

國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

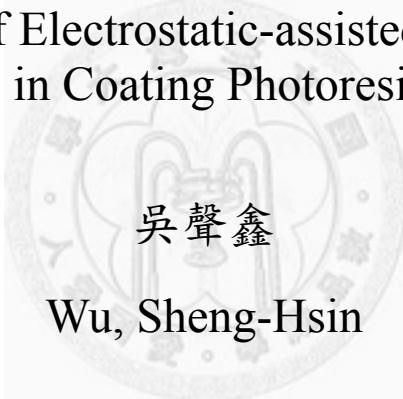
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

靜電輔助噴塗用於光阻塗佈之探討與應用

Development of Electrostatic-assisted Spray Coating
with Applications in Coating Photoresist onto Substrates



吳聲鑫

Wu, Sheng-Hsin

指導教授：楊申語 博士

Advisor: Yang, Sen-Yeu, Ph.D.

中華民國 99 年 6 月

June, 2010

致 謝

感謝天父上帝的帶領，這兩年的碩士生活能夠順順利利，儘管有許多挫折，但也都順利解決。感謝我的指導教授 楊申語博士在我碩士班兩年的指導，不管在專業研究領域及為人處事上，使我受益良多。感謝張復瑜授教、劉士榮教授與黃子健博士在百忙之中蒞臨學生的口試，並提供許多寶貴的意見和建議，使論文內容更加充實完整，在此銘謝。

感謝博士班學長子健、景棠、佳霖、承桓和榮宏學長在實驗方向與論文寫作上的指導，特別是景棠學長，在我作實驗的過程中常常給予協助與幫忙。感謝上屆學長昕駿、建璋、映達、冠男和偉志的教導，特別是昕駿的帶領與教導，使我能夠快速的瞭解實驗室的情況與實驗進行的流程，同時能為自己的論文作準備。再來感謝實驗室同學慧文、定緯、奕豪、維毅與振中，在實驗室的同窗兩年互相幫忙與互相學習，不僅在專業課程方面，同時也在英文與運動上精進。感謝碩一的佑豪、岱融、楷恆和宗甫在實驗室事務的處理，使我們碩二的可以專心的作實驗寫論文，不必擔心實驗室的大小事務。其中，要特別感謝學弟岱融，在我作實驗的期間，不厭其煩的給予協助，使我的碩士論文能夠順利的完成。

最後也是最重要的，要感謝我的家人，特別是父親吳家珍先生，使我在求學期間能夠不必擔心經濟上的問題，使我可以專心的在課業上努力，同時也給與人生的方向，讓我能堅定我的目標，勇往直前。感謝女友伊真在這段日子的陪伴與包容。謹將本論文獻給我最親愛的家人與女友，以及曾經給予我關懷、幫忙與指導的人，願將此喜悅與你們分享。

摘要

本研究開發靜電輔助噴塗裝置，將溼式光阻有效地噴塗於表面具微結構之平面與非平面圓柱基材上。本研究首先開發靜電輔助噴塗機台，接著探討將溼式光阻用靜電輔助噴塗技術應用於平面晶圓、平面具微結構之基材、金屬滾輪與微結構滾輪上，探討其厚度差異與均勻度，並與其他方式作比較。本研究利用此靜電輔助噴塗技術，結合步進式光微影技術及無電鍍鎳技術製作出剛性微結構滾輪，裝於 UV 固化壓印機台上，最後實際滾壓複製微結構於 PET 薄膜上。

塗佈實驗結果顯示，利用本研究所開發之靜電輔助噴塗機台能均勻的將濕式正型光阻 (EPG-510) 塗佈於四吋晶圓上，其均勻度 $1\sigma\%$ 降低至 5% 以下，光阻厚度差異 δ_i 方面 (取樣長度為 5 mm)，可降低至 121 nm 上下。此外，靜電輔助噴塗可提昇塗佈之效率，在相同噴塗秒數下，使用靜電輔助噴塗之光阻厚度約為一般噴塗之兩倍。塗佈在金屬圓柱滾輪，在相同噴塗秒數 3 秒時，使用靜電輔助噴塗可將均勻度 $1\sigma\%$ 由一般噴塗之 19.5% 降低至 7.7%，厚度差異 δ_i 也降低至 400 nm。利用靜電輔助噴塗，證實可將光阻均勻的塗佈於有微結構之平面基材 (深 25 μm ，寬 50 μm)、有方形微結構圓柱滾輪 (高度 2 μm ，週期 143 μm) 與有波浪型微結構 (高度 24 μm ，寬度 245 μm) 圓柱滾輪上，其噴塗厚度差異遠比一般噴塗小，與浸潤式塗佈相當，但不會有其垂流缺陷。

本研究實際利用步進式曲面曝光機台，在圓柱型基材上定義線寬 20 μm 週期 143 μm 之連續式光阻結構，微結構平行於滾輪的軸線方向，顯影後光組線寬為 19 μm ，並接著使用無電鍍鎳技術，直接在滾輪上製作連續式剛性微結構 (高度約為 10 μm)。最後使用 UV 固化壓印技術，將微結構進行實際 UV 固化滾壓，複製於 UV 固化樹脂的 PET 膜上，轉印之深度為 9.7 μm 週期為 143 μm ，證實能利用本研究開發的靜電塗佈光阻進行步進式曝光、顯影與電鍍來直接製作微結構於剛性滾輪上，並進行 UV 固化滾壓複製微結構於基材上。

Abstract

This study is to develop an effective mechanism for spraying photoresist on planar and non-planar substrates with high topography surface. An electrostatic-assisted spray coating apparatus for spraying photoresist on substrate has been designed and tested. First, this apparatus is used to spray photoresist on 4 type of substrates: the wafer, the planar substrate with high topography surfaces, the non-planar substrates with and without non-planar high topography surfaces. The thickness difference δ_t and uniformity $1\sigma\%$ of the photoresist on the substrates are measured and evaluated. The other aspect of this study is integrating electrostatic-assisted spray coating, stepped lithographic process, and electroless nickel plating process to fabricate the continuous microstructures onto the metal rollers. The rollers are then used in the UV curing roller imprinting to fabricate microstructures on PET films.

The Electrostatic-assisted spray coating apparatus can successfully spray photoresist (EPG-510) on substrates. Using the electrostatic-assisted spray coating, the uniformity $1\sigma\%$ of photoresist is below 5% on the wafer and the thickness difference δ_t is about 121 nm. Using the electrostatic-assisted spray coating on the roller with same spray time, the uniformity $1\sigma\%$ of photoresist can decrease from 9.5% of traditional spray to 7.7% and the thickness difference δ_t is about 400 nm. Furthermore, using the electrostatic-assisted spray coating can effectively spray photoresist 3 kind of substrates with high topography surface: nickel plate with V groove microstructure (width 50 μm and depth 25 μm), roller with wave shape microstructure (width 245 μm and depth 24 μm), roller with rectangle microstructure (height 2 μm and period 122 μm). Compared with traditional spray coating, electrostatic-assisted spray coating yields significantly better performance in increasing uniformity and decreasing thickness difference. Electrostatic-assisted coating also avoided the defects due to the gravity-induced flow experienced in dip coating.

Finally, using the stepped rotating lithography technique, the photoresist patterns with 20 μm wide line have been successfully fabricated onto the nickel-plated roller coated with electrostatic-assisted spray. Subsequently, the roller is treated with electroless nickel plating process, and the residual photoresist is removed by acetone. After that, a roller with continuous rigid nickel microstructures, with 20 μm width, 10 μm height and 143 μm period, has been fabricated. The roller is used for practical UV curing imprinting to replicate the microstructures onto PET film. Microstructures with the same period but 9.7 μm depth, have been successfully replicated on the substrates.

目 錄

致 謝.....	I
摘 要.....	II
Abstract.....	III
目 錄.....	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
第一章 導論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 微壓印成型.....	1
1.3 滾輪製作介紹.....	2
1.4 塗佈方法介紹.....	3
1.5 具體研究方向與目標.....	3
1.6 論文內容與架構.....	4
第二章 文獻回顧.....	9
2.1 塗佈技術.....	9
2.1.1 平面基材塗佈技術.....	9
2.1.2 非平面基材塗佈技術.....	9
2.2 滾輪壓印複製成型技術.....	10
2.2.1 滾輪應用於軟微影成型.....	10
2.2.2 滾輪應用於微熱壓成型.....	11
2.3 微結構滾輪製作技術.....	11
2.4 整體回顧總結與研究創新.....	14
第三章 靜電輔助噴塗與微結構滾輪製程設備.....	24
3.1 實驗整體流程規劃.....	24
3.2 噴塗機台開發與設計.....	24
3.3 光微影製程設備與光阻材料.....	25
3.3.1 噴塗之光阻.....	25
3.3.2 步進式曲面曝光機台.....	25
3.4 具 UV 曝光功能之滾輪微轉印機台.....	26
3.5 微結構滾輪製程之相關量測設備.....	26
3.5.1 光譜與薄膜厚度量測儀.....	26
3.5.2 光強計.....	26
3.5.3 溫度計.....	27
3.5.4 非球面表面輪廓儀.....	27
3.5.5 光學顯微鏡.....	27

3.5.6 自組薄膜厚度量測載台.....	27
3.5.7 3D 雷射掃描顯微鏡.....	27
第四章 靜電輔助噴塗用於平面晶圓光阻塗佈.....	38
4.1 靜電輔助噴塗之製程特色與原理.....	38
4.2 晶圓之製備.....	38
4.3 量測方式.....	39
4.4 機台初步參數之探討.....	40
4.4.1.塗料流量之設定.....	40
4.4.2 製程步驟.....	40
4.5 製程參數探討.....	41
4.5.1 噴塗時間對於光阻厚度之關係.....	41
4.5.2 噴塗時間對於厚度差異 δ_t 之影響.....	42
4.5.3 噴塗時間對於光阻均勻度之影響.....	42
4.5.4 靜電電壓對於光阻厚度差異 δ_t 之關係.....	43
4.5.5 靜電輔助噴塗對均勻度之關係.....	43
4.6 靜電噴塗後之曝光顯影.....	44
4.7 靜電輔助噴塗與旋轉塗佈比較.....	44
4.8 本章結論.....	45
第五章 靜電輔助噴塗用於滾輪及表面微結構基材光阻塗佈.....	56
5.1 基材之製備.....	56
5.1.1 金屬滾輪之製備.....	56
5.1.2 車削方式製作波浪型溝微結構滾輪.....	56
5.1.3 V 溝鍍板.....	57
5.2 量測方式.....	57
5.2.1 金屬滾輪量測方式.....	57
5.2.2 結構機材量測方式.....	57
5.3 靜電輔助噴塗應用於金屬滾輪塗佈.....	57
5.3.1 製程步驟.....	57
5.3.2 靜電輔助噴塗應用於滾輪塗佈.....	58
5.4 靜電輔助噴塗應用於具微結構基材之光阻塗佈.....	59
5.4.1 靜電輔助噴塗應用於平面微結構基材之光阻塗佈.....	59
5.4.2 靜電噴塗應用於波浪形微結構滾輪光阻塗佈.....	60
5.4.3 靜電輔助噴塗應用於微結構滾輪.....	61
5.5 靜電輔助噴塗與其浸潤式塗佈方式比較.....	61
5.6 本章結論.....	62
第六章 微結構滾輪製作與應用.....	76
6.1 濕式光阻上定義出連續式微結構滾輪之光阻圖形.....	76
6.2 無電鍍鍍製作為滾輪結構.....	76

6.2.1 無電鍍鎳介紹.....	76
6.2.2 無電鍍鎳鍍浴配置.....	77
6.2.3 光學顯微鏡及表面輪廓儀量測.....	78
6.3 實際 UV 壓印測試.....	78
6.3.1 滾輪微轉印機台作動流程.....	78
6.3.2 紫外光固化高分子材料.....	79
6.3.3 實際壓印測試.....	79
6.4 本章結論.....	79
第七章 結論及未來展望.....	83
7.1 研究成果總結.....	83
7.2 本研究貢獻.....	84
7.3 未來研究方向.....	84
參考文獻.....	87
附錄 A (塗佈方式與條件對膜厚與品質的影響之數據)	90
噴塗時間對於光阻厚度之關係 (圖 4-12)	90
噴塗時間對於光阻表面厚度差異 δ_i 之影響 (圖 4-14)	90
噴塗時間對於光阻均勻度 $1\sigma\%$ 之影響 (圖 4-15)	91
靜電電壓對於光阻厚度差異 δ_i 之關係 (圖 4-16)	91
靜電輔助噴塗對均勻度 $1\sigma\%$ 之關係 (圖 4-17)	92
一般噴塗與靜電輔助噴塗應用於滾輪塗佈之均勻度 (圖 5-10)	93
一般噴塗與靜電輔助噴塗應用於滾輪塗佈之厚度差異 δ_i (圖 5-12)	94
靜電輔助噴塗與其浸潤式塗佈方式比較 (圖 5-18)	95
附錄 B 作者簡介.....	97
附錄 C 個人著作.....	98

表目錄

表 3-1 靜電主機之規格	28
表 3-2 靜電噴槍之規格	28
表 3-3 靜電噴頭之規格	28
表 3-4 EPG 510 光阻之材料性質與製程參數 (永光化學)	28
表 3-5 膜厚量測儀之相關資料	29
表 4-1 四吋矽晶圓規格	46
表 4-2 塗料罐壓力對於流量之影響結果	46
表 5-1 各種塗佈方式之比較	64
表 5-2 一般噴塗與靜電輔助噴塗之比較	64



圖目錄

圖 1-1 傳統微熱壓機器示意圖	5
圖 1-2 熱滾壓製程示意圖 [1].....	5
圖 1-3 灌模法應用於微結構滾輪製作流程圖[21].....	6
圖 1-4 乾膜光阻應用於微結構滾輪製作流程圖[25].....	7
圖 1-5 塗佈技術之分類	7
圖 1-6 整體實驗流程圖	8
圖 2-1 光阻霧化沈積設備示意圖 [2-3].....	15
圖 2-2 改良式旋轉塗佈裝置 [4].....	15
圖 2-3 噴霧式塗佈設備示意圖 [5-8].....	16
圖 2-4 滾輪應用於軟微影示意圖 [14].....	16
圖 2-5 LIGA 製程步驟示意圖.....	17
圖 2-6 熱滾壓製程示意圖 [1].....	17
圖 2-7 滾輪應用於微熱壓示意圖[12].....	18
圖 2-8 微影技術應用於微結構滾輪示意圖 [15]	18
圖 2-9 PDMS 曲面模具製作流程圖 [16].....	19
圖 2-10 PDMS 曲面模具實體圖 (a) 滾輪式 (b) 球狀式 [16].....	19
圖 2-11 REM 應用於曲面成形示意圖 [17].....	20
圖 2-12 溶劑輔助聚合物鍵合微影技術製作圓柱模的示意圖 [19].....	21
圖 2-13 以電鍍法製作圓柱模 [22]	22
圖 2-14 微影術應用於微結構滾輪製作之示意圖 [23].....	22
圖 2-15 蝕刻技術製作微結構滾輪 [24].....	23
圖 3-1 總體實驗流程圖	30
圖 3-2 整體機台示意圖 (a) 平面基材 (b) 滾輪.....	31
圖 3-3 靜電輔助噴塗機台實際照片圖	31
圖 3-4 靜電主機	32
圖 3-5 靜電噴槍	32
圖 3-6 靜電噴頭	32
圖 3-7 控制器	32
圖 3-8 塗料罐	33
圖 3-9 馬達	33
圖 3-10 馬達控制電源	33
圖 3-11 步進式曲面曝光機台	34
圖 3-12 具曝光功能之滾輪轉印機台示意圖	34
圖 3-13 具曝光功能之滾輪轉印機台實體圖	35
圖 3-14 薄膜厚度量測儀 (NanoCalc- 2000-VIS)	35

圖 3- 15 Power meter (1815-C , Newport)	36
圖 3- 16 Thermal meter (FLUKE-5439)	36
圖 3- 17 非球面表面輪廓儀 (Taylor Hobson - Talysurf- S21)	36
圖 3- 18 光學顯微鏡 (ZOOMKOP)	37
圖 3- 19 自組薄膜厚度量測載台	37
圖 3- 20 3D 雷射掃描顯微鏡	37
圖 4- 1 噴塗方向示意圖	46
圖 4- 2 靜電輔助噴塗之效果	47
圖 4- 3 EPG-510 於波長 300~800 nm 間之折射率 N 值	47
圖 4- 4 EPG-510 於波長 300~800 nm 間之反射率 K 值	48
圖 4- 5 量測原理示意圖	48
圖 4- 6 薄膜厚度量測儀顯示之量測結果，右上角微量測之結果	49
圖 4- 7 薄膜厚度量測儀量測之區域	49
圖 4- 8 表面輪廓儀量測光阻表面厚度差異 δ_i 量測之圖形	50
圖 4- 9 塗料罐壓力對於流量之影響	50
圖 4- 10 晶圓放置於噴塗基台內	51
圖 4- 11 噴塗時間過長造成之缺陷	51
圖 4- 12 噴塗時間對於厚度之影響	52
圖 4- 13 光阻在晶圓上之情形(側視圖)	52
圖 4- 14 噴塗時間對於光阻表面厚度差異 δ_i 之影響	53
圖 4- 15 噴塗時間對於光阻均勻度之影響	53
圖 4- 16 靜電輔助電壓對於光阻表面厚度差異之影響	54
圖 4- 17 靜電輔助電壓對於光阻均勻度之影響 (噴塗時間 3s)	54
圖 4- 18 靜電輔助噴塗完後之曝光顯影之結果	55
圖 5- 1 表面鍍鎳之實心鋁基滾輪 (直徑為 80 mm , 長度為 120 mm)	65
圖 5- 2 滾輪清洗流程	65
圖 5- 3 波浪形微結構滾輪	66
圖 5- 4 V 溝鎳板	67
圖 5- 5 滾輪量測示意圖	67
圖 5- 6 結構基材量測區域示意圖	68
圖 5- 7 結構基材量測方式 (光阻高度)	68
圖 5- 8 結構基材量測方式 (波形重疊)	69
圖 5- 9 滾輪放置於噴塗腔中	69
圖 5- 10 金屬滾輪使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗 3s 之光阻厚度差異	70
圖 5- 11 金屬滾輪使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗 4s 之光阻厚度差異	70
圖 5- 12 使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗 3s 之光阻厚度差異 δ_i 差異	71
圖 5- 13 使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗 4s 之光阻厚度差異 δ_i 差異	71
圖 5- 14 V 溝鎳板各種噴塗參數噴塗後之情形	72

圖 5-15 波浪形微結構滾輪各種噴塗參數噴塗後之情形	72
圖 5-16 方型微結構滾輪	72
圖 5-17 靜電輔助噴塗應用於微結構滾輪	73
圖 5-18 不同塗佈方式之厚度差異 δ_i 比較	74
圖 5-19 浸潤式塗佈光阻塗佈不均之示意圖	75
圖 5-20 使用靜電輔助噴塗應用於微結構滾輪	75
圖 6-1 滾輪曝光所使用之 20 μm 光罩	80
圖 6-2 經曝光顯影完後之滾輪	80
圖 6-3 使用光學顯微鏡觀查無電鍍鎳之結果	81
圖 6-4 使用表面輪廓儀量測無電鍍鎳之結果	81
圖 6-5 UV 轉印示意圖	82
圖 6-6 實際 UV 壓印之圖形	82
圖 7-1 塗佈抗沾黏溶液於結構滾輪表面	86
圖 7-2 投影式步進曲面曝光設計圖	86



第一章 導論

1.1 前言

隨著科技時代的進步，各種光電、通訊、生醫、航太等方面零件不斷往輕薄化與微小化發展，因而衍生出次世代產業需求之製程技術－微機電系統（Micro-Electro-Mechanical Systems，簡稱 MEMS）技術。此製程結合光學、機械、電子、材料、控制、物理、化學、生醫等多重技術領域的整合型微小化製造技術，提高製造性能、品質、可靠度及附加價值。微機電製程先以半導體技術使用微影技術來製作出微元件，接著再以微模造（Micro Molding）成型技術，來達到後段的量產複製（Replication）。

以微機電製程製造的微型元件的母模，靠後段微模造成型技術來快速低廉複製量產塑膠元件。目前常用的微模造技術包括列三種方式成型：微射出成型（micro-injection molding）、微壓印成型（micro-imprinting）、微鑄造成型（casting）。微射出成型模具設計複雜、成本高，而且難製造大面積的光學薄膜，在顯示器相關元件量產上有其限制。微鑄造成型使用熱固性塑膠（如聚二甲基矽氧烷，Polydimethylsiloxane，簡稱 PDMS）在液態直接澆鑄，製程簡單，但微鑄造只適用於生產少量驗證用元件或是翻製壓印用模具，但抗磨耗性差、使用壽命短。因此微壓印成型技術是現今廣用於微結構複製技術之一。

1.2 微壓印成型

微壓印技術始自微熱壓成型（hot embossing）。微熱壓成型乃將塑膠薄膜或薄片加熱至玻璃轉換溫度（ T_g ）以上或結晶型塑膠熔點（ T_m ）附近，再以表面有微結構的模具施壓其上，即可將微結構複製其上，冷卻後脫模就完成微複製成型。目前的微熱壓印技術多是藉由平板壓印機構來加熱加壓，如圖 1-1 所示。

但平板微熱壓製程需加熱冷卻難以快速及連續生產。滾輪壓印(roller imprinting)成為最新發展[1]。利用電鍍鎳模技術翻製出極薄的鎳模，以鎳模包覆滾輪的方式，將包覆鎳模的滾輪做為熱滾壓之模具，選用可撓式基材，兩端利用滾輪做roll-to-roll 連續遞料，達成結構大量複製生產，製程如圖 1-2 所示。滾輪式壓印技術能快速、連續生產，有效縮短製程時間，以 roll-to-roll 的機構，更可達到全製程量產及大面積的製作，近二十年內滾輪式製程系統早已廣泛應用在各領域，包括：印刷業、電子業、封裝製程等。滾輪的製作是滾輪壓印的關鍵，當今雖有眾多製作微結構滾輪之方法，但大都製程繁瑣，需要高檔昂貴之設備來進行製造，因此製作壓印滾輪極需開發更有效的製程。

1.3 滾輪製作介紹

在滾輪製作方面，若以電鑄技術翻製極薄的鎳模，將其包覆於滾輪上來做為滾輪壓印成型之模具時，由於模具與滾輪非一體成型，將模具包覆在滾輪上時難以緊密貼合，則在進行滾壓時會有模具位移、翹曲，以及結構不連續等問題產生。台大塑膠加工(本)實驗室曾發展軟模製作，如圖 1-3 所示係利用熱壓翻製之具有微透鏡陣列結構之 PC 模，利用 PC 模的可撓性，將其包覆於刻有溝槽的矽膠輪上，然後在溝槽的上方，以灌模之方式將依固定比例調配之液態 PDMS 倒入，待靜置固化後，剝離 PC 模，即可獲得 PDMS 圓柱軟模，但是以灌模之方式，在壓印複製微結構時，會有強度不足及不耐高溫等問題發生，造成軟模之結構變形或破壞，因而影響複製的結果。本實驗室也曾發展用乾磨光阻直接在金屬滾輪上直接製作微結構，如圖 1-4 所示為採用乾膜光阻容易貼附於曲面上之特性，製作一體成型之剛性微結構滾輪，以解決滾輪壓印時，包覆式模具與滾輪本體滑移之問題，以及提升微結構滾輪之耐久性、抗壓強度，並簡化微結構滾輪之製造流程以及生產成本，不過乾膜光阻的解析度遠遠的不及濕式光阻，以及膠片光罩是包覆於滾輪上來進行曝光的動作，因此無法製作連續式微結構滾輪。本實驗室進一步發展製作連續式微結構滾輪。

1.4 塗佈方法介紹

現今主流塗佈技術，如同其他高科技產品及技術發展，趨向輕、薄、短、小，對塗佈技術而言，越塗越薄絕對是最關鍵的課題之一，然而塗佈技術因產品的特性不同，其塗佈之方法也不同，大致分為兩類：乾式塗佈與濕式塗佈，如圖 1-5 所示。濕式薄膜塗佈是一個效率高、速度快又有極大發展潛力的技術，傳統上此項技術應用於軟片、膠帶與各式高分子薄膜製程中，歷史已極為悠久，與乾式的薄膜製程相比，如 CVD 與蒸鍍等技術，濕式塗佈技術在產率上較有極大的競爭力。

目前在工業上最常看到的濕式塗佈方式，大致可分為兩大類：預先計量式（pre-metered）及自身計量式（self-metering）兩種。所謂預先計量式塗佈，主要包括：狹縫式塗佈（slot coating）、淋幕式塗佈（curtain coating）及斜板式塗佈（slide coating）等，此類技術特點在於塗膜厚度的控制，可視產品品質的需求，藉由改變系統的流量及塗佈速度來達到所需之塗膜厚度，但機械系統設計上較為困難。然而自身計量式，可分為浸沾式塗佈（dip coating）、噴霧式塗佈（spray coating）、刮刀式塗佈（Blade coating）等，其塗膜厚度受流體物性、塗佈機台幾何參數及操作條件之三要素所影響，雖然無法事先計算塗膜厚度，不過在機械系統設計相當之簡單。對於本研究上，利用此方法可大幅縮短實驗時程，於塗佈機台設計及組裝上，能快速把機台裝備完成。

1.5 具體研究方向與目標

本論致力於開發靜電輔助噴塗技術，並將此技術應用於平面與非平面基材之塗佈。同時，結合步進式曲面光微影技術及無電鍍鍍製程技術，直接在金屬滾輪上製造連續式微米結構以解決包覆式模具及灌模式軟模滾輪所造成之問題。此外為達成未來基材製作多層結構之需求，利用此靜電輔助噴塗技術，達成在微結構平面基材與非平面基材上均勻塗佈，以利後續之製成。具體的研究方向及目標如

下：

- 一、 本研究利用自行開發之靜電式噴塗機台，透過控制靜電輔助電壓、噴塗時間、噴塗壓力與噴塗量來達到將濕式光阻均勻塗佈在平面與非平面基材上。同時，在平面與非平面且具有微米級結構之基材上，嘗試均勻塗佈光阻於其表面。
- 二、 利用自行開發之步進式曲面曝光機台來進行連續式微米級之光阻結構定義；接著運用無電鍍鎳技術，直接在滾輪上製作連續式剛性微結構。
- 三、 最後將本研究所製作之微結構滾輪進行實際 UV 壓印測試。

1.6 論文內容與架構

本論文共分為六個章節。第一章為導論，主要論述微元件的關鍵製造技術之製程特性與應用，並介紹滾輪模具製造技術、塗佈技術，以及本論文的研究動機、具體研究方向與目標；第二章為文獻回顧，首先介紹光阻（Photoresist）塗佈之技術發展，最後在針對滾輪壓印製程及微結構滾輪之製造做完整的彙整與評論；第三章為介紹本實驗所需之相關實驗設備、實驗整體規劃設計，主要內容包括：實驗目的及整體流程規劃、靜電式噴塗機台之設計與開發步進式曲面曝光機台之介紹、UV 固化壓印機台介紹以及最後為本研究所需之量測設備；第四章將濕式光阻噴塗於平面基材，探討電壓與噴塗時間對於均勻度與厚度差異 δ_t 之影響，最後將此噴塗技術與旋轉噴塗技術做比較；第五章則是針對非平面機材之金屬滾輪和已具有微結構的平面與非平面材上噴塗光阻，探討電壓與噴塗時間對於均勻度與厚度差異 δ_t 之影響；第六章是將前章已均勻塗佈之金屬滾輪進行曝光顯影，再利用無電鍍鎳製程，製作出微米級之剛性結構，最後實際 UV 固化壓印。第七章是本文之結論與未來展望。研究總體流程如圖 1-6 所示。

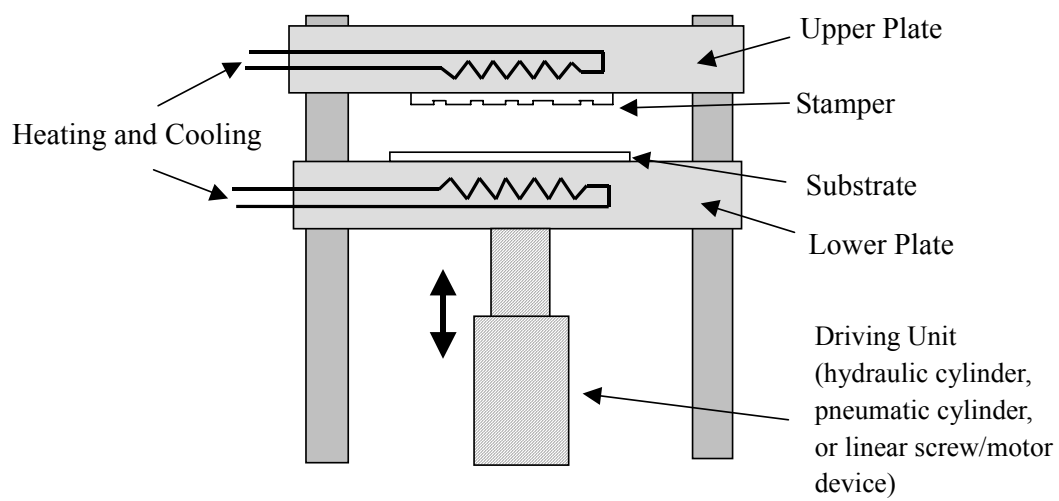


圖 1-1 傳統微熱壓機器示意圖

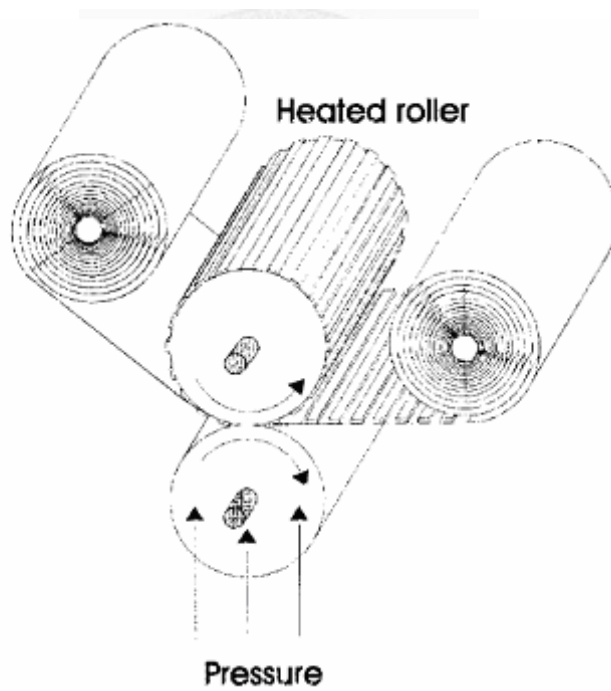
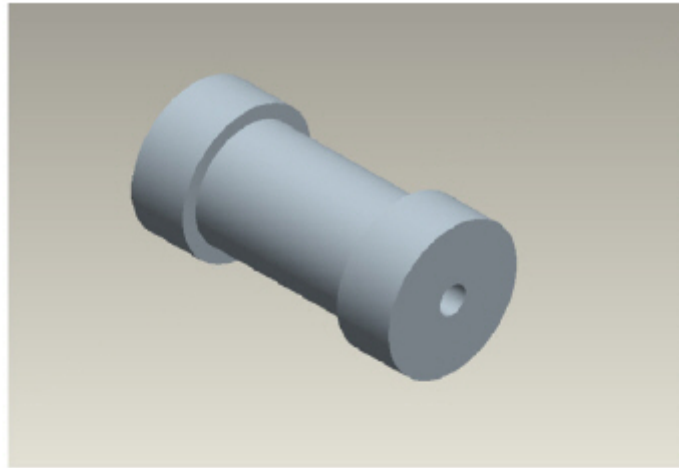
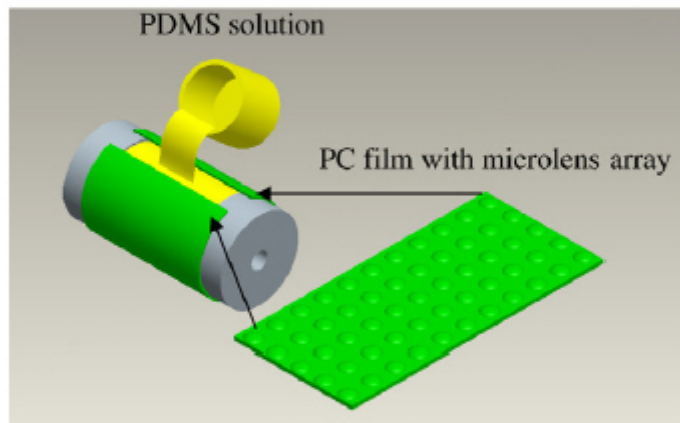


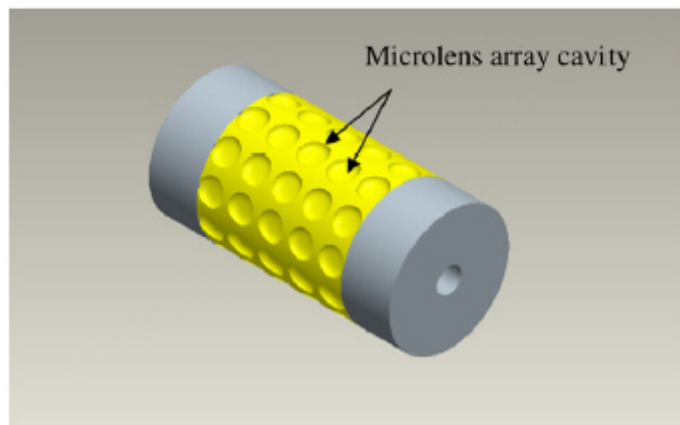
圖 1-2 熱滾壓製程示意圖 [1]



(a) Silicone cylinder without micro-features



(b) PDMS casting



(c) Soft roller with microlens array cavity

圖 1-3 灌模法應用於微結構滾輪製作流程圖[21]

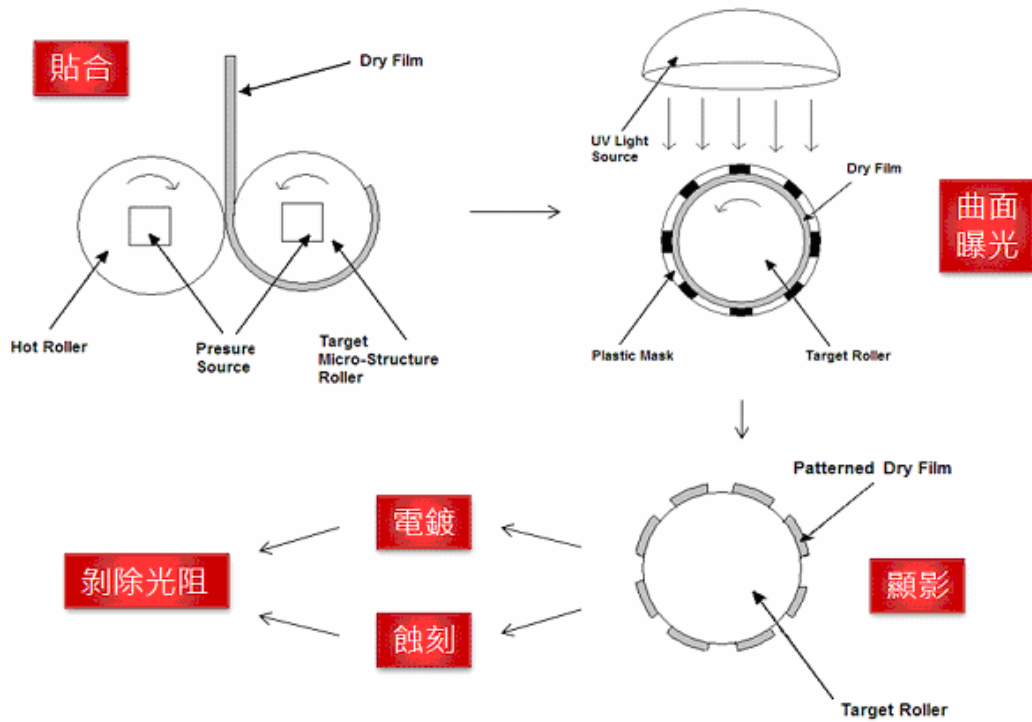


圖 1-4 乾膜光阻應用於微結構滾輪製作流程圖[25]

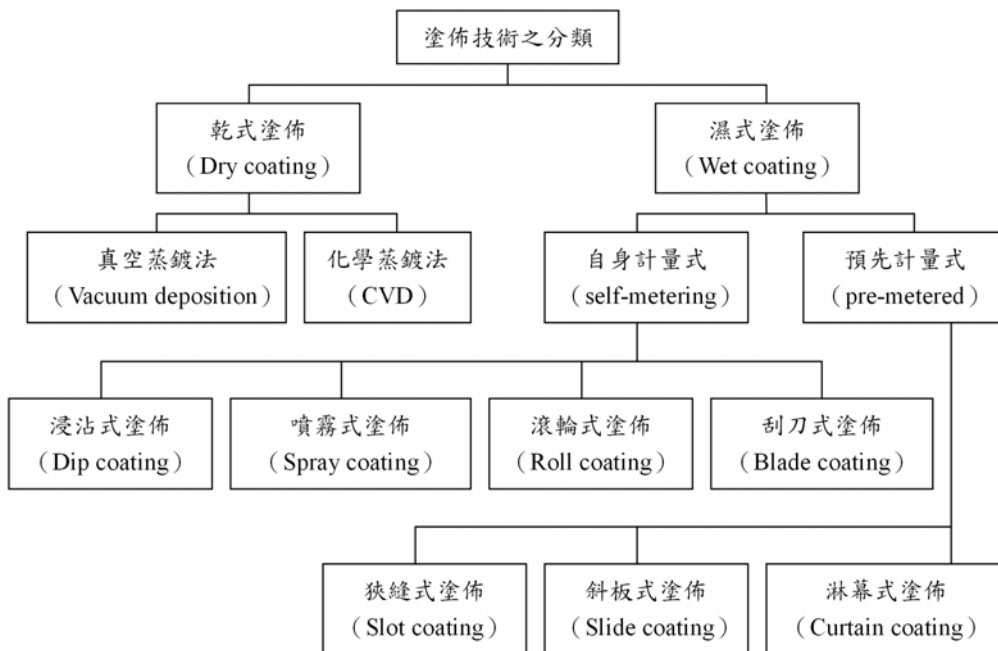


圖 1-5 塗佈技術之分類

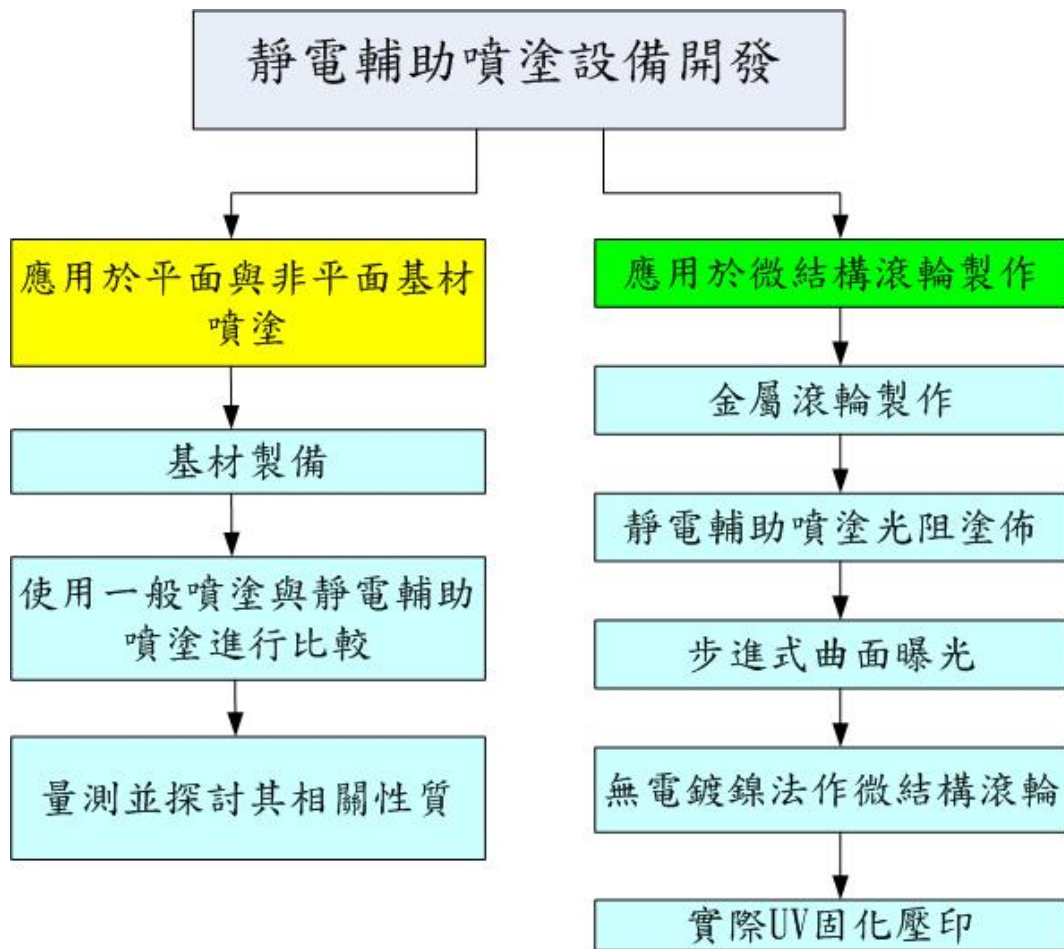


圖 1-6 整體實驗流程圖

第二章 文獻回顧

本章首先回顧光阻塗佈的相關文獻包括塗佈於平面與曲面之技術發展以及改善光阻塗佈厚度的相關文獻；第二節回顧微結構滾輪壓印複製成型技術，包括滾輪應用於滾輪熱壓微成型、軟微影以及固化成型技術運用於 Roll-to-Roll 連續生產製程；第三節回顧微結構滾輪製作之相關文獻；最後第四節做一整體性比較及本研究之創新構想。

2.1 塗佈技術

2.1.1 平面基材塗佈技術

美國賓州大學 Ruzylo [2-3] 等人以光阻霧化沈積並配合電場進行超薄光阻之塗佈，如圖 2-1 所示為首先以高壓氮氣將稀釋後之光阻送入噴霧器 (atomizer) 中，此時光阻會被霧化成平均粒滴直徑約為 250 nm，再透過淋氣頭 (shower head) 噴出，接著配合電場作用將其帶電，利用晶圓與帶電光阻產生之電位差，進而將光阻塗佈於晶圓表面上，並藉由控制電場之電壓大小及沉積時間控制其鍍膜厚度。此法可解決傳統旋轉塗佈 (spin coating) 無法塗佈於非平面及非圓形基材之問題，對於大面積塗佈區域，亦是一替代性的塗佈方式。

1994 年美國專利，發明人 Lin [4]，發明一項改善光阻色階的旋轉塗佈機 (spin coater)，如圖 2-2 所示。一般在旋轉塗佈的過程中，因溶劑揮發不均勻所造成光阻厚度不同之色階現象的產生，為了避免此問題，Burn J. Lin, Austin, Tex 設計了在旋轉塗佈機 (spin coater) 裡面，加裝了數支噴嘴，藉由噴嘴噴出之溶劑氣體到旋轉塗佈機之腔體內，主要目的使腔體內的溶劑達到飽和蒸氣壓，進而可以旋轉塗佈更均勻的光阻於晶圓表面上。

2.1.2 非平面基材塗佈技術

日本東北大學 Singh [5-8] 等人以製備薄膜之概念，提出噴霧式塗佈 (spray coating) 進行三維結構的光阻塗佈。首先利用 KOH 蝕刻 Si (100) 晶圓，其

結構深度為 400~1200 μm ，傾斜角度為 55 度，並將稀釋過之光阻與高壓氮氣混合，透過二流體噴嘴噴出平均粒徑約 6 μm 的光阻液滴，並藉由控制載台溫度、噴速等參數，成功塗佈膜厚均勻之光阻，有效地改善旋塗（spin coating）於三維不規則表面結構之膜厚不均問題，如圖 2-3 所示，但此研究只限於微小結構的塗佈，若對於體積較大的基材，如滾筒型等...就無法利用此塗佈製程技術。

荷蘭台特夫科技大學 Pham 等人[9-11]，利用噴霧式塗佈（spray coating）進行塗佈，首先對於平面塗佈之均勻性做探討，對於塗佈之均勻性作定義，再來在三維結構的光阻塗佈，而三維結構部份包括微米級的孔（50~500 μm ）或是斜邊，最後在可應用之結構上進行噴塗，證明其優勢。此外，他們也對於噴塗用光阻做探討，包括其流動性、蒸發率等等之參數，找出最佳之參數使光阻噴塗達到最佳效果。但是目前此技術尚未應用於非平面基材上。

台大機械黃子健[12]利用 EPG-510 濕式光阻直接在滾輪（直徑為 80 mm，長度為 120 mm 與 160 mm）表面上塗佈光阻。論文中係使用 Mikropack 公司的薄膜厚度量測儀（NanoCalc-2000-VIS）進行滾筒上光阻厚度之量測，但薄膜量測儀的原理是藉由薄膜表面與底材反射光的干涉現象，量測半透明及透明之膜厚，對於平面基材（如：晶圓）之薄膜量測結果較為精確，因此無法得知本論文所量測之數據是否準確，以及文中並無探討各項塗佈技術於塗佈後之光阻均勻度等缺點。

台大機械賴昕駿[13] 結合浸沾式塗佈技術、步進式光微影技術及無電鍍鍍技術直接提供一個簡化製程、降低成本的連續式剛性微結構滾輪製作技術。但此技術無法應用於表面具微結構之基材上。

2.2 滾輪壓印複製成型技術

2.2.1 滾輪應用於軟微影成型

Xia [14]等人針對微觸印技術的內容提出兩種方式。第一種方法先在軟模模具上沾上自我組裝型之高分子（Self-Assembly Monomer，SAM），並包覆在滾輪

上，以轉動的方式將軟模模具上沾染的 SAM 材料與基板表面形成強鍵結，達成滾輪微結構轉印的目的，如圖 2-4 (a) 所示；第二種方法則是將平面的材料轉印至鍍金後的滾輪上，達成非平面製作微結構的目的，如圖 2-4 (b) 所示。

2.2.2 滾輪應用於微熱壓成型

由於微機電系統的發明，開啟了微米與次微米的加工技術，並且由德國核能研究所開發之 LIGA 製程，可製作高深寬比的結構，如圖 2-5 所示，因此微壓印成型法變為製造微結構不可或缺的一種技術。

Gale [1] 針對光學元件製作技術的介紹中提出，利用電鑄鎳模技術翻製極薄的鎳模，以鎳模包覆滾輪的方式，並搭配 Roll-to-Roll (R to R) 的生產概念，將包覆鎳模的滾輪做為「熱滾壓」之模具，選用可撓式基材，兩端利用滾輪做 Roll-to-Roll 連續遞料，達成結構大量複製生產。此法已可成功的製作塑膠繞射光學元件，如圖 2-6 所示。但是此技術容易造成結構不連續及結構滑移等問題。

Chou [15] 提出滾輪式壓印技術應用在「熱壓式」奈米壓印微影研究，利用表面已製作微結構的滾輪，滾動將結構壓在一塗佈熱塑性高分子材料（如 PMMA）之基板上，並將溫度提高至玻璃轉換溫度以上，使得此熱塑性高分子材料隨滾輪表面結構而成形，之後再將溫度冷卻，並以乾蝕刻清除殘餘光阻，進而將滾輪上之結構圖案壓印於基板上，如圖 2-7 所示。

2.3 微結構滾輪製作技術

Feinerman [16] 提出以 X 光微影術在圓柱狀滾輪進行立體曝光微影，其中以 125 μm 的鋁或銅為圓柱本體，並塗佈厚度約 5~125 μm 的 PMMA 於圓柱上，接著在用切割過後的矽晶圓基板作為阻擋 X 光之光罩，來進行 2D（光罩）對 3D（滾輪上之光阻）的曝光微影，如圖 2-8 所示。

Gale [1] 利用電鑄鎳模技術翻製極薄的鎳模，以鎳模包覆滾輪的方式，並搭配 R to R 的生產概念，將包覆鎳模的滾輪做為熱滾壓之模具，如圖 2-5 所示。

Choi 和 Park [17] 利用傳統平面半導體製程製作微結構母模，再翻製成 PDMS

模具，並利用 PDMS 的可撓曲特性將它貼到具曲率的表面上，再加熱到其玻璃轉移溫度上使之和基板緊密貼合，製作具有微結構的滾輪和曲面模具（微結構 350 nm），以省去高成本的微影步驟，如圖 2-9 所示，其成品如圖 2-10 所示，但是在加熱過程中 PDMS 模具容易變形，且 PDMS 平面模具的厚薄均勻度控制不易，都是本製程的缺點。

Xia 等人[18]由 Whitesides 對 REM (Replica Molding) 的定義，並利用 PDMS 母模可撓曲的特性，在翻第二次聚合材料時，可隨 PDMS 的彎曲而固化成為具有曲度的表面，如圖 2-11 所示。REM 軟模重覆翻製的特點，不僅降低製程成本及時間，也使得更多做學術研究的學者可以很容易且迅速的將想法實現，而它最大的優勢則是突破了硬模無法製作具有曲面結構的困難點及製程時間的縮短，不僅使得曲面的製作容易達成且更具時間效率。

Luan et al. [19]提出用溶劑輔助聚合物鍵合?微影的方式製作圓柱模 (Solvent-Assisted Polymer-Bonding Lithography)，如圖 2-12 所示，其製程步驟是先準備 PDMS 軟模，接著在 PDMS 軟模與玻璃圓柱上各塗佈一層 PMMA 阻劑後，再將 PDMS 軟模包覆於玻璃圓柱，讓尚未固化成形的 PMMA 作為兩者間的黏著劑；PMMA 固化後，與玻璃相觸的 PMMA 會因兩者之間的交互作用而固定於玻璃圓柱上；與 PDMS 模相觸的 PMMA 則可複製 PDMS 模上的微結構，且不會跟 PDMS 產生交互作用，因此可剝離 PDMS，完成曲面微結構的複製。此方式製作的圓柱模，因為 PMMA 直接與玻璃圓柱產生交互作用，可以穩固地固定在玻璃圓柱基材上，然而，製作的玻璃圓柱模，因玻璃的易脆性質，成為應用於滾動式製程上的阻礙。

台大機械所方煌盛[20]採用 PDMS 模具作為轉印的模仁，直接貼在滾輪表面上（非加熱黏著），進行轉印動作，結果發現比起以鍍模仁包覆於滾輪上其沾黏現象明顯改善，但是 PDMS 模仁與滾輪間的滑移會造成轉印失真，為最大缺點；另外，若翻製的 PDMS 模具厚度不均，則會使得接觸面受壓不一等問題發生。

台大機械所朱明輝[21]是先利用熱壓翻製之具有微透鏡陣列結構之 PC 模，利

用 PC 模的可撓性，將之包覆於刻有溝槽的矽膠輪上，然後在溝槽的上方，灌入 10:1 比例調配之液態 PDMS，待靜置固化後，剝離 PC 模，而 PC 模上的微結構因而複製在 PDMS 上，即可獲得 PDMS 圓柱模，但以灌模之方法製作軟性滾輪進行壓印時，則有強度不足、不耐高溫等問題。

Marques et al. [22]修改 LIGA 製程，將具有微孔洞的 PMMA 加熱到 130°C 左右，使其軟化，包覆在直徑 1.6 cm 鎳圓柱上，做為電鍍的擋罩，再放入特製的電鍍槽，如圖 2-13 (a) 所示，通電後，電鍍槽上的鎳離子會附在無擋罩區域的鎳圓柱上，即在鎳圓柱基材上製作圓柱狀微結構，如圖 2-13 (b) 所示為成功的在圓柱基材上製作高深寬比的鎳圓柱模，然而其製作過程中，卻需要特殊的電鍍槽、且製程步驟多，完成的鎳圓柱模也需經過抗沾黏處理，才能應用於光固化製程。

Wen 等人[23]發展一套微影技術，可以直接在滾輪表面上製作微結構小於 5 μm 的致動器和感測器。其主要技術為軟性光罩的製作、光阻塗佈技術和精密對位技術，如圖 2-14 所示。但是隨著微結構尺寸的降低，其圖案均勻度明顯的從特徵尺寸 30 μm 的 90% 下降至 5 μm 的 20%，凸顯此製程的不穩定度。

潘昆志等人[24]，提出一種微結構滾輪製作的方法，其方法為先在一滾輪表面上附著金屬層，然後把此滾輪滾過一個 PDMS 模具，此 PDMS 模具上塗佈一層自我組裝高分子光阻 (Self-Assembly Monomer, SAM)，滾輪上的金屬層會跟自我組裝高分子光阻產生反應形成單層分子膜，可以用來當蝕刻的保護層，再利用蝕刻技術將滾輪上未附著蝕刻保護層處予以蝕刻，最後去除蝕刻保護層跟金屬層，即可得到所需的微結構滾輪，其流程如圖 2-15 所示。

台大機械所江亮霆[25]採用乾膜光阻容易貼附於曲面上之特性，製作一體成型之剛性微結構滾輪，以解決滾輪壓印時，包覆式模具與滾輪本體滑移之問題，以及提升微結構滾輪之耐久性、抗壓強度，並簡化微結構滾輪之製造流程以及生產成本；不過乾膜光阻的解析度遠遠的不及濕式光阻，且文中所使用的膠片光罩，其解析度不及玻璃光罩，以及文中提到膠片光罩是包附於滾輪上來進行曝光

的動作，因此無法製作連續式的微結構滾輪等缺點。

2.4 整體回顧總結與研究創新

塗佈技術對於微機電製程是關鍵性之技術，而滾輪式壓印技術可有效縮短製程時間，且兼具快速、連續式等優點，配合 Roll-to-Roll 的概念，更可達到全製程量產及大面積的製作。

本研究根據上述文獻探討結論，提出一種靜電輔助噴塗方式將濕式光阻塗佈於平面與非平面基材上。在滾輪部分，使用靜電輔助噴塗技術將濕式光阻均勻塗佈於滾輪表面後，使用光微影製程製作無電鍍結構於滾輪表面進行壓印製程，結合「滾輪表面濕式光阻靜電噴塗技術」、「曲面光微影技術」、「無電鍍鍍」、「UV 固化滾輪壓印」等製程來大量複製微結構，預計可為目前常使用之光學薄膜製程、連續生產滾輪相關製程等帶來新的突破。重點歸納如下：

1. 利用開發之靜電塗佈技術，將濕式光阻均於塗佈至基材上
2. 配合研究中所開發之機構達到可調整間距式的滾輪曝光方法。
3. 預計可於本研究中改善滾輪雕刻方式，運用光學設計配合曲面微影無電鍍的方式製作出滾輪上微結構更小之滾輪。
4. 可利用此靜電輔助噴塗技術，達成製作出多層結構之平面或非平面機材。

在滾輪製作部分，本研究運用光阻直接定義圖形在滾輪表面上，並藉由化學鍍膜法製作出結構於滾輪表面上，預計可解決目前使用超精密鑽石車床加工時有許多結構外型無法製作之問題。且由於製作出之微結構與滾輪是一整體剛性結構，解決了滾輪壓印時，包覆式模具與滾輪本體滑移之問題，且能以更高效率、大面積的方式來製作微結構和光學元件，實現在塑膠膜上大量壓印微結構之目的。在非平面機材塗佈部份，本文利用靜電輔助噴塗，將溼式光阻均勻塗佈於已具微米結構之平面與非平面之基材上，預計可將此技術應用於製作多層結構之平面與非平面之基材上。

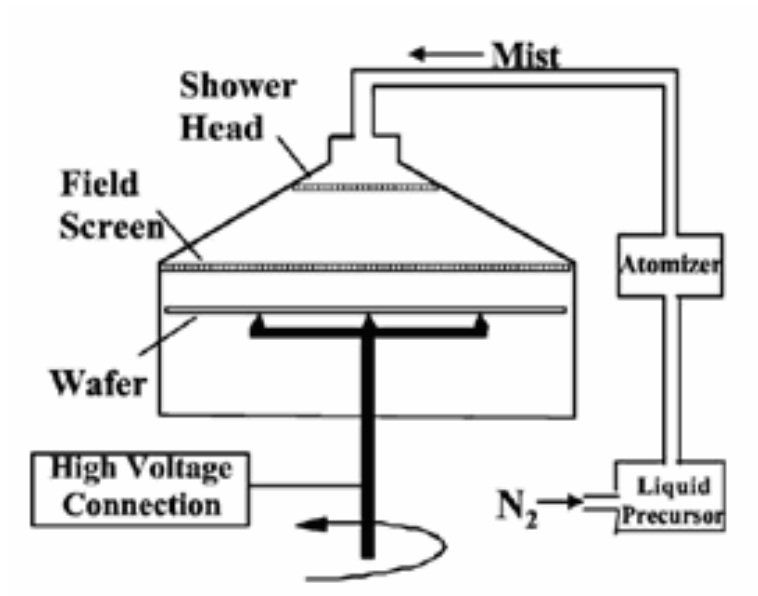


圖 2-1 光阻霧化沈積設備示意圖 [2-3]

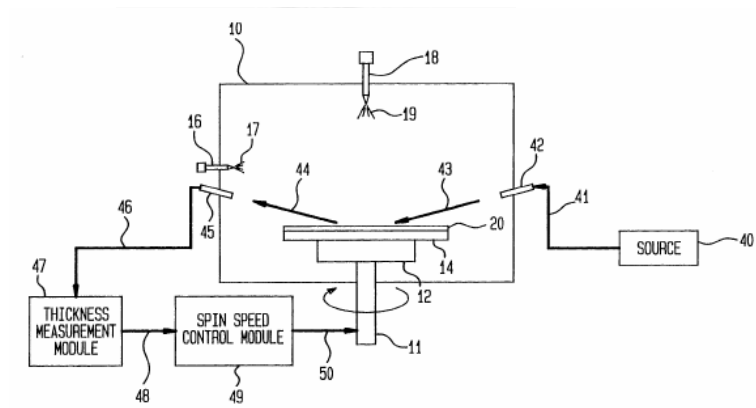


圖 2-2 改良式旋轉塗佈裝置 [4]

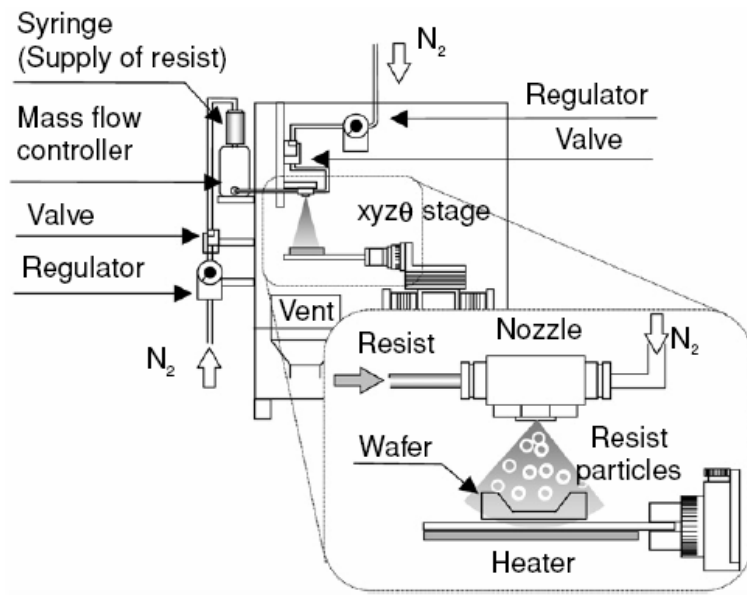
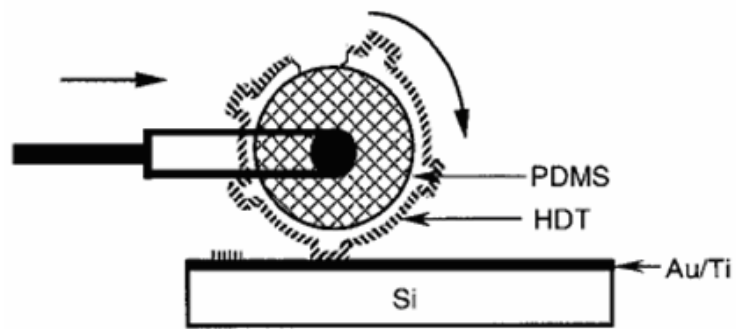
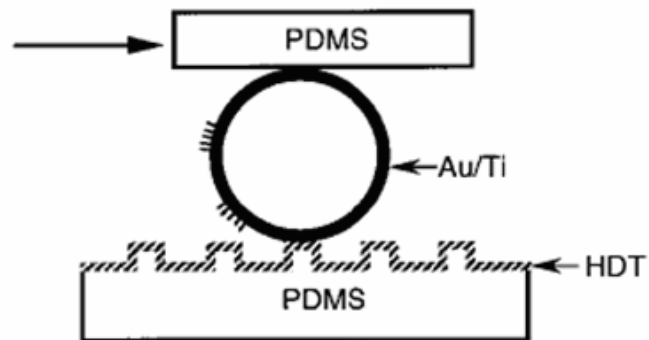


圖 2-3 噴霧式塗佈設備示意圖 [5-8]



(a)



(b)

圖 2-4 滾輪應用於軟微影示意圖 (a) 曲面應用於微觸印 (μ CP) 示意圖
(b) 以微觸印 (μ CP) 製作曲面微結構示意圖[14]

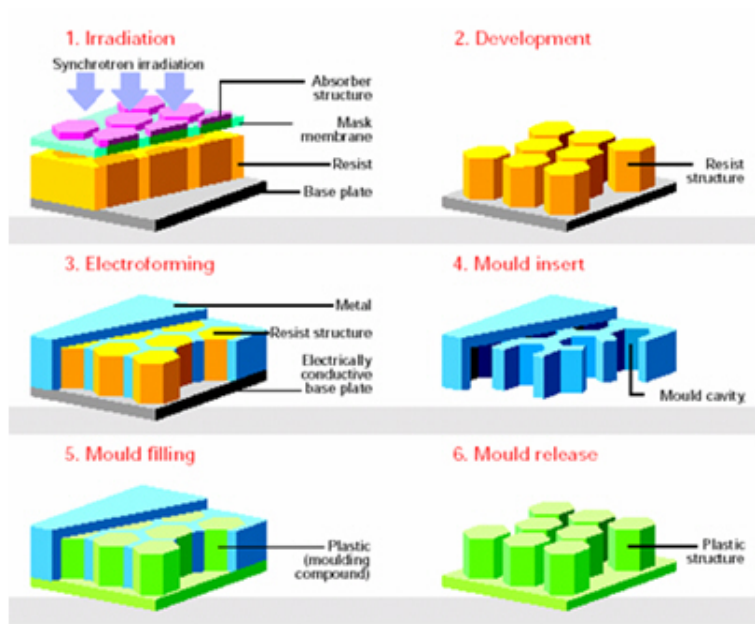


圖 2-5 LIGA 製程步驟示意圖

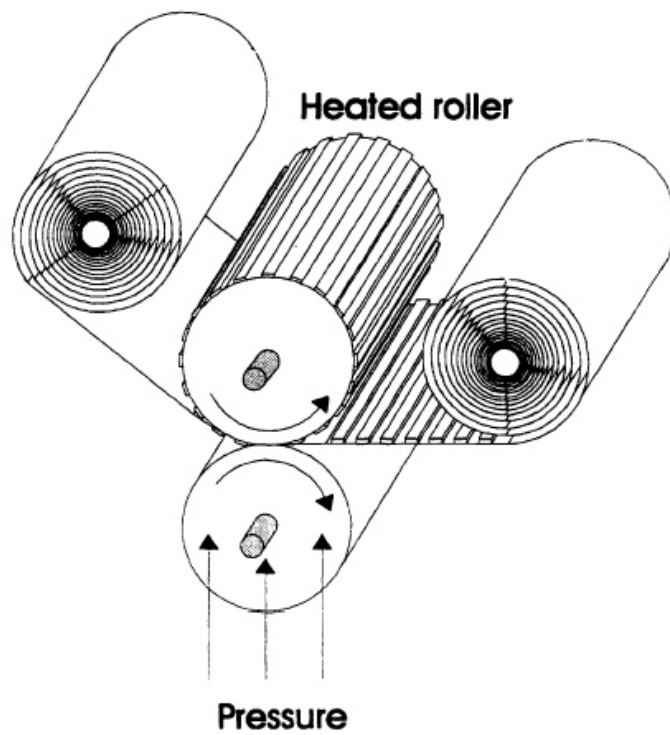


圖 2-6 熱滾壓製程示意圖 [1]

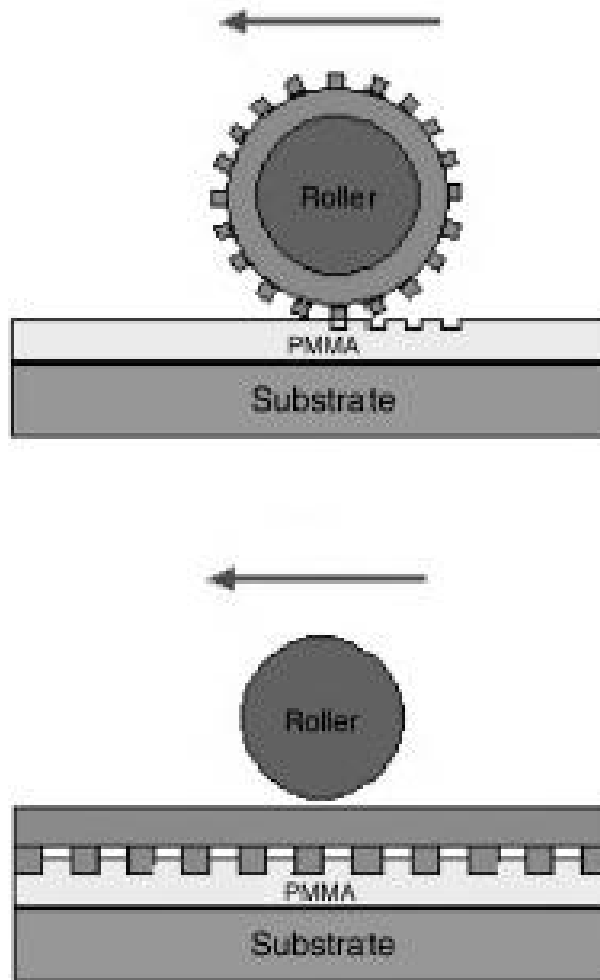


圖 2-7 滾輪應用於微熱壓示意圖[12]



圖 2-8 微影技術應用於微結構滾輪示意圖 [15]

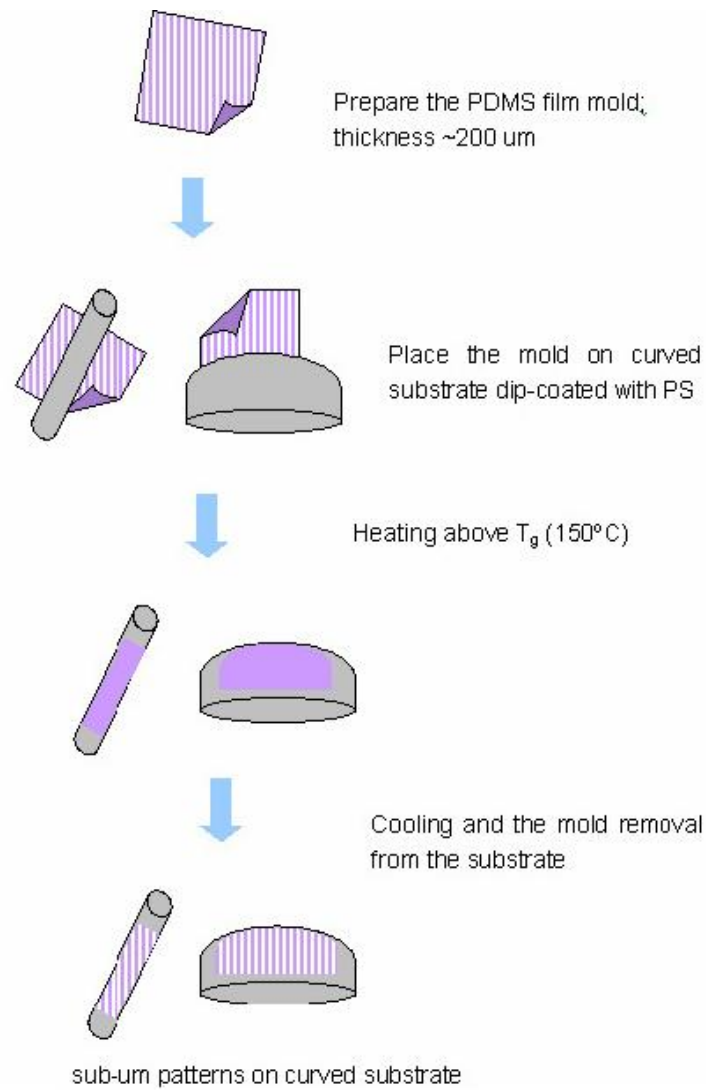


圖 2-9 PDMS 曲面模具製作流程圖 [16]

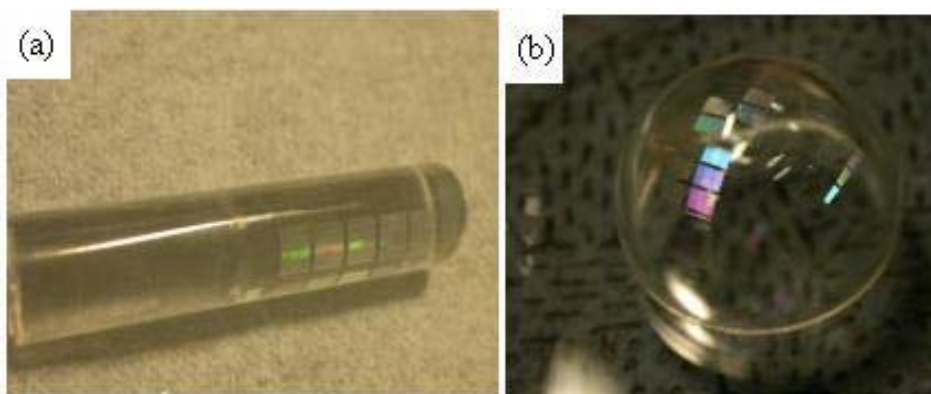


圖 2-10 PDMS 曲面模具實體圖 (a) 滾輪式 (b) 球狀式 [16]

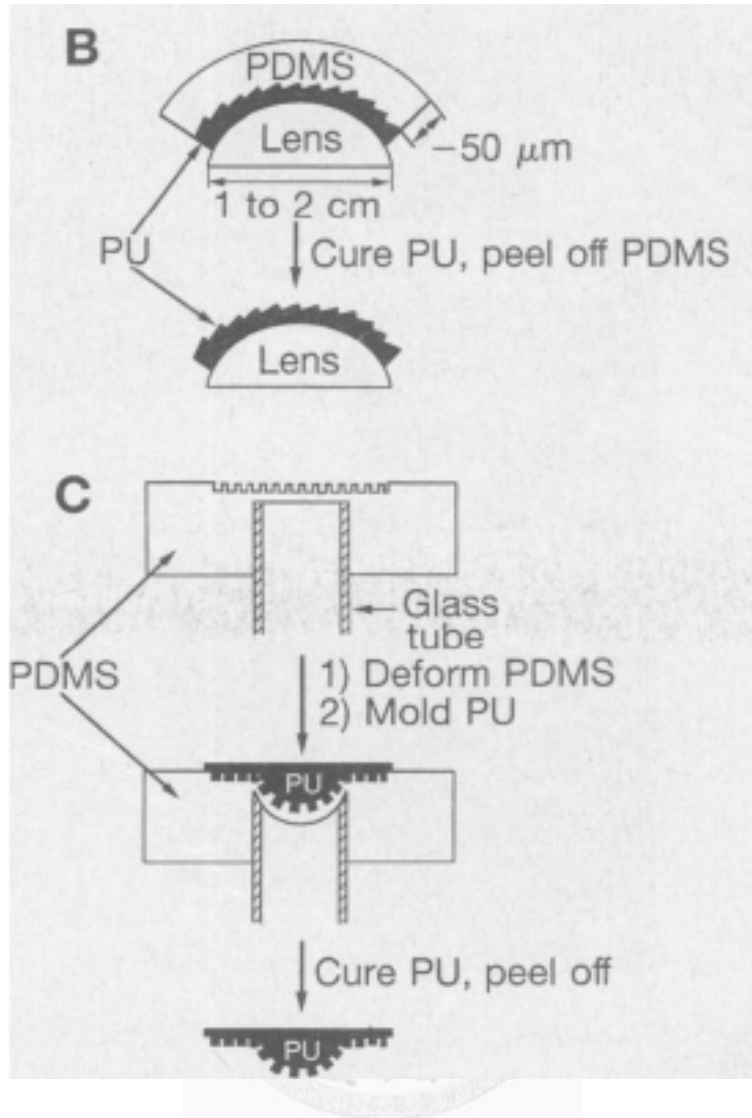


圖 2-11 REM 應用於曲面成形示意圖 [17]

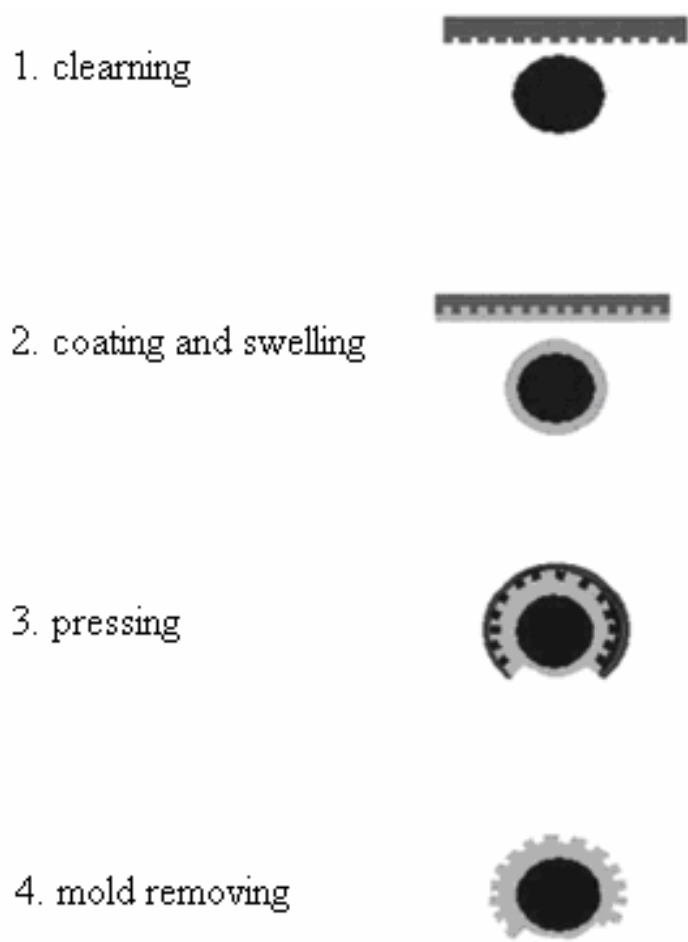
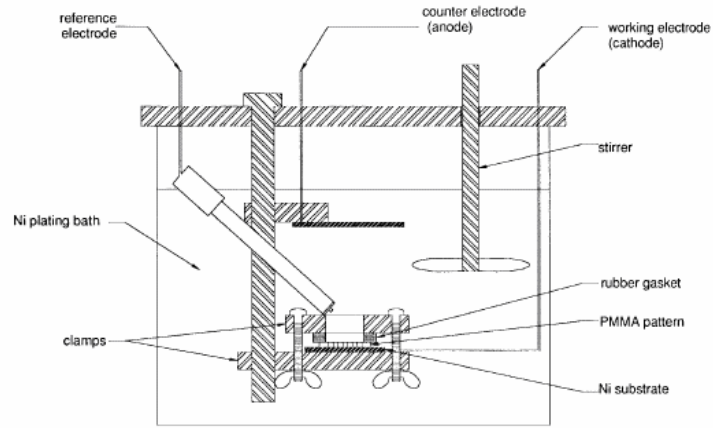
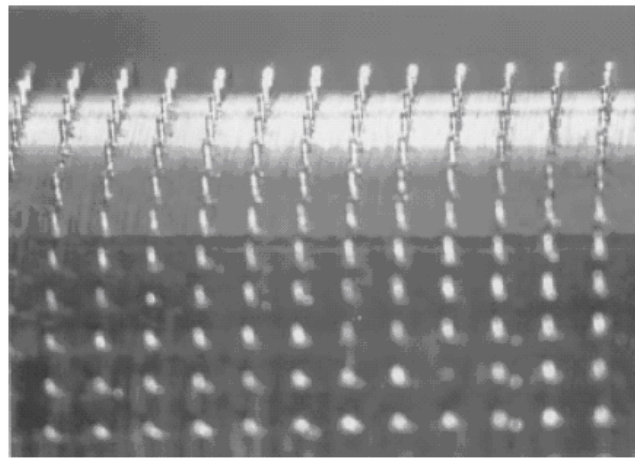


圖 2-12 溶劑輔助聚合物鍵合微影技術製作圓柱模的示意圖 [19]



(a)



(b)

圖 2-13 以電鍍法製作圓柱模 (a) 以 PMMA 薄板包覆圓柱之電鍍槽示意圖 (b) PMMA 薄板包覆圓柱進行電鍍得到之鎳圓柱微結構 [22]

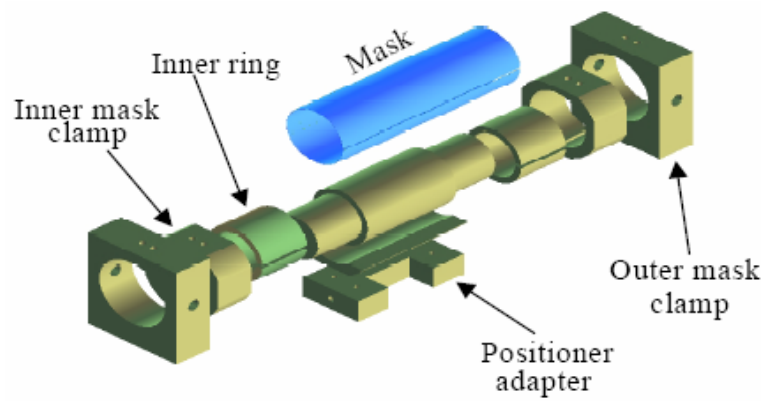
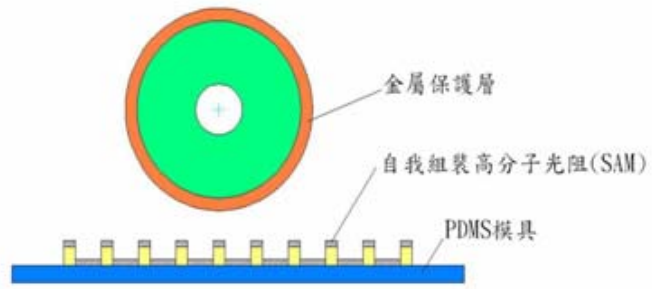
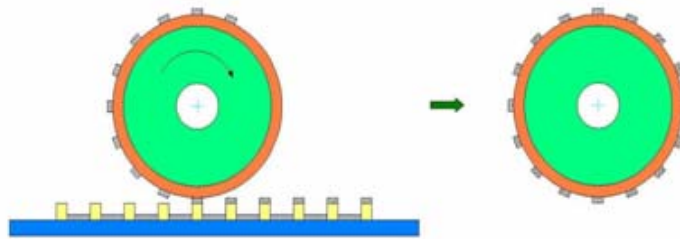


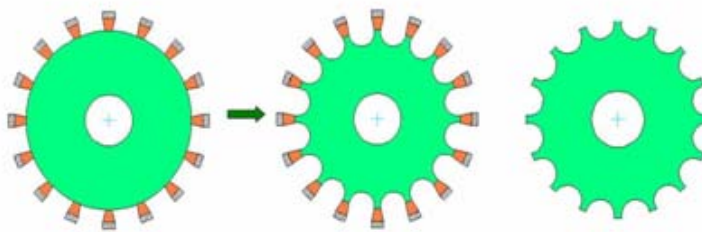
圖 2-14 微影術應用於微結構滾輪製作之示意圖 [23]



(a) 實驗設置圖



(b) 滾輪滾過 PDMS 模具，與 SAM 產生反應形成蝕刻保護層



(c) 利用蝕刻把滾輪上未附着蝕刻保護層處予以蝕刻，最後去除金屬保護層



(d) 微結構滾輪用於膜片生產製作

圖 2-15 蝕刻技術製作微結構滾輪 [24]

第三章 靜電輔助噴塗與微結構滾輪製程設備

本章介紹本研究所使用之實驗設備與基材之製備，共分為五小節。第一節首先介紹實驗目的及整體流程規劃；第二節描述本研究所開發之靜電噴塗之設備；第三節介紹光微影製程所需之製程設備與光阻材料；第四節介紹 UV 壓印機台設備；最後一節將說明本實驗所使用之量測方法及設備。

3.1 實驗整體流程規劃

本研究實驗流程圖 3-1 (a) 所示，主要分為兩大部分，其一為探討其一般噴塗與靜電輔助噴塗應用於不同基材之噴塗，其流程圖如圖 3-1 (b) 所示。而另一部份為利用靜電輔助噴塗濕式光阻 EPG-510 均勻噴塗於金屬滾輪上，利用步進式曲面曝光定義圖形，再利用無電鍍鎳製作出剛性微結構，最後再做實際之 UV 壓印測試，其流程圖如圖 3-1 (c) 所示。

3.2 噴塗機台開發與設計

本實驗目的為將濕式光阻均勻的噴塗於基材上，為達成本研究之目的，本實驗製作一噴塗設備，同時可加入靜電輔助以進行靜電輔助噴塗。此外，並設計特殊之載台，可噴塗濕式光阻於非平面之基材上。示意圖如圖 3-9 (a) 平面基材專用 (b) 滾輪專用所示，實際機台如圖 3-10 所示。其詳細各部位之功能如下述：

1. 靜電主機 (宇萱噴塗公司 型號 HV-2101，如圖 3-2 所示，詳細規格如表 3-1 所示)，其功能為使靜電噴槍產生靜電。
2. 靜電噴槍 (宇萱噴塗公司 型號 A-90，如圖 3-3 所示，詳細規如表 3-2 所示)，本噴槍主要功能為將液態之塗料送至噴嘴，並在此過程中控制其流量。此外靜電主機產生靜電後，再此處將塗料加入靜電。
3. 噴嘴 (宇萱噴塗公司 型號 TCP-35，如圖 3-4 所示，詳細規如表 3-3 所

示)，此噴嘴功能為：使用氣體氮氣將由噴槍送至之塗料霧化形成二相流流體。此部分決定塗料霧化之效果與噴塗範圍。

4. 控制器（如圖 3-5 所示），此控制器用來控制噴塗時整體的運作，包括控制噴塗時間與控制霧化氣體氮氣之壓力。
5. 塗料壓力罐（如圖 3-6 所示），此處為放置塗料之地方，須由氮氣氣瓶加壓，使塗料送至噴槍中。
6. 步進馬達（如圖 3-7 所示），此馬達為帶動滾輪旋轉之機構。
7. 步進馬達控制電源（如圖 3-8 所示），此電源為提供馬達之電源。
8. 絕緣外箱與抽風設備：在靜電噴塗中，帶電塗料會吸附於接地的導體上，本實驗只將所需塗佈之機材接地，剩餘部份皆要作成非導體，故在外箱部份，使用 PMMA 壓克力作為材料，同時也可方便觀察實驗過程。

3.3 光微影製程設備與光阻材料

3.3.1 噴塗之光阻

- 光阻（Photo Resist，PR）

本研究使用光阻為 EPG-510 Series（永光化工）之正型濕式光阻（G-line 型）來進行實驗。如表 3-2 所示為此型光阻之特性。

- 顯影液

配合 EPG-510 Series 所使用的顯影液為 EPD-1000（永光化學）。

- 剝膜液

將定義好之光阻圖形當作保護層，利用無電鍍鍍技術長出結構後，運用丙酮搭配震洗機將光阻剝離，即可獲得微結構滾輪。

3.3.2 步進式曲面曝光機台

本研究為了要在金屬滾輪上進行步進式光微影製程，自行組裝一步進式曲面

曝光機台，主要元件包括一組微步進馬達驅動之旋轉平台(解析度為 0.0025 度)、一組 LED 紫外光燈、玻璃光罩架、玻璃光罩、光學平板及一台精密微調移動平台(精度為 10 μm)，如圖 3-11 所示。

3.4 具 UV 曝光功能之滾輪微轉印機台

由於在製程中，考量到材料固化對成型的影响，故須加裝一可使材料產生固化的機制，由於實驗所使用之光阻材料具有經照特定波長紫外光即固化的特性，故須選擇一適合於材料及製程的光源。本實驗所選用的是長波 365 nm 的紫外線曝光源，此光源為 PHILIPS UV-A 365 nm 固化專用曝光源，最高功率 400W。曝光固化的原理是在特殊配方的樹脂中加入光起始劑(或光敏劑)，經過吸收 UV-365 nm 波長後，產生活性自由基或離子基，從而引發聚合、交聯(架橋反應)和接枝反應，使樹脂在短時間內由液態轉化為固態。此滾輪微轉印機台由驅動動力源、滾輪升降機構、底座平移輸送機構及真空底盤吸附等四大單元所組成機台示意圖如圖 3-12 所示，機台實體如圖 3-13 所示。

3.5 微結構滾輪製程之相關量測設備

3.5.1 光譜與薄膜厚度量測儀

本研究使用 Mikropack 公司的薄膜厚度量測儀(NanoCalc-2000-VIS)，如圖 3-14 所示。利用機台可發出之光源波長範圍 400~850 nm，藉由薄膜表面與底材反射光之干涉現象，快速、可靠的量測半透明及透明之膜厚，為非接觸式量測，不會破壞試片；若基材本身為透明材料時，可改由穿透式量測。用此薄膜厚度量測儀進行本實驗所塗佈於金屬滾輪表面上之光阻厚度量測，其薄膜厚度量測儀之相關資料，如表 3-5 所示。

3.5.2 光強計

利用 Power meter, 1815-C, Newport 來量測 UV-LED 之光源強度，以計算本實驗所需之曝光時間，如圖 3-15 所示。

3.5.3 溫度計

利用 Thermal meter (FLUKE-5427)，來量測烤盤之溫度，如圖 3-16 所示。

3.5.4 非球面表面輪廓儀

使用非球面表面輪廓儀 (Taylor Hobson – Talysurf - S21) 如圖 3-17 所示。用此進行金屬滾輪表面之粗糙度量測、滾輪上之光阻結構及無電鍍鎳結構輪廓量測。

3.5.5 光學顯微鏡

本研究使用光學顯微鏡 (ZOOMKOP) 來進行滾輪上之光阻結構與微結構滾輪之觀察，如圖 3-18 所示。

3.5.6 自組薄膜厚度量測載台

本研究欲將於曲面上進行光阻厚度量測實驗，自行開發一薄膜厚度量測載台。載台主要元件包括：可放置滾輪之滾輪置架、可校正光於金屬滾輪位置之 Z-Stage、Y-Stage、可將光纖置於其上的 Mount、可驅動滾輪置架於線性移動之線性平台及光學平板，如圖 3-19 所示。

3.5.7 3D 雷射掃描顯微鏡

本研究利用 3D 雷射掃描顯微鏡 (VK-9710)，如圖 3-20 所示，量測其光阻在表面輪廓之關係。

表 3-1 靜電主機之規格

型式	HV-2101-A
高電壓出力	DC-90 kV
高電壓調整	-15 kV~-90 kV 無段式
高電壓開關	手動自動
電源電壓	AC100V~240V

表 3-2 靜電噴槍之規格

型式	A-90
常用高電壓	DC-90 kV
噴槍全長	300 mm

表 3-3 靜電噴頭之規格

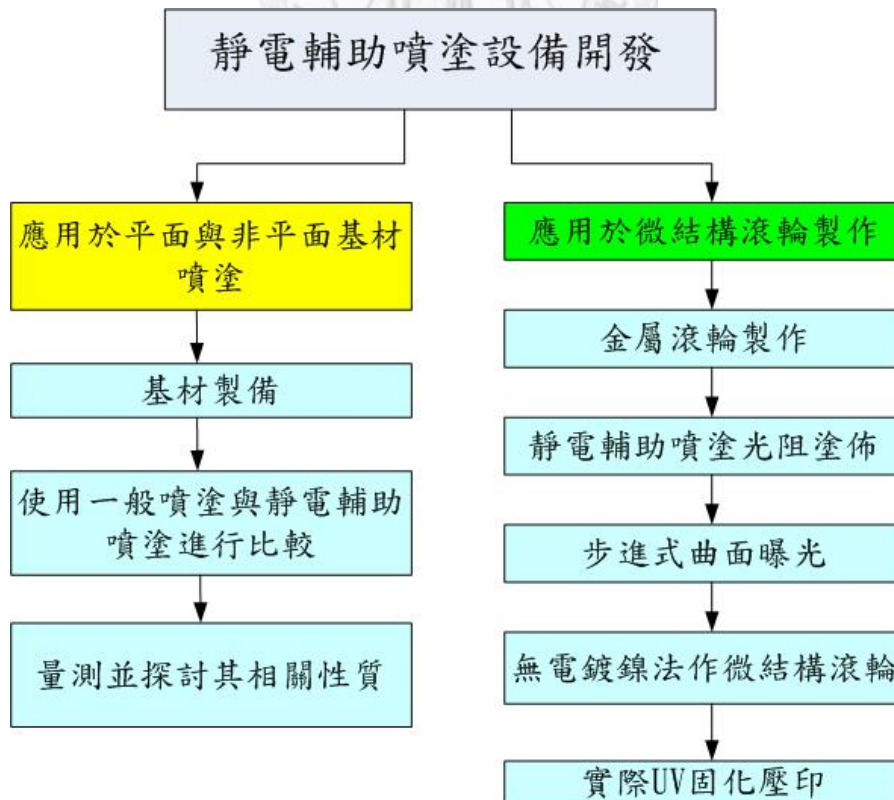
型式	TCP-35
口徑 (mm)	12
塗料吐出量 NI/min	50~300
霧化壓力 Mpa (kgf/cm ²)	0.08~0.2 (0.8~2.1)
噴幅	300
空氣消耗量 NI/min	100

表 3-4 EPG 510 光阻之材料性質與製程參數 (永光化學)

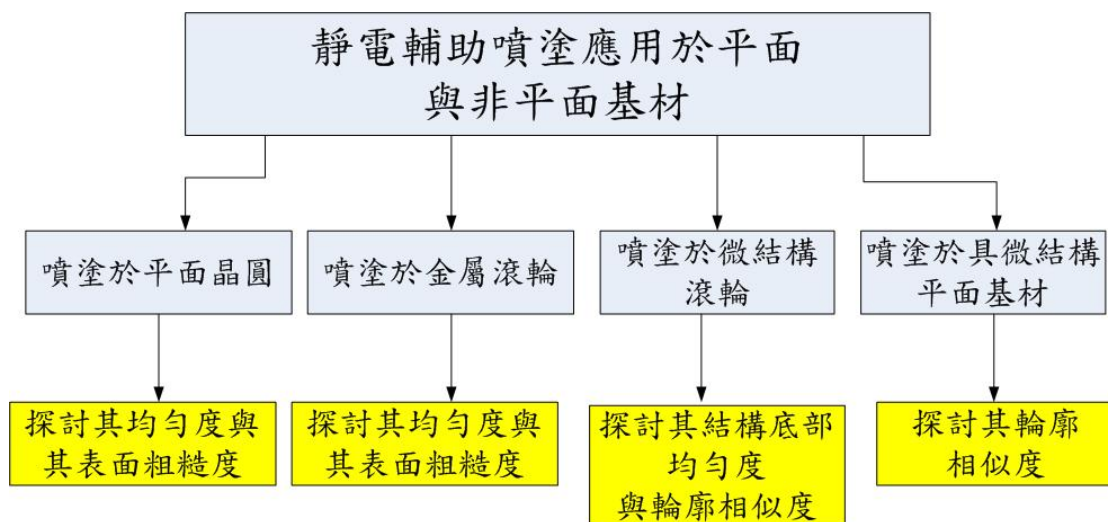
EPG 510	Sensitivity		Resolution (μm)	Thermal Resistance 5μm	
	Eth	Eop		Pad Huge Pad	(°C)
	(mJ/cm ²)		0.6	135	125
60	90				
Prebake	PEB		Development	Dark Erosion (Å)	
90°C/60sec	110°C/60sec		Puddle 60sec.23°C	808	

表 3-5 膜厚度測儀之相關資料

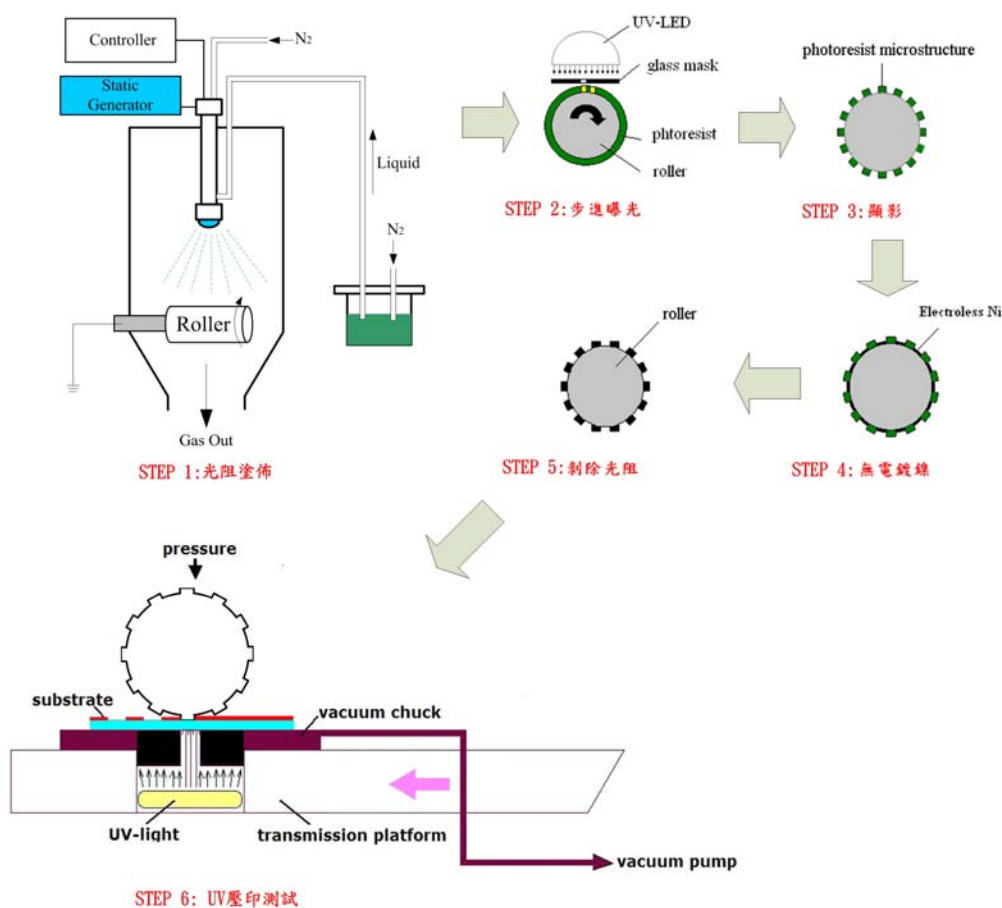
規格/型號	NanoCalc- 2000-VIS
膜厚範圍	50 nm ~ 20 μm
解析度	0.1 nm
精確度	10% (10 nm) 1% (>1 μm)
再現性	0.3 nm (10 nm~1 μm) 1 nm (>1 μm)
波長範圍	400 ~ 850 nm
光譜儀	Single Channel 2048 Pixel CCD
光源	鹵素燈
界面	ISA/PCI/USB
主機尺寸	190 x 140 x 260 mm
主機重量	~ 2.5 Kg
操作溫度	5 ~ 35 °C
電源	DC 12V 2.5 A



(a)

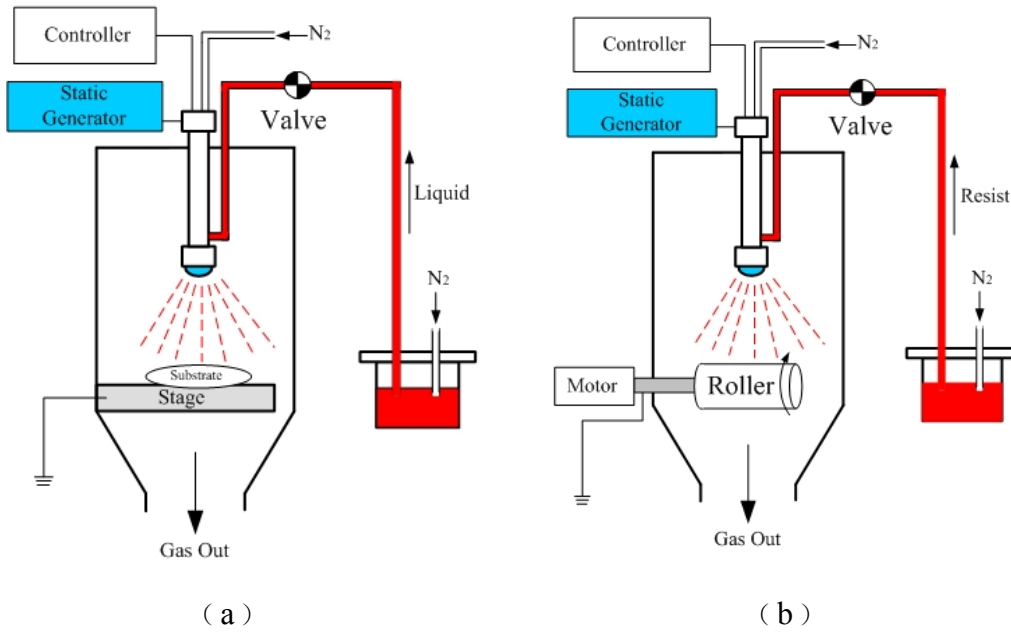


(b)



(c)

圖 3-1 總體實驗流程圖



(a) (b)
圖 3-2 整體機台示意圖 (a) 平面基材 (b) 滾輪

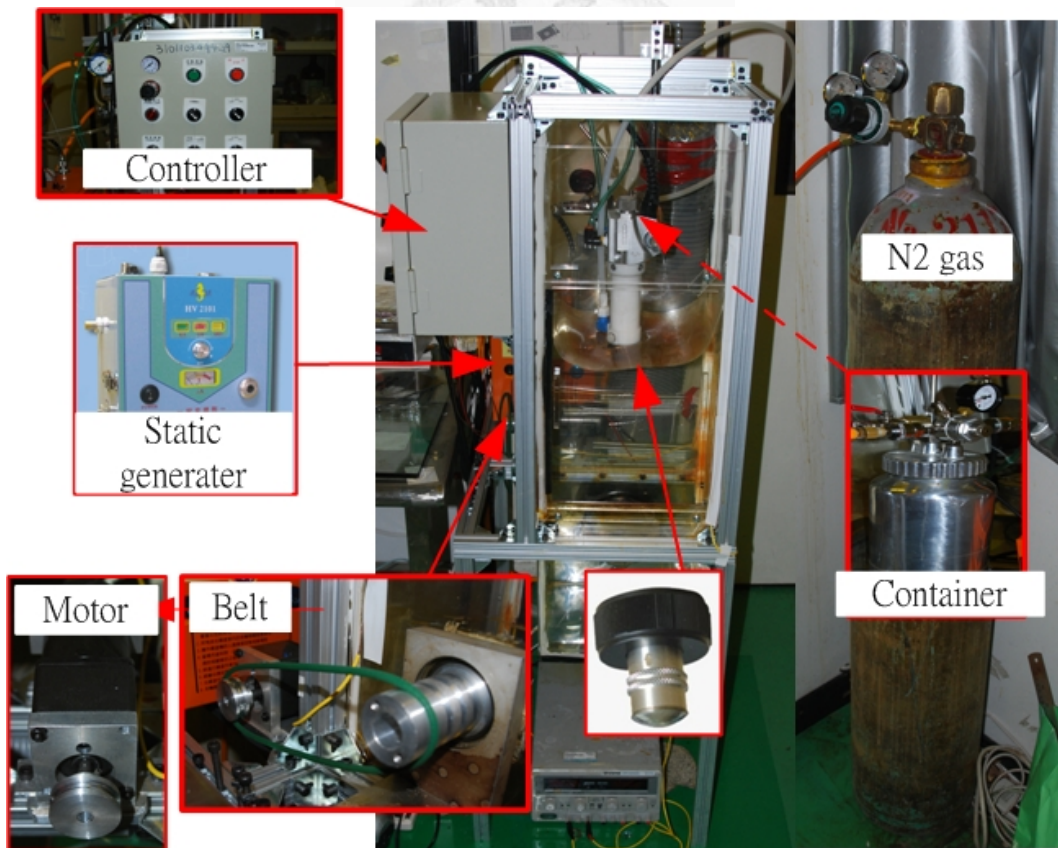


圖 3-3 靜電輔助噴塗機台實際照片圖



圖 3-4 靜電主機



圖 3-5 靜電噴槍



圖 3-6 靜電噴頭

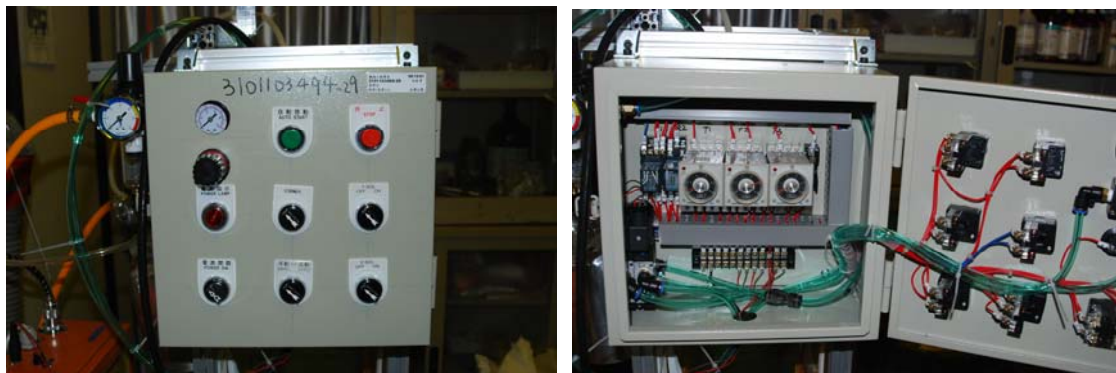


圖 3-7 控制器



圖 3-8 塗料罐

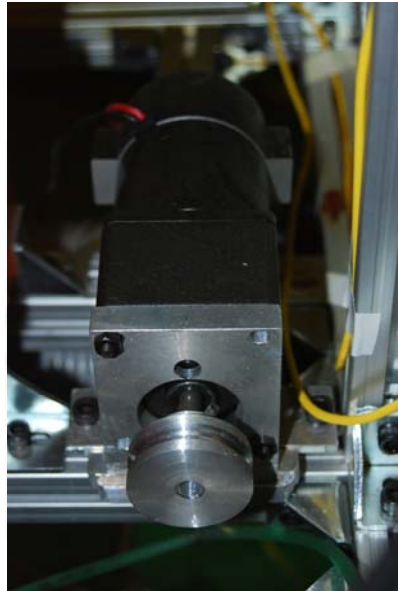


圖 3-9 馬達



圖 3-10 馬達控制電源

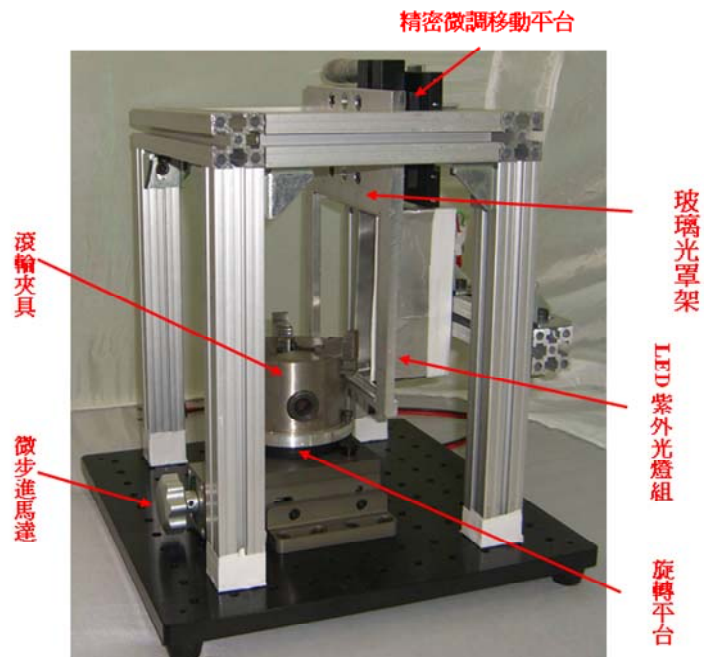


圖 3-11 步進式曲面曝光機台

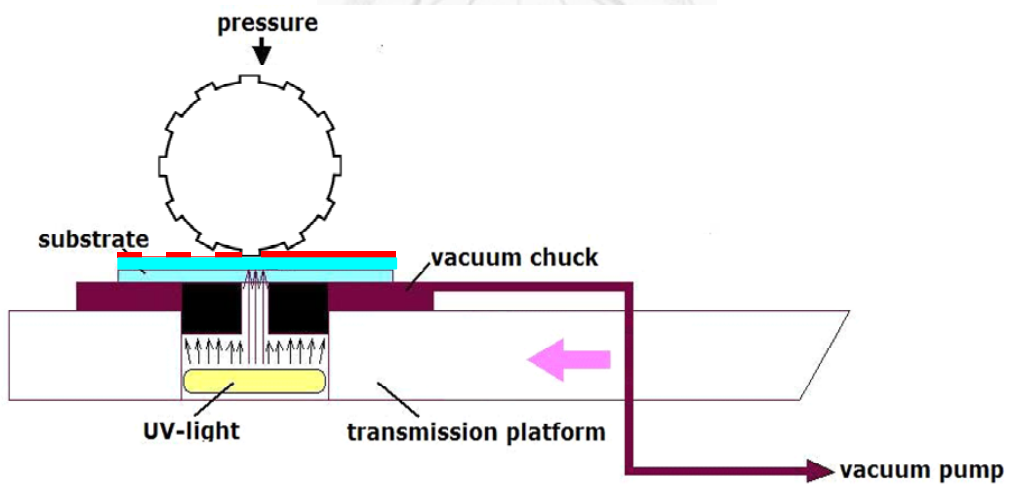


圖 3-12 具曝光功能之滾輪轉印機台示意圖

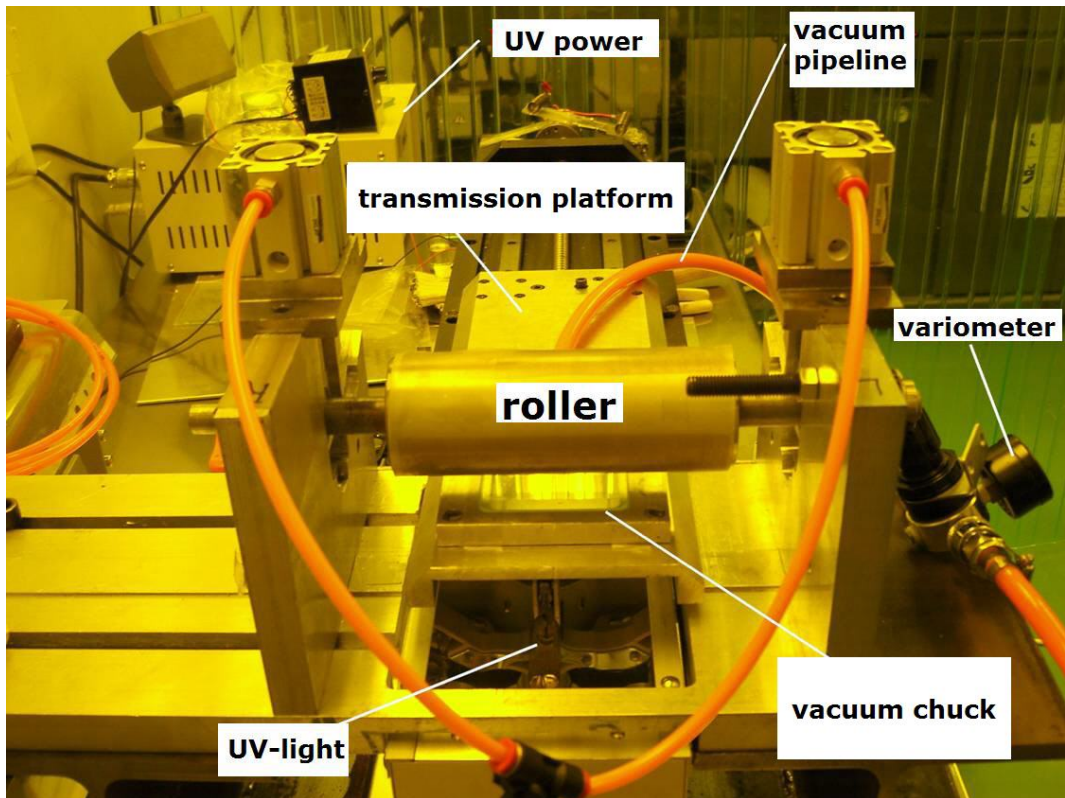


圖 3- 13 具曝光功能之滾輪轉印機台實體圖

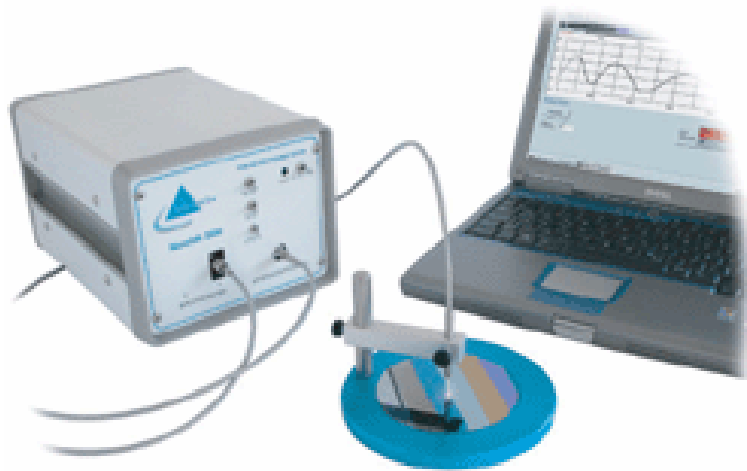


圖 3- 14 薄膜厚度量測儀 (NanoCalc- 2000-VIS)



圖 3- 15 Power meter （1815-C , Newport）



圖 3- 16 Thermal meter （FLUKE-5439）



圖 3- 17 非球面表面輪廓儀（Taylor Hobson - Talysurf- S21）

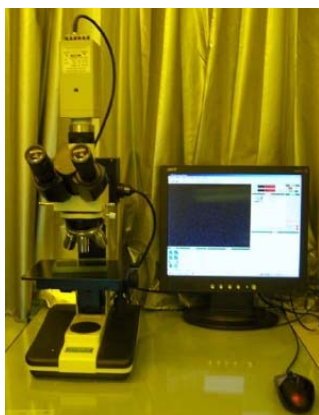


圖 3-18 光學顯微鏡 (ZOOMKOP)

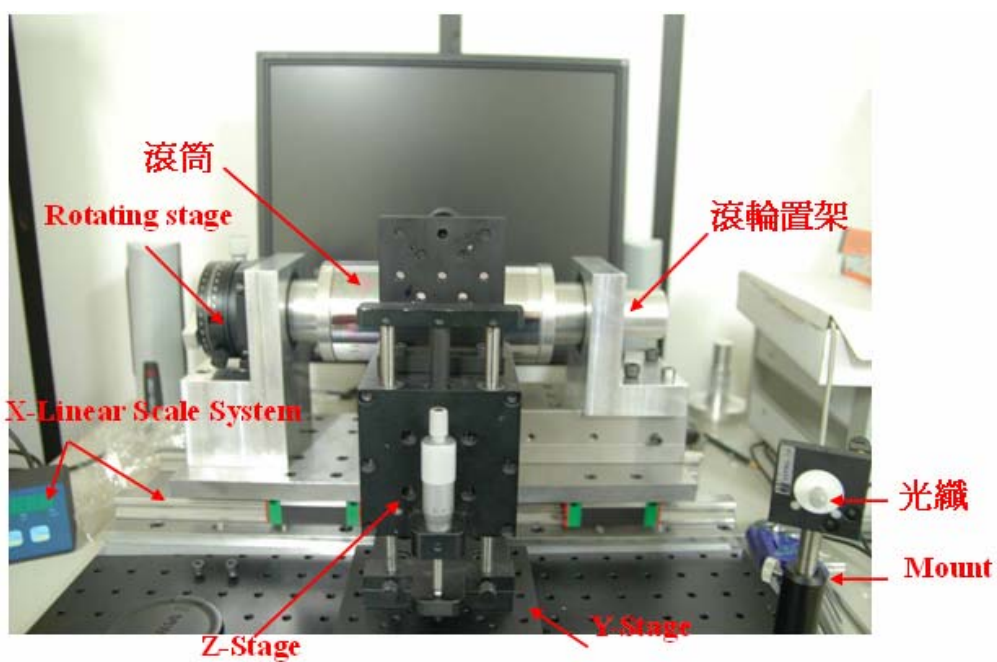


圖 3-19 自組薄膜厚度量測載台



圖 3-20 3D 雷射掃描顯微鏡

第四章 靜電輔助噴塗用於平面晶圓光阻塗佈

本章節主要介紹利用噴塗與靜電噴塗之方式將濕式光阻噴塗至平面晶圓上，測試其機台之相關參數並探討其光阻於塗佈後之相關性質。首先第一節介紹靜電輔助噴塗之製程特色與原理；第二節針對欲使用之晶圓之製備進行介紹；第三節對量測方式做介紹；第四節對於機台之初步參數做探討；第五節探討一般噴塗與靜電噴塗應用於平面基材光阻塗佈效果差異；第六節將探討靜電噴塗後晶圓之曝光效果；而最後一節為本章之結論。

4.1 靜電輔助噴塗之製程特色與原理

靜電塗佈原理，主要係因為一般而言電荷遵守電荷守恆定律，亦即自由電荷可以在物體之間轉移，並不會消滅。所謂的電中性是指物體所帶的正負電量相等，當物體的正電荷或負電荷較另一方為多時，此物體就成為帶電體。因此本研究設計機台能使噴塗的塗料能夠帶電。在本實驗中，當塗料經過噴頭時，會在這時同時給予電荷，使其帶電。經由此一外加電荷，會使霧化後光阻為帶有正電之帶電體，並將待塗佈之基材接地，使霧化後之光阻能因靜電力的電位差而吸附於基材上，達成均勻塗佈的目的。此外在霧化過程中，塗料也會因本身帶電的關係，不會與鄰近的帶相同電性的分子聚集，反而會排斥，使其霧化效果更佳。

本研究藉由靜電輔助噴塗會提升塗料的包覆力之特性，達成均勻塗佈與基材上的目的。如圖 4-1 所示，從上往下噴塗，但因靜電輔助噴塗的包覆效果效果，使其基材背面也有噴塗到塗料，如圖 4-2 所示。代表其塗料因靜電之關係，增加其包覆效果。

4.2 晶圓之製備

本研究使用四吋矽晶圓，其規格可見表 4-1。為確保在塗佈過程不受晶圓上之污染源影響，在塗佈之前需先清潔晶圓。依序利用丙酮 (Acetone)、異丙醇 (IPA)

及去離子水 (DI water) 放置於超音波震洗槽清洗各 5 分鐘，再將晶圓浸入硫酸與過氧化氫溶液 (體積比為 $H_2SO_4:H_2O_2=3:1$, SPM)，利用加熱盤加熱至 $80^{\circ}C$ ，並維持溫度置放 10 分鐘。之後再利用去離子水洗淨，並用氮氣吹乾，最後置於 $120^{\circ}C$ 烤箱 (Oven) 使水分完全蒸發。

4.3 量測方式

本實驗量測光阻的方式有光學量測與接觸式量測。在光學量測的部份，使用的是上述之膜厚度量測儀 (NanoCalc-2000-VIS) 此機台必須知道使用光阻之相關折射率(n)與反射率(k)值。故需先使用頻譜式橢偏儀 (Spectroscopic Ellipsometer) 量測光阻 (EPG-510) 於波長 300~800 nm 間之 N 值與 K 值 (實部為 N 與折射率有關，虛部為 K 與吸收率有關)，分別如圖 4-3、圖 4-4 所示，接著把資料輸入於薄膜厚度儀器內。然而薄膜厚度量測儀之原理為藉由薄膜表面與底材反射光的干涉現象，量測半透明及透明之膜厚，對於平面基材 (如 Silicon 晶圓) 之薄膜量測結果較為精確，示意圖如圖 4-5 所示。量測之機台使用 Mikropack 公司之薄膜厚度量測儀 (NanoCalc-2000-VIS)。量測之圖形如圖 4-6 所示。

本實驗使用光學式量測量測其均勻度，而量測方法是先在晶圓上取十點，如圖 4-7 所示，在利用此十點量測出來的厚度套用定義去計算其厚度的差異[9]，而在均勻度之定義由式 4-1[9]可知，其均勻度 $1\sigma\%$ 值越小，代表其均勻度越佳。

$$1\sigma\% = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (4-1)$$

其中： σ 量測光阻厚度之數值標準差， \bar{X} 是平均光阻厚度。

而在接觸式量測部分本實驗使用非球面表面輪廓儀 (Taylor Hobson - Talysurf - S21)。本文用此機台量測光阻再取樣長度內之厚度差異 δ_i ，計算時取量測範圍內三段之厚度差異 δ_i ，每段 5 mm，並取其最高點與最低點決定其厚度

差異 δ_i 。此外，在上述所取的厚度差異 δ_i 中在取 500 μm ，同樣計算其厚度差異 δ_i ，進行比較。而其厚度差異 δ_i 量測圖形，如圖 4-8 所示。

4.4 機台初步參數之探討

本節主要是要對於本實驗所製作的靜電輔助噴塗機台作基本性能之測試，並設置固定的參數，以利後續實驗之進行。

4.4.1. 塗料流量之設定

由於本實驗所架設之靜電輔助噴塗機台之塗料流量可從兩個方面去控制：

1. 噴槍之線性旋鈕控制
2. 塗料罐之壓力

本實驗使用單一參數法，首先先將機器本身之線性旋鈕固定一流量後，調整塗料罐之壓力，本次實驗以水當作塗料，每組壓力讓塗料噴塗三秒取平均值即可得流量結果如表 4-2 所示。由圖 4-9 可知，壓力越大，其流量越大。而因光阻溶液之黏滯係數較水來的高，為提供噴塗時供料之連續性以下本實驗皆採用 3 kg/cm^2 之壓力。此外在噴槍之線性旋鈕部份，則因應各種不同塗料之黏滯係數，調整至其最小可連續供料的旋扭位置。以光阻 EPG-510 為例，其最小穩定之流量為 0.5g/s，故以下實驗使用 EPG-510，流量皆為 0.5g/s。此外由下表可看出，其機器本身對於流量的控制並不是相當的準確，誤差將近 0.08g/s 左右。

4.4.2 製程步驟

本實驗要將一般噴塗製程與靜電噴塗製程應用於光阻塗佈上，故本實驗設計依上述之機台來達成此目的。操作流程如下：

1. 將清潔過之平面基材放至腔體中，如圖 4-10 所示
2. 調整噴頭距離基材 20 cm 處
3. 調整塗料罐之氣體壓力至 3 kg/cm^2
4. 調整控制流量旋鈕至 0.5 g/s
5. 調整噴塗秒數與靜電電壓兩參數

6. 噴塗
7. 噴塗完後靜置 40s
8. 軟烤 (90 °C 60s)
9. 量測 (接觸式量測或非接觸式量測)

4.5 製程參數探討

本小節要探討一般噴塗與靜電輔助噴塗應用於平面基材光阻塗佈效果差異，其中包括探討靜電輔助噴塗後之光阻厚度、光阻表面之厚度差異 δ_i 與均勻度 $1\sigma\%$ 與一般噴塗之差異。

4.5.1 噴塗時間對於光阻厚度之關係

首先本實驗探討噴塗時間對於光阻厚度之關係，本實驗使用光阻 EPG-510，實驗規劃如下：

1. 一般噴塗噴塗時間 1s、2s、3s、4s 和 5s。
2. 靜電輔助噴塗搭配電壓 60 kV，塗噴塗時間 1s、2s、3s、4s 和 5s。

在量測方式上採用接光學式，在結果方面，噴塗時間為 1s 時，因厚度差異 δ_i 過大，無法由光學式量測量測其厚度值，而在靜電輔助噴塗時間為 5s 時，在邊緣處會造成缺陷，如圖 4-11 所示，也無法由光學式量測方式量測。將一般噴塗與靜電噴塗數據做比較，由圖 4-12 可知，噴塗時間越長，其光阻之厚度越厚，且在相同之噴塗時間下如使用靜電噴塗其光阻厚度會比傳統噴塗厚，例如在噴塗 2s 時，傳統噴塗厚 2796 nm 而靜電輔助噴塗厚 4201 nm，代表使用靜電輔助噴塗可提升噴塗效率。

本文將噴塗完光阻之晶圓使用雷射共軛焦顯微鏡拍攝，拍攝角度是由晶圓的側面拍攝，確認其光阻在晶圓上之情形。如圖 4-13 所示，可看出光阻均勻的塗佈在晶圓上。

4.5.2 噴塗時間對於厚度差異 δ_t 之影響

在光阻塗佈技術中，均勻度與光阻表面之粗糙度為判定其是否塗佈良好的指標。其中光阻表面之厚度差異 δ_t 大小是代表光阻表面的厚度變化程度，其值大小會影響其是否能應用於光微影製程，如其光阻表面之厚度差異 δ_t 過大，將無法應用，故本小節將探討靜電輔助噴塗與噴塗時間對於厚度差異 δ_t 之影響。

本實驗要找出在相同條件下，使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗光阻 EPG-510 之噴塗時間對於厚度差異 δ_t 之影響。

實驗參數如下：

1. 一般噴塗噴塗時間 1s、2s、3s 和 4s
2. 靜電輔助噴塗搭配靜電電壓 60 kV，噴塗時間 1s、2s、3s 和 4s。

量測方式使用接觸式量測並量測光阻表面厚度差異 δ_t ，其量測距離為 5 mm，量測三次取平均，其量測結果如圖 4-14 所示，詳細數據如附錄 A 所示。

由圖 4-14 可看出，隨噴塗時間的增加，在晶圓表面上的光阻之厚度差異 δ_t 會下降。其原因為噴塗時間越長，其噴塗腔體中充滿更多的光阻與其溶劑，其溶劑會幫助光阻降低其厚度差異 δ_t 。而在靜電輔助噴塗方面，其效果為增加其光阻之吸附至晶圓上的量，其光阻量越多溶劑的量也越多使光阻降低其厚度差異 δ_t 。在相同時間參數與實驗參數下，使用靜電輔助噴塗會比傳統噴塗更有效率的降低光阻表面之厚度差異 δ_t 。此外，本文將表面粗糙度較低之 2s、3s 和 4s 在取 500 μm 為量測範圍，進行量測，其結果如表 4-3 所示。由表 4-3，可看出在噴塗時間 2s、3s 和 4s 中，如選取 500 μm 為量測範圍其粗糙度都在 50 nm 以下。

噴塗方式	噴塗時間		
	2s	3s	4s
一般噴塗	47 nm	43 nm	33 nm
靜電輔助噴塗	44 nm	43 nm	31 nm

4.5.3 噴塗時間對於光阻均勻度之影響

在光阻塗佈製程中，均勻度是相當重要的指標，判定其塗佈是否良好並是否可以應用。而均勻度代表的是光阻在晶圓上各位置的光阻厚度是否均勻。其均勻

性會影響後續製程，不同的光阻厚度需要不同的曝光時間，如光阻塗佈之均勻度不佳，也會造成後續曝光製程之問題，故本實驗將針對其光阻塗佈之均勻性做探討。

本實驗將探討噴塗時間對均勻度 $1\sigma\%$ 之關係。實驗參數如下：

1. 一般噴塗噴塗 噴塗時間 2s、3s 和 4s
2. 靜電噴塗輔助噴塗噴塗時間 2s、3s 和 4s 搭配靜電電壓 60 kV

實驗結果如圖 4-15 所示，詳細數據如附錄 A 所示，隨噴塗時間增加，其均勻度之 $1\sigma\%$ 也會隨之降低，這代表著均勻度會隨著噴塗時間而提升。此外，利用靜電輔助噴塗，可使均勻度 $1\sigma\%$ 降低至 5% 以下。

4.5.4 靜電電壓對於光阻厚度差異 δ_i 之關係

本實驗將探討靜電電壓對於噴塗後光阻厚度差異 δ_i 之關係。實驗參數如下：

1. 一般噴塗噴塗時間 3s
2. 靜電輔助噴塗噴塗時間 3s 搭配靜電電壓 30 kV、靜電電壓 40 kV、靜電電壓 50 kV 與靜電電壓 60 kV

為量測光阻表面之厚度差異 δ_i ，使用接觸式之量測方式量測，其量測方法如上述。其數據如表所示，結果如圖 4-16 所示，詳細數據如附錄 A 所示，其結果顯示出使用靜電輔助噴塗後，其光阻之厚度差異 δ_i 由一般噴塗之 400 nm 左右，降低至靜電輔助噴塗之 250 nm 左右。但提高電壓，並無看出有明顯提升其厚度差異 δ_i 之情況。

4.5.5 靜電輔助噴塗對均勻度之關係

本實驗將探討靜電輔助噴塗對均勻度 $1\sigma\%$ 之關係。實驗參數如下：

1. 一般噴塗噴塗時間 3s
2. 靜電噴塗輔助噴塗噴塗時間 3s 搭配靜電電壓 30 kV、40 kV、50 kV 與 60 kV

由於要量測並計算其表面均勻度 $1\sigma\%$ ，故採用光學式量測，量測方法如上述。由圖 4-17 可知，詳細數據如附錄 A 所示，在使用相同實驗參數下（噴塗時

間 3 秒)，一般噴塗之均勻度 $1\sigma\%$ 約 6.46%，但在使用靜電噴塗可使光阻之均勻度 $1\sigma\%$ 可降低至 2.71% 左右，其原因在於使用靜電噴塗，光阻因靜電之特性會均勻的包覆於基材，故可提升其均勻度。並由圖可以得知當靜電電壓越大時，相同實驗參數下，其光阻厚度越厚，代表其電壓越大時，會提升其包覆性，但是其上升的幅度並不明顯。

4.6 靜電噴塗後之曝光顯影

本實驗於完成靜電塗佈光阻後，為確認其光阻之功能，將其曝光顯影測試其功能。本實驗參數與步驟如下：

1. 靜電輔助噴塗 2s 搭配電壓 60 kV
2. 軟烤 (90°C 60s)
3. UV 汞燈曝光 (1s)
4. 曝後烤 (90°C 60s)
5. 顯影 (20s)

其結果如圖 4-18 所示。光阻噴塗於晶圓時，厚度約為 2362 nm，而顯影完成後厚度為 1895 nm，最後使用光學顯微鏡觀察其結構。結果顯示，經靜電輔助噴塗後之光阻，仍保持原本之功能，使其能正常曝光顯影。

4.7 靜電輔助噴塗與旋轉塗佈比較

在平面塗佈技術方面，旋轉塗佈 (spin coating) 是最常用的方式。本小節將比較旋轉塗佈、一般噴塗和靜電輔助噴塗做比較。三者皆使用 EPG-510 進行塗佈，塗佈於晶圓上比較其均勻性與光阻厚度差異 δ_t 。實驗參數如下：

1. 旋轉塗佈 500 轉 10s 2000 轉 20s
2. 一般噴塗 3s
3. 靜電輔助噴塗 3s 搭配靜電電壓 60 kV

由下表可知，詳細數據如附錄 A 所示，在晶圓上使用旋轉塗佈，塗佈效果

較一般噴塗與靜電輔助噴塗佳。

塗佈方式	均勻度 $1\sigma\%$	厚度差異 δ_t (nm)
旋轉塗佈	0.23	66.75
一般噴塗	12.9	320.5
靜電輔助噴塗	3.9	121.25

4.8 本章結論

本章成功利用本實驗所開發之靜電輔助噴塗機台，將濕式光阻 EPG-510 塗佈於晶圓上。首先，當噴塗時間越長造成光阻之厚度增加、均勻度提升和光阻厚度差異 δ_t 降低。而在相同噴塗時間與參數下，使用靜電輔助噴塗搭配電壓 60V，可提升一倍的噴塗效率，例如在噴塗 2s 時，傳統噴塗厚 2796 nm 而靜電輔助噴塗厚 4201 nm。在相同的噴塗參數與噴塗時間 3s 下如使用靜電輔助噴塗搭配電壓 60 kV，會使光阻表面之表面粗造度由一般噴塗之 400 nm 降低至靜電輔助噴塗之 250 nm。在相同噴塗參數噴塗時間 3s 下，如使用靜電輔助噴塗搭配電壓 60 kV，其均勻度 $1\sigma\%$ 會由一般噴塗之 6%降低至靜電輔助噴塗之 5%以下。

本文設定一最佳操作範圍，其規定光阻表面之表面粗造度在 5 mm 的範圍下要低於 300 nm，而在量測範圍 500 μm 下要低於 50 nm，且均勻度 $1\sigma\%$ 要低於 5%，其符合條件之結果為靜電輔助噴塗 3s 與 4s。本實驗將經靜電輔助噴塗完光阻之晶圓進行曝光顯影，其結果顯示，經靜電輔助噴塗後之光阻，仍保有其性質與功能，能正常曝光顯影。

本章最後將一般噴塗、靜電輔助噴塗與旋轉塗佈進行比較，其結果顯示，在使用光阻為 EPG-510 時，旋轉塗佈之光阻均勻度與厚度差異 δ_t 皆比一般噴塗與靜電輔助噴塗來得佳。但此旋轉塗佈無法應用於已有結構之晶圓，而使用噴塗式光阻塗佈法可應用於已有結構之平面與非平面機材上，此部份將在第五章進行討論。

表 4-1 四吋矽晶圓規格

Diameter	100+/-0.5mm
Thickness	525+/-25 μm
Type/Dopant	P/Boron
Orientation	(100)
Resistivity	1-100ohm-cm
Surface	polished/etched
Primary Flat	32.5+/-2.5mm
TTV	<10 μm
Bow/Warp	<40 μm
Particle	<=0.3 μm @<=10ppw

表 4-2 塗料罐壓力對於流量之影響結果

塗料罐之壓力 kg/cm^2	1	2	3
三秒之流量 $\text{g}/3\text{s}$	0.70	1.19	1.35
	0.76	1.16	1.4
	0.78	1.19	1.44
	0.74	1.13	1.43
	0.72	1.11	1.47
平均流量 g/s	0.24	0.38	0.47

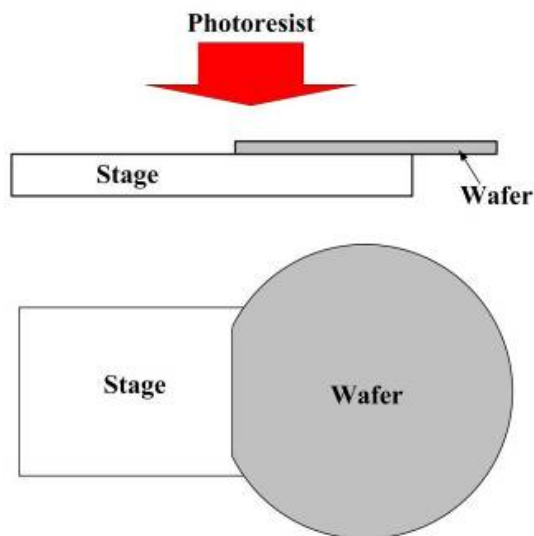


圖 4-1 噴塗方向示意圖

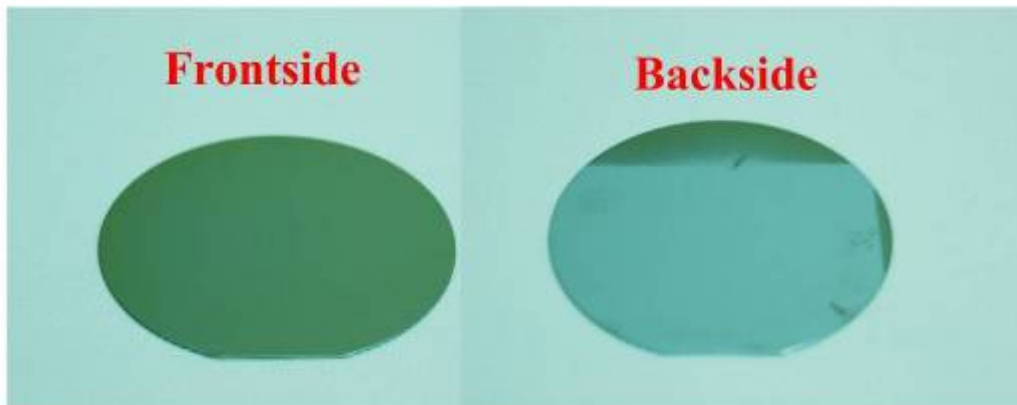


圖 4-2 靜電輔助噴塗之效果

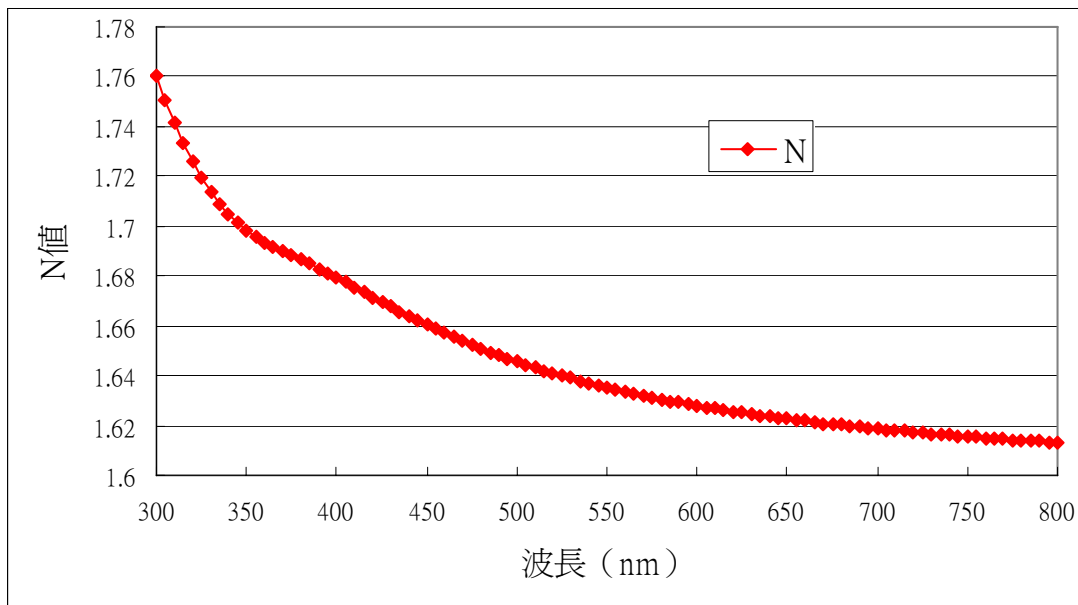


圖 4-3 EPG-510 於波長 300~800 nm 間之折射率 N 值

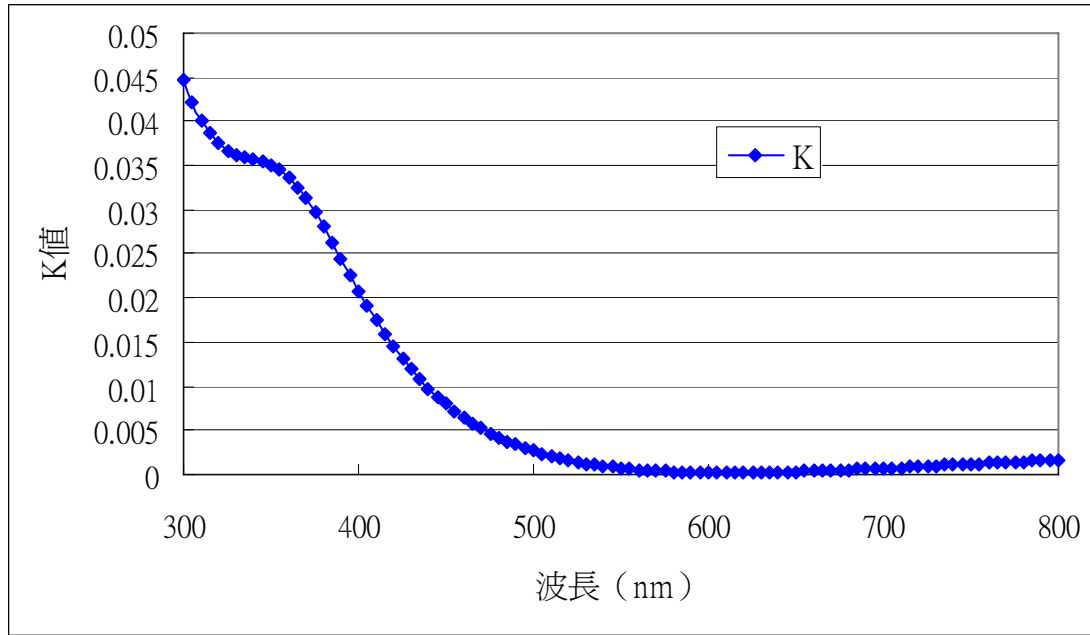


圖 4-4 EPG-510 於波長 300~800 nm 間之反射率 K 值

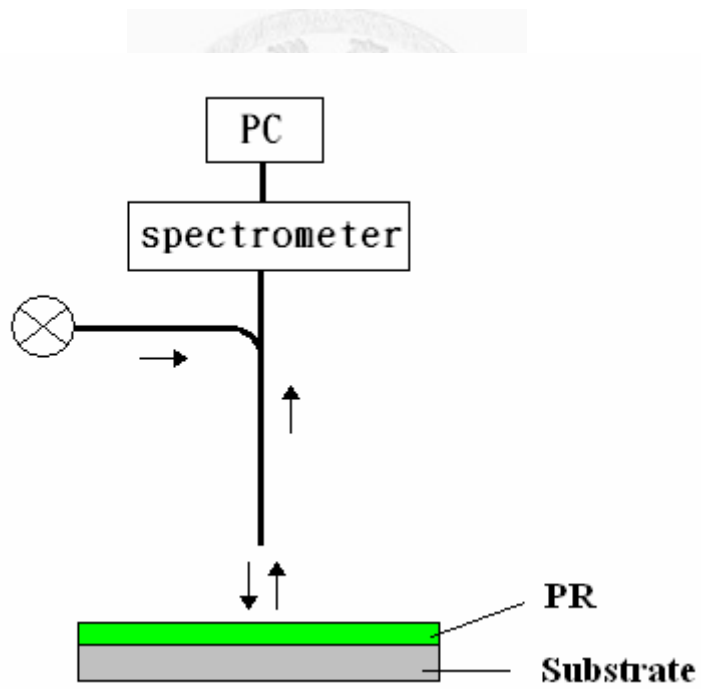


圖 4-5 量測原理示意圖

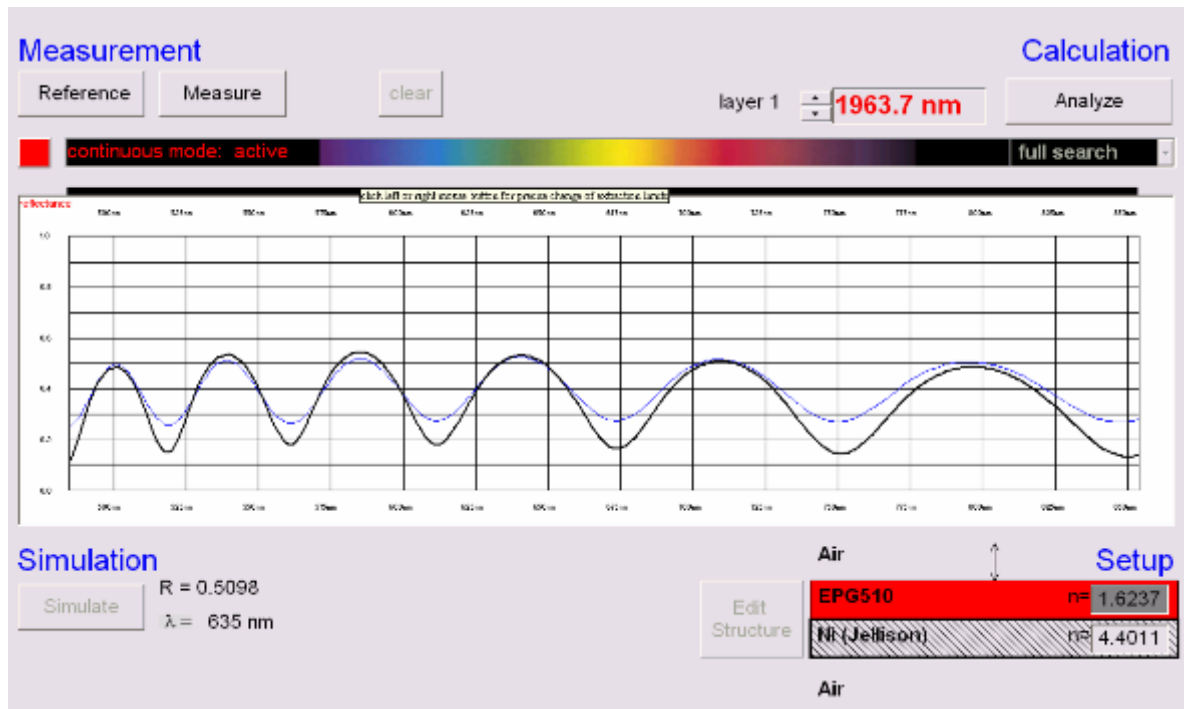


圖 4-6 薄膜厚度量測儀顯示之量測結果，右上角微量測之結果

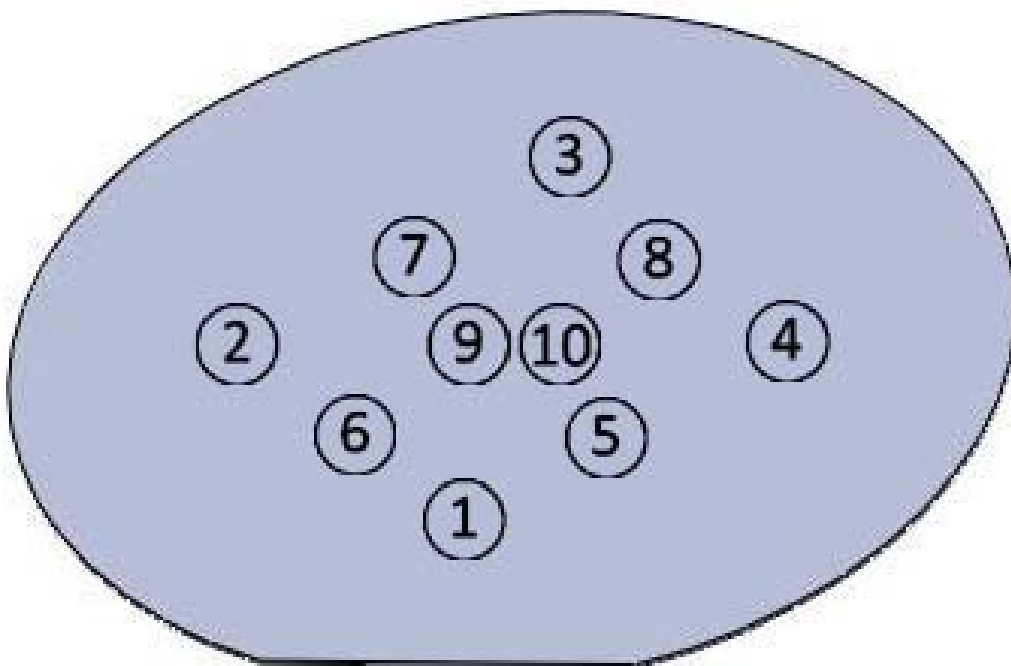


圖 4-7 薄膜厚度量測儀量測之區域

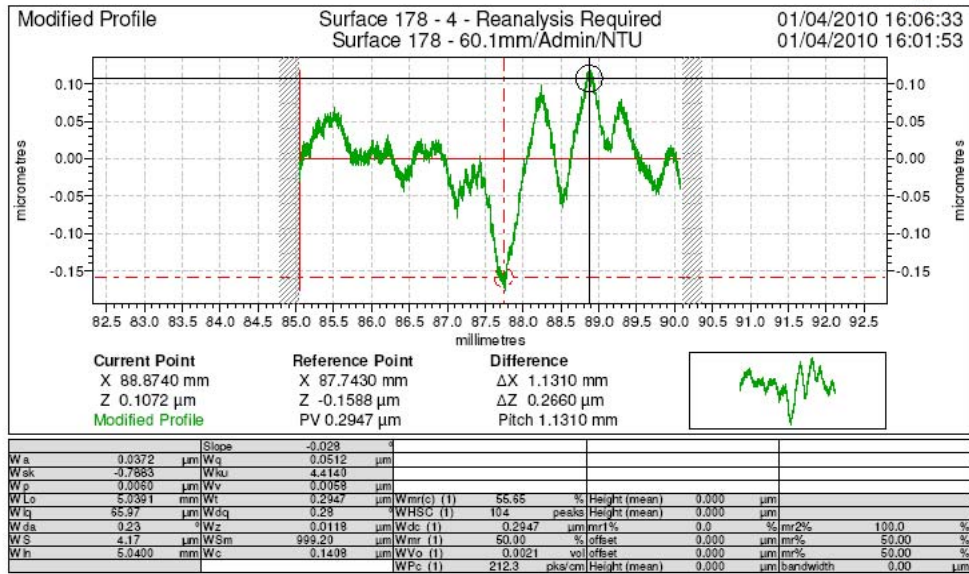


圖 4-8 表面輪廓儀量測光阻表面厚度差異 δ , 量測之圖形

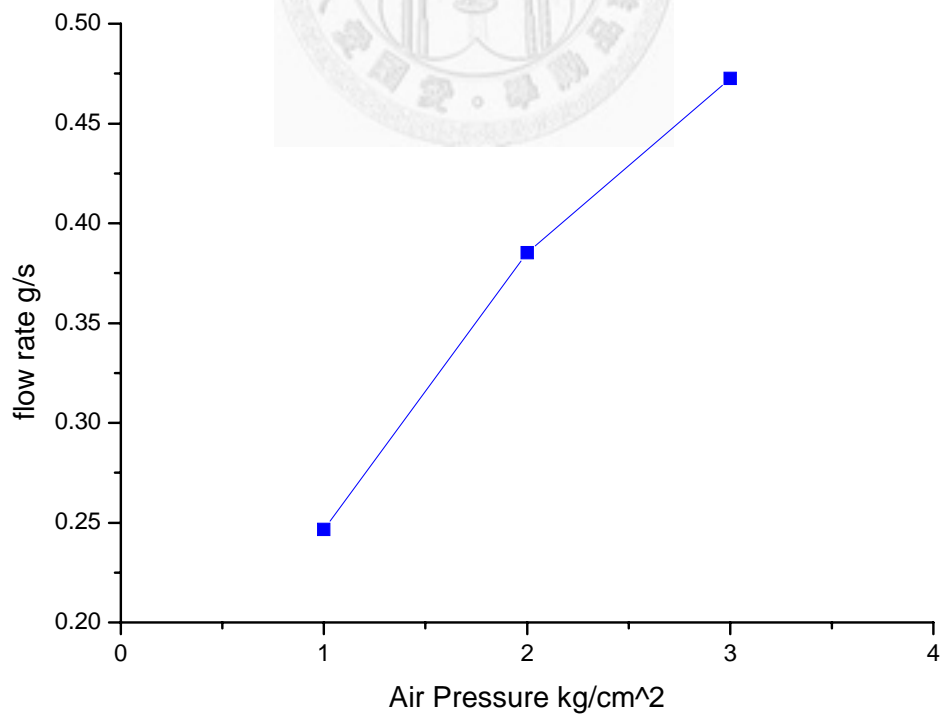


圖 4-9 塗料罐壓力對於流量之影響

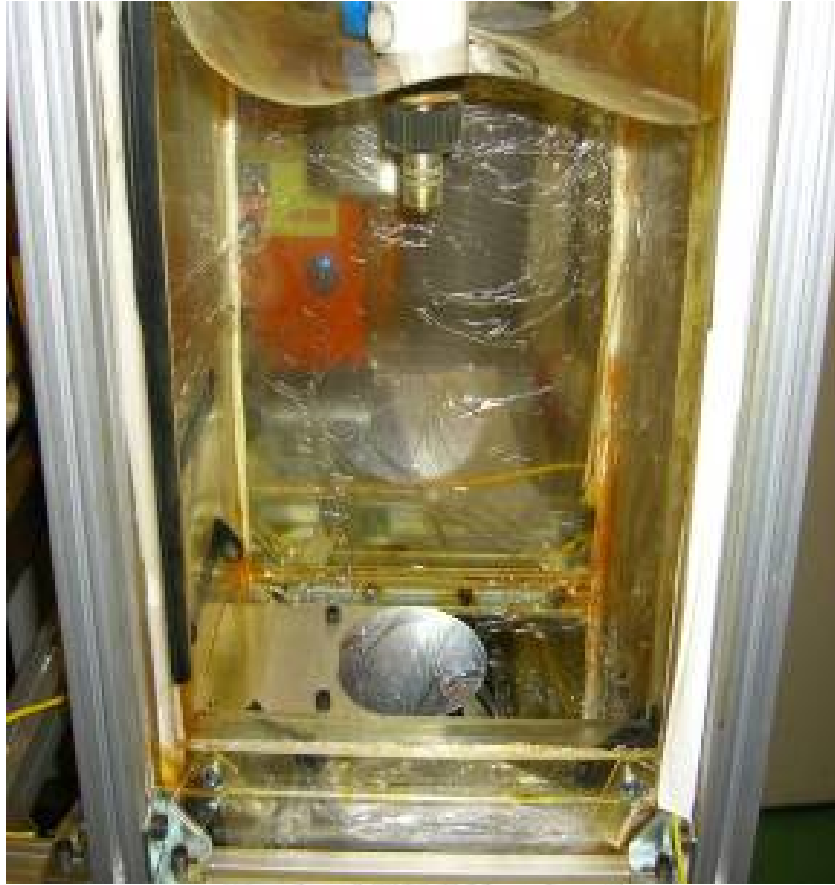


圖 4-10 晶圓放置於噴塗基台內

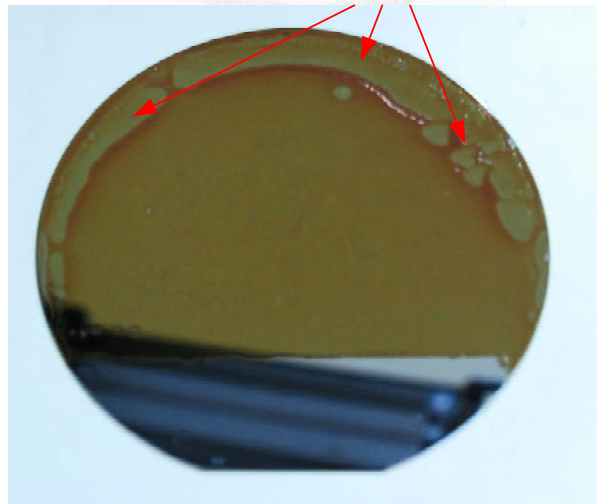


圖 4-11 噴塗時間過長造成之缺陷

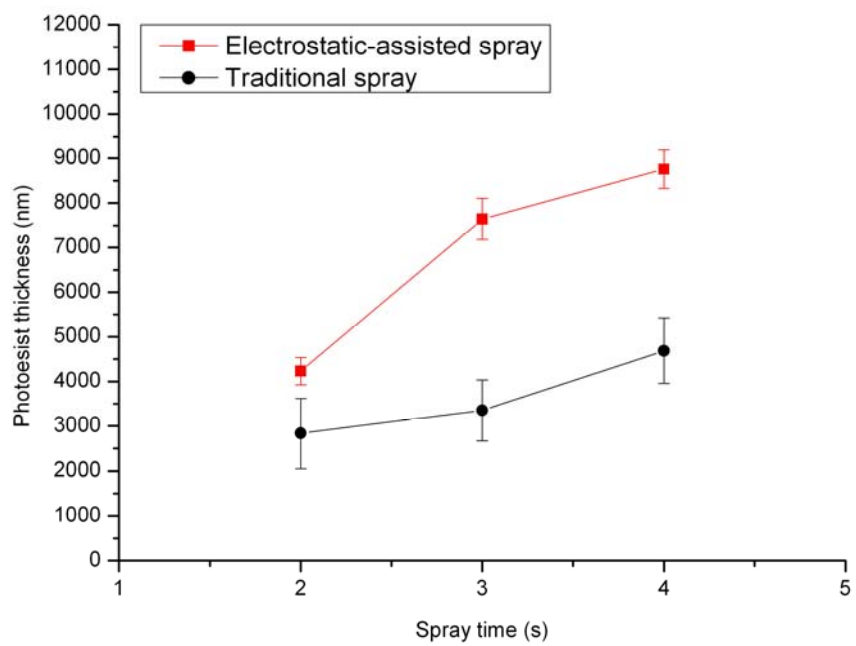


圖 4-12 噴塗時間對於厚度之影響

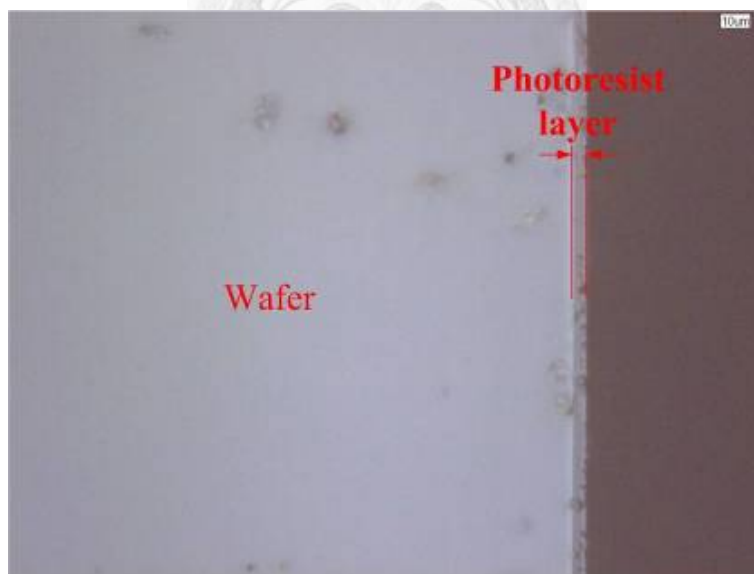


圖 4-13 光阻在晶圓上之情形(側視圖)

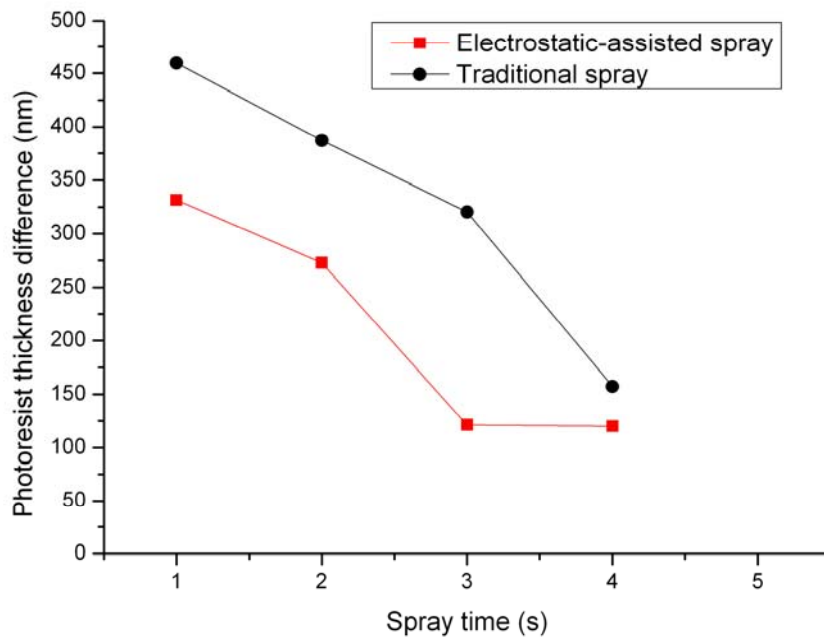


圖 4-14 噴塗時間對於光阻表面厚度差異 δ_t 之影響

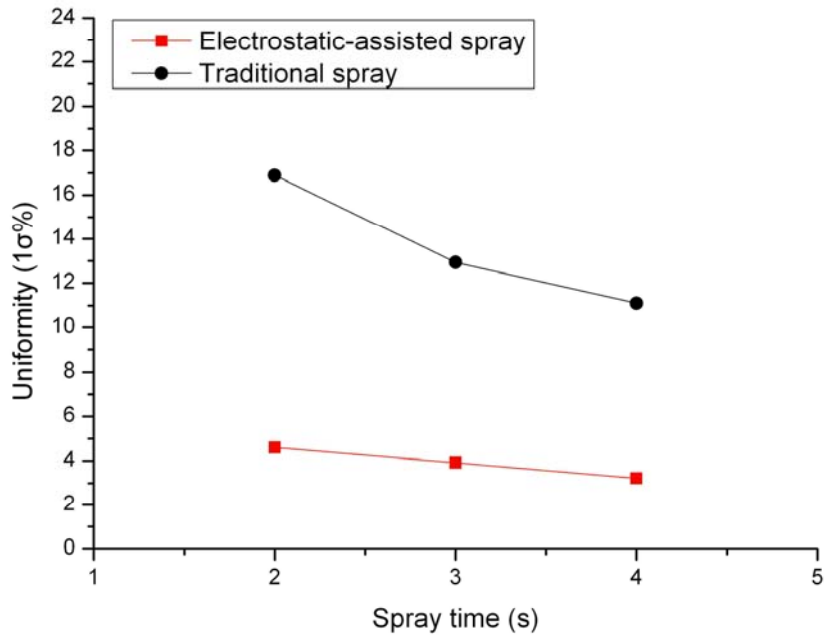


圖 4-15 噴塗時間對於光阻均勻度之影響

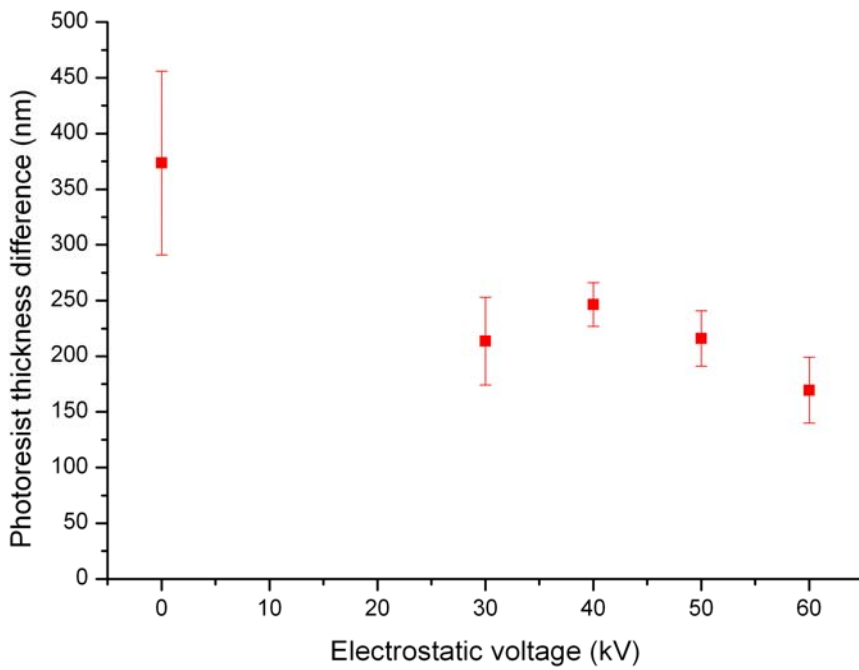


圖 4-16 靜電輔助電壓對於光阻表面厚度差異之影響

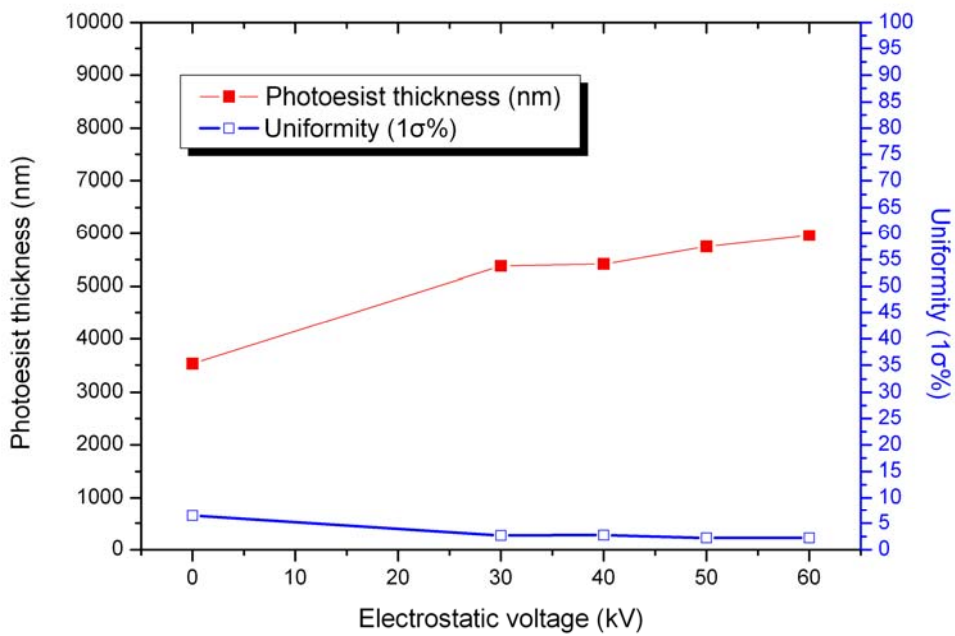
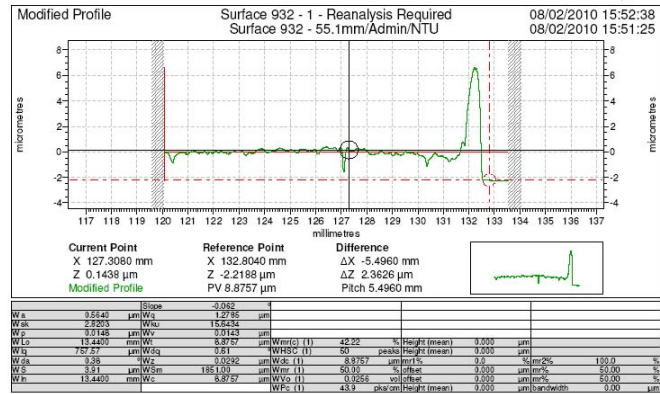


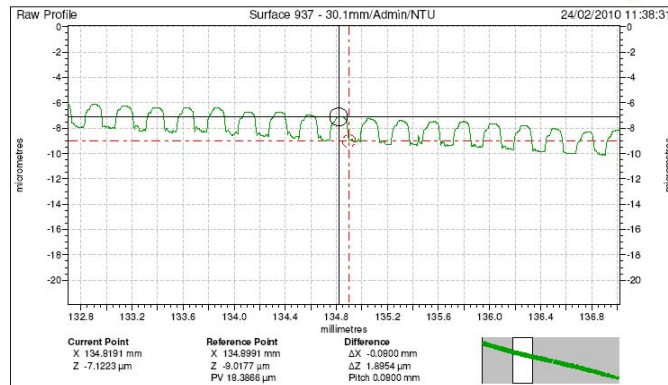
圖 4-17 靜電輔助電壓對於光阻均勻度之影響（噴塗時間 3s）

514.434

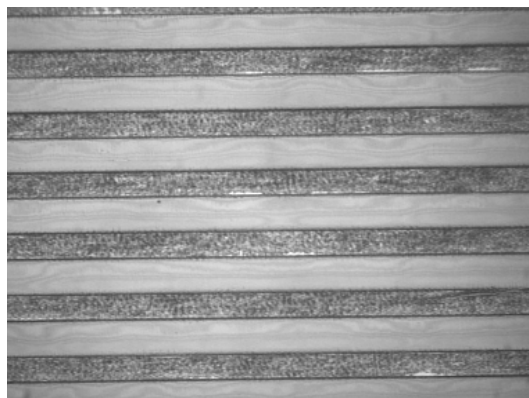
Taylor Hobson
TRAC S100

(a)

514.434

Taylor Hobson
TRAC S100

(b)



(c)

圖 4-18 靜電輔助噴塗完後之曝光顯影之結果 (a) 噴塗結束後光阻之高度 (b) 顯影完後光阻之高度 (c) 使用光學顯微鏡觀察顯影完之結構照片

第五章 靜電輔助噴塗用於滾輪及表面微結構基材光

阻塗佈

本章主要探討為將一般噴塗與靜電噴塗應用於金屬滾輪、平面具微結構之基材、方形微結構滾輪與波浪型微結構滾輪上。本章共五分節。首先第一節介紹其滾輪與其他微結構基材之製作方式；第二節介紹量測方式；第三節介紹一般噴塗與靜電噴塗應用於滾輪光阻塗佈；第四節討論平面微結構基材光阻塗佈與微結構光阻塗佈；第五節為一般噴塗、靜電輔助噴塗與浸潤式塗佈之比較；最後一節為本章結論。

5.1 基材之製備

5.1.1 金屬滾輪之製備

本研究中委託工研技術研究院機械所加工，使滾輪表面的粗糙度可達到 Ra 10 nm 以下。如圖 5-1 所示為實心滾輪（直徑為 80 mm、長度為 120 mm），其表面粗糙度（Ra）平均為 3.1 nm。

在滾輪清潔部分，為保持滾輪清潔，首先將滾輪利用丙酮搭配震洗機震洗 5 分鐘，拿起後用去離子水沖洗 10s，接著用去離子水震洗 5 分鐘，再用去離子水沖洗 10s，然後重覆上述步驟一遍，接下來使用過濾氣槍噴氮氣將滾輪表面水氣去除（氮氣瓶內含有些許金屬粒子，噴出時會傷其滾輪本身，故選用過濾氣槍），最後放置烤盤上烤乾，等到金屬滾輪冷卻後即完成清洗步驟，詳細清洗流程如圖 5-2 所示。

5.1.2 車削方式製作波浪型溝微結構滾輪

本實驗所用的波浪型溝微結構滾輪是直接在滾輪的表面用車床車出結構來，其結構的幾何形狀可由刀具的形狀和車床的進給率來決定，不同的刀具形狀就可以做出不同的結構在滾輪表面上。圖 5-3 (a) 為本實驗所用的波浪型溝微結

構滾輪，滾輪的材質選用鋁合金 6061，波浪型溝微結構滾輪的直徑為 74 mm，有波浪型溝微結構的地方長度為 50 mm。圖 5-3 (b) 為實驗所用的波浪型溝微結構滾輪的輪廓圖，其高度為 24 μm ，寬度 245 μm 。

5.1.3 V 溝鍍板

此為使用超精密加工機加工模仁後，在使用電鑄機台翻鑄出鍍模，如圖 5-4 (a) 所示，長為 3 cm 寬為 3 cm。圖 5-4 (b) 所示，結構深為 25 μm ，結構寬為 50 μm 。

5.2 量測方式

5.2.1 金屬滾輪量測方式

本實驗將使用接觸式量測與光學式量測，接觸式量測方面將滾輪分成四個角度 0、90、180 與 270 度，在每個角度上任取四個量測區域，每次量測長度為 5 mm，計算其光阻厚度差異 δ_i 。而在光學式量測方面將滾輪分成四個角度，分為 0、90、180 與 270 度，在每種角度上指定範圍內任取五點的厚度值，如圖 5-5 所示，再進行計算。

5.2.2 結構機材量測方式

在具結構之基材量測時，同樣使用丙酮將一部分之光阻去除如圖 5-6 所示，在使用接觸量測時即可量到有塗光阻之表面輪廓與未塗光阻之表面輪廓。在數據量測方面，量測有塗佈光阻區域之高度，如圖 5-7，同將有塗佈光阻的圖形與未塗佈光阻的圖形重疊後比較其與原本輪廓與結構高度之差異，如圖 5-8 所示。

5.3 靜電輔助噴塗應用於金屬滾輪塗佈

5.3.1 製程步驟

本實驗要將一般噴塗製程與靜電輔助噴塗製程應用於滾輪光阻塗佈上，故本實驗設計依第三章所介紹之靜電輔助噴塗機台來達成此目的。操作流程如下：

1. 將清潔過之滾輪放至腔體中，如圖 5-9 所示

2. 調整噴頭距離基材 20 cm 處
3. 調整塗料罐之氣體壓力至 3 kgf/cm^2
4. 調整控制流量旋鈕至適當位置
5. 調整噴塗秒數與電壓
6. 調整馬達轉速達 120 rpm
7. 噴塗
8. 噴塗完後靜置 20s
9. 軟烤 ($90 \text{ }^\circ\text{C}$ 60s)
10. 量測

5.3.2 靜電輔助噴塗應用於滾輪塗佈

本實驗將一般噴塗與靜電輔助噴塗應用於金屬滾輪塗佈之比較，而比較方式為先使用一般噴塗方式金屬滾輪塗佈完成後量測其數據，最後清洗乾淨，再做一次與上述相同噴塗參數並加入靜電電壓 60 kV，噴塗完成後量測其結果。再將結果比較。實驗參數如下：

1. 一般噴塗，噴塗時間 1s、2s、3s 與 4s
2. 靜電輔助噴塗，噴塗時間 1s、2s、3s 與 4s 搭配靜電電壓 60 kV

在量測方式方面，厚度與均勻度計算方面使用光學式量測，而噴塗後光阻表面之厚度差異 δ_i 由接觸式方式來進行量測。在結果方面一般噴塗 1s 與 2s 其效果不佳，使用接觸式量測量測其光阻之厚度差異 δ_i 皆超過 $1 \text{ } \mu\text{m}$ ，無法使用光學式量測。故比較的時候從 3s 與 4s 進行比較。其噴塗 3s 之結果如圖 5-10 所示，詳細數據如附錄 A 所示。如圖 5-10 所示，使用靜電輔助噴塗後，在相同的噴塗參數下，會使光阻的厚度增加約 1.5 倍，其噴塗效率顯著提升。而在噴塗 4s 時，如圖 5-11 所示，詳細數據如附錄 A 所示，一般噴塗的平均厚度 1648 nm 而靜電輔助噴塗厚度為 4792 nm，增加約兩倍。這代表著靜電輔助噴塗相較於一般噴塗，在相同的實驗參數下，其噴塗效率大大提升。

在均勻度 $1\sigma\%$ ，經由光學式量測並計算均勻度後，如下表所示，詳細數據

如附錄 A 所示。

噴塗方式	噴塗秒數	均勻度%
一般噴塗	3s	19.5
靜電輔助噴塗	3s	7.7
一般噴塗	4s	11.5%
靜電輔助噴塗	4s	6.8%

在均勻度方面，如噴塗時間為 3s 時，使用靜電輔助噴塗，可將均勻度 $1\sigma\%$ 由一般噴塗的 19.5% 降低至 7.7%。如噴塗時間為 4s 時，使用靜電輔助噴塗可將均勻度 $1\sigma\%$ 由一般噴塗的 11.5% 降低至 6.8%。由此可看出，使用靜電輔助噴塗使光阻塗佈在滾輪上的厚度能夠均一。

而在噴塗完後光阻表面之厚度差異 δ_i 方面，量測方式先將滾輪四個角度上，每個角度取四個區塊，每個區塊 5 mm，量測其厚度差異 δ_i ，在同一個角度上之厚度差異 δ_i 來比較。如圖 5-12 所示，詳細數據如附錄 A 所示，在噴塗時間為 3s 時，使用靜電輔助噴塗光阻之厚度差異 δ_i 都大約在 400 nm 左右，而未使用靜電之噴塗其厚度差異 δ_i 較高且不均勻。如圖 5-13 所示，詳細數據如附錄 A 所示，噴塗時間為 4s，使用靜電輔助噴塗之光阻厚度差異 δ_i 皆比噴塗 3s 時來得低，由 3s 的 400 nm 左右到 4s 的 250 nm 左右，而使用一般噴塗也由原先的 800 nm 到 1000 nm 間降到 600 nm 到 800 nm 間。以上結果可以看出，使用靜電輔助噴塗，可降低其光阻之厚度差異 δ_i 。同時，噴塗時間也可改善光阻之厚度差異 δ_i 。

由以上結果可知，如使用靜電噴塗，不僅可以提升其噴塗效率，同時提昇其噴塗均勻，並可降低光阻之厚度差異 δ_i 。

5.4 靜電輔助噴塗應用於具微結構基材之光阻塗佈

5.4.1 靜電輔助噴塗應用於平面微結構基材之光阻塗佈

本文將比較一般噴塗與靜電輔助噴塗應用於平面結構基材之光阻塗佈之結果差異，探討其對於表面輪廓的影響。上述之 V 溝鍍板。實驗參數如下：

1. 一般噴塗噴塗 3s 與 1s

2. 靜電輔助噴塗噴塗 3s 靜電電壓 60 kV，靜電輔助噴塗噴塗 1s 靜電電壓 60 kV

首先先作一般噴塗，依上述方式量測並清洗完畢後，在做靜電噴塗，並一上述方式量測。量測結果如下表所示，

噴塗方式	靜電輔助電壓(kV)	噴塗秒數(s)	噴塗後之結構深度(μm)
一般噴塗	0	3	13.62
靜電輔助噴塗	60	3	10.51
一般噴塗	0	1	X
靜電輔助噴塗	60	1	17.53
原始結構深度			25

由表可看出在噴塗時間皆為 3 秒時，靜電在對於平面具 V 溝結構基材上，會吸附較多光阻沉積於 V 溝底部，此會影響與原始輪廓的相似程度，但如使用靜電輔助噴塗 1 秒，可提高其與原始輪廓之相似成度，其結果如圖 5-14。使用一般噴塗 1 秒鐘，則噴塗效果不佳，光阻無法完整的塗佈與基材上。

5.4.2 靜電噴塗應用於波浪形微結構滾輪光阻塗佈

使用微結構滾輪作比較，先作一次一般噴塗並依上述量測方式量測完後，清洗完畢在作一次靜電噴塗在作一次靜電噴塗，兩者再來作比較。噴塗參數如下

1. 一般噴塗 3s 與 1s
2. 靜電輔助噴塗 3s 電壓 60 kV，靜電輔助噴塗 1s 電壓 60 kV

結果如下表所示

噴塗方式	靜電輔助電壓(kV)	噴塗秒數(s)	噴塗後之結構深度(μm)
一般噴塗	0	3	9.99
靜電輔助噴塗	60	3	9.08
一般噴塗	0	1	X
靜電輔助噴塗	60	1	10.78
原始結構深度			24

由表可看出，在一般噴塗與靜電輔助噴塗之比較上，在相同秒數上，如加上靜電輔助時會吸附較多光阻沉積於溝底部，此會影響與原始輪廓的相似程度，但如使用靜電輔助噴塗 1s，可提高其與原始輪廓之相似成度如圖 5-15 所示。使用

一般噴塗 1s，則噴塗效果不佳，無法均勻塗佈。

5.4.3 靜電輔助噴塗應用於微結構滾輪

本文使用另一隻方型微結構滾輪如圖 5-16 所示，其製作方式將於第六章作討論。本小節要討論靜電輔助噴塗對於結構底部噴塗光阻厚的情形，探討靜電輔助噴塗與一噴塗對於底部光阻厚度差異 δ_i 之影響。此外，由於實驗用之基材結構高度約為 2 μm ，週期約為 122 μm ，如使用靜電輔助噴塗，噴塗時間為 3s 時，會使光阻填滿整個結構深度，而使用一般噴塗，噴塗時間為 3s 時，1s 時，又無法順利均勻噴塗完成，故實驗參數如下：

1. 一般噴塗 2s
2. 靜電輔助噴塗 2s 靜電電壓 60 kV

本節使用接觸式量測，量測其經噴塗後的表面輪廓與結構底部（寬約 100 μm ）光阻之厚度差異 δ_i ，總共量測幾次不同位置之厚度差異 δ_i ，取其平均值。

其果如下表所示

噴塗方式	靜電輔助電壓 (kV)	噴塗秒數 (s)	厚度差異 δ_i (nm)	噴塗後之結構深度 (μm)
一般噴塗	0	2	66.5	1.398
靜電輔助噴塗	60	2s	32	1.207
原始底部厚度差異 δ_i			125.25	
原始結構深度				2.132

在尚未噴塗之前，其結構底部之厚度差異 δ_i 平均值為 125.25 nm，使用一般噴塗後之平均值為 66.5 nm，而如使用靜電輔助噴塗則平均值為 32 nm。由此結果可知，靜電輔助噴塗可降低其底部之厚度差異 δ_i ，其噴塗後之圖形如圖 5-17 所示。

5.5 靜電輔助噴塗與其浸潤式塗佈方式比較

本節將比較靜電輔助噴塗與其他塗佈方式應用於非平面基材或是平面具微結構基材之比較。實驗參數如下：

1. 浸潤式塗佈
2. 一般噴塗 4s
3. 靜電輔助噴塗 4s 搭配電壓 60 kV

首先金屬滾輪之塗佈，其結果如下表所示，詳細數據如附錄 A 所示。

浸潤式塗佈	7.1%
一般噴塗	11.5%
靜電輔助噴塗	6.8%

利用靜電輔助噴塗可達與浸潤式塗佈相當之均勻度，在使用浸潤式塗佈時，容易造成光阻垂流之現象，使均勻度變差，而使用靜電輔助噴塗則不會造成垂流之現象。在厚度差異 δ_t 方面，結果如圖 5-18 所示，詳細數據如附錄 A 所示，使用浸潤式塗佈可達最佳之厚度差異 δ_t 。在微結構滾輪塗佈方面，如使用浸潤式塗佈會造成光阻塗佈不均之現象，如圖 5-19 所示。而使用靜電輔助噴塗，可達成均勻塗佈之目的，其結果如圖 5-20 所示。

5.6 本章結論

本章成功利用一般噴塗與靜電輔助噴塗，將濕式光阻 EPG-510 塗佈於金屬滾輪、具波浪形微結構滾輪、具方型溝微結構滾輪與具 V 溝結構的鍍板。首先在金屬滾輪的部份，使用靜電輔助噴塗可提升其噴塗效率。在噴塗皆 4s 時，靜電輔助噴塗的各角度厚度約為 4700 nm 上下，而使用一般噴塗約為 1700 nm 上下。在均勻度方面，噴塗秒數為 4s 時，使用一般噴塗之均勻度約為 11.5%，而靜電輔助噴塗之均勻度為 6.8%。此外在厚度差異 δ_t 上，可看出使用靜電輔助噴塗光阻之厚度差異 δ_t 都大約在 300 nm 左右，而未使用靜電之噴塗其厚度差異 δ_t 範圍在 700 nm 上下。由以上結果可看出使用靜電噴塗，不僅提升了噴塗的效率與對於均勻度的提升上，對於降低光阻表面之厚度差異 δ_t 也有顯著的效果。

而在方型微結構滾輪上，使用靜電輔助噴塗可降低結構底部之厚度差異 δ_t ，從原本使用一般噴塗之 66.5 nm 到靜電輔助噴塗的 32 nm。

由以上結果可看出，如欲均勻塗佈光阻於微結構滾輪上時，使用靜電輔助噴塗不僅可以提升其整體之均勻度，並且可以提升與原始輪廓之相似性與降低光阻表面之粗糙度。

最後將以上噴塗之結果與其他塗佈方法比較，如表 5-1 所示，而針對一般噴塗與靜電輔助噴塗之比較如表 5-2 所示。



表 5-1 各種塗佈方式之比較

	Spin coating	Dip coating	Spray coating	Electrostatic-assisted spray coating
Planar substrate	○	○	○	○
High topography surfaces substrate	X	X	○	○
Non-planar substrate	X	○	○	○
High topography surfaces non-planar substrate	X	X	○	○
○ : applicable X : not applicable				

表 5-2 一般噴塗與靜電輔助噴塗之比較

	Spray coating	Electrostatic-assisted spray coating
Equipment cost	✓	
Safety	✓	
Spray efficiency		✓
Photoresist uniformity on wafer		✓
Photoresist thickness difference δ_i on wafer		✓
Photoresist uniformity on non-planar substrate		✓
Photoresist thickness difference δ_i on non-planar substrate		✓
Photoresist thickness difference δ_i on high topography surfaces non-planar substrate		✓



(a)

(b)

圖 5-1 表面鍍鎳之實心鋁基滾輪（直徑為 80 mm，長度為 120 mm）(a) 滾輪正視圖 (b) 滾輪上視圖

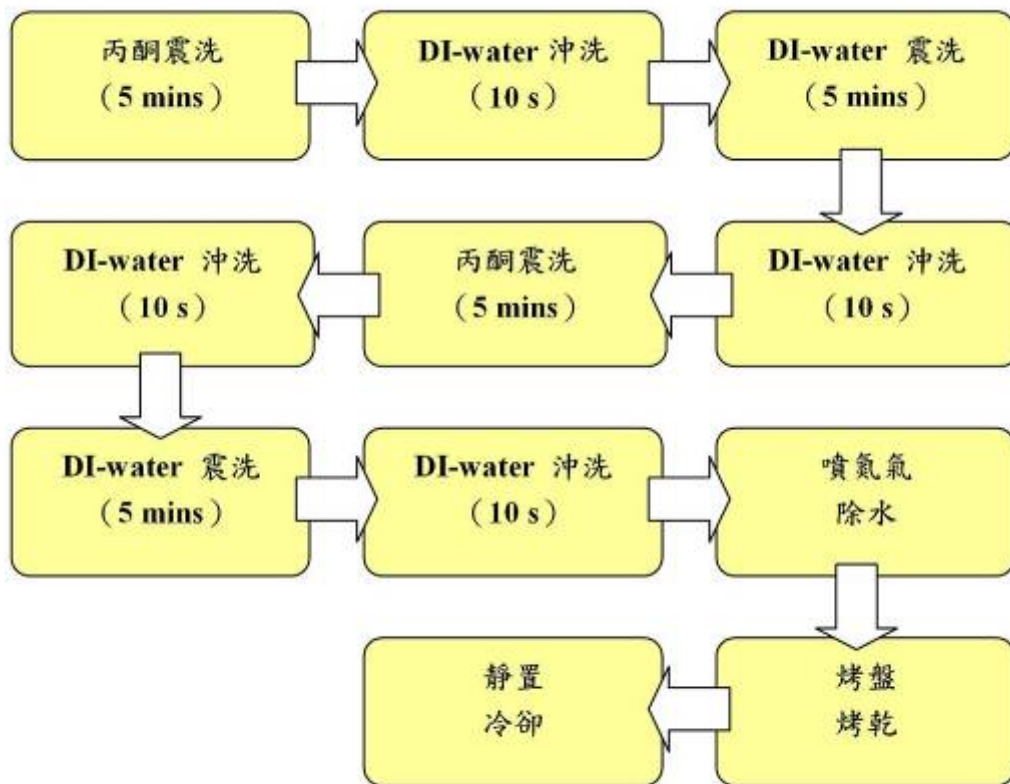
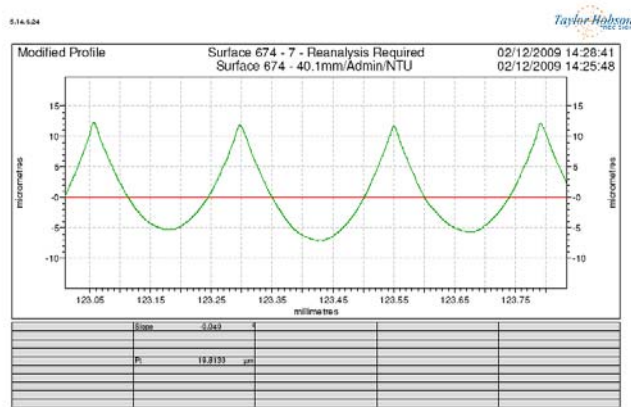


圖 5-2 滾輪清洗流程



(a)

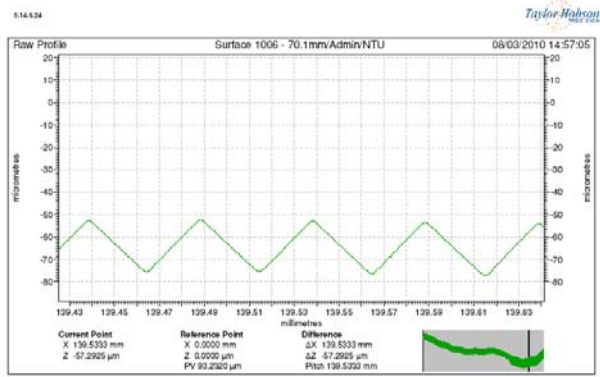


(b)

圖 5-3 波浪形微結構滾輪



(a)



(b)

圖 5-4 V 溝鍍板

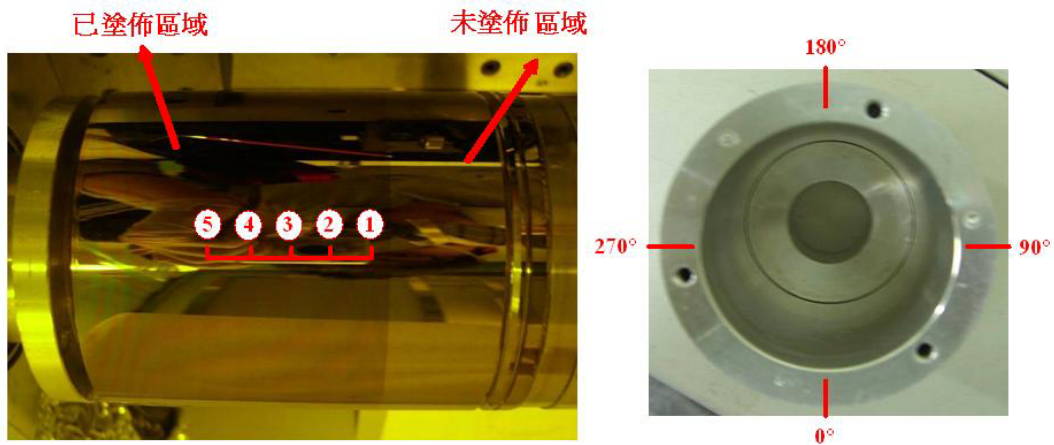


圖 5-5 滾輪量測示意圖

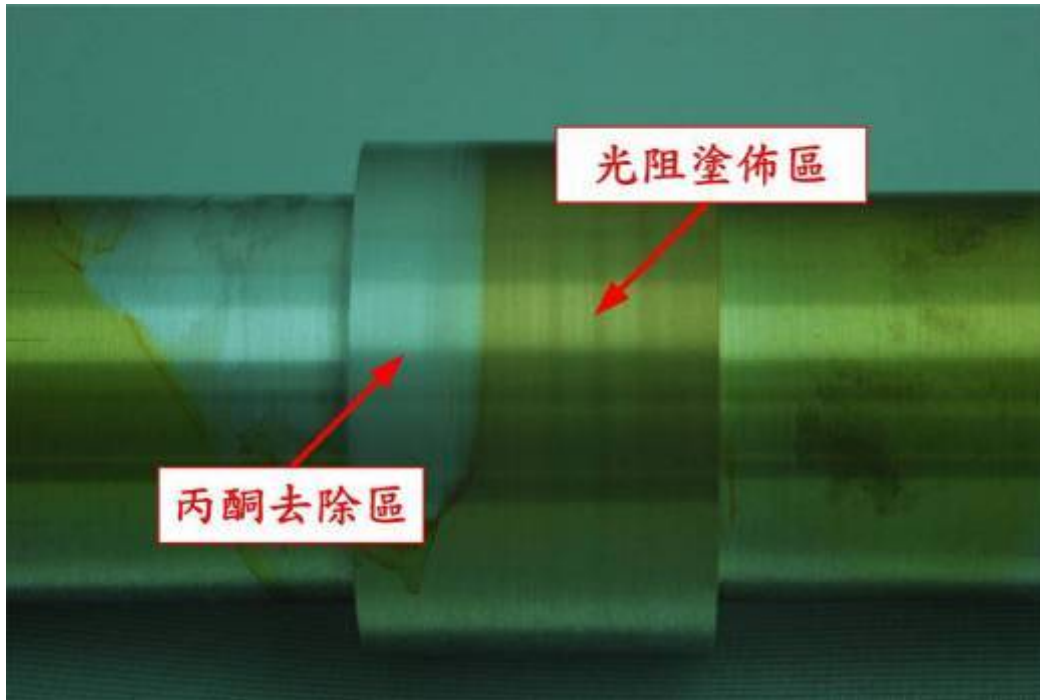


圖 5-6 結構基材量測區域示意圖

5.14.6.24

Taylor Hobson
PRECISION

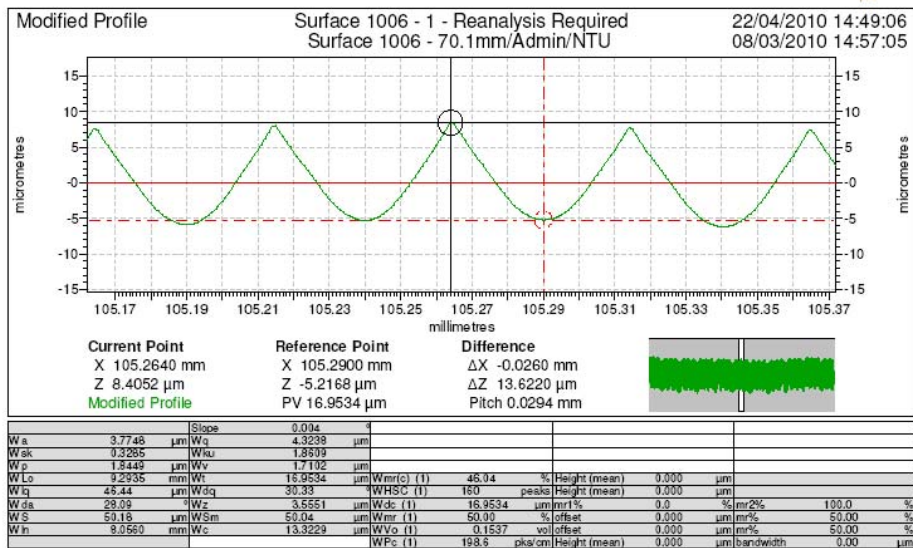


圖 5-7 結構基材量測方式 (光阻高度)

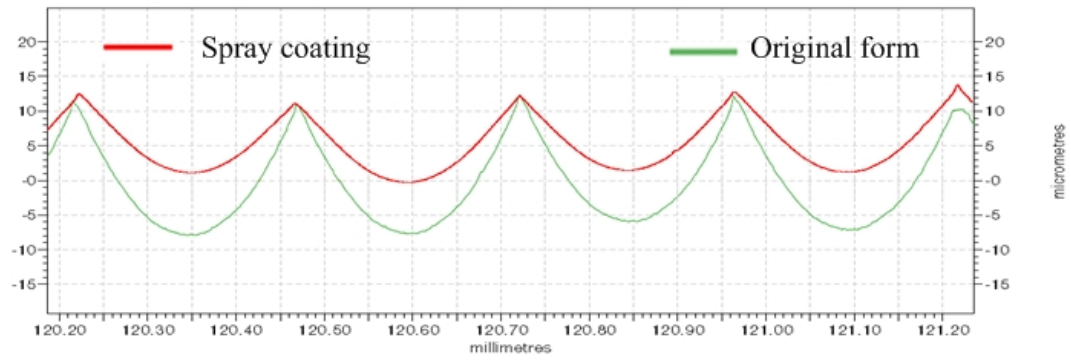


圖 5-8 結構基材量測方式 (波形重疊)

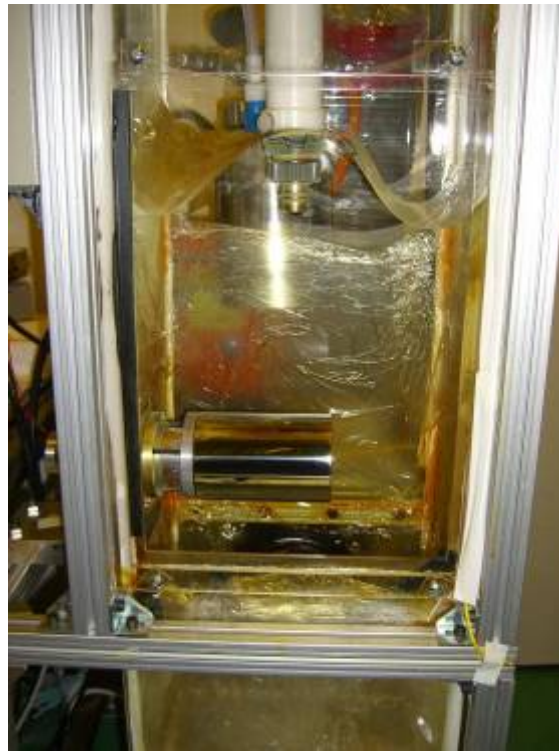


圖 5-9 滾輪放置於噴塗腔中

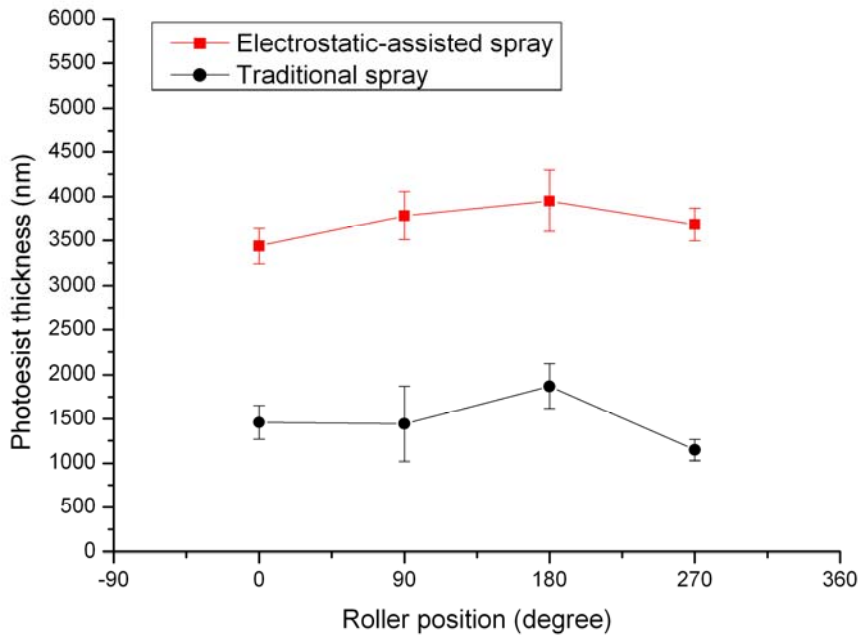


圖 5-10 金屬滾輪使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗 3s 之光阻厚度差異

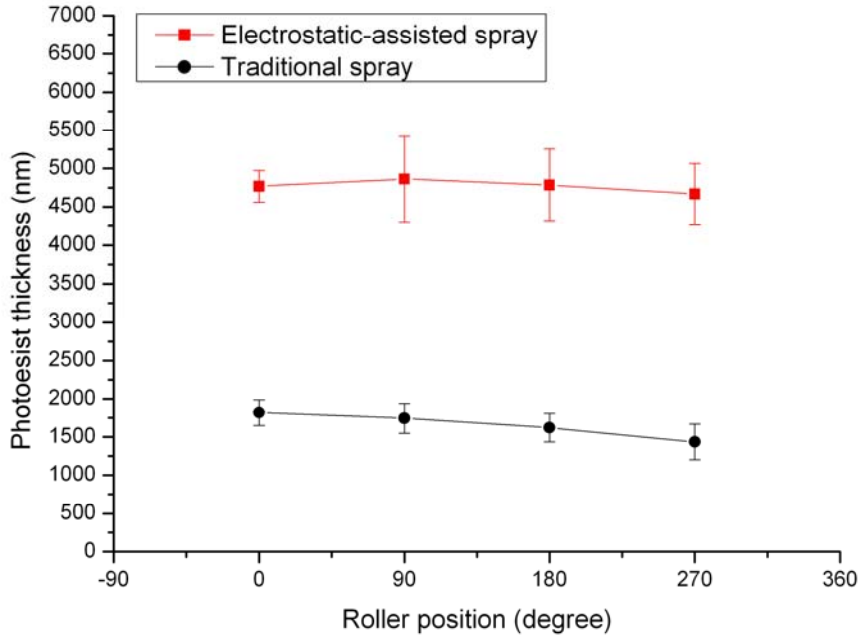


圖 5-11 金屬滾輪使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗 4s 之光阻厚度差異

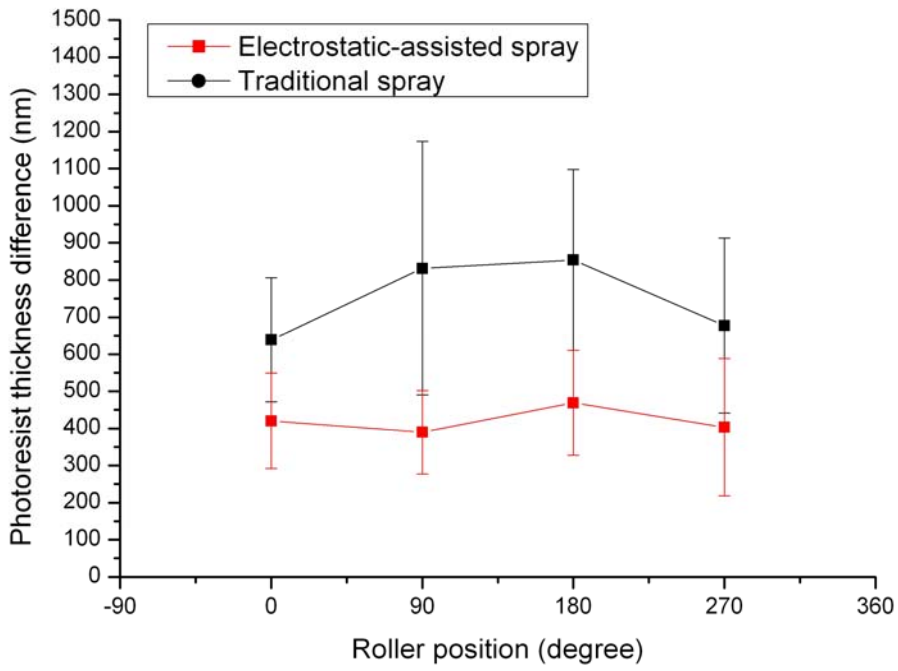


圖 5-12 使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗 3s 之光阻厚度差異 δ , 差異

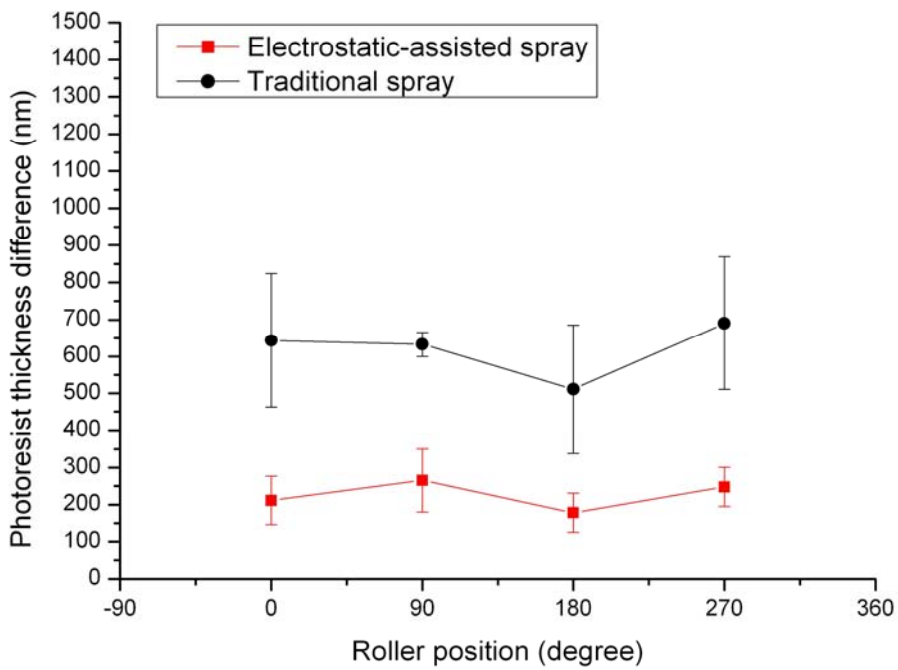


圖 5-13 使用一般噴塗與靜電輔助噴塗噴塗 4s 之光阻厚度差異 δ , 差異

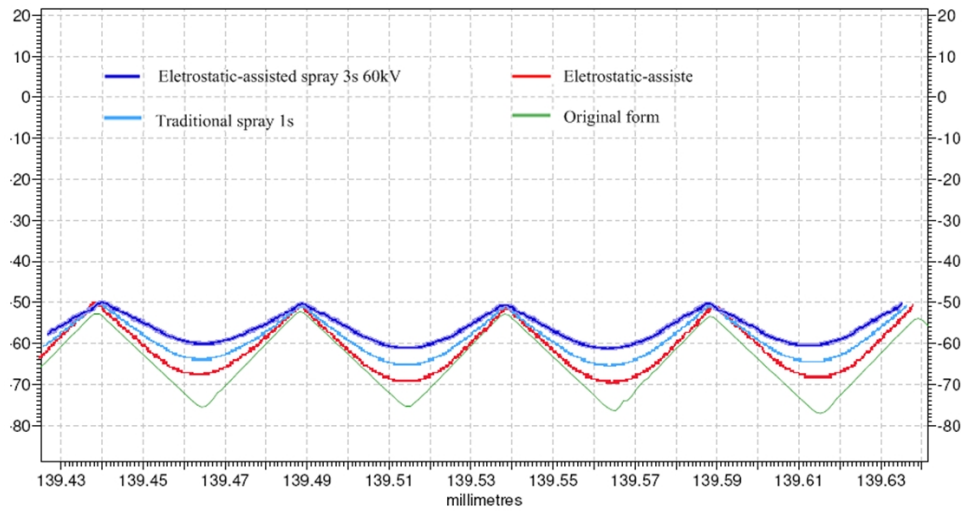


圖 5- 14 V 溝鎳板各種噴塗參數噴塗後之情形

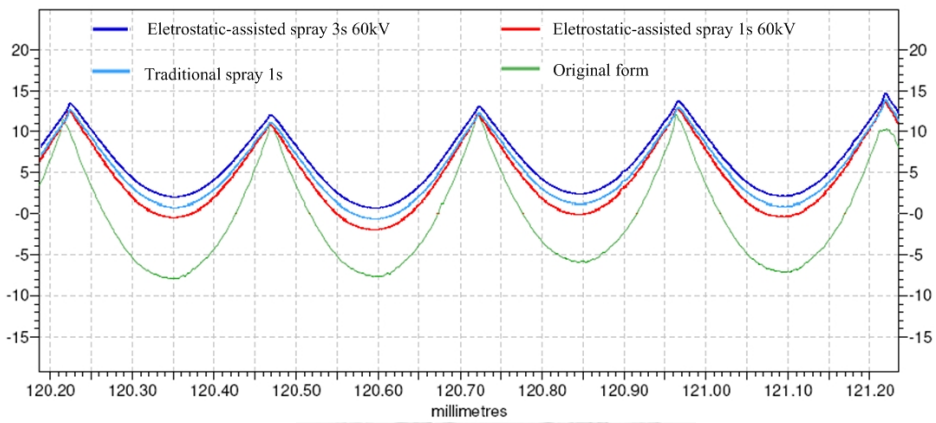


圖 5- 15 波浪形微結構滾輪各種噴塗參數噴塗後之情形

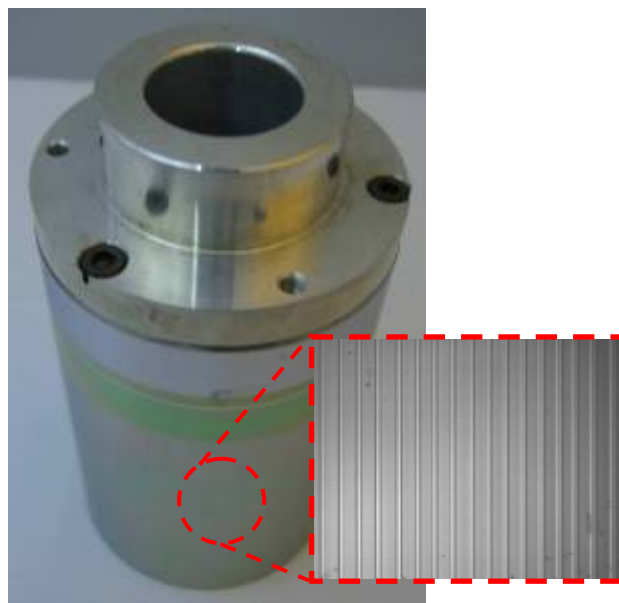
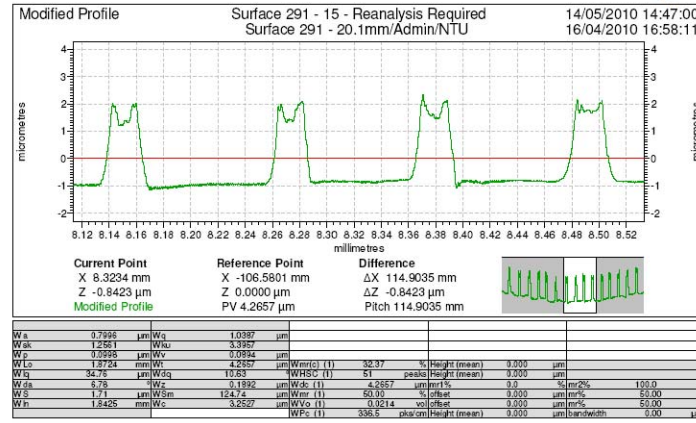
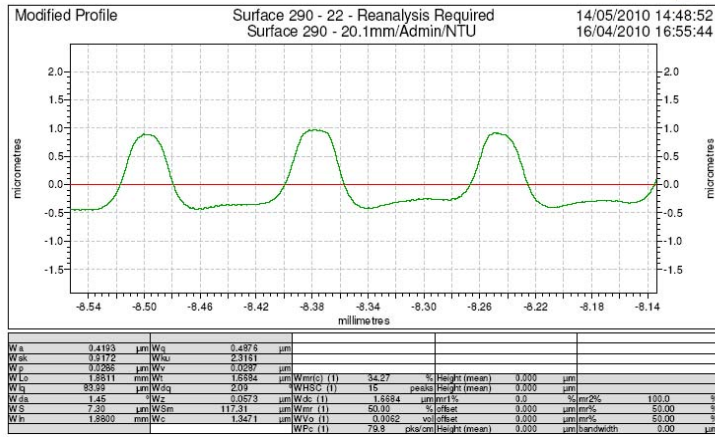


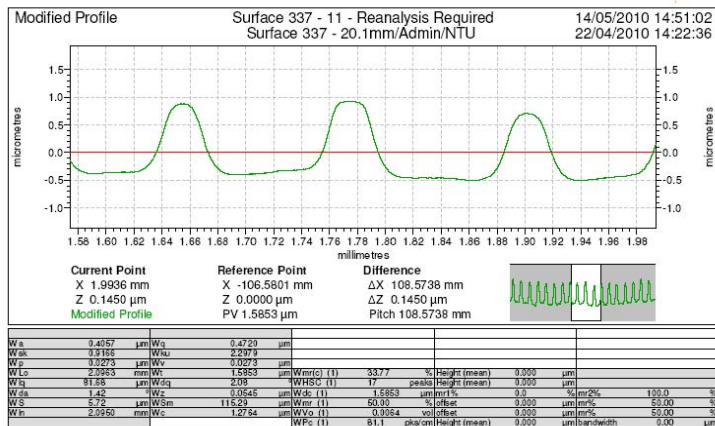
圖 5- 16 方型微結構滾輪



(a)



(b)



(c)

圖 5-17 靜電輔助噴塗應用於微結構滾輪 (a) 原始結構圖形 (b) 一般噴塗噴塗完後之圖形 (c) 靜電輔助噴塗噴塗完後之圖形

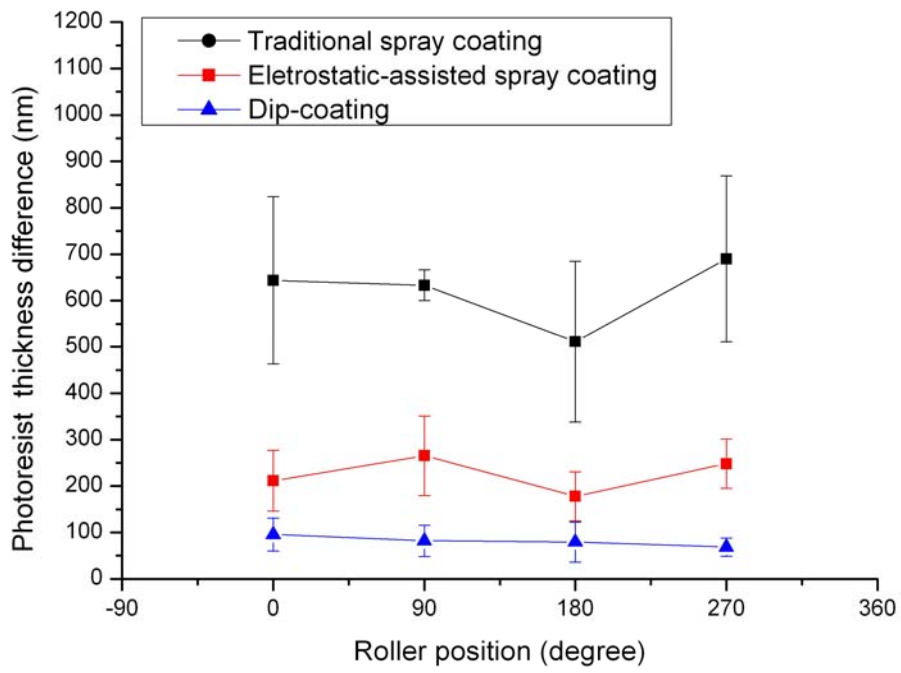


圖 5-18 不同塗佈方式之厚度差異 δ 比較



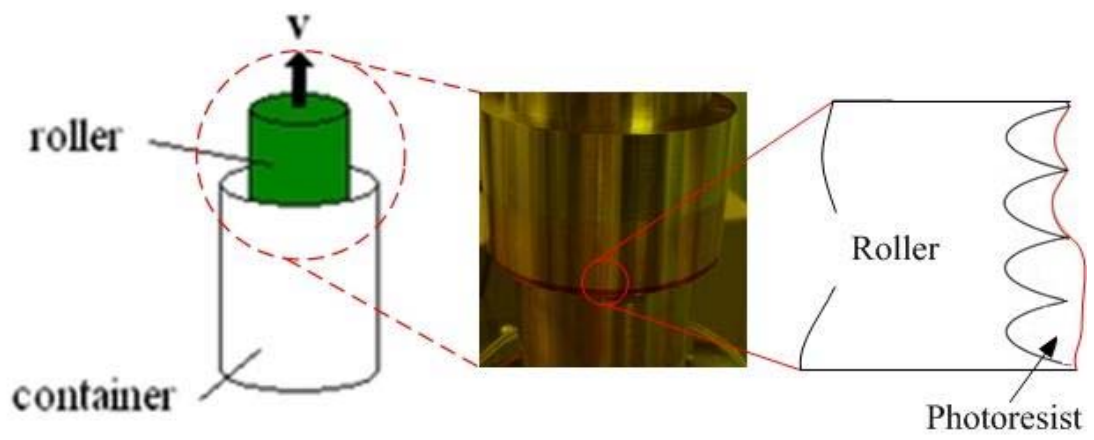


圖 5-19 浸潤式塗佈光阻塗佈不均之示意圖

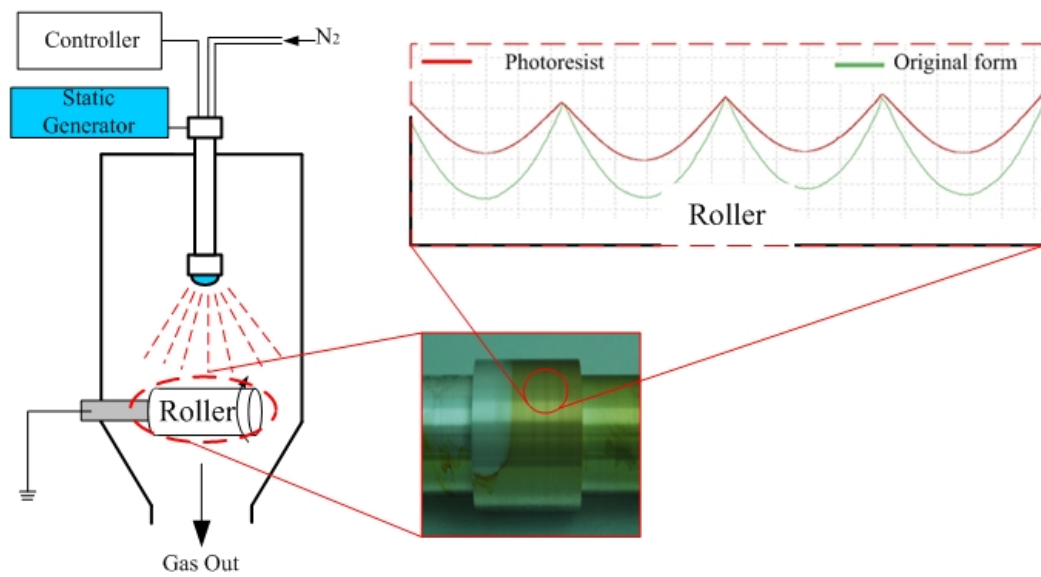


圖 5-20 使用靜電輔助噴塗應用於微結構滾輪

第六章 微結構滾輪製作與應用

本章目的為將塗佈好光阻之滾輪使用步進式光微影製程曝光顯影進行結構之定義並與用無電鍍鎳製程製作，剝除光阻後即可獲得連續式微結構滾輪，最後使用製作出之滾輪做實際 UV 壓印之測試。因此，本章首節說明在濕式光阻上定義出連續式微結構滾輪之光阻圖形並進行量測；第二節說明以無電鍍鎳技術製作連續式微結構滾輪並進行滾輪上之微結構量測；第三節說明以具為結構之滾輪進行壓印測試；最後一節為本章結論。整體實驗流程如圖 3-1 所示。

6.1 濕式光阻上定義出連續式微結構滾輪之光阻圖形

本論文所使用的 PR (EPG-510) 之最佳光能量為 $60\sim 90 \text{ mJ/cm}^2$ ，經本文使用靜電輔助噴塗將光阻塗佈於滾輪上，光阻厚度約為 $3 \mu\text{m}$ 時，其最佳曝光時間在 18s 左右。如圖 6-1 所示，光罩線寬為 $20 \mu\text{m}$ 。經曝光 18 秒後，使用顯影劑 EPD-1000 顯影 20 秒，而光阻顯影後其線寬為 $19 \mu\text{m}$ ，如圖 6-2 所示。

6.2 無電鍍鎳製作為滾輪結構

6.2.1 無電鍍鎳介紹

無電鍍法亦可稱為自身催化鍍法 (Autocatalytic Plating)、化學鍍及無電解鍍。傳統電鍍常因電流密度之高低，造成鍍層膜厚不均或低電流區死角，而無電鍍是將工件沉浸於化學鍍液中，不需任何陽極板和電鍍工具來輔助，只靠鍍浴槽中化學鍍液之氧化還原作用，即可對金屬表面進行鎳磷合金的沉積，因為不需經電解作用，就沒有高、低電流的問題，對於有深孔、凹槽或不規則形狀的工件，都可獲得均勻之膜厚。這種金屬表面處理技術對不規則形狀的工件及精密產品的表面處理作業上已成一種趨勢。以下為無電鍍相較於一般電鍍之優點：

1. 鍍層非常均勻，均一性非常好，鍍件內外都均勻，銳邊及角等節狀鍍層 (nodular deposits) 情形可完全消除。

2. 鍍層孔率較少，其耐蝕性比電鍍為佳。
3. 可鍍在非導體上（需做適當前處理）。
4. 鍍層具有獨特之物理、化學、機械性質及磁性。
5. 複合鍍層（co-deposit），多元合金（polyalloy）可形成。
6. 密著性、耐磨性良好。
7. 製品與導體接觸也可完全鍍上。

無電鍍法可用來產生鎳、鈷、鈮、鉑、銅、金、銀和銻這些金屬合金之鍍層。使用的還原劑為次磷酸鈉、甲醛、聯胺、硼氫化物及胺基硼烷，其中應用最早且最為廣泛者，為使用次磷酸鈉的無電鍍鎳，所得之鎳層並不是純鎳，而是含磷 3 至 15% 的鎳磷合金。

在無電鍍鎳技術中之重要因素為觸媒作用（Catalytic Action），鈮、鉑等週期表中第八族元素，其原子表面極易吸收氫原子，在較高溫度時，次磷酸根離子極不穩定，放出氫原子，被觸媒金屬吸收，引發無電鍍鎳之反應。在較酸性情況下，鎳析鍍率較為緩慢，相對磷含量較高，一般酸型無電鍍鎳液之 PH 值在 4.6~4.8 之間，若 PH 值超過 5.0，則鍍析速率就會變快，鍍液易傾向瞬間分解；鹼型鍍液之 PH 值則控制在 8.5 與 9.5 間，若 PH 值在 10.0 以上，則鍍液會呈現不穩定狀況。鍍析速率與操作溫度有關，在 65°C 以下之鍍析速率緩慢，若超過 95°C 以上，則鍍液容易分解，故通常操作溫度範圍 80~90°C 間較為適當。

6.2.2 無電鍍鎳鍍浴配置

本實驗使用之無電鍍鎳鍍浴成分為：

硫酸鎳（NiSO ₄ ·6H ₂ O）	20 g/L	提供鎳離子
琥珀酸鈉（Sodium Succinate）	16g /L	促進劑、活化次磷酸根離子
次磷酸鈉（NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O）	27 g/L	還原劑、提供磷
檸檬酸	2.3 g/L	有機鉗合劑

首先將適當水量加入燒杯盛裝無電鍍鎳液，置於浴槽內並設定溫度為 80~90°C；接著依順序加入上述四種溶質攪拌溶解，待前一種溶解完畢後再加入

下一種；最後以 PH 值量測棒來量測燒杯內的 PH 值，並以稀釋硫酸（10%）或氨水將 PH 值調整至 4.7。

以此成分之酸性鍍浴形成之鍍層物理特性如下：

磷含量 (wt%)	5.0 – 9.0
鍍層密度 (g/cm ²)	7.8 – 8.0
熔點 (°C)	880 – 960
硬度	500 – 720HV
熱處理後硬度	900 – 1000HV

6.2.3 光學顯微鏡及表面輪廓儀量測

本小節使用上節所定義完光阻結構之滾輪（線寬約 19 μm 之光阻結構，光阻厚度約為 3 μm，每次步進角度約 0.2°），進行無電鍍鍍製程 40 分鐘，並於剝除光阻後分別以光學顯微鏡及表面輪廓儀所量測之結果。其光學顯微鏡之觀察結果如圖 6-3 所示，而使用表面輪廓儀量測之結果如圖 6-4 所示，其鍍結構之高度為 11 μm 而週期為 143 μm。

6.3 實際 UV 壓印測試

6.3.1 滾輪微轉印機台作動流程

針對實驗所設計的氣壓式滾輪微轉印機台，其示意圖如圖 6-5 所示，其作動的流程可分為下列步驟：

1. 清潔並放置基材：清潔基材表面並基材放置真空吸盤。
2. 真空吸附：開啟真空幫浦，對基材進行抽真空動作，以固定基材位置。
3. 加壓：藉由氣壓閥控制氣壓，使滾輪下降與基材接觸。
4. 平台進給：驅動平台馬達使傳輸機構進給，藉由壓力施於滾輪與基材間的摩擦力驅動滾輪旋轉，施行轉印，轉印同時使用 UV 汞燈曝光，使 UV 膠固化。
5. 作動停止：當圖形轉印行程終了，平台停止進給。
6. 洩壓：控制氣壓閥進行洩壓使滾輪上昇。

7. 關閉真空系統並取下已轉印完成之基材。

經由以上的操作步驟流程即完成機台作動流程。

6.3.2 紫外光固化高分子材料

本研究使用的紫外光固化高分子材料，為肯美特公司生產的光固化樹脂，產品型號為 UV1321，此材料為 PU 的聚寡物 (Acrylated Urethane Oligomer)，其特性為透明性高、黏著性佳、易黏著於各式基板，材料比重為 1.06、黏度為 2500 cps (@25°C)、最佳固化光譜 365 nm、固化後收縮 7%、折射率為 1.50、硬度 (Shore D) 65~72、抗拉強度 (tensile strength) 1200 psi (ASTM D638)，且經過兩小時 100°C 沸水之浸泡，吸收水重量比為 3.18% (ASTM D570)，經 100 小時之浸泡，其強度變成原始的 67%。

6.3.3 實際壓印測試

本實驗首先將 UV 固化樹脂塗佈於 PET 薄膜上，在放置於 UV 壓印及台上，而此 UV 膠需要曝光 10s，故本實驗配合此曝光時間調整馬達進給速率。曝光完成後將成品取下，如圖 6-6 所示，曝光完成後之成品結構深度約為 9.7 μm

6.4 本章結論

本章成功使用靜電輔助噴塗將濕式光阻 EPG-510 噴塗於滾輪上，並使用步進式曲面曝光機台搭配 UV LED 燈，成功的在滾輪表面上定義出線寬 19 μm 的圖形。將定義完圖形之滾輪進行 40 分鐘之無電鍍鎳，將光阻去除後，得到高度約 10 μm，週期約 143 μm 之為結構滾輪。最後將滾輪做實際 UV 壓印之測試，其轉印的 UV 膠結構結構深度約為 9.7 μm 週期 143 μm。本章成功結合步進式曲面曝光技術、無電鍍鎳技術與 UV 固化壓印技術，成功轉印結構於 UV 固化樹脂上

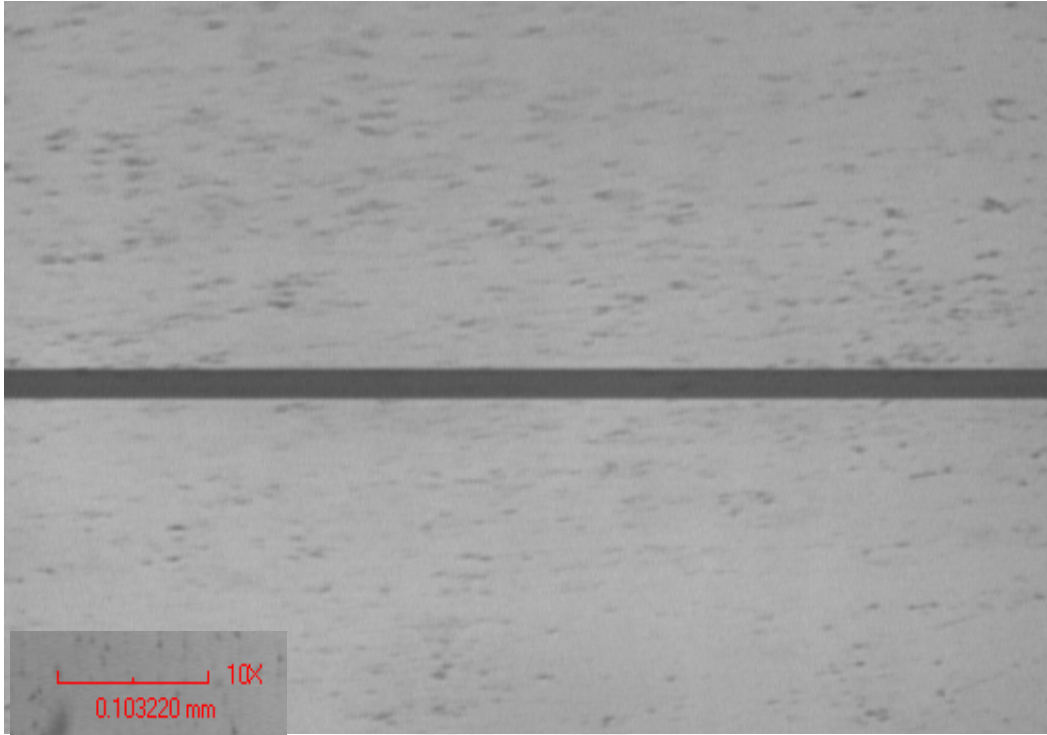


圖 6-1 滾輪曝光所使用之 20 μm 光罩

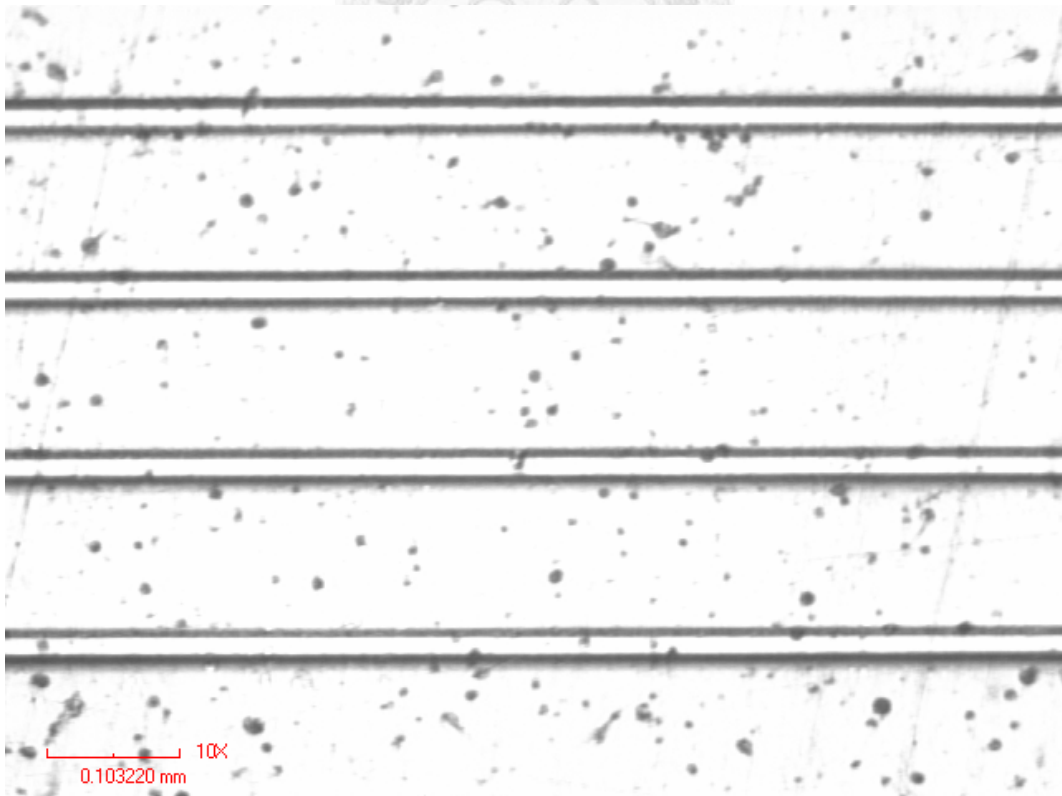


圖 6-2 經曝光顯影完後之滾輪

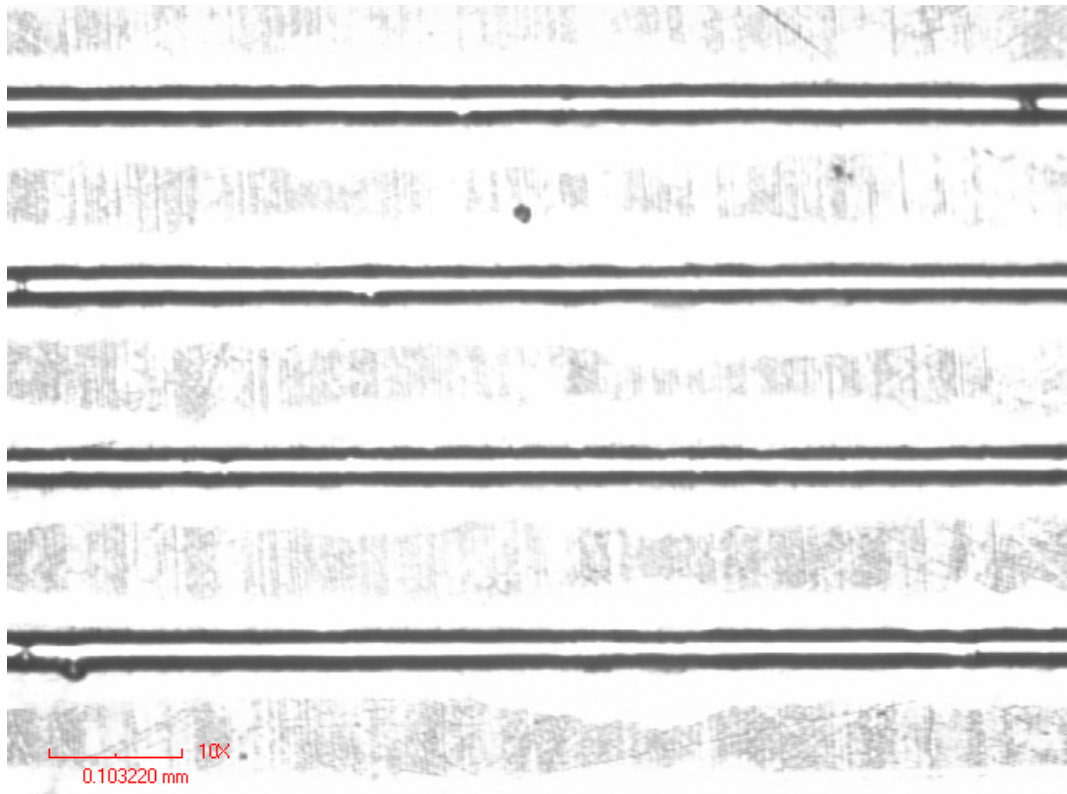


圖 6-3 使用光學顯微鏡觀查無電鍍鍍之結果

5.14.6.24

Taylor Hobson
PRECISION

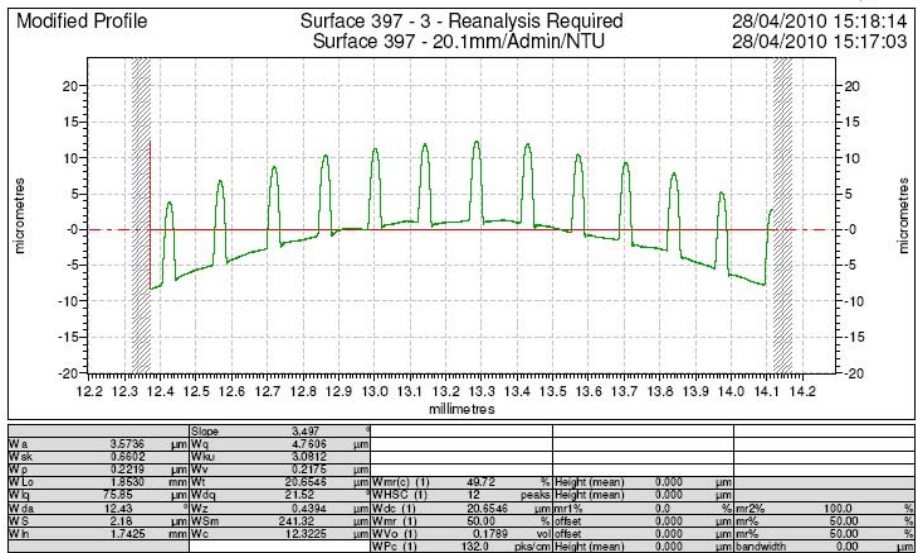


圖 6-4 使用表面輪廓儀量測無電鍍鍍之結果

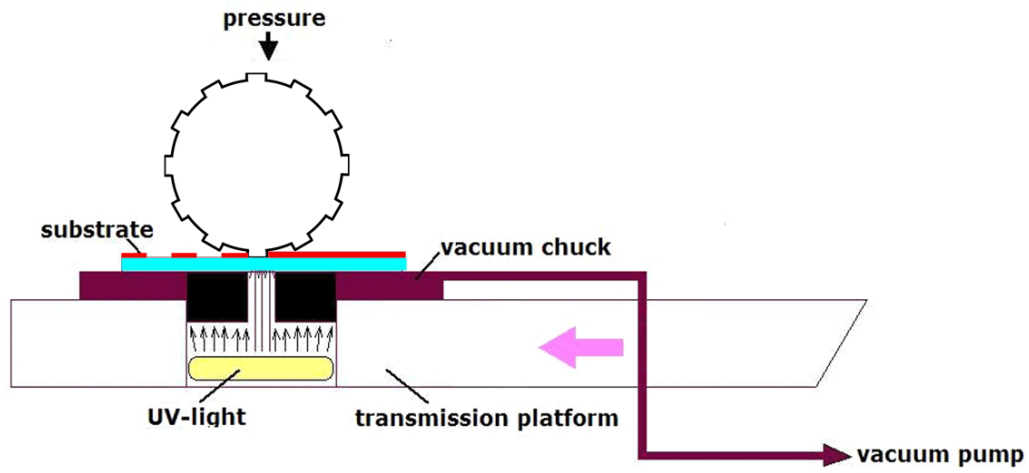


圖 6-5 UV 轉印示意圖

5.14.6.24

Taylor Hobson
PRECISION

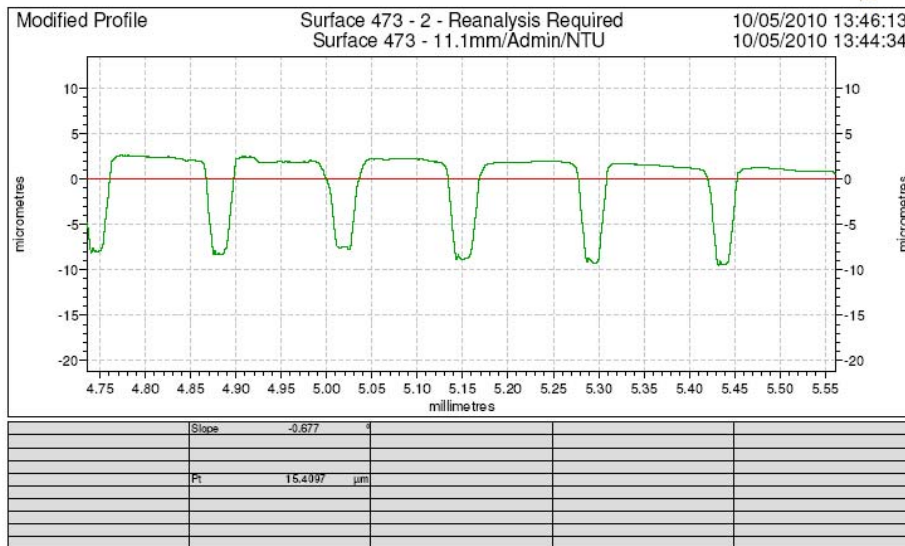


圖 6-6 實際 UV 壓印之圖形

第七章 結論及未來展望

7.1 研究成果總結

本文致力於開發靜電輔助噴塗技術，將濕式光阻均勻塗佈於平面與非平面基材上，同時結合步進式曲面光微影技術及無電鍍鎳技術，製作出剛性微結構滾輪，最後使用 UV 固化壓印做實際之壓印測試。此外，本研究所開發之靜電輔助機台，可將濕式光阻均勻塗佈於平面具微結構基材和非平面具微結構基材上，未來可運用此技術，製作出多層結構。本研究具體研究成果包括：

- 一、成功的利用自行開發之靜電輔助噴塗機台，均勻的將濕式正型光阻（EPG-510）塗佈於平面晶圓上，並利用此靜電輔助噴塗提升其均勻性與降低光阻表面之粗糙度。
- 二、成功的利用自行開發之靜電輔助噴塗機台，均勻的將濕式正型光阻（EPG-510）塗佈於表面鍍鎳之滾輪（直徑為 80 mm，長度為 120 mm），並利用此靜電輔助噴塗提升其均勻性與降低光阻表面之粗糙度。
- 三、成功的利用自行開發之靜電輔助噴塗機台，均勻地將濕式正型光阻（EPG-510）塗佈於 V 溝鎳板、波浪型微結構滾輪與方形微結構滾輪，並利用靜電輔助噴塗技術，提升與原始輪廓之相似程度並降低溝槽底部之厚度差異 δ_i 。
- 四、成功的結合靜電輔助噴塗技術、步進式曲面光微影技術及無電鍍鎳技術，提供一個「簡化製程」、「降低成本」的連續式剛性微結構滾輪模具製作技術。

7.2 本研究貢獻

- 一、應用傳統機械加工法中經常使用角度分度加工，以及使用步進式光微影製程技術應用於大面積的平面上，本研究將兩者結合並應用於自行開發之步進式曲面曝光機台，成功的直接在金屬滾輪上定義光阻結構並配合無電鍍鎳技術製作連續式剛性微結構滾輪且微結構平行於滾輪軸線方向。
- 二、目前文獻中所提起之滾輪模具製作大多係利用鎳模或軟模包覆法、灌模法、單晶鑽石精密車削、以及使用電子束或 X-Ray 等高能量束進行滾輪表面的直寫等，但都有相當之限制及缺點存在。因此，本研究係結合靜電輔助噴塗、步進式曲面光微影技術及無電鍍鎳技術，成功的製作連續式剛性微結構之金屬滾輪且微結構平行於滾輪軸線方向。
- 三、目前尚無文獻指出能在具結構之滾輪上均勻塗佈光阻，本研究利用靜電輔助噴塗技術，能將濕式光阻均勻塗佈於具結構之滾輪上，未來對於製作第二層結構之應用，奠定了基礎。

7.3 未來研究方向

隨著光電技術蓬勃發展，各式電子產品朝向微小輕量化目標，其相關光學元件的製造技術也越來越受到重視，而製程上也慢慢朝向具有節省時間，製程快速、大量連續生產等優點邁進，故 Roll-to-Roll (R to R) 相關製程技術，也吸引越來越多的專家或研究團隊紛紛投入。針對 R to R 之重要性，此研究所提出之靜電輔助噴塗技術對於滾輪塗佈方面，具有一定之貢獻。以下就研究展望與未來工作項目做說明：

目前針對塗佈專用之光阻尚未普遍，其光阻之蒸發率與流動性對於具結構機材之塗佈是非常重要的參數，未來將針對其塗佈之需要對於光阻之特性做調整，以達到最佳之噴塗狀況。同時尋找更薄的噴塗用光阻，應用於靜電輔助噴塗技術上，使其塗佈之厚度可達奈米等級，這對要製作次微米等級之結構是相當重要之

關鍵因素。

除塗佈光阻外，可嘗試塗佈其他功能性塗料，例如抗沾黏性塗料，由於金屬鎳滾輪在實際壓印時常常會造成脫模不順利之情形，希望藉由靜電輔助噴塗技術，均勻噴塗抗沾黏之功能性溶液於結構滾輪上，如圖 7-1 所示，已達順利脫模之目的。

目前光微影曝光技術可分成三種方法：接觸式 (Contact)、近接式 (Proximity) 及投射式 (Projection)，其中投影之方式比較不會損害光阻，且成像解析度佳；接著更進一步演進到在曝光時，光源先經過光罩定義圖形，再透過透鏡將圖形依適當比例縮小後，曝於局部的晶圓上，以數次重覆性且步進 (step and repeat) 之方式來達到整面晶圓曝光的動作。根據上述概念提出『投影式步進曲面光微影技術於滾筒型基材上』，利用本論文之步進式曲面曝光機台，並搭配半圓柱型凸透鏡 (Cylindrical Plano Convex Lenses)，設計示意圖如圖 7-2 所示，以「投影式」、「步進式」的方式，直接在金屬滾輪之光阻上定義解析度更佳之微結構。



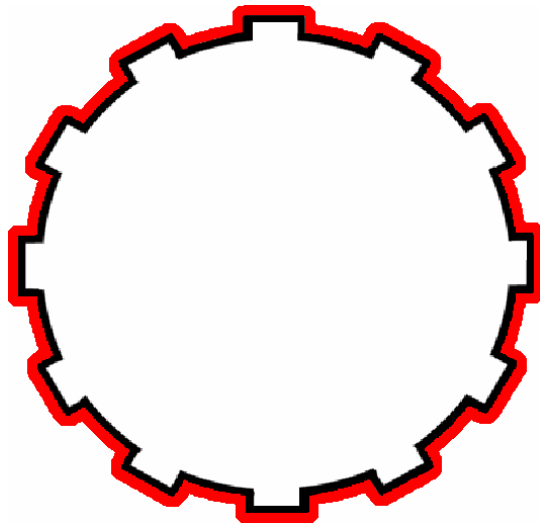


圖 7-1 塗佈抗沾黏溶液於結構滾輪表面

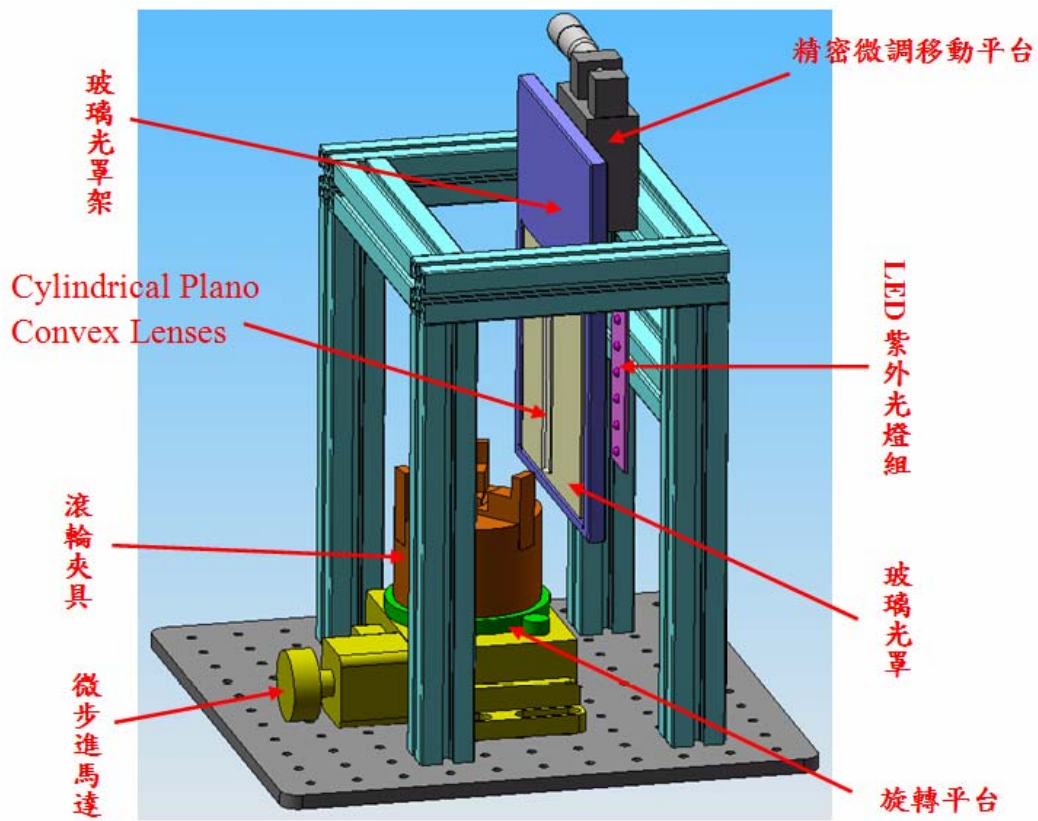


圖 7-2 投影式步進曲面曝光設計圖

參考文獻

- 1 M. T Gale, “Replication techniques for diffractive optical elements ” ,
Microelectronics Engineering 34 pp,321-339,1997.
- 2 D. O. Lee,P. Roman,C. T. Wu,P. Mumbauer,M. Brubaker,R. Grant and J. Ruzylo,
“Mist deposited high-k dielectrics for next generation MOS gates,” Solid-State
Electronics,46,1671-1677,2002.
- 3 W. Mahoney,P. Roman,C. T. Wu,P. Mumbauer,and J. Ruzylo,“Mist deposition of
thin photoresist films,” Proceedings of SPIE,5376,861-866,2004.
- 4 Burn J. Lin,Austin,Tex.,美國專利，93 年 11 月
- 5 V. K. Singh,M. Sasaki,J. H. Song,and K. Hane,“Heating Effect on Photoresist in
Spray Coating Technique for Three-Dimensional Lithography,” Japanese Journal
of Applied Physics,42,4027-4030,2003.
- 6 V. K. Singh,M. Sasaki,K. Hane,and M. Esashi,“Flow Condition in Resist Spray
Coating and Patterning Performance for Three-Dimensional Photolithography
over Deep Structures,” Japanese Journal of Applied Physics,43,2387-2391,2004.
- 7 V. K. Singh,M. Sasaki,J. H. Song,and K. Hane,“Technique for Preparing
Defect-free Spray Coated Resist Film on Three-Dimensional
Micro-Electromechanical Systems,” Japanese Journal of Applied
Physics,44,2016-2020,2005.
- 8 V. K. Singh,M. Sasaki,K. Hane,Y. Watanabe,H. Takamatsu,M. Kawakita and H.
Hayashi,“Deposition of thin and uniform photoresist on three-dimensional
structures using fast flow in spray coating,” Journal of Micromechanis and
Microengineering,15,2339-2345,2005.
- 9 N. P. Pham,Tom.L.M. Scholtesa,Ruud Kierka,B.Wieder.,Pasqualina M. Sarroa and
Joachim N. Burghartz,“Direct Spray Coating of Photoresist for MEMS

- applications,” *Micromachining and Microfabrication Process Technology*,0277-786X/01/
- 10 N. P. Pham,E. Boellard,J.N. Burghartz and P.M. Sarro “Photoresist coating methods for the integration of novel 3-D RF microstructures”,*J.MEMS*,13/3,2004,491–499.
 - 11 N. P. Pham,J.N. Burghartz and P.M. Sarro,”Spray Coating of Photoresist for pattern transfer on high topography surfaces” *J. Micromech. Microeng.* 15 ,2005, 691-697.
 - 12 黃子健，應用光阻與角度步進光微影於滾輪表面製作無電鍍鎳微結構，國立台灣大學機械工程研究所博士論文，民國 98 年 1 月。
 - 13 賴昕駿，浸沾式光阻塗佈與步進式光微影技術應用於微結構滾輪製作之探討，國立台灣大學機械工程研究所博士論文，民國 98 年 6 月。
 - 14 Y. Xia and G. M. Whitesides,“Soft Lithography ”,*Angew. Chem. Int. Ed.* 37, pp. 550-575,1998.
 - 15 . Tan,A. Gilbertson and S. Y. Chou,“Roller nanoimprint lithography”,*J. Vac. Sci. Technol. B* 16(6),1998.
 - 16 D. Feinerman,R. E. Lajos,V. White and D. D. Denton,“X-ray lathe : an X-ray lithographic exposure tool for nonplanar objects”,*Journal of Microelectromechanical systems*,Vol. 5,No.4,1996.
 - 17 W. M. Choi and O. O. Park,“The fabrication of submicron patterns on curved substrates using a polydimethylsiloxane film mould”,*Nanotechnology*,15,pp. 1767-1770,2004.
 - 18 Younan Xia,Enoch Kim,Xiao-Mei Zhao,John A. Rogers,Mara Prentiss,George M. Whitesides,“Complex Optical Surfaces Formed by Replica Molding Against Elastomeric Masters”,*Science*,Vol. 273,19 July 1996.
 - 19 S. Luan,R. Xing,Z. Wang,X. Yu and Y. Han,”Solvent-assisted polymer-bonding

lithography”,*Journal of Vacuum Science and Technology B*,Vol. 23,No.1,pp. 236-241,2005.

- 20 方煌盛，滾輪式微結構轉印製程開發研究，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，94年6月。
- 21 朱明輝，軟模低壓滾輪式轉印製程的研發與應用，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，95年6月。
- 22 C. Marques, Y. M. Desta, J. Rogers, M. C. Murphy and K. Kelly, ”Fabrication of high-aspect-ratio microstructures on planar and nonplanar surfaces using a modified LIGA process”,*IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 6, No.4, pp. 329-336, 1997.
- 23 Wen J. Li, John D. Mai, and Chih-Ming Ho, ” A MEMS fabrication technique for non-planar substrates”,*IEEE MEMS, Heidelberg, January 1998*, pp. 268-273 (98CH36176).
- 24 潘昆志等人，微結構滾輪製作的方法，中華民國專利證書號 I251266，95年。
- 25 江亮霆，乾膜光阻應用於微結構滾輪製作之探討，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，96年6月。

附錄 A (塗佈方式與條件對膜厚與品質的影響之數據)

噴塗時間對於光阻厚度之關係 (圖 4-12)

	晶圓上 10 點之光阻厚度(nm)					
	一般噴塗			靜電輔助噴塗 60 kV		
	2s	3s	4s	2s 60 kV	3s 60 kV	4s 60 kV
1	2054	2672	4446	4046	7179	8328
2	2632	2894	4890	4329	7264	8806
3	2706	3631	4303	4445	7700	9034
4	3618	4027	4491	4243	8107	9133
5	2890	3395	5424	3925	7287	8770
6	3421	2832	5423	4228	7193	8509
7	2235	3436	5023	4536	7511	9190
8	2795	3589	4352	4151	7658	8835
9	2681	3426	4164	4022	7347	8777
10	2934	3005	3950	4092	7328	8495

噴塗時間對於光阻表面厚度差異 δ_i 之影響 (圖 4-14)

噴塗秒數	一般噴塗之晶圓上光阻之厚度差異 δ_i (nm)			
	1	2	3	平均
1s	490	404	345	459.5
2s	343	393	438	387.25
3s	229	258	297	320.5
4s	192	143	139	157.5
噴塗秒數	靜電輔助噴塗之晶圓上光阻之厚度差異 δ_i (nm)			
	1	2	3	平均
1s	368	270	349	331.75
2s	334	168	357	272.75
3s	118	109	113	121.25
4s	110	140	112	120.5

噴塗時間對於光阻均勻度 $1\sigma\%$ 之影響 (圖 4-15)

	晶圓上 10 點之光阻厚度(nm)					
	一般噴塗			靜電輔助噴塗 60 kV		
	2s	3s	4s	2s 60 kV	3s 60 kV	4s 60 kV
1	2054	2672	4446	4046	7179	8328
2	2632	2894	4890	4329	7264	8806
3	2706	3631	4303	4445	7700	9034
4	3618	4027	4491	4243	8107	9133
5	2890	3395	5424	3925	7287	8770
6	3421	2832	5423	4228	7193	8509
7	2235	3436	5023	4536	7511	9190
8	2795	3589	4352	4151	7658	8835
9	2681	3426	4164	4022	7347	8777
10	2934	3005	3950	4092	7328	8495
Thickness average (nm)	2796.6	3290.7	4646.6	4201.7	7457.4	8787.7
$1\sigma\%$	16.8	12.9	11.1	4.607163	3.913937	3.217306

靜電電壓對於光阻厚度差異 δ_i 之關係 (圖 4-16)

靜電輔助電壓 kV	晶圓上光阻之厚度差異 δ_i (nm)			
	1	2	3	平均
0	456	291	438	395
30	231	253	174	219.3333
40	266	227	249	247.3333
50	191	241	239	223.6667
60	179	140	199	172.6667

靜電輔助噴塗對均勻度 $1\sigma\%$ 之關係 (圖 4-17)

	晶圓上十點光阻厚度(nm)				
	0 kV	30 kV	40 kV	50 kV	60 kV
1	3563	5381	5244	5826	6019
2	3152	5551	5699	5619	5981
3	3793	5128	5426	5557	5909
4	3750	5468	5434	5827	5890
5	3330	5150	5518	5738	6145
6	3712	5434	5535	5543	5835
7	3362	5430	5246	5761	5749
8	3297	5501	5245	5853	6069
9	3562	5437	5328	5875	6127
10	3752	5256	5431	5860	5870
Thickness average (nm)	3527.3	5373.6	5410.6	5745.9	5959.4
$1\sigma\%$	6.4	2.7	2.7	2.2	2.1

一般噴塗與靜電輔助噴塗應用於滾輪塗佈之均勻度 (圖 5-10)

滾輪各角度之五點量測厚度值(nm)								
	一般噴塗 3s				靜電輔助噴塗 3s			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
1	1402	1649	1694	1228	3635	3509	3903	3645
2	1268	1685	1617	1243	3451	3675	4058	3497
3	1478	1870	1643	1246	3500	4058	4299	3785
4	1640	1722	1906	1027	3238	3897	4288	3870
5	1652	1020	2119	1264	3424	4038	3605	3690
	Thickness average (nm)	1518	1 σ %	19.5	Thickness average (nm)	3753	1 σ %	7.7

(圖 5-11)

滾輪各角度之五點量測厚度值(nm)								
	一般噴塗 4s				靜電輔助噴塗 4s			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
1	1840	1652	1687	1202	4561	4302	4317	4267
2	1795	1547	1805	1536	4625	4851	4749	4487
3	1987	1942	1436	1668	4680	4965	4762	4581
4	1650	1557	1491	1546	4958	5299	4881	4842
5	1913	1602	1512	1604	4975	5422	5257	5067
	Thickness average (nm)	1648	1 σ %	11.5	Thickness average (nm)	4792	1 σ %	6.8

一般噴塗與靜電輔助噴塗應用於滾輪塗佈之厚度差異 δ_i (圖 5-12)

一般噴塗 3s 滾輪各角度之厚度差異 δ_i (nm)					
	1	2	3	4	average
0°	654	767	806	472	674.75
90°	698	1173	1163	490	881
180°	874	934	1098	610	879
270°	441	787	913	570	677.75
靜電輔助噴塗 3s 60 kV 滾輪各角度之厚度差異 δ_i (nm)					
	1	2	3	4	average
0°	549	430	411	292	420.5
90°	430	502	429	277	409.5
180°	610	390	348	328	419
270°	588	386	425	218	404.25

(圖 5-13)

一般噴塗 4s 滾輪各角度之厚度差異 δ_i (nm)					
	1	2	3	4	average
0°	547	824	463	505	584.75
90°	600	666	612	605	620.75
180°	685	565	338	627	553.75
270°	869	511	554	853	696.75
靜電輔助噴塗 4s 60 kV 滾輪各角度之厚度差異 δ_i (nm)					
	1	2	3	4	average
0°	277	262	146	266	237.75
90°	240	180	351	321	273
180°	125	231	157	201	178.5
270°	241	301	195	256	248.25

靜電輔助噴塗與其浸潤式塗佈方式比較 (圖 5-18)

	一般噴塗 4s 各角度之五點量測厚度值(nm)				靜電輔助噴塗 4s 各角度之五點量測厚度值(nm)			
	滾輪角度							
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
1	1840	1652	1687	1202	4561	4302	4317	4267
2	1795	1547	1805	1536	4625	4851	4749	4487
3	1987	1942	1436	1668	4680	4965	4762	4581
4	1650	1557	1491	1546	4958	5299	4881	4842
5	1913	1602	1512	1604	4975	5422	5257	5067
	Thickness average (nm)	1648	1 σ %	11.5	Thickness average (nm)	4792	1 σ %	6.8

浸潤式塗佈各角度之五點量測厚度值(nm)				
	滾輪角度			
	0°	90°	180°	270°
1	4016	4278	3704	3871
2	4344	4571	3980	4012
3	4647	4643	4238	4148
4	4497	4731	4366	4297
5	4642	4826	4489	4469
	Thickness average (nm)	4338	1 σ %	7.1

	一般噴塗 4s 滾輪各角度之厚度差異 δ_i (nm)				
	1	2	3	4	average
0°	547	824	463	505	584.75
90°	600	666	612	605	620.75
180°	685	565	338	627	553.75
270°	869	511	554	853	696.75

靜電輔助噴塗 4s 60 kV 滾輪各角度之厚度差異 δ_i (nm)					
	1	2	3	4	average
0°	277	262	146	266	237.75
90°	240	180	351	321	273
180°	125	231	157	201	178.5
270°	241	301	195	256	248.25
浸潤式塗佈之滾輪各角度之厚度差異 δ_i (nm)					
	1	2	3	4	average
0°	60	91	119	131	100.25
90°	48	57	71	116	73
180°	36	42	69	123	67.5
270°	49	75	85	88	74.25



附錄 B 作者簡介

姓 名：吳聲鑫

性 別：男

生 日：民國 75 年 4 月 26 日

求學經歷：

研究所：國立台灣大學	機械工程研究所	畢業	97.9~99.7
大 學：國立台灣科技大學	機械工程系（二技部）	畢業	95.9~97.9
專 科：私立明志科技大學	機械工程科（五專部）	畢業	90.9~95.6

E - m a i l : r97522705@ntu.edu.tw



附錄 C 個人著作

國際會議論文(Conference Papers)

Hsin-Chun Lai, Jing-Tang Wu, Tzu-Chien Huang, Sen-Yeu. Yang*, **Sheng-Hsin Wu**, “Fabrication of rigid microstructures on a metal roller using stepped rotating lithography”, *35th International Conference on Micro- and Nano-Engineering (MNE 2009)*, 28 Sep-01 Oct 2009, Ghent, Belgium.

Sheng-Hsin Wu, Jing-Tang Wu, Sen-Yeu Yang, Tai-Jung Chuang and Tzu-Chien Huang, “Electrostatic-Assisted Photoresist Spray Coating and Stepped Lithographic Technique for Directly Fabricating Rigid Microstructures onto Metal Rollers”, The First IFToMM Asian Conference on Mechanism and Machine Science October 21 - 25, 2010, Taipei, Taiwan (In preparation).

專利(Patents)

蔡習訓; 梁晶煒; 吳聲鑫, ”振動計數的方法與裝置”, 中華民國發明專利, 民國 94 年。專利號 200720633

