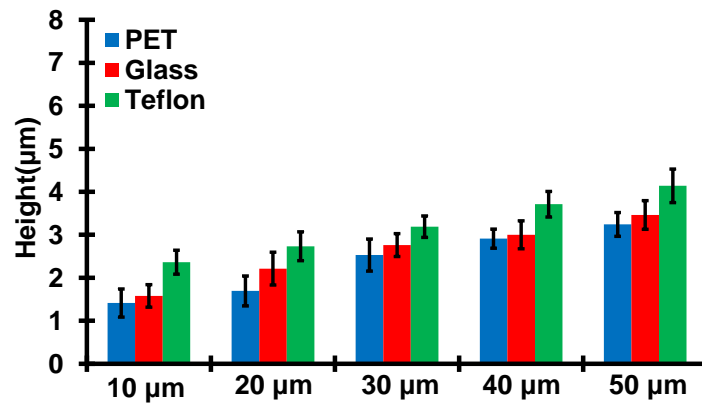


敗，造成不連續圖案的產生，因此，基板並非表面能越低越好，雖然印刷結果顯示其印刷解析度最佳，但是其印刷良率不佳，如何選擇不同表面能的基板，需要考慮到其印刷限制及應用。從 4-3 式可以計算出印墨的高寬比，印刷於鐵氟龍基板之高深比最多可達 0.157，而玻璃基板與 pet 基板由於印墨塌落嚴重，其高深比均低於 0.1，若是要印刷高深比大的銀膠結構時，應選擇鐵氟龍作印刷基板，可得到較佳的印刷結果，也可以透過表面電漿改質系統，將原本疏水的表面處理成親水性質，增加入墨量，使印墨厚度提高，減少斷線機會。

### (A) Stencil thickness – 6 $\mu\text{m}$



### (B) Stencil thickness – 4 $\mu\text{m}$



### (C) Stencil thickness – 2 $\mu\text{m}$

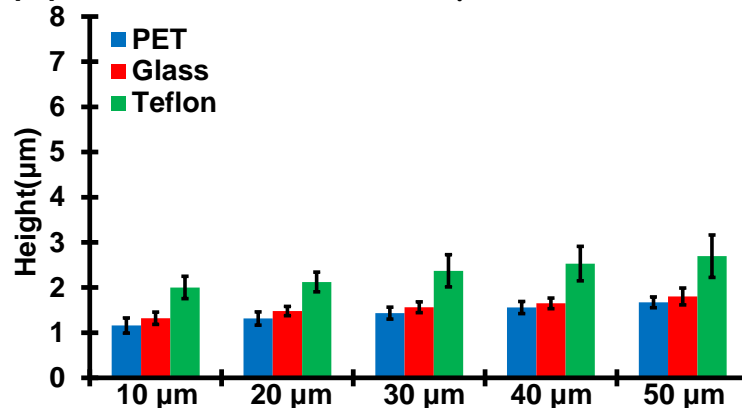


圖 4-20 利用三種厚度與基板之印刷厚度統計圖表。印墨厚度會隨著入墨孔厚度減少而下降，印刷線寬也會影響到印墨之厚度，表面能最低的鐵氟龍基板，印墨可以維持其原本形貌，印墨厚度與預期結果最接近。

承如文章先前所描述，印墨的厚度取決於其固體含量以及入墨孔厚度，理論上印刷厚度要與入墨孔厚度一樣，接著隨著固化過程進行及基板表面能作用，厚度會逐漸下降，本研究所使用印刷銀膠固體含量為 70%，所以理論上印刷厚度會比預期少 30%，圖 4-21 為印刷銀膠厚度誤差分析圖，實驗為利用厚度 2  $\mu\text{m}$  之入墨孔印刷精細圖案，使用 4-2 式計算印墨厚度誤差值，入墨孔厚度 2  $\mu\text{m}$  即為設定印刷厚度，從圖 4-21 之高度曲線可以觀察到，鐵氟龍基板的印刷厚度最高，甚至可以超過原本預期高度，從結果來看，利用鐵氟龍基板之印刷結果，相較玻璃基板與 PET 基板，會有將近優於 40% 的印刷厚度誤差，而 PET 基板之印刷厚度則為最低，其印刷厚度誤差也最大，其印刷厚度只有原本預期的 60% 至 80%，考量到銀膠之固體含量 70%，PET 基板與玻璃基板之印刷結果，也還在容許範圍內。鐵氟龍基板擁有極低之表面能，所以印刷過程中，印墨會隨著鋼版的離板，印墨也會隨之拉高，造成印刷厚度的補償作用，玻璃與 PET 基板雖然也會有此補償作用，但是由於其基板附着力大於印墨表面張力，導致印墨塌落與外擴，使得印刷之厚度會超過 20% 的誤差。

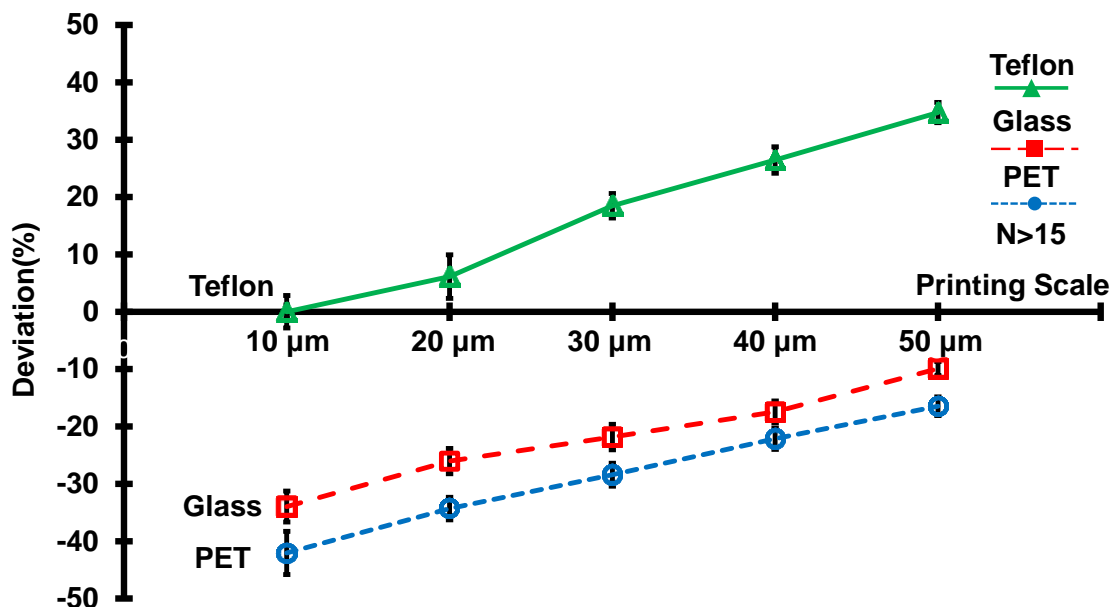


圖 4-21 厚度 2  $\mu\text{m}$  入墨孔之印刷線寬誤差數據圖。利用鐵氟龍基板之印刷厚度，與原本預期中最接近，印墨厚度補償超過預期 40% 厚度。

#### 4.3.4 超小間距印刷分析

本研究除了印刷尺度下降至  $20\ \mu\text{m}$  之外，縮小圖案之間間距也是一項重要工作，縮小印刷尺度與印刷間距，有助於提升印刷密度。圖 4-21 為超小間距印刷結果圖，圖 4-22 分別顯示線寬  $20\ \mu\text{m}$  和間距  $20\ \mu\text{m}$ ，與線寬  $30\ \mu\text{m}$  和間距  $30\ \mu\text{m}$  兩組等間距印刷結果，其圖案成功印刷於基板上，傳統印刷考量到滲墨效應影響，一般來說，線條之間的間距至少要為線寬之兩倍，也就是說，傳統的網印間距極限約為  $100\ \mu\text{m}$  以上，間距低於  $100\ \mu\text{m}$  稱之為超小間距(Ultra-fine pitch)。然而，傳統鋼版印刷科技是不利於印刷密集圖案，原因在於，過於密集的开孔，將會導致鋼版強度下降，導致該區域印刷壽命減少，本研究透過儲墨槽設計，減少入墨孔微結構在印刷時所承受之應力，有效提升印刷壽命，但是儲墨槽之設計，並不能避免結構之間的吸附效應產生，尤其是當印刷線寬，與印刷長度比超過 1:10 的時候，吸附效應更容易發生，可以注意到圖 4-22 其印刷長度約為  $400\ \mu\text{m}$ ，其印刷線寬與長度比已達 20，已經算是金屬結構之極限，若長度要再拉長，其印刷過程中銀膠在入墨時，極高可能會使長條狀金屬結構扭曲，進而破壞入墨孔結構。

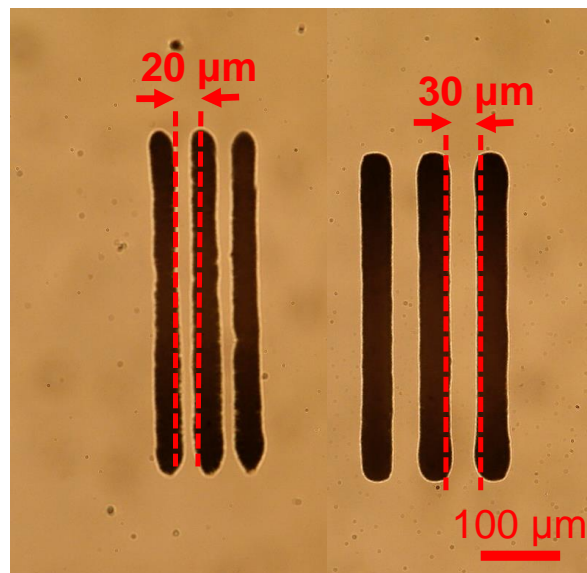


圖 4-22 超細間距印刷結果圖。印刷間距縮小至  $20\ \mu\text{m}$ ，印刷長度  $600\ \mu\text{m}$ ，相較傳統印刷技術其印刷間距大幅縮小。

圖 4-23 為結構受到吸附效應影響，圖中為兩線寬  $25\ \mu\text{m}$ 、間距  $15\ \mu\text{m}$  且長度超過  $500\ \mu\text{m}$  之長樑微結構，方形虛線處為結構因受表面張力影響，使長樑結構處產生變形互相纏繞或是黏附至兩側壁上，造成印墨孔結構損壞，使印刷圖案無法正確地轉移至基板上，只有縮小印刷間距，卻不能有效拉長印刷長度，那麼其應用會受到限制，另外從圖中可以觀察到，於虛線圓圈處有些許光阻剝落殘留，。

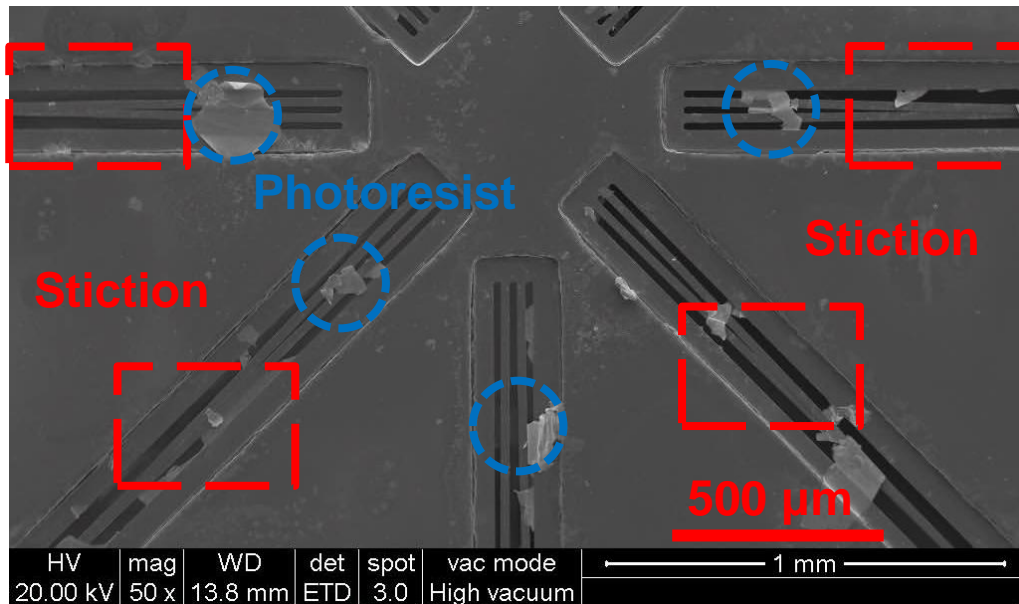


圖 4-23 鋼版微結構濕式離型後所造成之結構沾黏及光阻剝落。兩長樑結構受到表面張力影響，產生變形並吸附至鄰近結構上，並且有些許光阻剝落殘留。

因此，本研究於入墨孔微結構之間添加橋樑支架結構，對於微結構進行補強。圖 4-24 為使用橋樑結構印刷鋼版所印製的超小間距結果，總長度超過  $20\ \text{mm}$  之密集連續長條圖案，成功地被印於 PET 基板上，圖 4-24 顯示使用橋樑結構的印刷鋼版所印製的連續密集直線，其印刷果幾乎與預期一樣，沒有斷線、大量滲墨和波浪紋圖案產生。可以觀察到每隔  $200\ \mu\text{m}$  印刷線條便會有一些外擴，其成因是來自橋樑結構，當銀膠刮至橋樑結構時，由於結構與刮印方向成垂直，導致過量的油墨會入墨，但是並不會影響到印刷結果。

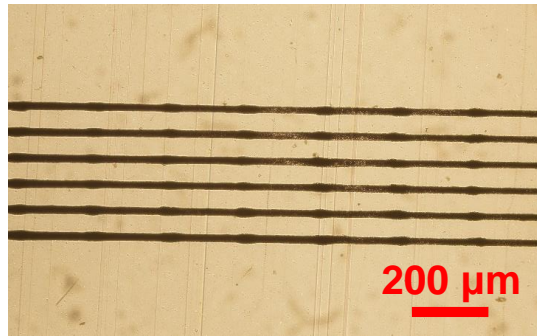


圖 4-24 超小間距連續長條圖案印刷結果。利用有橋樑支架結構印刷鋼版，所印刷的小線距圖案，精細線條印刷長度可超過 20 mm，且線間距小於 100  $\mu\text{m}$ ，無滲墨與斷線的產生，顯示橋樑結構確實發揮作用。

## 第五章 結論與未來展望

### 5.1 結論

本研究成功開發一創新製程，製作出具有多層結構印刷鋼版，印刷結果驗證，其大幅改善傳統印刷所遇到的問題。製程結合 AZ4620 與 SU-8 兩款光阻，定義不同層之結構，其最小線寬可達 10  $\mu\text{m}$ ，並利用精密電鑄使結構成型於玻璃基板上。當作電鑄種子層的鈦金屬層，除了當作金屬黏著層之外，更可以當作犧牲層，利用 HF 快速蝕刻鈦層使結構脫模。透過 CCP 系統進行表面改質，提高鍍層品質和金屬結構之間的附著力，最後，成功地將鋼版從玻璃基板上離型，且結構不會受到損壞。之後，利用手印方式快速驗證其印刷結果，同時比較，印刷於不同表面能基板時，基板對於印墨影響。

印刷技術由於其高產能與低成本，廣泛的被應用於電子產業當中，現今的印刷最小線寬受限於傳統印刷技術限制，使得低於 50  $\mu\text{m}$  之圖案難以被印刷出來，而圖案之間的間距，也受限於 100  $\mu\text{m}$  左右，隨著科技的發展與進步，如何能夠提高每單位面積的印刷圖案數量，降低最小印刷線寬與印刷間距，成為一大課題。透過儲墨槽簡單的設計概念，提升注墨效率與入墨均勻度，且儲墨槽內之印墨，於印刷時可以提供額外入墨，做為印墨的高度補償，使印墨結構厚度得到改善，同時也保護薄且細的入墨孔，提升使用壽命，使得薄且精細的圖案得以被印刷出來。而藉由結合黃光微影與電鑄成型技術，可以輕易的創造出多層金屬結構，並且藉由印刷結果來隨時調整各層金屬的設計，藉此得到最佳化鋼版設計，提升鋼版印刷解析度。

表面電漿改質系統，成功地提升基板的親水性，並且具有超過 3 天的改質時效性，透過表面電漿處理後，其明顯改善電鑄表面粗糙度，使  $R_a$  值僅有 0.05  $\mu\text{m}$ ，相較於未改質鍍層提高一倍的粗糙度，而且能增加金屬層之間的附著力，使多層金屬結構可以成功地被脫模。另外，從印刷結果得知，不同的基板表面能確實會對印墨造成影響，表面能大的基板可以提升入墨量，減少印刷斷線的產生，但同

時也造成墨層的塌落，降低印刷解析度;而表面能低的基板，其更容易使墨層維持原本形貌，提升印刷精度。

印刷結果顯示，本研究利用超薄雙層結構印刷鋼版，成功印出線寬 20  $\mu\text{m}$  圖案，傳統網版印刷技術，其印刷尺度受限於網布線徑，印刷尺度很難低於 50  $\mu\text{m}$ ，而鋼版印刷技術更因為受限於金屬薄版厚度，使印刷尺度無法有效縮小。此外，本研究添加橋樑支架結構於印刷鋼版中，延長極小間距圖案之印刷長度，且讓印刷間距下降至 20  $\mu\text{m}$ ，與過往研究比較，最小印刷線寬縮小約 30  $\mu\text{m}$ ，而印刷間距縮小一倍以上，而直角圖案的印刷顯示，本研究鋼版其入墨均勻，且印刷解析度高。由於印刷鋼版無開口率問題，透過儲墨槽結構的設計，20 $\times$ 20 之點陣圖案，可以 100% 完整的全部印出，相較傳統網印技術，改善 10% 的印刷效率，另外，傳統網印技術特有的印刷波浪紋理，在儲墨槽均於入墨的情況下，其印刷得到良好的改善。

本研究之創新高精度印刷微鋼版，透過創新製程結合兩種光阻與電鑄系統，成功將多層結構金屬印刷鋼版成型。結果顯示本研究高精度鋼版，可以印刷低於 50  $\mu\text{m}$  之線寬圖案，與 1  $\mu\text{m}$  的薄膜於不同基板上，透過橋樑支架結構的設計，更可以印刷高密及圖案於基板上，使其應用更為廣泛。本研究所提出的方法，其有效改善傳統印刷技術所遇到問題，透過快速且便宜的製程，製作高精度印刷鋼版，未來可以應用於高科技電子產業，提升印刷精度與產量，降低高科技產品之生產成本，使高科技產品更為普及。

## 5.2 未來展望

雖然印刷結果顯示，其印刷尺度已成功低於 50  $\mu\text{m}$ ，但是由於本研究所電鑄成型印刷鋼版，相對於印刷業界來說微小許多，未來對於更大面積的金屬鋼版成型，是否與本研究結果相符不得而知，且對於大面積鋼版製作與開發，其所帶來的獲益是否能夠高於傳統技術，亦是有待商榷。而且因為本研究是利用手印方式印刷，



其印刷變因較難控制，未來若是有實際印刷機台做印刷測試，對於其印刷參數與鋼版最佳化設計，具有相當大的幫助，此外，由於印刷技術的好處是，只要是流體的東西皆可以當作印墨，且印刷基板幾何形狀與材質限制較少，對於不同種類的印墨極基板，其搭配可以很多，透過印刷不同的印墨，提高應用價值。而本研究之印刷皆為單次印刷，若是能配合對準系統，並可以進行多次印刷，讓不同成分的印墨與結構印於相同基板上，大幅縮減與簡化既有的微機電製程，並且有效降低生產成本。另外，由於金屬鋼版其親水性相對於高分子材料大上許多，印刷時可能會有印墨滲入鋼版底部，造成印刷解析度下降，若能有效改質鋼版底部之親水性，使其變成疏水表面，相信有助於提升印刷精度與使用壽命。

## 参考文献

- [1] P. Jalonen, "A new concept for making fine line substrate for active component in polymer," *Microelectronics journal*, vol. 34, pp. 99-107, 2003.
- [2] N. Chandler and S. Tyler, "Ultra-fine feature printed circuits and multi-chip modules," *Microelectronics Reliability*, vol. 36, pp. 393-404, 1996.
- [3] T. Ogawa, T. Asai, O. Itoh, M. Hasegawa, A. Ikegami, K. Atoh, *et al.*, "New thick-film copper paste for ultra-fine-line circuits," *IEEE Transactions on Components and Manufacturing Technology*, vol. 12, pp. 397-401, 1989.
- [4] D. Erath, A. Filipović, M. Retzlaff, A. K. Goetz, F. Clement, D. Biro, *et al.*, "Advanced screen printing technique for high definition front side metallization of crystalline silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, pp. 57-61, 2010.
- [5] M. Ju, Y.-J. Lee, J. Lee, B. Kim, K. Ryu, K. Choi, *et al.*, "Double screen printed metallization of crystalline silicon solar cells as low as 30 $\mu$ m metal line width for mass production," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 100, pp. 204-208, 2012.
- [6] S. Pranonsatit and S. Lucyszyn, "Micromachined screen printing (MaSPrint) technology for RF MEMS applications," *High Frequency Postgraduate Student Colloquium*, pp. 3-6, 2005.
- [7] T. Schüler, T. Asmus, W. Fritzsche, and R. Möller, "Screen printing as cost-efficient fabrication method for DNA-chips with electrical readout for detection of viral DNA," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 24, pp. 2077-2084, 2009.
- [8] M. Kšniĝ, M. Deckelmann, A. Henning, R. Hoenig, F. Clement, and M. Hšrteis, "Dual Screen Printing Featuring Novel Framed Busbar Screen Layout and Non-Contacting Ag Busbar Paste," *Energy Procedia*, vol. 27, pp. 510-515, 2012.
- [9] G. E. Jabbour, R. Radspinner, and N. Peyghambarian, "Screen printing for the fabrication of organic light-emitting devices," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 7, pp. 769-773, 2001.
- [10] J. Pan, G. L. Tonkay, and A. Quintero, "Screen printing process design of experiments for fine line printing of thick film ceramic substrates," *Journal of Electronics Manufacturing*, vol. 9, pp. 203, 1999.
- [11] Y. Yen, T. Fang, and Y. Lin, "Optimization of screen-printing parameters of SN9000 ink for pinholes using Taguchi method in chip on film packaging," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, pp. 531-537, 2011.

- [12] D. Kim, S. Ryu, D. Shin, J. Shin, J. Jeong, H.-J. Kim, *et al.*, "The fabrication of front electrodes of Si solar cell by dispensing printing," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 177, pp. 217-222, 2012.
- [13] H. Hayashi, K. Honda, I. Sumita, U. Itoh, M. Yoshida, and H. Tokuhisa, "Preferable opening area of screen mesh to print fine finger electrode with less-bumpy surface," *Photovoltaic Specialists Conference*, pp.2158-2160, 2012.
- [14] C. Park, T. Kwon, B. Kim, J. Lee, S. Ahn, M. Ju, *et al.*, "Front-side metal electrode optimization using fine line double screen printing and nickel plating for large area crystalline silicon solar cells," *Materials Research Bulletin*, vol. 47, pp. 3027-3031, 2012.
- [15] D. Schwanke, J. Pohlner, A. Wonisch, T. Kraft, and J. Geng, "Enhancement of fine line print resolution due to coating of screen fabrics," *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, vol. 6, pp. 13, 2009.
- [16] S. Vasudivan and W. Zhiping, "Fine line screen printed electrodes for polymer microfluidics," *Electronics Packaging Technology Conference*, pp. 89-93, 2010.
- [17] R. Kay and M. Desmulliez, "A review of stencil printing for microelectronic packaging," *Soldering & Surface Mount Technology*, vol. 24, pp. 38-50, 2012.
- [18] T.-N. Tsai, "Improving the fine-pitch stencil printing capability using the Taguchi method and Taguchi fuzzy-based model," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, pp. 808-817, 2011.
- [19] L. Li and P. Thompson, "Stencil printing process development for flip chip interconnect," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 23, pp. 165-170, 2000.
- [20] J. Pan, G. L. Tonkay, R. H. Storer, R. M. Sallade, and D. J. Leandri, "Critical variables of solder paste stencil printing for micro-BGA and fine-pitch QFP," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 27, pp. 125-132, 2004.
- [21] R. Lathrop, "Solder paste printing and stencil design considerations for wafer bumping," *29<sup>th</sup> International IEEE CPMT SEMI on Electronics Manufacturing Technology Symposium*, pp. 229-237, 2004.
- [22] O. Krammer, L. M. Molnár, L. Jakab, and A. Szabó, "Modelling the effect of uneven PWB surface on stencil bending during stencil printing process," *Microelectronics Reliability*, vol. 52, pp. 235-240, 2012.
- [23] S. Bhat, G. Rao, N. Dinesh, and B. Baliga, "Photo-Defined Electrically Assisted Etching Method for Metal Stencil Fabrication," *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, pp. 1116-1121, 2011.

- [24] J. Yang, J. Cai, *et al.*, "Study of stencil printing technology for fine pitch flip chip bumping," *International Conference on ICEPT-HDP 9<sup>th</sup> Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, pp. 900-905, 2009.
- [25] J. Hoornstra, H. de Moor, A. Weeber, and P. Wyers, "Improved front side metallization on silicon solar cells with stencil printing," *Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp.5-9, 2000.
- [26] T. Yang, T.-N. Tsai, and J. Yeh, "A neural network-based prediction model for fine pitch stencil-printing quality in surface mount assembly," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 18, pp. 335-341, 2005.
- [27] J. Kloeser, K. Heinrich, K. Kutzner, E. Jung, A. Ostmann, and H. Reichl, "Fine pitch stencil printing of Sn/Pb and lead free solders for flip chip technology," *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 41-50, 1998.
- [28] D. Manassis, R. Patzelt, A. Ostmann, R. Aschenbrenner, H. Reichl, J. Wiese, *et al.*, "Technological advancements in Lead-free Wafer Bumping using Stencil Printing Technology," *European Microelectronics and Packaging Conference*, pp. 427-433, 2005.
- [29] G. Jackson, M. Hendriksen, R. Kay, M. Desmulliez, R. Durairaj, and N. Ekere, "Sub process challenges in ultra fine pitch stencil printing of type-6 and type-7 Pb-free solder pastes for flip chip assembly applications," *Soldering & Surface Mount Technology*, vol. 17, pp. 24-32, 2005.
- [30] W. E. Coleman , "Step stencils," *Global SMT & Packaging*, 2006.
- [31] Y. Tsuru, M. Nomura, and F. Foulkes, "Effects of boric acid on hydrogen evolution and internal stress in films deposited from a nickel sulfamate bath," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 32, pp. 629-634, 2002.
- [32] Y. Tsuru, M. Nomura, and F. Foulkes, "Effects of chloride, bromide and iodide ions on internal stress in films deposited during high speed nickel electroplating from a nickel sulfamate bath," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 30, pp. 231-238, 2000.
- [33] J. Dini and H. Johnson, "The influence of nickel sulfamate operating parameters on the impurity content and properties of electrodeposits," *Thin Solid Films*, vol. 54, pp. 183-188, 1978.
- [34] R. Oriňáková, A. Turoňová, D. Kladeková, M. Gálová, and R. M. Smith, "Recent developments in the electrodeposition of nickel and some nickel-based alloys," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 36, pp. 957-972, 2006.
- [35] J. Mearig and B. Goers, "An overview of manufacturing BGA technology." *Seventeenth IEEE/CPMT International in Electronics Manufacturing Technology Symposium*, pp. 434-437, 1995.

- [36] J. Chen and K. D. Wise, "A high-resolution silicon monolithic nozzle array for inkjet printing," *IEEE Transactions on Electron Device*, vol.44, pp.401-409, 1997.
- [37] H. Siringhaus, T. Kawase, R. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu, *et al.*, "High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits," *Science*, vol. 290, pp. 2123-2126, 2000.
- [38] J.-D. Lee, J.-B. Yoon, J.-K. Kim, H.-J. Chung, C.-S. Lee, H.-D. Lee, *et al.*, "A thermal inkjet printhead with a monolithically fabricated nozzle plate and self-aligned ink feed hole," *Micro Electro Mechanical Systems, Journal of*, vol. 8, pp. 229-236, 1999.
- [39] L. Zhang, H. Liu, Y. Zhao, X. Sun, Y. Wen, Y. Guo, *et al.*, "Inkjet Printing High-Resolution, Large - Area Graphene Patterns by Coffee - Ring Lithography," *Advanced Materials*, vol. 24, pp. 436-440, 2012.
- [40] T. H. Van Osch, J. Perelaer, A. W. de Laat, and U. S. Schubert, "Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates," *Advanced Materials*, vol. 20, pp. 343-345, 2008.
- [41] M. Pudas, J. Hagberg, and S. Leppävuori, "Printing parameters and ink components affecting ultra-fine-line gravure-offset printing for electronics applications," *Journal of the European Ceramic Society*, pp. 43-50, 2004.
- [42] <http://www.metallizationworkshop.eu>
- [43] <http://www.clean.cise.columbia.edu/>
- [44] <http://www.microchem.com/>
- [45] B. Bohl, R. Steger, R. Zengerle, and P. Koltay, "Multi-layer SU-8 lift-off technology for microfluidic devices," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, p. 1125, 2005.
- [46] A. Mata, A. Fleischman, and S. Roy, "Fabrication of multi-layer SU-8 microstructures," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, p. 276, 2006.
- [47] H. Keramati, J. Miao, and W. Chan, "Fabrication of five-layer three-dimensional miniature SU-8 axial fans using ultraviolet lithography," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 10, pp. 1-6, 2011.
- [48] N. Das, "Release of multi-layer metal structure in MEMS devices by dry etching technique," *Solid-State Electronics*, vol. 46, pp. 501-504, 2002.
- [49] B. Parvais, A. Pallandre, A. M. Jonas, and J.-P. Raskin, "Liquid and vapor phase silanes coating for the release of thin film MEMS," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 5, pp. 250-254, 2005.
- [50] J. Li, *et al.*, "Fabrication of metallic micromirror using electroplating technology," *Microsystem technologies*, vol. 17, pp. 1671-1674, 2011.

# 自述

姓名:陳必軒(Pi-Hsuan Chen)

出生日期:1990/02/17



學歷:

國立中山大學	機械與機電工程研究所	碩士	2012.09-2014.06
國立中山大學	機械與機電工程學系	學士	2008.09-2012.06

發表著作:

International conference

1. Chen, Pi-Hsun, Chun-Wei Huang, and Che-Hsin Lin. "Fabrication of thin stencil with buffer reservoir utilizing the combination of AZ4620 and SU-8 electroplating molds.", The 27<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(IEEE MEMS 2014), San Francisco, USA , Jan 26-30, 2014.

國內研討會:

1. 陳必軒、黃俊維、林哲信,“創新超小線寬電鑄網版之開發”, The 17<sup>th</sup> Nano and Microsystem Technique Conference, Taichung, Aug 22-23, 2013.
2. 陳必軒、黃俊維、劉冠志、曾健明、林哲信,“創新超薄精密雙層鋼版結構製程開發應用於印刷術”, 2013 Chinese Society of Mechanical Engineers, Ilan, Dec 6-7, 2013.
3. 陳必軒、林哲信,“創新精密雙層鋼版結構結合 AZ4620 和 SU-8 光阻製程開發” 2014 Conference on Precision Machinery and Manufacturing Technology, Kenting, May 23-25, 2014.

## 附錄

附錄一印刷印墨線寬數據表

Pattern	Injection hole thickness	Width (N>15)		
		Glass	PET	Teflon
	μm	μm		
10 μm line	2	27.91±3.02	25.3±3.62	15.9±1.8
	4	27.25±4.01	25.68±3.38	21.56±2.41
	6	24.35±3.55	25.9±5.02	21.65±3.35
20 μm line	2	37.62±3.16	34.69±2.5	25.36±4.53
	4	35.12±4.32	31.73±3.39	27.42±3.07
	6	36.38±3.29	32.2±3.34	25.3±4.53
30 μm line	2	48.04±4.19	46.23±3.56	32.2±2.75
	4	48.08±4.03	46.27±3.54	35.5±2.76
	6	55.92±4.7	47±4.53	35.17±3.25
40 μm line	2	56.45±4.29	53.91±4.04	42±3.87
	4	58.67±4.62	56.47±3.11	44.78±3.43
	6	65.96±4.49	62.96±3.8	45.83±4.31
50 μm line	2	69.59±3.49	64.78±4.21	52.08±3.68
	4	72±4.26	68.09±4.01	54.46±3.67
	6	75.13±5.93	71.67±4.75	56.3±4.92

附錄二 印刷印墨厚度數據表

Pattern	Injection hole thickness	Height (N>15)		
		Glass	PET	Teflon
	μm	μm		
10 μm line	2	1.32±0.14	1.15±0.17	2±0.25
	4	1.57±0.26	1.41±0.33	2.36±0.27
	6	1.75±0.37	1.6±0.45	2.99±0.64
20 μm line	2	1.48±0.1	1.31±0.14	2.12±0.22
	4	2.21±0.38	1.69±0.35	2.73±0.34
	6	2.98±0.75	2.24±0.54	3.99±0.72
30 μm line	2	1.56±0.12	1.46±0.13	2.37±0.26
	4	2.76±0.26	2.53±0.37	3.19±0.25
	6	3.74±1.06	3.38±0.41	5.31±0.38
40 μm line	2	1.65±0.12	1.56±0.13	2.53±0.28
	4	2.99±0.33	2.91±0.22	3.71±0.29
	6	4.97±0.83	4.01±0.41	5.68±0.72
50 μm line	2	1.8±0.18	1.67±0.12	2.7±0.27
	4	3.46±0.33	3.24±0.28	4.14±0.38
	6	5.37±0.73	4.79±0.59	6.33±0.45