

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

玻璃模造技術於微光學陣列元件之成形研究



Fabrication of micro-optical arrays by glass molding technique

研究生：方治偉

指導教授：周長彬 教授

中華民國一百年六月

玻璃模造技術於微光學陣列元件之成形研究

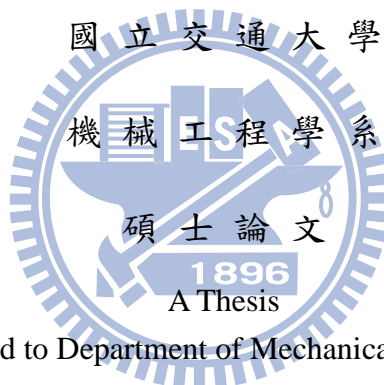
Fabrication of micro-optical arrays by glass molding technique

研究生：方治偉

Student：Chih-Wei Fang

指導教授：周長彬 教授

Advisor：Chang-Ping Chou



Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in
Mechanical Engineering

June 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一 百 年 六 月

玻璃模造技術於微光學陣列元件之成形研究

研究生：方治偉

指導教授：周長彬

國立交通大學 機械工程學系 碩士班

摘要

微光學陣列元件(Micro-optical array components)已廣泛應用於光電產業。目前玻璃微光學元件多透過超精密鑽石輪磨或是精密玻璃模造技術來製造，但刀/模具、設備等成本較高。因此本研究結合雷射加工、電解拋光與精密玻璃模造技術，進行玻璃微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列的製作，以期縮短製程周期與降低模仁加工成本。本研究使用雷射在不銹鋼材料上製作六邊形與矩形之微結構陣列，六邊形外接圓直徑為 200 μm 與矩形直徑為 200 μm 、250 μm 、及 300 μm 。並利用電解拋光技術去除因雷射加工而形成之熔融層及改變微結構形貌，使其由六角柱與矩形結構轉變為圓頂柱狀結構。最後透過玻璃模造技術在鈉玻璃(soda lime glass)上製作 10*10 mm 之光學微陣列元件，微透鏡陣列深度約 39.3 μm 且曲率半徑為 58.1 μm ，兩透鏡之間距為 180 μm ；微柱狀鏡陣列深度約 37 μm 且曲率半徑為 79.8 μm ，兩柱狀鏡之間距為 250 μm 。

關鍵字：微透鏡陣列、微柱狀鏡陣列、雷射、電解拋光、精密玻璃模造

Fabrication of micro-optical arrays by glass molding technique

Students : Chih-Wei Fang

Advisor : Chang-Ping Chou

**Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University**

Abstract

Micro-optical arrays are widely used in optoelectronic industry. The glass micro-optical arrays are fabricated by precision diamond grinding technique (PDGT) or precision glass molding technique (PGMT) in recently. However, the cost of PDGT or PGMT is high. Therefore, this study combines laser micromachining, electro polishing, and precision glass molding technique to fabricate glass micro lens array and micro lenticular lens array that can reduce the cost of mold and process time.

At first, external diameter 200 μm of hexagon structures and width of 200 μm , 250 μm , and 300 μm rectangle structures were fabricated by laser on stainless steel materials. Then the remelting layer generated by laser was removed by electro polishing technique. Finally, PGMT was utilized to fabricate the glass micro lens array on 10x10 mm soda lime glass with a pitch of 180 μm , a depth of 39.3 μm , and a radius of 58.1 μm and micro lenticular lens array with a pitch of 250 μm , a depth of 37 μm , and a radius of 79.8 μm .

Keywords: micro lens array, micro lenticular lens, laser, electro polishing technique, precision glass molding technique

誌 謝

轉眼碩士生涯即將結束，首先先感謝周長彬老師在這兩年中的教導與鼓勵，當我懷疑徘徊時總會適時的給予我們建議，從老師的身上我們學到積極不懈研究精神與待人處世的道理。

於此，特別感謝建堯學長，於實驗中給予我極大的幫助與信心，讓我能順利的完成研究。同時感謝碩班學長毛毛、哈利、元駿、明良與學姐貞慈，博班學長姐明璋、柏青、孟弘、阿楷、右拳、愛蕙、偉仁，碩班學弟阿貴、正峰、天一、滄正、阿咪，感謝實驗室的各位同儕於這兩年來的的互相幫忙與配合，使得無聊的研究生活添加了些色彩。除此之外，坐在我隔壁兩年的帥哥彥彬，人既長得帥個性又好，每當我研究陷入黑暗低潮時，你帥氣逼人的光芒總是照耀著我並指引我方向；人稱比賽達人又超優秀有愛心的漢彭哥、超級梗王宏信屢次都能說出令大家哄堂大笑的話、交大阿勇哥的玩咖的形象真是令我佩服的五體頭地。

在實驗方面感謝國研院儀科中心的黃國政組長、釋峰、文澤、阿輝、阿傑、俊傑、育政等學長們於儀器設備的支援與技術指導，另外特別感謝SEM的小朱姊。

最後感謝家人長久以來給予的經濟支持與關心、女友二年來的的支持與包容。需要感謝的人真的很多，沒有你們的一路扶持，我走到現在的我可能早已精疲力盡，於此再次謝謝各位！

目錄

摘要	i
Abstract	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	x
第一章、緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	3
1.3 文獻回顧	4
1.3.1 微透鏡陣列	4
1.3.2 微柱狀鏡陣列	5
1.3.3 雷射微加工技術	8
1.3.4 電解拋光技術	10
1.3.5 精密玻璃模造技術	11
1.4 論文架構	14
第二章、實驗原理與技術介紹	15
2.1 光學玻璃介紹	15
2.2 光學玻璃分類	16
2.2.1 折射率	17
2.2.2 阿貝數(色散)	18
2.2.3 穿透率	18
2.2.4 機械與物理性質	19
2.2.5 化學性質	19
2.3 傳統研磨拋光技術介紹	20
2.3.1 切割	21
2.3.2 圓整	21
2.3.3 成形	21
2.3.4 研磨拋光	22
2.3.5 定心	22
2.3.6 鍍膜	23

2.4	雷射微加工技術介紹	23
2.4.1	雷射基本組成	24
2.4.2	雷射激發原理	24
2.4.3	雷射加工機制	25
2.5	電解拋光介紹	28
2.5.1	電解拋光原理	28
2.5.2	電解拋光與機械研磨之比較	29
2.6	玻璃模造介紹	32
第三章、實驗步驟與方法		35
3.1	實驗流程	35
3.2	實驗材料介紹	36
3.2.1	不銹鋼材料介紹	36
3.2.2	鈉玻璃介紹	37
3.3	檢測設備雷射	37
3.3.1	3D 共軛焦顯微鏡	37
3.3.2	掃描式電子顯微鏡與能量分散光譜儀	39
3.3.3	阿貝氏折射率量測儀	39
第四章、結果與討論		41
4.1	雷射直寫實驗	41
4.1.1	雷射參數對模仁表面形貌與表面粗糙度之影響	41
4.1.2	雷射頻率對模仁高度之影響	45
4.1.3	雷射掃描速度對模仁表面輪廓之影響	52
4.2	電解拋光實驗	60
4.2.1	電解時間對模仁表面形貌與結構高度之影響	62
4.2.2	電解時間對模仁粗糙度之影響	65
4.2.3	微透鏡陣列模仁之電解拋光實驗	66
4.2.4	微柱狀鏡陣列模仁之電解拋光	72
4.3	玻璃模造熱壓實驗	76
4.3.1	熱壓參數對折射率影響	76
4.3.2	單段熱壓成形之影響	79
4.3.3	二段熱壓成形之參數影響	83
4.3.4	比較二段熱壓成形時腔體含氮氣與真空狀態的影響	90
第五章、結論		98
第六章、未來工作		100
參考文獻		101

圖目錄

圖 1-1 利用柱狀鏡產生立體.....	6
圖 1-2 可切換式液晶柱狀鏡.....	7
圖 1-3 (a)微柱狀鏡(b)微環狀鏡之 AFM 掃描圖橫截面.....	7
圖 1-4 (a)直交式的微柱狀梯度折射率透鏡陣列模型(b)其製作流程.....	8
圖 1-5 微透鏡陣列之橫截面 3D 輪廓.....	9
圖 1-6 共軛焦顯微鏡觀察(a)正方形(b)三角形之微透鏡陣列.....	9
圖 1-7 三維 GC 模仁微結構(a)先經機械加工(b)再熱壓於玻璃.....	12
圖 1-8 玻璃模造示意圖 (a) 三種不同邊角之影響(b)微透鏡成形.....	13
圖 1-9 鏤板上之連續水平陣列(a)上視圖(b)側視圖.....	13
圖 2-1 Schott 公司玻璃毛胚品種圖.....	17
圖 2-2 光經過不同介質產生色散.....	18
圖 2-3 傳統玻璃研磨拋光技術流程.....	20
圖 2-3 透鏡(a)研磨中(b)以瀝青為磨碗之黏模劑.....	22
圖 2-4 誘發放射原理.....	25
圖 2-5 飛秒雷射加工(a)炸藥(b)火柴.....	27
圖 2-6 UV 雷射加工架構.....	28
圖 2-7(1)原始工件表面(2)經機械研磨(3)電解拋光處理過程(4)經電解拋光後.....	30
圖 2-8 電解槽示意圖.....	31
圖 2-9 玻璃模造流程圖.....	33
圖 2-10 玻璃模造機.....	34
圖 2-11 模造技術可節省大量步驟.....	34
圖 3-1 實驗流程圖.....	35
圖 3-2 模仁設計(a)無縫六邊形陣列(b)矩形陣列.....	37
圖 3-3 3D 彩色雷射共軛焦顯微鏡(a)組成架構(b)實際形貌.....	38
圖 3-4 冷場式掃描電子顯微鏡(SEM).....	39
圖 3-5 (a)阿貝氏折射率量測儀(b)臨界角之分界.....	40

圖 4-1 雷射掃描路徑示意圖(a) Line (b)Cross (c)Bidirectional	43
(d) Bidirectional + Cross	43
圖 4-2 雷射加工各參數對不銹鋼試片表面形貌與表面粗糙度之影響.....	44
圖 4-3 雷射脈衝重複頻率與雷射功率關係.....	46
圖 4-4 雷射脈衝重複頻率與模仁結構高度關係.....	47
圖 4-5 外接圓尺寸為 100 μm 雷射脈衝重複頻率 100 kHz，標示區域為再鑄.....	48
圖 4-6 外接圓尺寸為 200 μm 雷射脈衝重複頻率 160 kHz.....	48
圖 4-7 外接圓尺寸為 200 μm 雷射脈衝重複頻率 110 kHz	49
圖 4-9 矩形結構寬度 100 μm 雷射脈衝重複頻率 120 kHz.....	50
圖 4-10 矩形結構寬度 200 μm 雷射脈衝重複頻率 160 kHz.....	51
圖 4-11 矩形結構寬度 200 μm 雷射脈衝重複頻率 110 kHz	51
圖 4-12 雷射掃描速度與模仁結構高度之影響.....	53
圖 4-13 外接圓尺寸為 100 μm 掃描速度 200 mm/s，標記為熔融區域.....	54
圖 4-14 外接圓尺寸為 200 μm 掃描速度 400 mm/s.....	54
圖 4-15 外接圓直徑 200 μm 掃描速度 2200 mm/s.....	55
圖 4-16 脈衝重複頻率 110k 於外接圓尺寸 200 μm 之掃描速度.....	55
圖 4-17 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度為 900 mm/s.....	56
圖 4-18 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度為 1000 mm/s.....	56
圖 4-19 雷射掃描速度與模仁結構高度之影響.....	58
圖 4-20 掃描速度 200 mm/s 矩形寬度 200 μm ，標記為金屬回流形成再鑄層	58
圖 4-21 掃描速度 400 mm/s 矩形寬度 200 μm	59
圖 4-22 掃描速度 800 mm/s 矩形寬度 200 μm	59
圖 4-23 掃描速度 2200 mm/s 矩形寬度 200 μm ，標記為雷射掃描不連續.....	60
圖 4-24 經雷射加工後之模仁表面形貌.....	61
圖 4-25 (a) 微柱狀鏡陣列電解前(b)微柱狀鏡陣列電解後 (c)微透鏡陣列電解前(d)微透 鏡陣列電解後之示意圖	61
圖 4-26 雷射參數與電解拋光時間對模仁結構高度之影響.....	63
圖 4-27 電解拋光時間對模仁幾何形狀與高度之影響(a)電解前(b)電解後	64
圖 4-28 雷射參數與電解拋光時間對模仁微結構表面粗糙度之影響.....	66

圖 4-29 電解拋光時間與模仁微結構高度之影響.....	67
圖 4-30 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 900 mm/s，電解時間 60 min	68
圖 4-31 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s，電解時間 60 min	68
圖 4-32 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 900 mm/s，電解時間 75 min	69
圖 4-33 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 900mm/s，電解時間 90 min	69
圖 4-34 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s,電解時間 90 min	70
圖 4-35 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s，電解時間 75 min	70
圖 4-36 雷射加工後模仁表面形貌.....	71
圖 4-37 經電解拋光後之模仁表面形貌.....	71
圖 4-38 不銹鋼模仁之微透鏡陣列實際圖片	72
圖 4-39 電解拋光時間與模仁微結構高度之影響.....	73
圖 4-40 矩形寬度 250 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s 電解時間 95 min	73
圖 4-41 矩形寬度 250 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s 電解時間 125 min	74
圖 4-42 矩形寬度 250 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s 電解時間 125 min	74
圖 4-43 電解拋光後不銹鋼微柱狀鏡模仁之光學顯微鏡圖	75
圖 4-44 不銹鋼模仁之微柱狀鏡陣列實際圖片.....	75
圖 4-45 溫度與不同光學玻璃之絕對折射率溫度係數的關係.....	77
圖 4-46 不同光學玻璃之絕對折射率的溫度係數對冷卻速率之影響.....	77
圖 4-47 玻璃厚度 5 mm，冷卻速率與溫度之折射率變化量	79
圖 4-48 玻璃厚度 1.2 mm，冷卻速率與溫度之折射率變化量	79
圖 4-49 單段熱壓成形溫度與壓力對時間之歷程圖.....	80
圖 4-51 溫度對填充率之影響(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列	82
圖 4-52 接觸面對熱壓阻力示意圖(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列	82
圖 4-53 玻璃溫度與熱膨脹量的關係.....	83
圖 4-54 二段熱壓成形溫度與壓力對時間之歷程圖.....	84
圖 4-55 田口直交表分析結果(a)一段成形力量(b)二段成形力量(c)壓模速度(d)模造時間 (e)成形溫度.....	86
圖 4-56 田口直交表分析結果(a)首段成形力量(b)二段成形力量(c)壓模速度(d)模造時間 (e)成形溫度.....	89

圖 4-57 玻璃溫度對黏滯係數之關係.....	90
圖 4-58 二段熱壓成形-比較腔體條件為真空或氮氣時壓力對填充率之影響	92
圖 4-59 二段熱壓成形-比較腔體條件為真空或氮氣時溫度對填充率之影響	93
圖 4-60 最佳化之微透鏡陣列 3D 表面輪廓與量測值.....	94
圖 4-61 玻璃微透鏡陣列實際玻璃表形貌.....	95
圖 4-61 玻璃微透鏡陣列 SEM 圖	95
圖 4-62 最佳化之微柱狀鏡陣列 3D 表面輪廓與量測值.....	96
圖 4-63 放大倍率 1000 倍拼接圖之微柱狀鏡陣列 3D 表面形貌與量測值.....	96
圖 4-64 玻璃微柱狀鏡陣列實際玻璃表形貌.....	97
圖 4-64 玻璃微柱狀鏡陣列 SEM 圖	97



表目錄

表 2-1 光學玻璃與光學高分子材料.....	15
表 2-2 電解拋光與傳統機械研磨之比較.....	31
表 2-3 電解液成分.....	32
表 3-1 鈉玻璃物理性質表.....	37
表 4-1 雷射加工參數意義.....	43
表 4-2 L16 直交表參數設計與實驗結果.....	45
表 4-3 玻璃模造熱壓實驗之參數代號.....	84
表 4-4 田口 L16 直交表實設計參數與實驗數據-微柱狀鏡陣列.....	87
表 4-5 田口 L16 直交表實設計參數與實驗數據-微透鏡陣列.....	88



第一章、 緒論

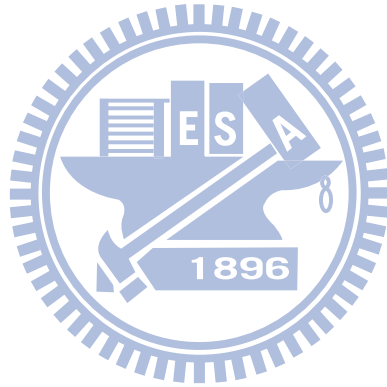
1.1 研究動機

隨著光學相關技術持續進步，產品不斷的微小化及輕量化，傳統上利用研磨拋光製作的巨觀光學元件(Macro-optical components)已經逐漸不敷使用，開始被微光學元件(Micro-optical components)所取代。微光學元件包括透鏡、柱狀鏡、反射鏡、菱鏡等，其元件陣列廣泛應用於光電產業上[1]。

微光學系統可結合聚焦、分光、光線折射等功能，將系統積體化製作於單一元件上並可減少體積與重量，改善在光學系統中各元件間相對位移所造成的定位與對準。微光學元件不僅應用於天文望遠鏡、相機及顯微鏡等各類光學儀器，在國防及民生領域，有越來越多應用，例如液晶顯示器(Liquid Crystal Display, LCD)的背光模組(Back light module)[2]、3D 裸視技術[3]、光學量測儀器、資訊存取與傳輸、醫療美容雷射、雷射光束武器、藍光 DVD 讀取頭以及衛星攝影機等。因為微光學元件需求量日益增多，傳統製程方法已無法達到快速量產高精度微光學元件之需求。

目前市面上之微光學元件大多使用光學高分子材料，因製作成本較低、成形較容易且能達到奈米尺度等級。但以高階光學應用而言，光學玻璃擁有高折射率、低色散、耐熱、低膨脹係數以及抗有機環境等特點，有其不可取代的地位。

非球面玻璃元件的製造方法可分為三種：CNC 研拋方法、超精密鑽石輪磨加工法，以及精密玻璃模造法。與精密玻璃模造法相較之下，傳統研拋方法品質穩定性較差，量產時加工時程較長且成本較高。超精密鑽石輪磨法則有加工速度慢，鑽石砂輪消耗補正等技術問題，不適合用來大量生產。而採用精密玻璃模造技術可縮減多道研拋法的製程，因此可快速批量生產良率佳的高精度光學元件。精密玻璃模造技術除了可應用在非球面鏡片的量產之外，亦可應用於複合光學元件以及微結構之研究，例如微柱狀鏡陣列、微透鏡陣列、平面光學元件、次波長光學元件及生醫晶片等。



1.2 研究目的

本研究目的主要為開發光學玻璃微結構陣列的熱壓成形製程，利用 UV 雷射微加工技術搭配電解拋光技術與精密玻璃模造技術，經由實驗分析討論後取得各製程的最佳參數，完成玻璃光學微陣列元件。本研究有別於使用半導體製程之研究，希望經由低成本製程與材料，進行微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列之量產技術開發。

本研究之重點工作為：

- (1) 經由雷射微加工實驗，搭配田口實驗法，獲得微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列掃描圖形之雷射最佳加工參數。
- (2) 銜接上述實驗結果來探討最佳電解拋光時間。
- (3) 利用田口實驗法分析玻璃模造製程參數對玻璃成形結果之影響。
- (4) 藉由共軛焦顯微鏡、掃描式電子顯微鏡，來評估微光學元件表面幾何形貌及表面粗糙度。
- (5) 利用上述實驗所取得之最佳加工參數，完成玻璃微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列元件。

1.3 文獻回顧

1.3.1 微透鏡陣列

微透鏡依成像原理可分為折射式光學元件 (Refractive optical elements ,ROE)[4]與繞射式光學元件(Diffractive optical elements ,DOE)[5]兩種。折射式光學元件是利用光在不同介質中傳播時，因不同折射率的分布達到聚光或散光的功能，且較容易獲得大的數值孔徑(Numerical aperture)、光學效率較高、適用波長較廣。繞射式光學元件則是利用繞射原理來達成聚焦效果，繞射式的體積與重量都較折射式小，而且具有高的繞射效率，材料的選擇範圍也比較廣，擁有特殊的光學特性。總結以上原因，使得折射式光學元件與繞射式光學元件在微光學系統中仍同時佔有十分重要的地位[6]。

本研究探討折射式微透鏡陣列之成形技術。以目前製作微透鏡陣列的文獻可分成半導體製程與超精密加工製程。以半導體製程文獻而言舉出下列幾種方法：

- (1) 熱熔法(reflow)：1664年Robert Hook [7]提出以熱熔法製作微透鏡，需先將光阻或高分子材料經過曝光顯影後，於基板上形成直徑數百或數十微米之圓柱。再將基板加熱至轉化溫度(Tg點)後，光阻圓柱開始熔化，因內聚力與表面張力而形成半球形，最後以反應離子蝕刻法(reactive ion etching)將光阻形狀複製到基板上，形成半球形透鏡。

- (2) 微粒滴(droplet)法：利用類似噴墨印表機的噴口，直徑為數百或數十微米的噴嘴。首先將光阻或高分子加熱再經由材料噴出，粒滴因表面張力而形成半球形，並透過控制平台移動製作出微透鏡陣列，其直徑為數十微米到數百微米[8]。
- (3) 體積膨脹法(volume swelling)：使用高能量光源（X-ray、電子束等）透過光罩照射基板(PMMA)。利用高能量打斷PMMA之分子鍵結，被照射部份產生化學鍵結改變與有機單體擴散等效應。由於被照射區域的分子量高於未被照射區域，故被照射區會因表面張力而隆起成半圓球形[9]。

以上均為半導體製程，其材料以高分子材料為主。微奈米製程雖然可以做到較小的尺度，但對於玻璃材料之研究卻是相當困乏。

超精密加工製程主要區分為超精密鑽石車削技術、超精密鑽石輪磨技術以及精密玻璃模造技術[10-11]。若要加工玻璃材料，則使用鑽石輪磨技術以及精密玻璃模造技術，但是鑽石輪磨技術只能單件式的加工、加工速度緩慢且有鑽石砂輪磨耗等技術問題。因此藉由精密玻璃模造技術可批量的快速製作高精度光學微陣列元件。有關於玻璃模造技術文獻將在1.3.5節詳細說明。

1.3.2 微柱狀鏡陣列

近年來 3D 裸視顯示技術已越來越被重視，其中微柱狀鏡元件於裸視技

術中佔有重要的腳色。目前 3D 顯示器廠商普遍採用 2D 多工式(Multiplexed 2D)之裸視法。其原理為將液晶面板的畫素分成若干個奇數畫素及偶數畫素的影像對。奇數畫素影像對提供觀賞者一眼的影像，偶數畫素影像對則提供觀賞者另一眼的影像，而影像對的多寡，則決定了視域的多寡。此外利用柱狀透鏡(Lenticular lens)將光線分光，再將其交叉排列，進而將奇數畫素與偶數畫素的影像。分別投影至觀賞者的兩眼，利用大腦可以將左右眼所看到的不同影像，融合在一起，如圖 1-1 所示。因此不需要透特殊眼鏡即可產生立體的影像，目前已出現小量之商業化產品。

柱狀透鏡是利用製作成長條狀的凸透鏡，將奇數和偶數列畫素的光線以不同角度平行射出。因此在一定距離和角度內，左右眼造成視差，即會看到不同的影像。柱狀透鏡的優點，在於不會犧牲螢幕亮度，不過會有多視角而造成解析度下降的問題。

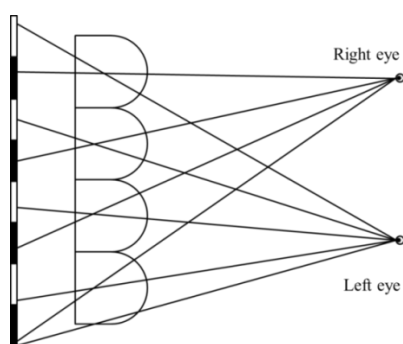


圖 1-1 利用柱狀鏡產生立體

此外飛利浦(Philips)公司則是將柱狀透鏡內部注入液晶，利用電場

控制其柱狀透鏡的聚焦特性(圖 1-2)，而便於 2D/3D 的切換。若柱狀鏡的對準無法非常準確，則容易造成散射與立體影像的成像模糊[12]。

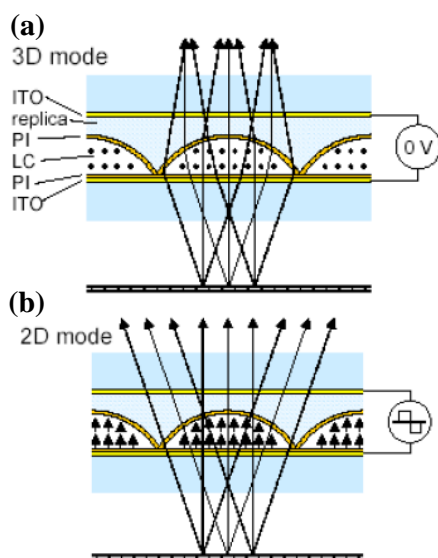


圖 1-2 可切換式液晶柱狀鏡[12]

2006 年 C.L. Le[3] 等人提出利用光阻回流技術配合化學氣相沉積(CVD)與感應耦合電漿(ICP)蝕刻技術，製作鑽石的微柱狀鏡與微環透鏡。其寬度分別為 $20\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ ，高度為 $1.2\ \mu\text{m}$ 如圖 1-3 所示。此外可達到均方根粗糙度可達 $3\ \text{nm}$ 以下，且擁有良好的橫截面圓形輪廓。該研究並說明利用鑽石優良的光學特性可應用於光束整形器、光學過濾器、微環共振器等。

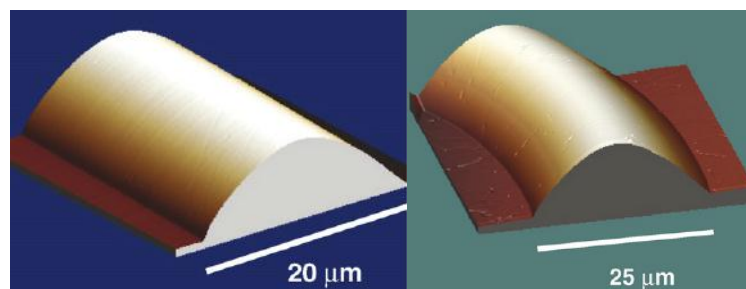


圖 1-3 (a)微柱狀鏡(b)微環狀鏡之 AFM 掃描圖橫截面[13]

2009 年 Shouyue[14]等人提出利用半導體製程與離子交換法，製作直交式的微柱狀梯度折射率透鏡陣列。藉由兩個柱狀鏡前後軸排列並搭配數值模擬的設計，進行雷射二極體的光束整形，以減少系統之能量消耗與光徑。其模型與製作流程見圖 1-4。

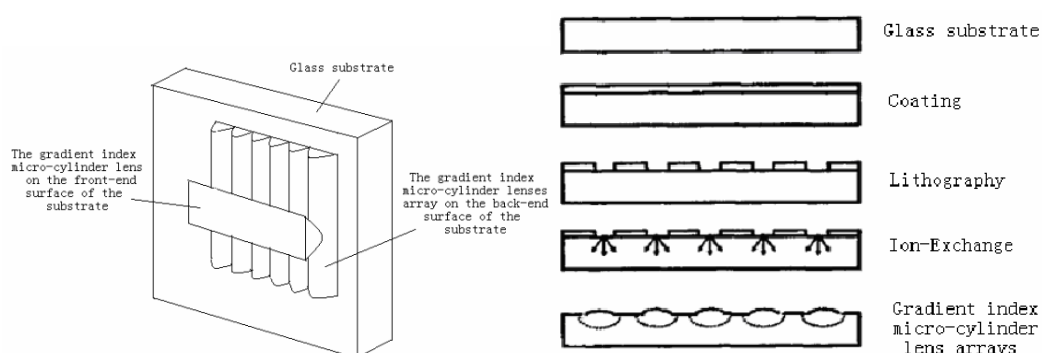


圖 1-4 (a)直交式的微柱狀梯度折射率透鏡陣列模型(b)其製作流程[14]

1.3.3 雷射微加工技術

雷射微加工已廣泛運用在現代工業上。其可對任何可吸收雷射波長之材料加工，雷射加工為非接觸式加工，可快速的製作任意微結構圖形且具有高深寬比。

1997 年 M. Wakaki 等人提出利用波長為 10.6 μm 之 CO_2 雷射[15]，直接加工於玻璃基板上(Corning 7059)。當玻璃基材表面溫度上升時，玻璃開始軟化變形，直到上升至工作點溫度時(1160 $^{\circ}\text{C}$ for Corning 7059)，雷射照射周圍因玻璃融化所產生之表面張力效應開始出現圓形凹洞，進而中間形成微透鏡結構。研究中發現雷射照射時間嚴重影響透鏡尺寸。由實驗數據

得知在相同功率、光斑大小以及雷射光束尺寸下，CO₂雷射照射時間越長可得到尺寸越大的微透鏡，如圖 1-5 所示。

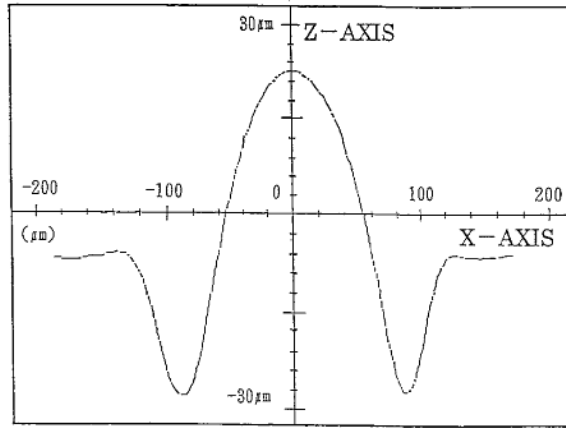


圖 1-5 微透鏡陣列之橫截面 3D 輪廓[15]

此外 2010 年 Daniel Nieto[16]等人利用 Nd:YVO₄ (摻釹鈮酸鈮)laser，其波長為 1064 nm，並搭配振鏡系統直接於鈉玻璃表面進行加工。可低成本且快速的製作出透鏡尺寸為直徑 10 μm 與高 0.8 μm，表面平均粗糙度 3.84 ± 0.01 nm，焦距長 117.67 ± 3.82 μm 及 126.33 ± 3.64 μm 的正方形與三角形的微透鏡陣列，如圖 1-6 所示。

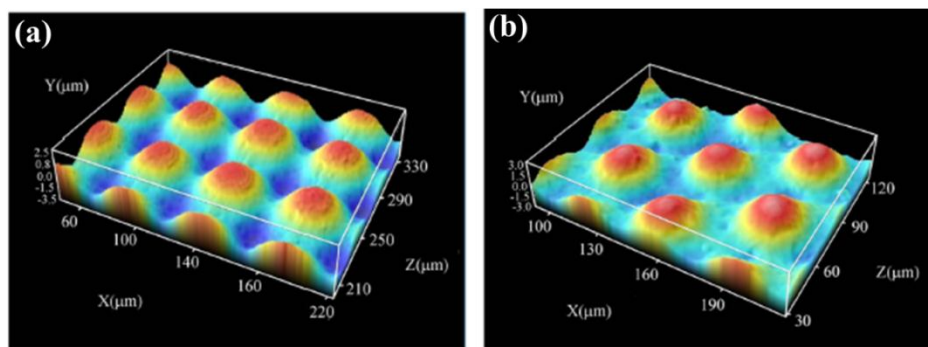


圖 1-6 共軛焦顯微鏡觀察(a)正方形(b)三角形之微透鏡陣列[16]

2007年 Hong-Tsu Young[17]等人利用飛秒雷射與 Nd:YVO₄ 雷射對不銹鋼材料進行加工，並探討其差異性。經由實驗結果指出，隨著飛秒雷射脈衝數量增加，不銹鋼板的蝕刻深度也隨之增加、剝蝕速率降低且原始材料表面之粗糙度對加工品質並無顯著影響。但於 Nd:YVO₄ 雷射實驗中發現，雖雷射脈衝數量增加，不銹鋼板的蝕刻深度亦隨之增加。但在相同之雷射平均功率下，較高的雷射重複頻率，能達到較佳的表面加工精度。

1.3.4 電解拋光技術

電解拋光之理論於1936年Jaquet[18]提出，電解拋光和機械拋光相比，因電解拋光沒有機械力的作用，不致引起表層金屬流動，而可出現拜爾培層(Beilby)，此層改善了金屬表面的質量，使其具有更好的表面精度、耐蝕性和表面反射率。

1982年Faust[19]指出電解拋光過程中於工件表面會產生黏稠層，使表面凹點黏稠層較厚，電阻較高溶解速度較慢、凸點黏稠層較薄，電阻較低溶解速度相對較快，並符合歐姆定律產生整平的效果。拋光後，黏稠層底部會形成緻密的鈍化層，拋光後的表面潔淨、平滑且光反射均勻。

1966年Hopenfeld[20]等人實驗證明，金屬之析出量，取決於電極之間各點的電流密度(current density)。導電度隨著流速增加而變大，直到臨界值。此外於電解拋光系統中加入擾動系統，產生強制對流使電解液擾動，加快

質傳作用，使覆蓋於電極上之氣泡脫離。可保持電流穩定與孔蝕減少，提高電解拋光品質。

在1996年時Raman[21]進行不同金屬與合金的電解拋光，探討拋光過程中包括電解液溫度、黏度、濃度、工件表面粗糙度、攪拌速度、拋光時間及電極距離等變數影響。由結果得知電解液溫度升高時電阻值會下降，拋光所需電壓亦隨之下降。電解液攪拌可增加工件陽極與陰極之間離子的移動量，且在適當與穩定之攪動速度下可改善拋光的品質。在一定的電壓下，若增加電解液濃度，電流密度會提高，但電解液黏度則與電流密度成反比。

1.3.5 精密玻璃模造技術

目前市場上越來越多的光學與光電產品逐漸使用微小化鏡頭，其解析度與穩定性的要求也逐漸增高，由此趨勢使得光學性質佳的玻璃微光學元件需求急增。

玻璃模造技術最早是 1974 年由 Eastman Kodak 美國專利(US patent 3833347)提出[22]，至今發展已 30 多年。因諸多原因無法技術整合，導致生產成本無法下降，產品自然無法打入消費市場。日本的研究光學領域雖然較晚，但目前已發展出低成本的非球面玻璃量產技術，不僅帶動微光學元件的總產值，也帶動光學與光電產業的國際競爭力[1]。

2007 年日本 Masaharu Takahashi 等人[23]利用玻璃碳(GC, Glassy Carbon)

作為模仁材料，利用切割加工與機械加工的方式，於模仁上製作出不同深寬比的棋盤狀與金字塔型之 3D 微結構，利用 Pyrex 玻璃進行熱壓。Masaharu 認為濕式蝕刻的加工解析度太低、表面精度太差，乾式蝕刻速度太慢且成本過高，所以才提出熱壓技術來製作玻璃微光學元件解決上述之問題，如圖 1-7 所示。此外 Masaharu 認為光學塑膠材料雖然輕且成本低，但光學玻璃材料較適合高溫環境的應用、化學穩定度較高、對於 UV 光線吸收低、高折射率低色散等優點，所以比塑膠材料更適合應用於光學微機電(Optical MEMS)、生醫流體機電(Fluidic MEMS)上。

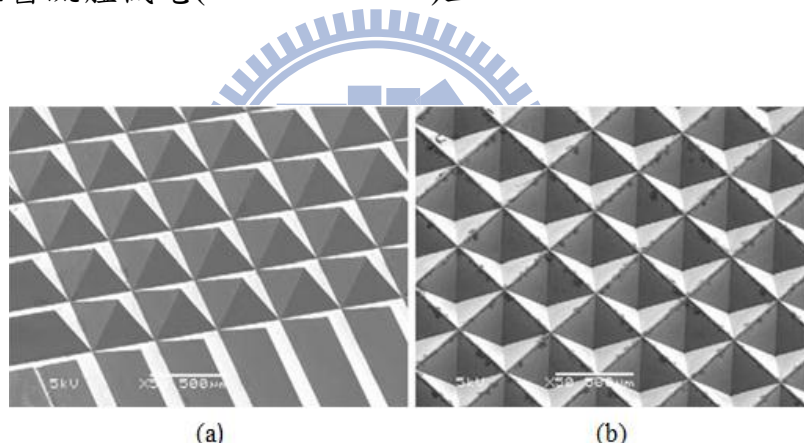


圖 1-7 三維 GC 模仁微結構(a)先經機械加工(b)再熱壓於玻璃[23]

2005年 G. C. Firestone 與 A. Y. Yi [24]提出利用邊角不同形狀來進行擠壓玻璃成形微透鏡與微透鏡陣列。針對BK7、K-PG325與鈉玻璃(soda lime glass)，模仁材料選用碳化鎢、316不銹鋼、715 銅鎳合金、鋁合金。探討模仁邊角為垂直、導圓角、導直角後進行壓印的參數，討論應力、應變率、總應變的差別。結果指出成形溫度、成形速度、冷卻時間、模仁形狀設計，

均會影響成形時的幾何形狀。並發現過大的應力容易造成玻璃擠壓過度而變形，如圖1-8所示。

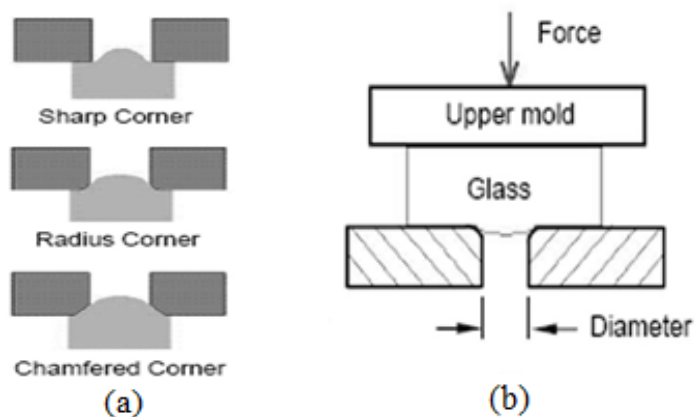


圖 1-8 玻璃模造示意圖 (a) 三種不同邊角之影響(b)微透鏡成形[24]

2009年Ray-Quen Hsu[25]等人利用鑽石切削在電解鎳模仁製作出平行的V溝陣列，並結合玻璃模造技術於FCD 1 (Hoya)與SF2 (Ohara)玻璃上熱壓出V溝陣列。探討模仁與材料之間的作用壓力、保壓時間、脫模溫度、玻璃溫度等。研究結果顯示成形溫度高於 T_g 點(glass transition temperatures) $35 - 55^{\circ}\text{C}$ 時有最佳的成形精度，此外也建議應注意脫模溫度與使用脫模劑，以防止玻璃損壞或沾黏在模仁上，如圖1-9所示。

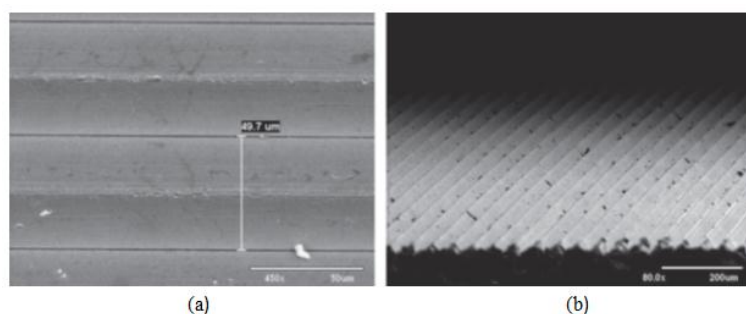


圖 1-9 鎳板上之連續水平陣列(a)上視圖(b)側視圖[25]

1.4 論文架構

本論文主要以UV雷射在不銹鋼材料上加工出微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列模仁。再經過電解拋光並結合玻璃模造技術製作光學玻璃微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列。對其基本原理、設計方法、製造過程與檢測結果，作一系列的介紹。內容一共分五個章節，分別為：

第一章、緒論

介紹本文研究動機、目的與研究中使用技術之文獻探討

第二章、實驗原理與技術介紹

說明實驗中應用之技術原理。

第三章、實驗方法與步驟

說明實驗流程規劃、設備與材料規格

第四章、初步結果與討論

針對微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列實驗分別探討雷射微加工、電解拋光與玻璃模造技術參數對成品之影響，建立參數資料，並探討最佳實驗參數。

第五章、未來展望

提出本研究未來可繼續深入探討之項目，進一步使研究成果更臻完整。



第二章、 實驗原理與技術介紹

2.1 光學玻璃介紹

微光學元件中以高分子材料與玻璃使用的最為廣泛。其中高分子材料因比重小、成本低以及耐機械衝擊性高等因素，較為目前業界所青睞。但在高階光學應用，玻璃的高折射低色散、光學成像品質、抗刮性、耐有機物質腐蝕能力以及耐高溫等優點，則是高分子材料所不能及的。表 2-1 為玻璃與高分子材料特性之比較[26]。

光學玻璃成分主要是使用高含量的矽與硼、鈉、鉀、鋅、鉛、鎂、鈣、銀等元素的氧化物，因需求不同而按特定的配方混合而成。目前以德國、日本、美國與中國為光學玻璃材料的主要供應商，例如 Schott、Hoya、Ohara、Corning 等。

表 2-1 光學玻璃與光學高分子材料[26]

Material Property	Optical Glass	Optical Polymer
Refractive Index	1.5~1.9	1.3~1.7
Abbe Number	20~ above 65	25~55
Birefringence	No	Yes
Transmittance coefficient	85~95	Above 90
Spectra Range	370~above 1500 nm	400~1100nm
Glass Transition Temperature	380~570°C	70~130°C
Linear Expansion Index	$70\sim 130 \times 10^{-7}$	More than glass 10 times
Specific Weight	2.2~7.3	1.0~1.5

2.2 光學玻璃分類

如圖 2-1[27]所示，以 Schott 公司玻璃材料為例，光學玻璃主要利用阿貝數(Abbe number, v_d)與折射率(Refractive index, n_d)來進行分類並加以編號。主要分為冕冕玻璃(Crown Glass)與火石玻璃 (Flint Glass)。冕冕玻璃($n_d < 1.60$, $v_d > 50$)具有較低的折射率與較高的阿貝數，代表色散程度較小，火石玻璃($n_d > 1.60$, $v_d < 50$)具有較高的折射係數但阿貝數較小，代表色散的程度較大。2007 年 7 月歐盟環保法令開始實施，限制光學玻璃原料中不能含有鉛(Pb)、鎘(Cd)、砷(As)等重金屬，並於玻璃編號前加一英文代號表示，譬如 Schott 的未含管制之重金屬 FK5 玻璃編號為 N-FK5。此外，不管那一種玻璃原料，皆有一國際編碼，其編碼若為 501564.252 則代表 $n_d = 1.501$ 、 $v_d = 56.4$ 、玻璃密度為 2.52。

以光學玻璃而言最重要之性質為折射率、阿貝數以及穿透率(Transmittance)，通常利用汞(Hg)、氦氖(He-Ne)、氫(H)、鎘(Cd)、氦(He)雷射光源來量測。利用光學玻璃在不同波長光源會有不同的折射係數、阿貝數以及穿透率來進行光學玻璃品質的鑑定。

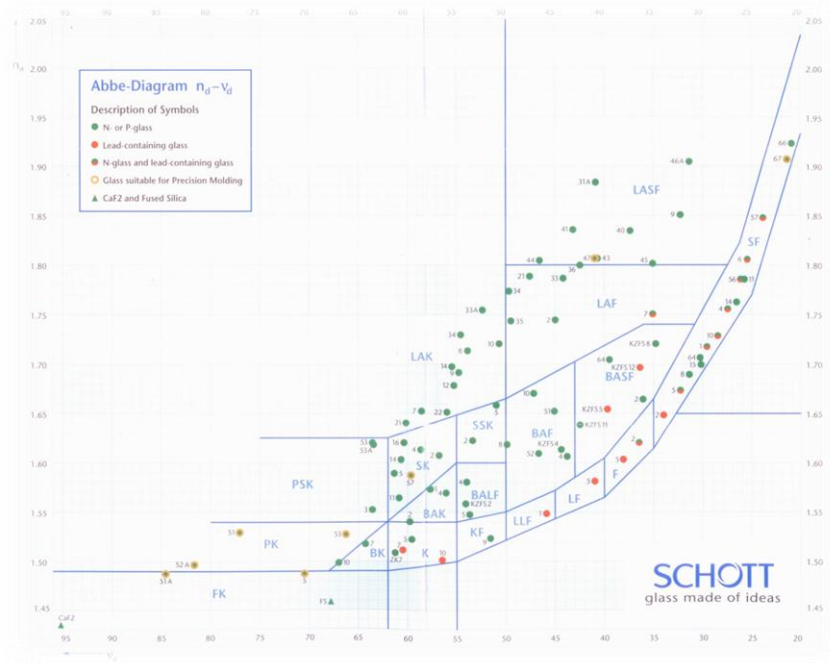


圖 2-1 Schott 公司玻璃毛胚品種圖[27]

2.2.1 折射率

玻璃的折射率(n)公式定義為光在真空中的速度(c)與在光在玻璃介質中的速度(v)比，折射率越高的玻璃材料，其曲折光的能力越好。一般光學玻璃折射率介於 1.5-1.9 之間[1]。其公式如下：

$$n = \frac{c}{v} \quad (2-1)$$

玻璃材料對於不同的入射波長光源會有不同的折射率，以 n 之下標符號來表示所使用的光源波長，例如 n_d 是指玻璃材料在波長為 587.56 nm 的折射率、 n_F 是在波長為 486.1 nm 的折射率、 n_C 是在波長為 656.3 nm 的折射率。

2.2.2 阿貝數(色散)

當一白光通過稜鏡時，紅光的速度最快而紫光最慢，因為折射率會隨者波長變長而變小。造成不同波長的光分散開來，如圖 2-2 所示，此為色散也稱為阿貝數，阿貝數越小代表光通過玻璃材料色散的程度越大，反之阿貝數越大代表其色散程度越小。對於光學成像系統而言，色散是必須避免與修正的。一般光學玻璃阿貝數介於 20-90 之間。

阿貝數可由折射率計算而出[1]。其公式如下：

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2-2)$$

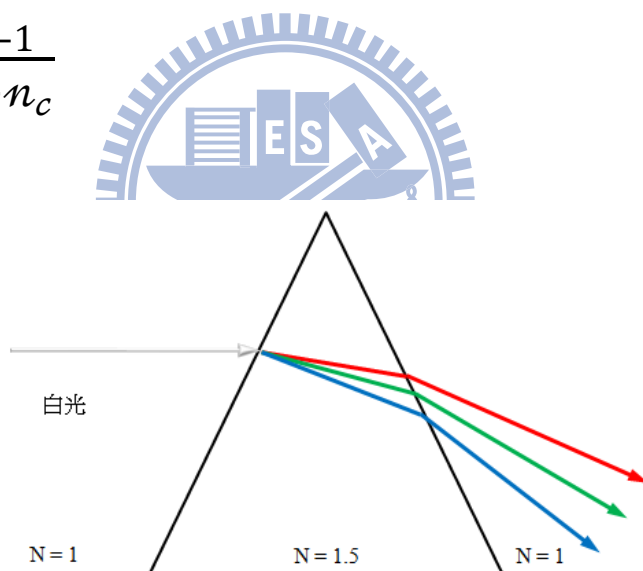


圖 2-2 光經過不同介質產生色散

2.2.3 穿透率

穿透率通常使用光譜分析儀與分光光譜儀進行量測。一般未鍍抗反射膜之玻璃基材，其對可見光譜之穿透率約為 96%。光學系統中，由於每個

材料對不同波段光譜的穿透率都不相同。光學玻璃製造廠商也會針對材料標注其穿透率低的波段，例如 Schott 提供的 Color code 33/29，表示厚度為 10 mm 的玻璃基材，在波長 330 nm 光線穿透時，其穿透率剩下 80%，而在波長為 290 nm 時，穿透率僅剩 0.5% [1]。

2.2.4 機械與物理性質

光學玻璃的機械與物理性質主要分為硬度、可研磨性以及熱膨脹係數等。玻璃材料的硬度單位為 HK (Knoop hardness)，數值越高表示能承受的應力越大。可研磨性(Grindability)則是以材料互相的研磨，以能研磨掉的多寡來分類。研磨等級用 HG 表示，數字越低表示所能移除的材料越少，也代表其材料不易研磨。

熱膨脹係數(α)一般指溫度於 -30 - $+70^{\circ}\text{C}$ 之間的平均熱膨脹係數。對於較高熱膨脹係數的玻璃材料而言，若外在溫度急速改變而導致體積的急速變化，容易造成材料因內應力影響而破裂。大多數玻璃材料的熱膨脹係數介於 $7-13 \times 10^{-8}$ [1]。

2.2.5 化學性質

玻璃的化學性質係指玻璃材料在拋光後，其鏡片表面對於氣候環境以及酸鹼環境之間所有可能產生的化學反應，而影響到光學玻璃的精度。主

要分為氣候的抵抗性(Climatic resistance)與抗沾黏性(stain resistance)。氣候抵抗性，對於濕度與溫度較高之環境，玻璃容易產生霧面而無法處理。抗沾黏性又分成酸性與鹼性的抵抗程度，玻璃材料在標準微酸或微鹼溶液測試中，鏡面約會有 1 um 的表層產生色斑或損耗，依其程度再做分類[1]。

2.3 傳統研磨拋光技術介紹

傳統製作光學玻璃透鏡主要利用研磨拋光技術。雖然近年來已發展許多 CNC 的數值控制技術，可取代一些人工製程與使用肉眼判讀的檢測技術，但大多製作上還需仰賴傳統的加工技術。

傳統研磨拋光製程如圖 2-3 所示，主要分為選材、切割、圓整、成形、研磨、拋光、定心、鍍膜與膠合，其中以研磨與拋光部分最為費時。本小節將介紹各工序之製作[1]。

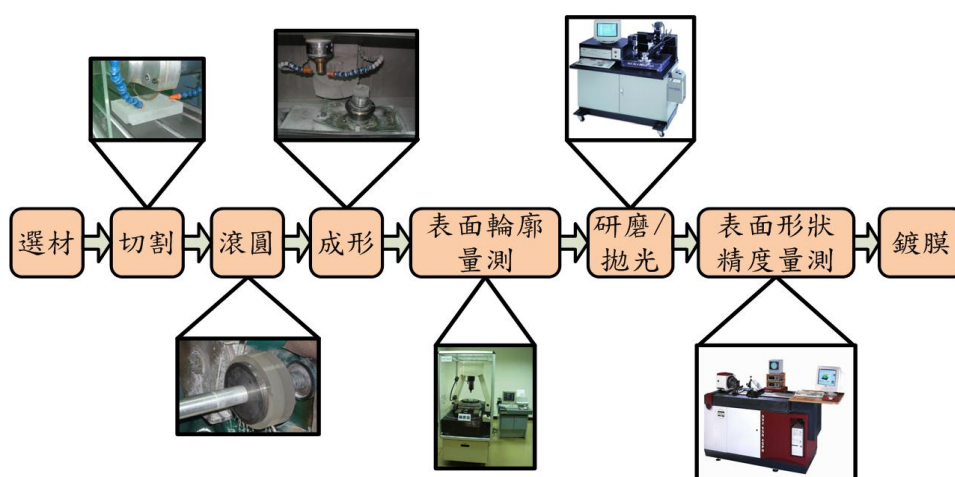


圖 2-3 傳統玻璃研磨拋光技術流程[1]

2.3.1 切割

玻璃由製造廠商取得時通常為塊材或板狀胚料，將胚料切割成所需要大小。切割前先使用鉛筆或油性筆畫出所需尺寸。於玻璃胚料切割時需注意：

- (1) 切割時必須先預留定心、圓整與研磨加工的消耗量。
- (2) 切割方向須避開胚料內的結石、結疤、脈紋與氣泡等缺陷。
- (3) 切割形狀盡量簡單，如正方形。

2.3.2 圓整

切割完成的方形胚料將其黏成棒狀，於柱棒兩端各貼上一有衝心鑽孔之金屬柄，以兩個衝心鑽孔頭貼緊於整圓機上，利用鑽石磨輪進行整圓動作，即可得到一般所見圓柱透鏡[1]。



2.3.3 成形

成形的的方法包括杯形鑽石輪磨、鑽石車削、鑽石研磨等。主要是對圓整後玻璃胚料進行曲面加工，利用控制刀具路徑來決定曲面輪廓。以杯形鑽石輪磨為例，鑽石磨輪刀口半徑為 r 、直徑 D ，中心傾斜角 α 與被加工透鏡之曲率半徑 R 之關係如下[1]：

$$\text{加工凸面}(R + r) \sin \alpha = \frac{D}{2} \quad (2-3)$$

$$\text{加工凹面}(R - r) \sin \alpha = \frac{D}{2} \quad (2-4)$$

2.3.4 研磨拋光

透鏡於上述諸多加工後表面會產生許多刀紋、刺孔等缺陷，需經研磨過程除去較大的缺陷[1]。研磨前需要三個步驟：

- (1)倒角：研磨過程中，為避免邊角損毀、增強邊角抵抗力等因素需要經過倒角的步驟。
- (2)透鏡的貼附：透鏡貼附於磨碗上需添加黏著劑，通常使用松香蠟或瀝青，貼附於磨碗上的透鏡數量將影響產能與研磨難易度，如圖 2-3 所示。
- (3)磨料：針對不同材料需選擇不同的磨粒進行研磨。

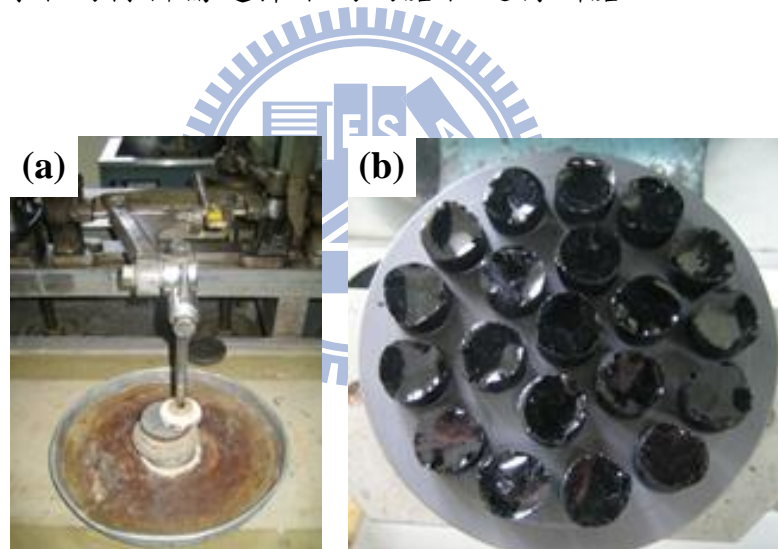


圖 2-3 透鏡(a)研磨中(b)以瀝青為磨碗之黏模劑

2.3.5 定心

球面透鏡雙邊曲面之曲率中心連線稱為透鏡光軸，透鏡在成形、研磨拋光中會使幾何軸心與光軸產生傾斜，稱為偏心，為了消除此偏心，需經過對心及磨邊程序，此兩道程序即稱為定心[1]。

2.3.6 鍍膜

光學薄膜就是在鏡片上鍍上一層或多層非常薄的特殊材料，使鏡片能達到某種特定的光學效果。光學薄膜在製造上通常以真空蒸鍍的方式製作，可分為電熱組式、電子槍式和濺鍍式[1]。以用途大致可分為：

- (1) 濾光膜：經過膜層設計，可決定是否使某光波段範圍通過，例如 UV-IR 截止濾光片是為阻止紅外光與紫外光之元件，減少紅外線對元件的傷害也藉此減少因紅外光所產生之熱。
- (2) 反射膜：使光學元件表面產生反射，通常用於反射鏡面，鋁的反射率在紫外光、可見光、近紅外光均有良好的反射率，是鍍反射鏡最常使用的材料之一。
- (3) 耐磨膜：主要是增加光學透鏡之抗耐磨耗之膜層，增加表面硬度，提昇產品的使用壽命，達到保護作用。
- (4) 抗反射膜：由於光通過不同介質之鄰接界而產生反射，使的光通量降低，甚至多重反射造成眩光。藉由抗反射膜可有效解決因介面反射所造成的光學問題。

2.4 雷射微加工技術介紹

光為橫波也是電磁波，由大量的光子所組成，雷射(Light Amplified Stimulated Emission of Radiation, laser)也是一種光。雷射具有高單色性、高

方向性、高時間相干性、高空間相干性以及高能量密度等優點。依照雷射能源供給能量的形式可分為連續式(Continue wave laser)與脈衝式(Pulsed laser)。

2.4.1 雷射基本組成

- (1) 介質(Medium)：以增益介質來區分雷射的種類與命名，如化學雷射、氣體雷射、半導體雷射、液體雷射、固體雷射等。只有當介質處於粒子數反轉(Population Inversion)分佈狀態時，通過介質的光才能被放大，也才有可能產生雷射。
- (2) 激發光源(pumping)：使基態原子受光源激發能遷移至受激態的能量。
- (3) 共振腔：主要提供軸向光波模的光學正回饋與控制振盪模式的特性，令光於腔內不停反覆，使增益介質不斷放大，達極限時產生單色的雷射光[28]。

2.4.2 雷射激發原理

原子由原子核與圍繞著原子核的電子所組成，電子以一定的軌道繞轉，每層軌道都有不同能量，而距離原子核越遠的軌道能階越高。

當電子受到外在光子激發時，由基態躍進至受激態，但只會維持 10^{-8} 秒左右即恢復基態，在恢復基態時因能階較低而放出光子。如果電子為自發性吸收光子而由基態躍遷到受激態，並自發地釋放光子而由受激態恢復到

基態，則稱之為自發吸收與自發放射。雷射機制屬於誘發性的放射，如圖 2-4 所示，當電子處於受激態時，剛好有外在適量的光子入射，此光子並不會被吸收而是誘導受激態電子降回基態，並釋放出與入射光子相同波長、相同方向與相位的光子，以此連鎖效應可產生大量相同的光子。但因受激態之電子維持時間太短，而大部分的電子都處於基態狀態，於是必須持續給予能量，當達到受激態的電子密度高於基態的電子密度，使雷射介質處於粒子數反轉的狀態，才能產生雷射[29]。

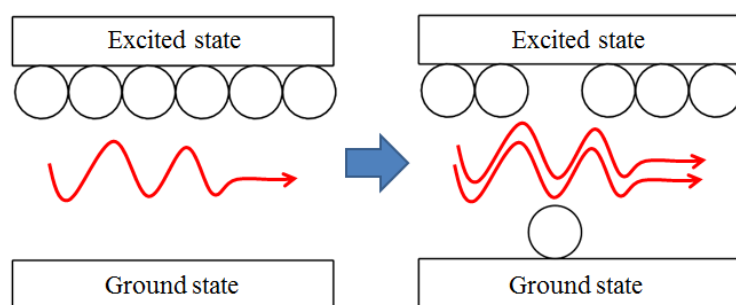


圖 2-4 誘發放射原理[29]

2.4.3 雷射加工機制

雷射微加工廣泛應用於工業與科學研究上，依據不同材料對不同雷射波長吸收的不同而選用不同雷射，並且可藉由不同聚焦長度的透鏡將雷射光束聚焦成不同能量密度(w/cm^2)的光斑(spot size)作為不同用途，如退火、劃片、光刻、清洗等應用。雷射加工主要機制分成：

(1) 光熱作用(Photo-thermal)

奈秒雷射加工時，材料吸收雷射光子之後，因能量轉移到晶格上造成

晶格震動而生熱，導致熱熔解、熱汽化、熱應力等改變顯微組織的熱影響產生，並透過熱擴散機制將能量傳遞到加工區域周圍，熱擴散長度與雷射脈衝寬度平方根成正比。對具有較高熱傳導係數的金屬材料而言，將產生較大的熱影響區(Heat-affected zone, HAZ)，大小約 $1\ \mu\text{m}$ 。且因受限於熱影響區的大小，奈秒雷射加工不易製作小於 $1\ \mu\text{m}$ 的形狀特徵，本研究即為此機制[30]。

(2) 光化學作用(Photo-chemical)

光化學作用通常發生在超快雷射(femto-second laser)等級，在光能量大且波長短的情況下，電子吸收足夠的光子能量後脫離原子或分子間的鍵結，而失去電子的原子核或離子也因彼此間均帶著正電而產生互相排斥的現象，通常以電漿的模式脫離母材。光化學作用是利用直接切斷鍵結的方式來移除材料，由於雷射的脈衝寬度小於電子與晶格間的能量轉移時間(τ_a ，約 $10\ \text{ps}$)，所以不會產生因晶格震動而生熱的現象，因此熱影響區也大幅減少，可獲得較好的加工品質，也稱為雷射的冷加工。圖 2-5 為利用飛秒雷射於炸藥與火柴上加工[29]。

飛秒雷射屬於光化學作用中的多光子吸收機制，在極高功率密度且短波長之脈衝雷射下，其功率通常需大於 $10^{13}\ \text{W}/(\text{cm}^2)$ 。其光子密度越高，原子中的電子與多光子之非線性吸收的機會就更高。電子吸收其數個至上百個光子後，能量大於能隙($h\nu > E_g$)，並由價帶(Valance bond)跳脫至導電帶

(Conduction bond)而形成自由電子，即稱為多光子的解離(Multiphoton ionization)。導電帶中的自由電子再繼續吸收雷射多光子遷移到更高能階，到足夠能量時，撞擊附近其他原子中的電子，再產生一個自由電子，稱為衝擊離子化(Impact ionization)，藉此不斷的吸收與碰撞可產生大量自由電子。前述所提及因失去電子後，原子會因均帶正電而有庫倫排斥力的產生，形成崩落離子化的現象(Avalanche Ionization) [31]。

本研究使用波長為 355 nm 之 UV 雷射系統 AVIA 355-14 (COHERENT Inc.)來製做模仁上微結構，為了減少透鏡間隙，於不銹鋼材料(SUS 304)上製作外接圓 100 - 500 μm 六角柱狀結構陣列與 200 μm 、250 μm 、300 μm 之矩形陣列，其範圍為 10 mm * 10 mm，雷射加工過程中探討雷射脈衝重複頻率、掃瞄速度與不同微透鏡尺寸對其表面輪廓之影響，使用雷射共軛焦顯微鏡量測微結構幾何尺寸並探討最佳雷射加工參數。圖 2-6 為雷射架構示意圖，雷射經過兩個反射鏡之後進入偏振系統，於不銹鋼模仁上加工六角形微結構。

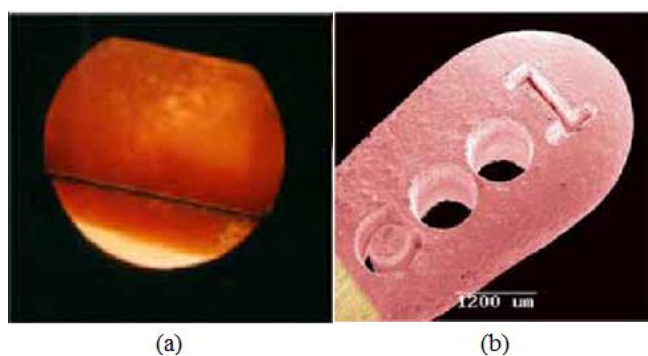


圖 2-5 飛秒雷射加工(a)炸藥(b)火柴[29]

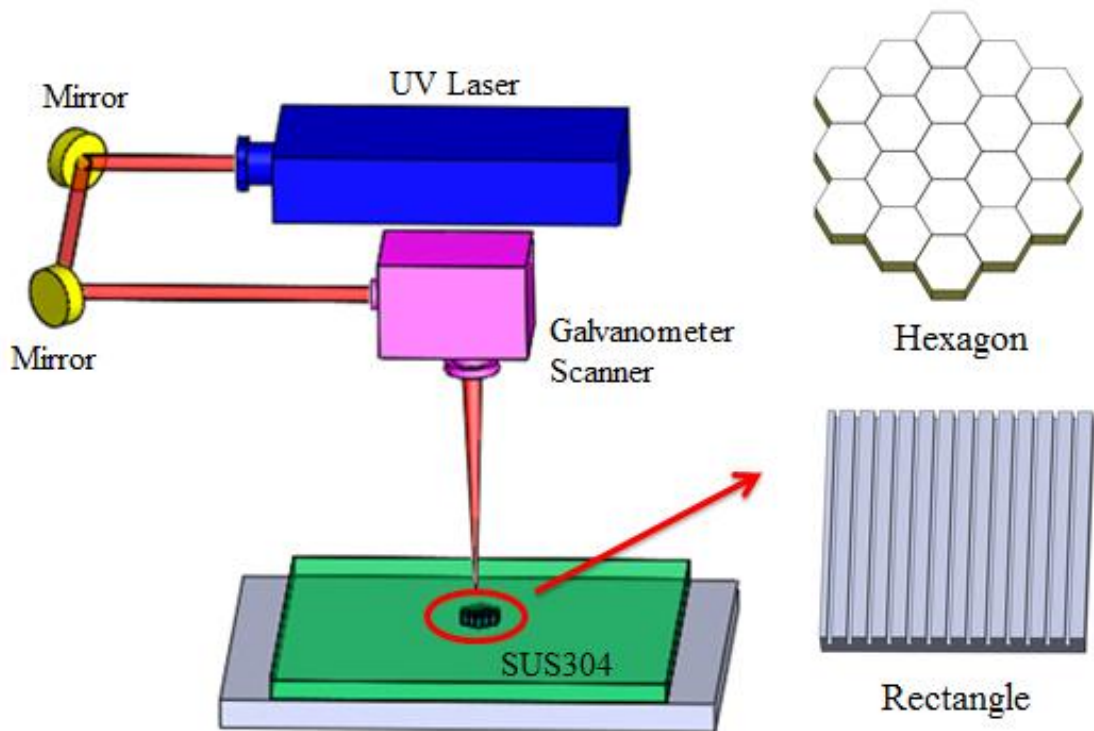


圖 2-6 UV 雷射加工架構

2.5 電解拋光介紹

2.5.1 電解拋光原理

電解拋光(electro polishing)，是非傳統加工方式，於充滿電解液的電解槽中將正極接上工件，負極接上電極，進行反電鍍的加工法。供給直流電後陽極金屬開始產生解離現象，達到金屬工件表面的平整(leveling)與光亮(brightening)。在電解拋光過程中，陽極工件表面發生氧化反應，並且生成氧氣；陰極電極表面則發生還原反應，產生氫氣。電解中，工件金屬層與電解液界面會產生鈍化層或稱之黏稠層(viscous layer)，由於工件凸起處距離陰極較近且黏膜層較薄，因此電流密度較高，故有較高的電解速率，反之工件低處有較厚的黏膜層，以及較低的電流密度與電解速率，因此試片

表面較高區域會因為黏稠層較薄而有較低電阻，根據歐姆定律優先解離的趨勢，達到表面平整，進而降低表面粗糙度[32]。

依據法拉第電解定律(Faraday's laws of Electrolysis)，電解過程中，電流 I 通過時間為 t 時，由電化學加工所移除的材料質量 w 可計算如下：

$$W = \frac{Mit}{ZF} \quad (2-3)$$

M 為金屬的原子量， Z ：原子價數，而「 M/n 」為化學當量(chemical equivalent)， F 為法拉第常數， $F = 96487$ ，約為 96500 庫侖/莫耳。 $F=96485.3383\pm 0.0083$ C/mol，「 $M/Z F$ 」為陽極金屬的電化學當量(electrochemical equivalent)。由公式(2-3)可知相同材料在電解過程中參與電極反應的質量與通過電極的電量及時間成正比。電解中，工件金屬層與電解液界面會產生黏稠層(viscous layer)，由於工件凸起處距離陰極較近且黏稠層較薄，因此電流密度較高，故有較高的電解速率。

2.5.2 電解拋光與機械研磨之比較

如圖 2-7 所示，傳統機械研磨拋光法雖然能快速降低表面粗糙度，但表面會產生微粒的累積，造成清理上的困難。不銹鋼材料經機械研磨後，其表面鈍化層嚴重收到破壞，容易導致不銹鋼氧化的現象。

電解拋光可補救傳統機械研磨拋光對不銹鋼所造成之傷害，利用工件表面反電鍍的原理，降低表面粗糙度達到平整光亮，並解離出鐵離子，產生含鉻之鈍化層（ Cr_2O_3 ），可增強不銹鋼表面抗腐蝕能力。但電解拋光目前在使用上仍然有其缺點[33]，如：

(1)被電解之工件需具導電性，且當工件為合金材料時，因不同的金屬成分對電解拋光機制有不同之解離速度，將使得工件難以得到均勻的加工。

(2)電解拋光所使用之電解液具有腐蝕性，需經過酸鹼中和之後方能排放，有環境上的問題。

(3)影響電解拋光成效的電解參數很多，不易控制，加工穩定性與重複性較差。表2-2為傳統機械研磨拋光與電解拋光之比較。

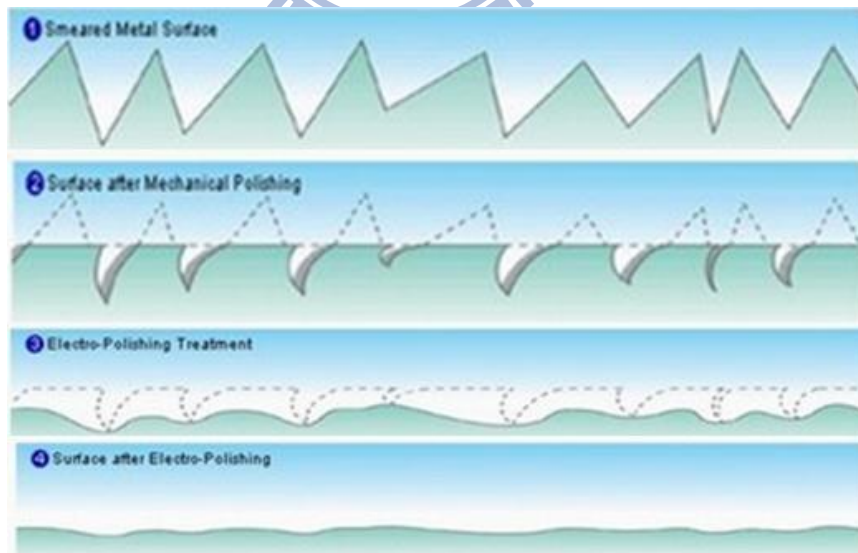


圖 2-7(1)原始工件表面(2)經機械研磨(3)電解拋光處理過程(4)經電解拋光後

[33]

表 2-2 電解拋光與傳統機械研磨之比較[34]

	傳統機械研磨	電解拋光
工作時對材料產生的塑性變形與應力	大	無
研磨亮面與抗腐蝕能力	較差	佳
處理形狀複雜與微觀尺寸工件之能力	差	佳
加工後於工件表面殘留之磨料與油脂	有	無
可達到鏡面效果	尚可	佳
加工所產生之熱造成金相變化與熱應力產生	較大	無

本實驗所使用之電解拋光機台為宇傑真空科技股份有限公司所提供。圖 2-8 為電解拋光機示意圖。

經雷射加工後模仁表面粗糙且有大量熔渣堆積隆起，透過電解拋光，使其表面粗糙度降低，若再增加拋光時間，可使表面形貌改變，使雷射加工後之六角結構陣列改變成為圓頂結構陣列。表 2-3 為本實驗所使用之電解液成分。

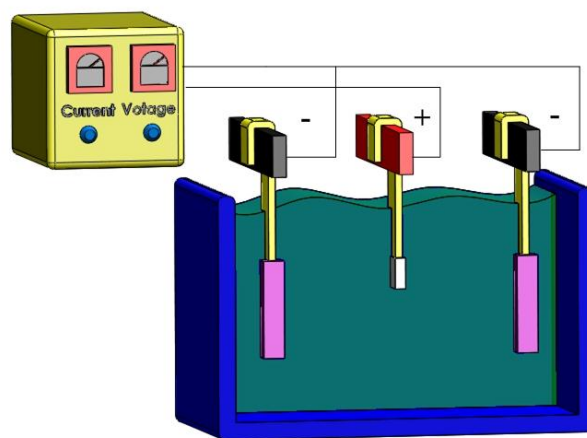


圖 2-8 電解槽示意圖

表 2-3 電解液成分

組成成分	比例
磷酸	40%~45%
硫酸	34%~37%
鉻酸	3% ~ 4%
水	17%~20%

2.6玻璃模造介紹

精密玻璃模造技術廣泛應用於各式光學元件，其可快速量產高精度光學元件。此技術包含模仁製作、預形體成形技術、模造參數控制以及硬膜技術。玻璃模造設備可分為連續式及單站式兩種，連續式可成形元件尺寸小，多使用在生產線上。而單站式多使用在製程研究或小型量產上，如Toshiba 207 HV之模造設備。其為一模多穴單站式系統，可全自動控制玻璃模造製程，也可依成形裝置位置或馬達荷重來控制加壓行程，系統操控彈性大，適合多種領域之應用研究。

圖2-9為玻璃模造製程流程圖。將玻璃預形體放在模造設備內模仁上，預形體有許多形狀，端視玻璃元件外型來設計，通常分為平板、球狀、棒狀或是水滴狀等，適當的預形體外形，可以提高模造製程的良率。為了避免腔體中氣體雜質影響玻璃元件品質，模造製程第二步驟會將腔體抽氣而成真空狀態，接著可選擇要讓腔體處於真空狀態或是在充填氮氣的狀態下進行玻璃模造製程。第四步驟利用石英燈管加熱模仁以及玻璃，加熱的溫度決定於玻璃材料的轉化點溫度，也就是俗稱的Tg點溫度以及玻璃的外形，利用石英燈管加熱，最高可達到1500 °C，甚至可以對高Tg點之石英玻璃進行加工。經過保溫時間後，模仁以及玻璃的溫度趨於穩定，可控制加壓力

以及加壓行程來進行熱壓程序，經過保壓程序後，以氮氣冷卻模仁及玻璃成品後即可取出。通常在生產線中，都是由機械手臂自動化進行模造製程。圖2-10為本研究系列所使用之模造設備，其為日本Toshiba之207HV高溫玻璃模造機，可加熱至1500°C。

玻璃模造技術利用加溫、保壓、冷卻等步驟達成光學玻璃的製作，由圖2-11所示，量產時，玻璃模造技術可取代傳統光學玻璃研磨技術，節省大量步驟與時間，傳統研磨一光學透鏡約需數個工作天，但精密玻璃模造技術僅需約二十分鐘即可製作完成一透鏡，且可精密的轉印模仁上之輪廓與精度。

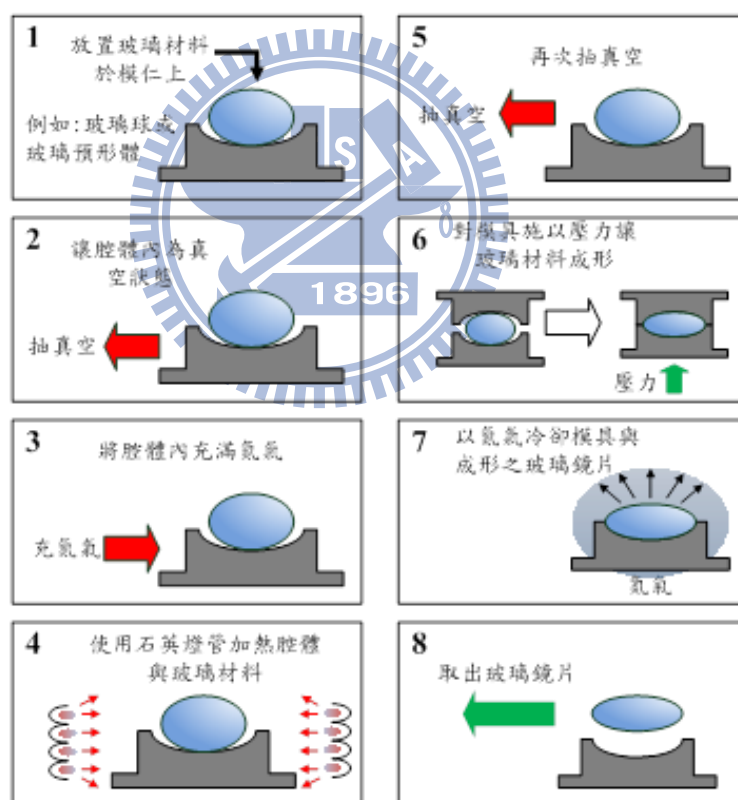


圖 2-9 玻璃模造流程圖[1]



圖 2-10 玻璃模造機

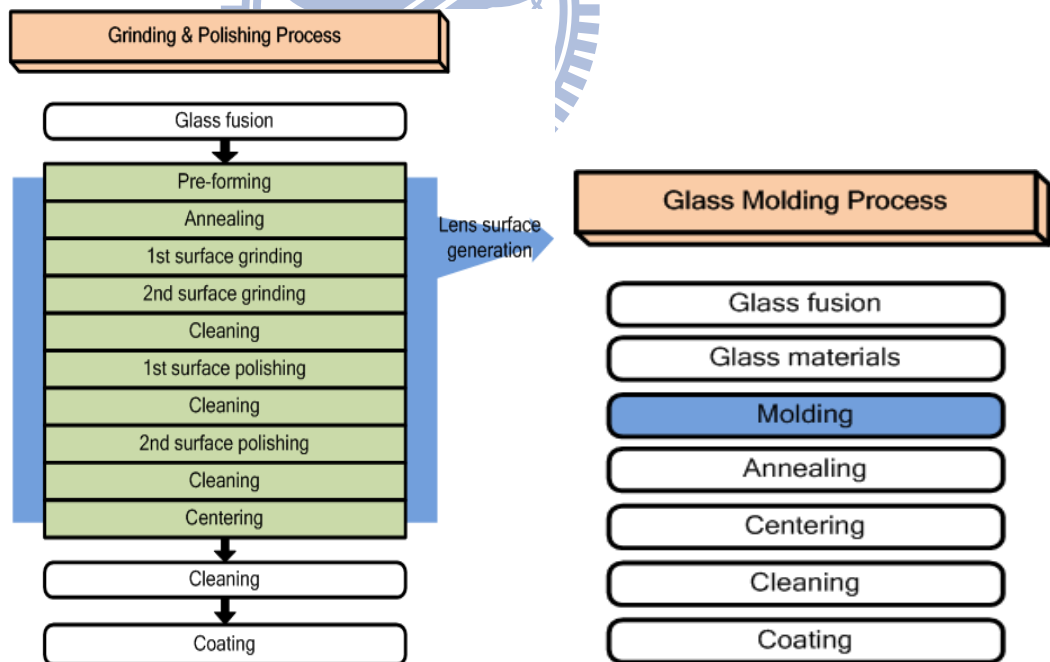


圖 2-11 模造技術可節省大量步驟[35]

第三章、實驗步驟與方法

3.1 實驗流程

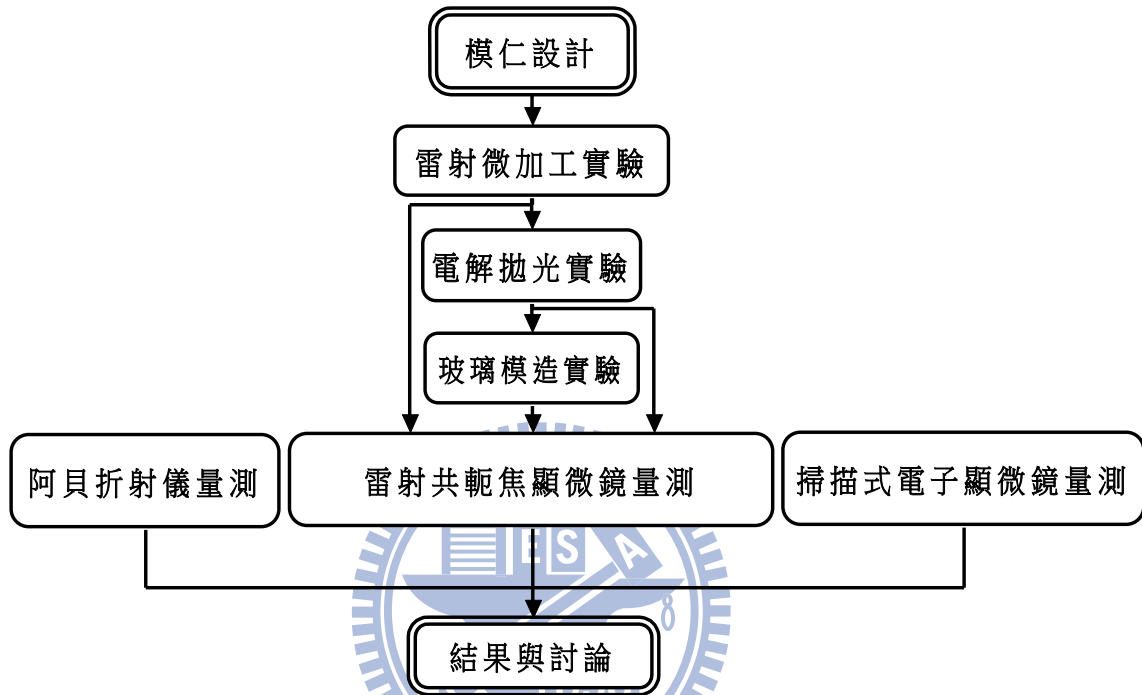


圖 3-1 實驗流程圖

本研究結合雷射微加工技術與電解拋光並配合玻璃模造技術製作玻璃微光學陣列元件，步驟如下：

- (1) 利用田口實驗法建立 L16 直交表，測試雷射參數對不銹鋼材料表面粗糙度的影響，測試範圍為 8*2 mm 之矩形。
- (2) 利用雷射微加工技術於不銹鋼模仁上製作出凸起之六角柱與矩形之陣列結構。
- (3) 探討諸多雷射加工參數，例如：掃描速度、脈衝重複頻率、掃描路徑，

比較其透過 3D 共軛焦顯微鏡量測結果。

(4) 將雷射微加工後模仁進行電解拋光。

(5) 電解拋光以時間作為參數，並利用 3D 共軛焦顯微鏡量測後，分析電解拋光時間對表面輪廓的影響。

(6) 透過控制玻璃模造參數，例如溫度與壓力，藉此獲得成形性最佳之玻璃元件，利用 3D 共軛焦顯微鏡、掃描式電子顯微鏡、阿貝折射儀，探討溫度及壓力對玻璃元件幾何尺寸與折射率的影響。

3.2 實驗材料介紹

3.2.1 不銹鋼材料介紹

本實驗所使用之模仁材料為 SUS304 沃斯田鐵型不銹鋼，尺寸為 40*40 mm，成分組成為 18~20% 的鉻(Cr)、8~10.5% 的鎳(Ni)和 66~74% 的鐵(Fe)。由於不銹鋼價格低廉，且電解拋光後之效果最佳，故使用不銹鋼作為模仁材料。

由於積體元件光學效率之關係，微透鏡陣列之雷射掃描圖形設計為外接圓直徑 100~500 μm 的無縫六邊形；微柱狀鏡陣列則為 200、250、及 300 μm 之組合對稱矩形圖形。如圖 3-2 所示。



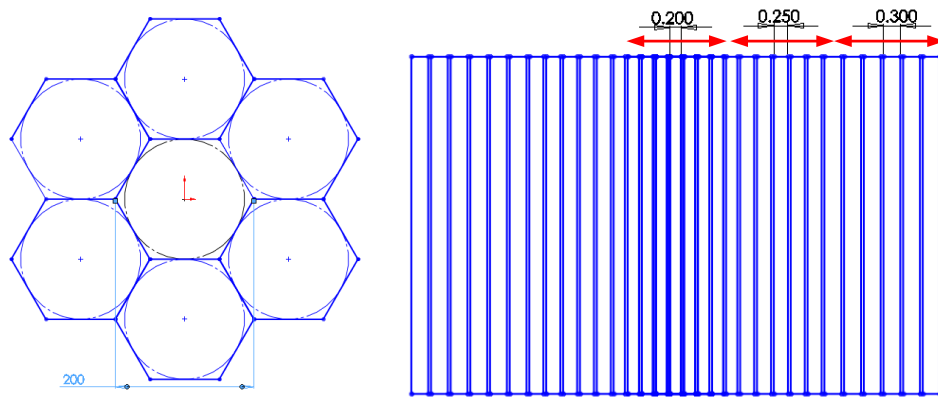


圖 3-2 模仁設計(a)無縫六邊形陣列(b)矩形陣列

3.2.2 鈉玻璃介紹

本實驗使用鈉玻璃(soda lime glass)進行玻璃模造熱壓，其尺寸為 38 mm * 25 mm * 1.2 mm。其玻璃物理性質如表 3-1 所示。

表 3-1 鈉玻璃物理性質表[36]

性質	鈉玻璃
玻璃轉換溫度, T_g ($^{\circ}\text{C}$)	564
熱膨脹係數, (ppm/K)	9.5
折射率, 於 20°C (n_D)	1.520
色散, 於 20°C , ($n_F - n_C$)	87.7

3.3 檢測設備雷射

3.3.1 3D 共軛焦顯微鏡

共軛焦顯微鏡是由雷射(laser)、兩個共軛焦孔洞(confocal pinhole)、雙色鏡(dichroic)、CCD 攝影機以及兩個凸透鏡(convex lens)組合而成。其基本

架構如圖3-3(a)所示，工作原理如下：

- (1) 雷射光源經由第一個凸透鏡在第一個共軛焦孔洞處聚焦。
- (2) 聚焦後，通過雙色鏡到達第二個凸透鏡。
- (3) 由第二個凸透鏡將光源聚焦在待測樣品上，此時樣品位於聚焦面(in focus plane)。
- (4) 從樣品上反射的光(reflected or fluorescent light)，會再穿過第二個凸透鏡到達雙色鏡處。雙色鏡會將光源反射且聚焦到第二個共軛焦孔洞，再藉由CCD camera 擷取樣品在聚焦面處的影像。

圖3-3(a)上的虛線表示凸透鏡焦點外(out-of-focus)的區域，實線表示聚焦面上的區域，若樣品擺在實線以外的區域，其反射光將無法在共軛焦孔洞處聚焦，導致CCD攝影機無法擷取影像。因此，待測樣品必須在聚焦面上才有辦法量測。若搭配精密Z軸控制模組，透過分層取像，可獲得待測樣品立體形貌，透過軟體分析，可獲得幾何尺寸及表面粗糙度等結果。

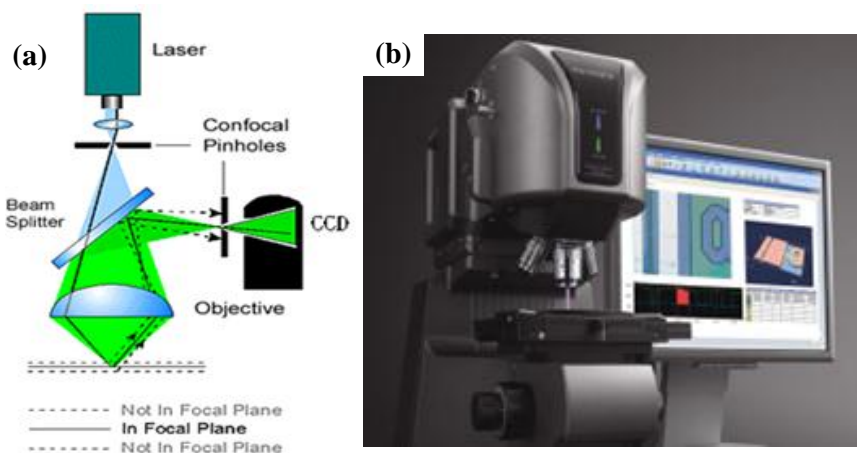


圖 3-3 3D 彩色雷射共軛焦顯微鏡(a)組成架構(b)實際形貌 [37]

3.3.2 掃描式電子顯微鏡與能量分散光譜儀

本研究使用的 SEM 為國家實驗研究院儀器科技研究中心之 Hitachi fe-s4300 冷場發射式之機型，並外加能量分散光譜儀，如圖 3-4 所示。掃描式電子顯微鏡基本原理為，電子槍加上外加加速電壓(0.5~30kv)產生電子束，通過一磁透鏡聚焦，利用遮蔽孔徑選擇電子束大小，經過控制電子束之掃描線圈再透過物鏡聚焦於工件，工件激發出電子訊號，並以接收器選取二次電子或背向散射電子。由於場發射式發出之電子束小、亮度高，其解析度可達 1.5 nm ，並可在最低電壓 0.3kv 底下操作。



圖 3-4 冷場式掃描電子顯微鏡(SEM)

3.3.3 阿貝氏折射率量測儀

本研究使用之折射儀為儀科中心之阿貝氏折射率量測儀 AR2008 ，主

要應用於測量透明與半透明液體或固體的折射率 n_D 。

其中量測折射率的原理，主要是利用折射定律及臨界角原理；光源燈通常為鈉燈，在鏡筒中利用反射、折射與濾光鏡的組合，將折射的光導向目鏡，經由目鏡中可觀察到明暗之區別，其兩區域接線處之角度，即為臨界角度，大於臨界角度則為光線未折射出來之陰暗處，故由可推算出此樣品之折射率，如圖 3-5 所示。

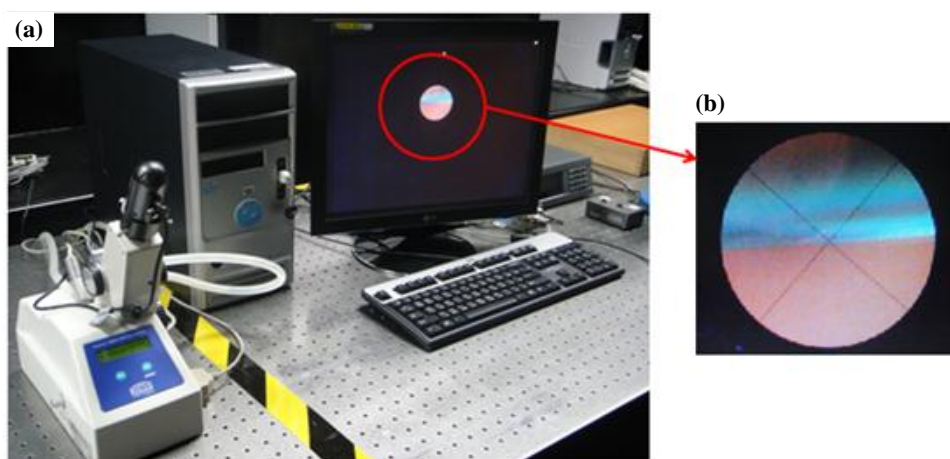


圖 3-5 (a)阿貝氏折射率量測儀(b)臨界角之分界

第四章、 結果與討論

本研究經由雷射加工、電解拋光及玻璃熱壓製程進行玻璃微光學陣列元件的製作，探討雷射加工參數、電解拋光時間、及玻璃模造製程參數對於模仁與玻璃微透鏡陣列表面輪廓與表面粗糙度之影響。探討之參數包括雷射掃描速度、雷射脈衝重複頻率、電解拋光時間以、及玻璃模造溫度、模造壓力、壓模速度、模造時間、模造腔體環境、及模造熱壓方式等。

4.1 雷射直寫實驗

本實驗使用之雷射機台為AVIA 355-14，波長為355 nm之UV雷射系統(COHERENT Inc.)，於不銹鋼模仁上直寫出微透鏡陣列的六角柱微結構與微柱狀鏡陣列的矩形微結構。雷射系統之脈衝重複頻率會影響輸出功率，而雷射掃描速度會影響被加工材料單位面積所接受到的能量，本研究亦針對此兩參數進行其影響之探討。

4.1.1 雷射參數對模仁表面形貌與表面粗糙度之影響

本研究利用田口法 L16 直交表規劃實驗參數，探討五種雷射加工參數對不銹鋼模仁表面粗糙度(Ra)與加工深度之影響。表 4-1 為各雷射參數意義，Frequency 代表(外頻)重複頻率，一般而言不大於內頻重複頻率之 80%；Passes 代表加工次數；Speed 代表加工速度； Pulse Repetition Rate 代表雷

射(內頻)重複頻率，此為決定雷射輸出頻率之主要參數；Path 代表加工路徑模式，分為直線(line)、直線來回(bidirectional)、十字交叉(cross)以及直線來回交叉(bidirectional+cross)等四種模式，如圖 4-1 所示。

表 4-2 為 L16 直交表之參數設計與實驗數據，使用雷射共軛焦顯微鏡量測模仁微結構高度及表面粗糙度。依據實驗結果並分析後可得圖 4-2，評估模仁之微結構高度、表面粗糙度與加工時間之結果。其最佳雷射加工組合參數為 Frequency= 100 kHz，Passes= 10 times，Speed= 200 mm/s，Pulse Repetition Rate= 140 kHz，Path= Cross。此最佳化雷射加工參數將為後續製作微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列之參考基準。

理論上而言；雷射加工能量愈高，單次材料移除量較大，故能獲得越高之微結構高度，但因能量高，所以表面粗糙度相對較差。且當雷射能量較高時，材料被加工表面會產生再鑄層，而再鑄層堆積會降低微結構高度，雖微結構高度仍可達到一定水準，但其幾何形狀已然變形失真，故於圖 4-2 中有部分參數其高度與表面粗糙度呈現相反之趨勢。

本實驗所選出之最佳參數以微結構高度為最主要考量範圍，故以表面粗糙度而言並非最佳之雷射加工參數。然而以雷射加工的條件下，結構高度與表面粗糙度本不能兩全，故於下一章節實驗中將利用電解拋光來降低表面粗糙度。

表 4-1 雷射加工參數意義

Frequency (kHz)	雷射重複頻率(外頻)
Passes	雷射掃描次數
Pulse Repetition Rate (kHz)	雷射脈衝頻率(內頻)
Speed (mm/s)	雷射掃描時間
Path	掃描方式

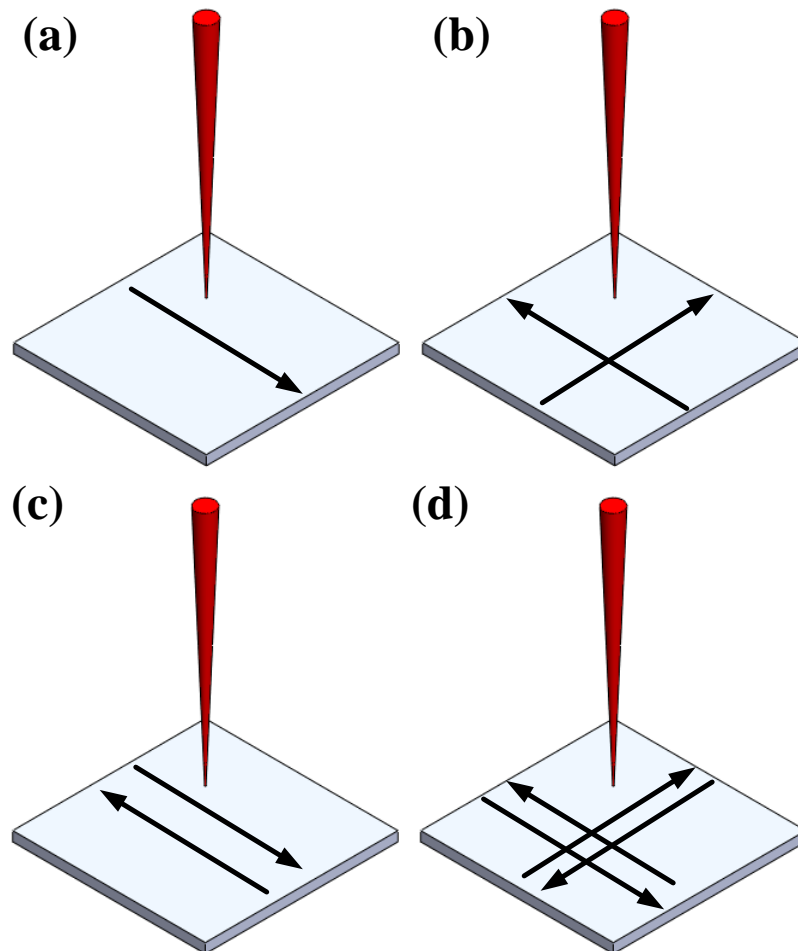


圖 4-1 雷射掃描路徑示意圖(a) Line (b)Cross (c)Bidirectional
(d) Bidirectional + Cross

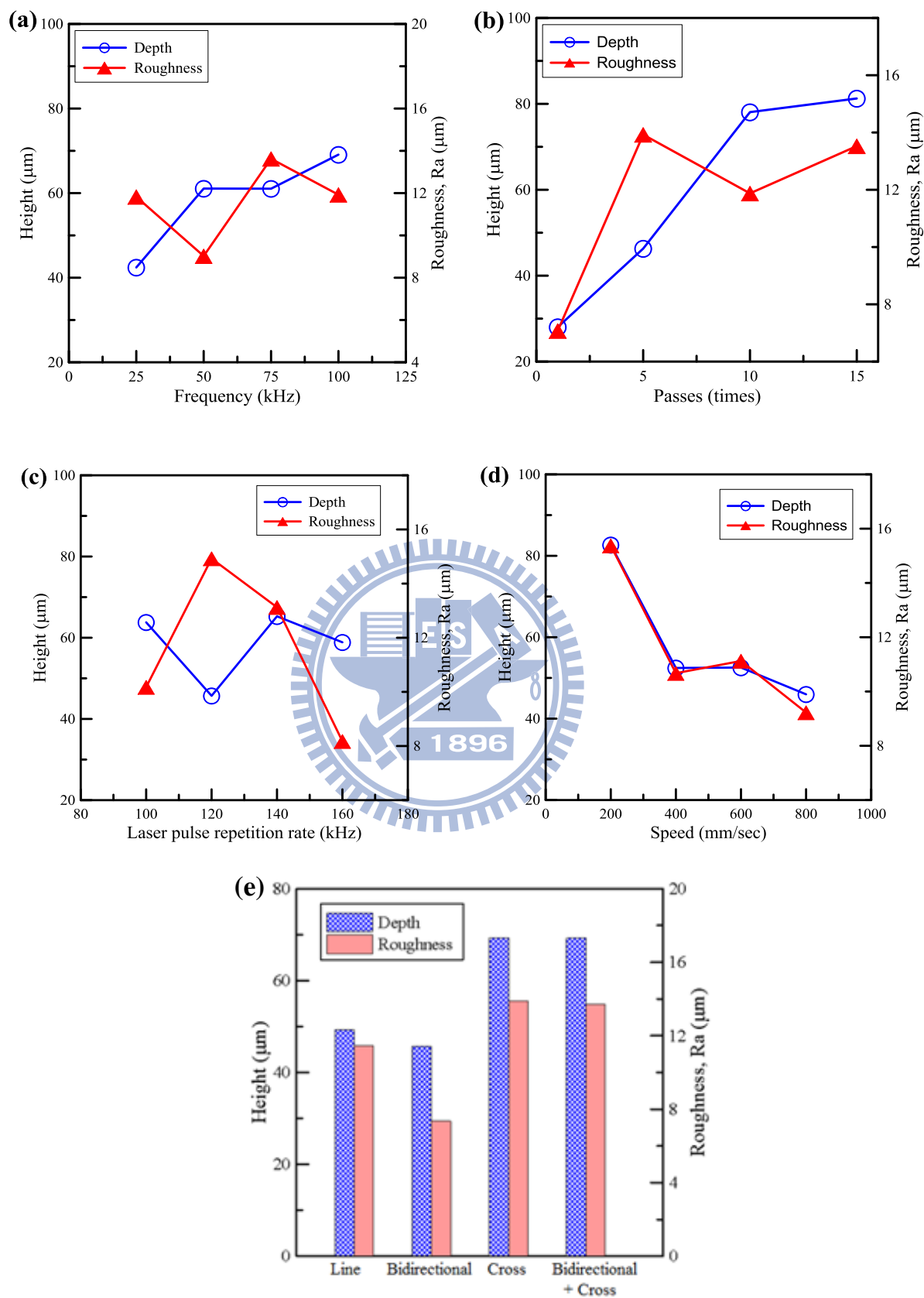


圖 4-2 雷射加工各參數對不銹鋼試片表面形貌與表面粗糙度之影響

表 4-2 L16 直交表參數設計與實驗結果

L16	Pulse repetition Rate (kHz)	Speed (mm/s)	Passes	Frequency (kHz)	Path	高度(μm)	粗糙度(μm)	加工時間(s)
1	100	200	1	25	Bidirectional	29	5.4	14
2	100	400	5	50	Cross	59.3	11.3	79.1
3	100	600	10	75	Bidirectional+Cross	91.1	14.1	76.5
4	100	800	15	100	Line	75.8	9.9	80.6
5	120	200	5	75	Line	51.4	22.9	69.9
6	120	400	1	100	Bidirectional+Cross	30.9	11.9	11.4
7	120	600	15	25	Cross	57.6	18.9	181.6
8	120	800	10	50	Bidirectional	42.9	6	31.6
9	140	200	10	100	Cross	130.8	19.8	275
10	140	400	15	75	Bidirectional	72.1	11.9	87.9
11	140	600	1	50	Line	22.6	5.4	6.4
12	140	800	5	25	Bidirectional+Cross	35.6	15.4	29.9
13	160	200	15	50	Bidirectional+Cross	119.5	13.4	345.4
14	160	400	10	25	Line	47.5	7.6	81
15	160	600	5	100	Bidirectional	38.9	6.1	20.2
16	160	800	1	75	Cross	29.6	5.6	10.6

4.1.2 雷射頻率對模仁高度之影響

雷射脈衝重複頻率會直接影響到雷射加工之輸出功率，亦會對所加工之微結構造成顯著之影響，故首先探討雷射脈衝頻率參數之物理關係。

雷射加工的作用時間 t 可表示如下：

$$t = f \times \Delta t \quad (4-1)$$

其中 Δt 為脈衝時間，系統內定為 $30\mu\text{s}$ ， f 為脈衝重複頻率(pulse repetition rate)。

單發的瞬間功率可以表示為 P_p ，其定義如下：

$$P_p = \frac{P_a}{t} \quad (4-2)$$

其中 P_a 為平均功率，由脈衝重複頻率決定，例如脈衝重複頻率為 100 kHz ，為保護雷射晶體，輸出功率百分比設定為 95% ，則其 P_a 為 15.93 W 。而單發雷射作用在工件上之能量 E 可定義如下：

$$E = \frac{P_p}{A} (J) \quad (4-3)$$

其中 A 為單發雷射所加工之材料面積。因為雷射光束為圓對稱，故材料面積可定義為：

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4-4)$$

其中 d 為雷射光束直徑，針對本實驗使用之UV雷射，其雷射光束直徑為 $30\mu\text{m}$ 。

由公式(4-3)可知，材料所接收到的單發雷射能量決定於脈衝重複頻率，雷射頻率越高則雷射功率隨之下降。圖4-3所示為本實驗之UV雷射其脈衝重複頻率與雷射功率關係，從中亦可發現當雷射脈衝重複頻率越高則雷射功率隨之下降，此現象亦符合上述理論公式。

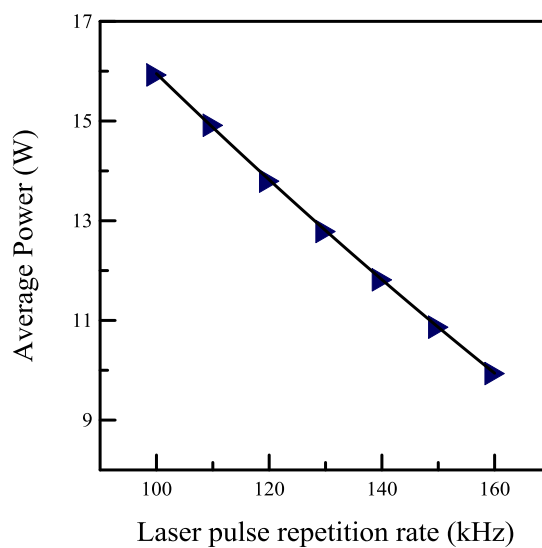


圖 4-3 雷射脈衝重複頻率與雷射功率關係

於製作微透鏡陣列之六角柱實驗中，雷射功率會隨著雷射脈衝重複頻率增加而減少，而加工深度也隨之下降，圖4-4顯示雷射脈衝重複頻率與加工深度成負相關的趨勢；雖然選擇較低之重複頻率可獲得較大輸出功率，但若選用過低重複頻率，例如100 kHz，則因其輸出功率過高，將導致加工表面過度再鑄層堆積，造成微結構形貌改變及高度減少(如圖4-5);使用較高的重複頻率雖然能避免較多再鑄層產生，但也因為功率不足，而無法有效移除所需之結構深度(如圖4-6)，且增加加工時間。此外，圖形幾何尺寸也嚴重影響模仁輪廓，圖4-5也顯示出因結構尺寸太小，雷射加工路徑過於接近，造成熱能累積過多，不銹鋼模仁產生過度熔融而導致幾何形狀嚴重失真，因此本實驗選用雷射脈衝重複頻率110 kHz，其輸出功率為14.9 W，於不銹鋼材料上製作六角柱微結構，實驗結果如圖3-7所示。

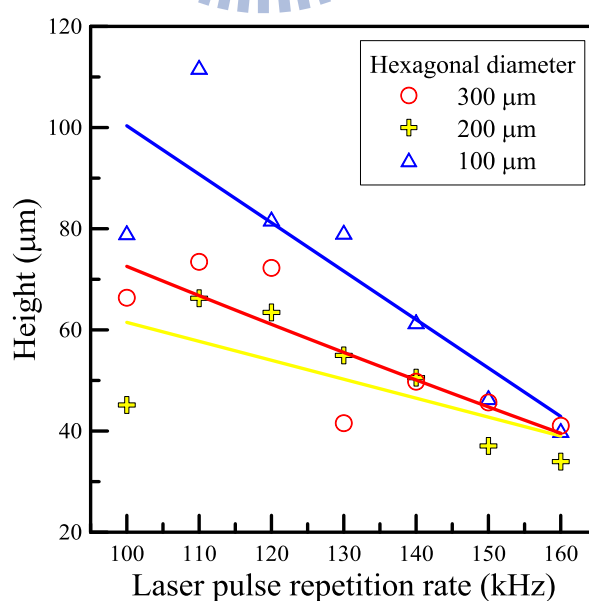


圖 4-4 雷射脈衝重複頻率與模仁結構高度關係

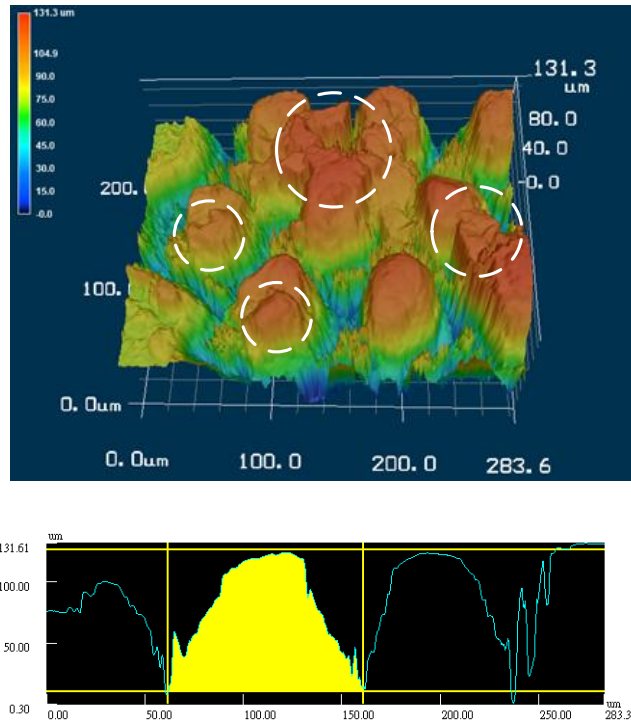


圖 4-5 外接圓尺寸為 100 μm 雷射脈衝重複頻率 100 kHz，標示區域為再鑄



層堆積

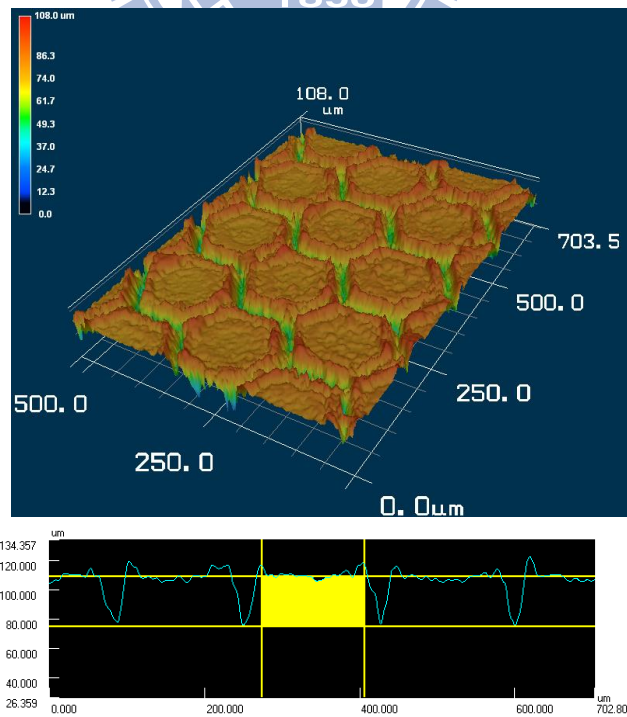


圖 4-6 外接圓尺寸為 200 μm 雷射脈衝重複頻率 160 kHz

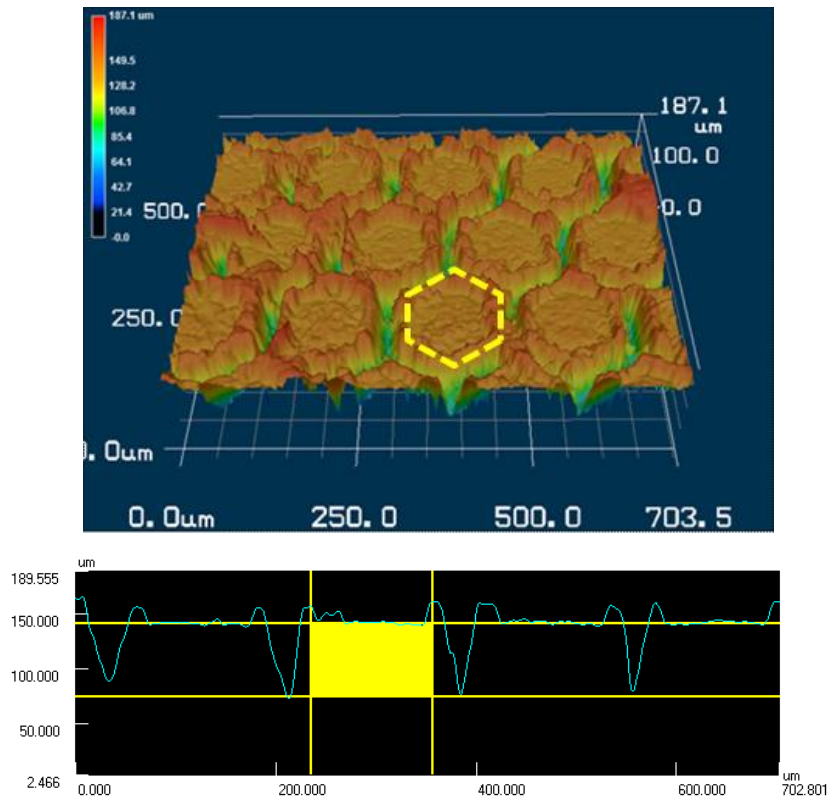


圖 4-7 外接圓尺寸為 $200\ \mu\text{m}$ 雷射脈衝重複頻率 $110\ \text{kHz}$

本實驗亦製作微柱狀鏡之矩形微結構，圖4-8所示為雷射脈衝重複頻率對不銹鋼模仁微結構高度的影響，其趨勢與微透鏡陣列實驗結果相似。雷射脈衝重複頻率與模仁高度為負相關趨勢。若選擇不適合之雷射脈衝重複頻率與微結構矩形寬度，亦導致模仁微結構變形與再鑄層過多或微結構高度不足，如圖4-9與圖4-10所示。因此選用脈衝重複頻率為 $110\ \text{kHz}$ ，其輸出功率為 $14.9\ \text{W}$ 在不銹鋼材料上製作矩形微結構，實驗結果之表面形貌如圖4-11所示。

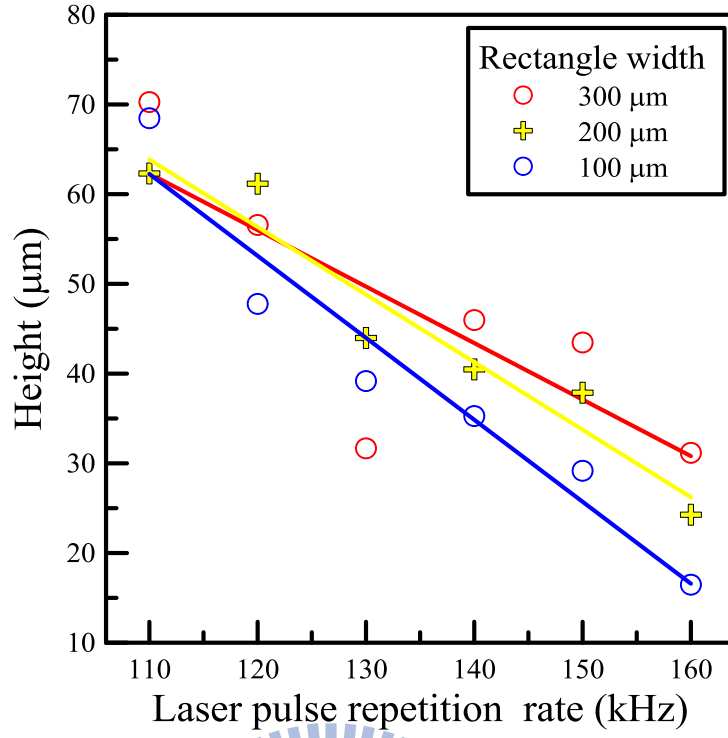


圖4-8 雷射脈衝重複頻率與模仁結構高度關係

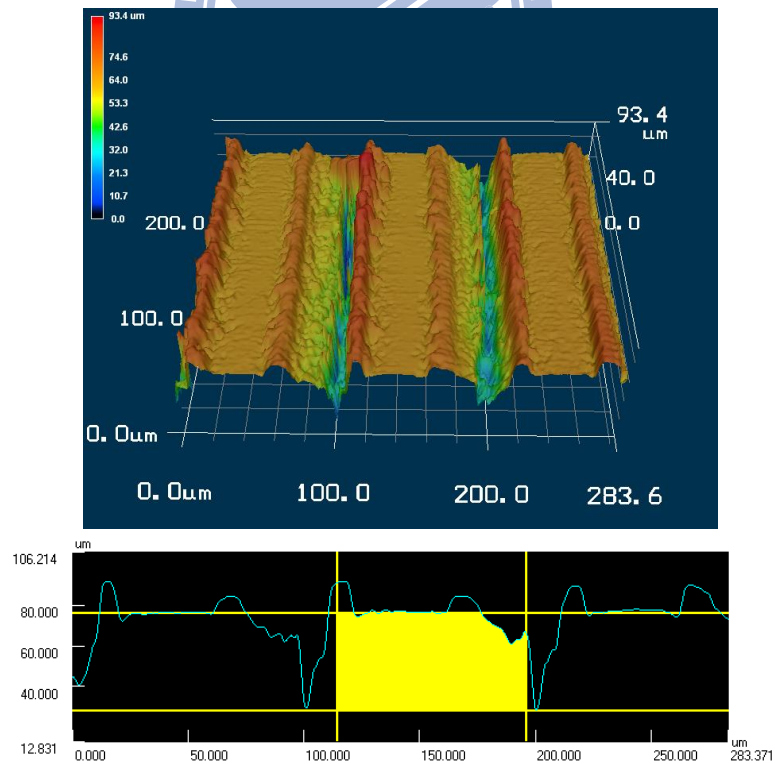


圖 4-9 矩形結構寬度 100 μm 雷射脈衝重複頻率 120 kHz

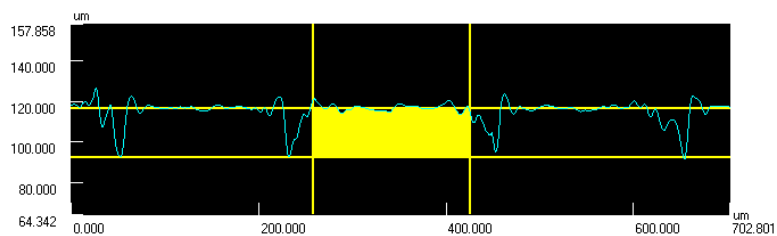
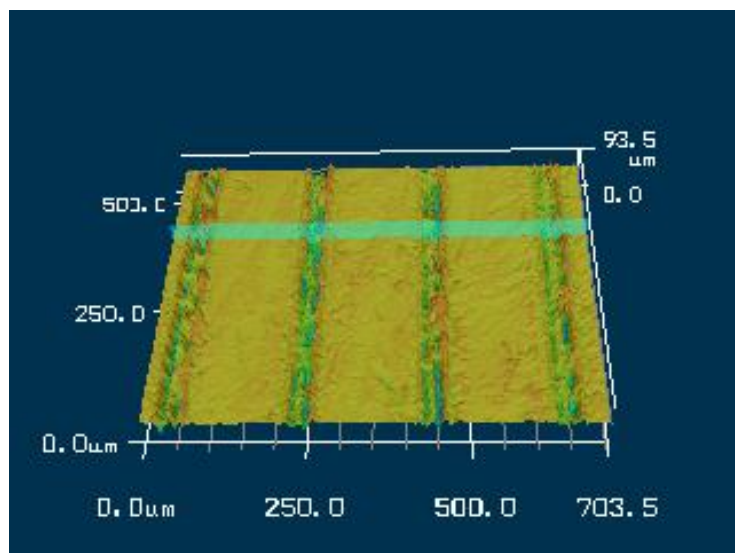


圖 4-10 矩形結構寬度 200 μm 雷射脈衝重複頻率 160 kHz

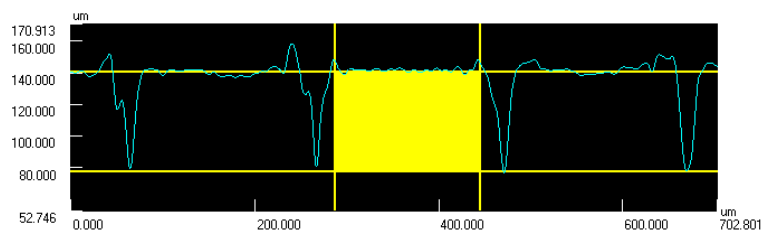
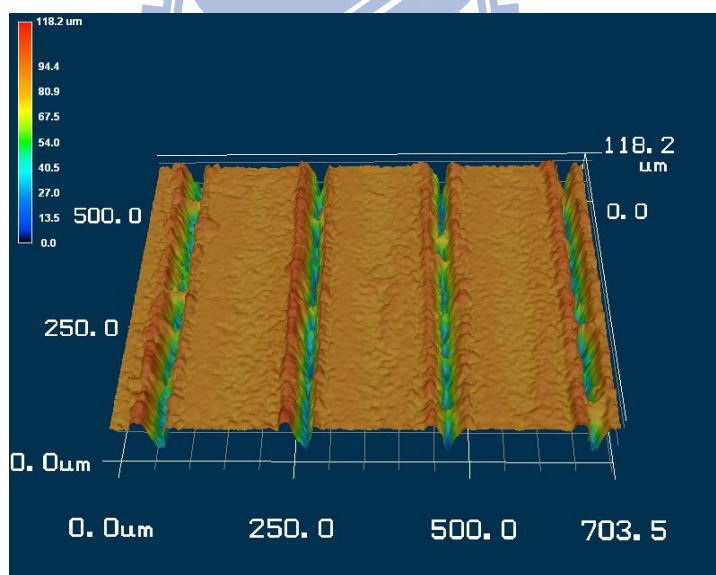


圖 4-11 矩形結構寬度 200 μm 雷射脈衝重複頻率 110 kHz

4.1.3 雷射掃描速度對模仁表面輪廓之影響

雷射掃描速度為一重要參數。掃描速度越快代表加工平面每單位面積所接收到的雷射能量越低，若掃描速度過快甚至會大於雷射系統中振鏡偏移速度，會導致圖形產生不連續的現象而失真，如圖 4-12 所示。微透鏡陣列之六角柱結構高度與雷射掃描速度成負相關趨勢，在速度為 200 mm/s 時，因速度較慢，熱量累積較多，造成過多的再鑄層產生，導致結構高度不穩定，因此在加工時間與品質上需取得一平衡點。基於以上考量，選用雷射掃描速度參數 400 mm/s，完成範圍 1*1 mm 之外接圓 200 μm 之六角形結構陣列。

六角形結構尺寸會影響雷射加工所造成之熱量累積程度，由於 100 μm 之六角形外接圓結構尺寸較小，由圖 4-13 所示，實驗發現雷射掃描速度過慢的情況下會與雷射脈衝重複頻率過低時相同，亦產生嚴重的熔融現象，反之雷射掃描速度越快，熔融現象則較不明顯。圖 4-14~15 所示，外接圓尺寸為 200 μm 時，雖然雷射的累積熱量較小，無嚴重的再鑄層產生，但依然產生再鑄層而形成火山口形狀之結構。後續工作將經由電解拋光來消除此火山口結構，降低表面粗糙度並改變其幾何形狀。

為提昇應用層面，故將六角形結構陣列範圍擴大，使用 40*40*2 mm 之 304 不銹鋼材料作為模仁，並於其上利用雷射製作 10*10 mm 之六角形結構陣列。但初始測試雷射掃描速度時，係於面積 1*1 mm 之範圍，獲得 400 mm/s

之最佳掃描速度參數。以此參數用於 10*10 mm 之陣列，發現模仁結構高度不符合預估值。推測原因是陣列範圍擴大，雷射振鏡使用 400 mm/s 之速度過慢，導致結構高度大幅降低。由圖 4-16 可知，針對 10*10 mm 範圍之六角形結構陣列，以 900 mm/s 與 1000 mm/s 之掃描速度可獲得高度與表面形貌較佳之不銹鋼模仁結構，如圖 4-17 與 4-18。

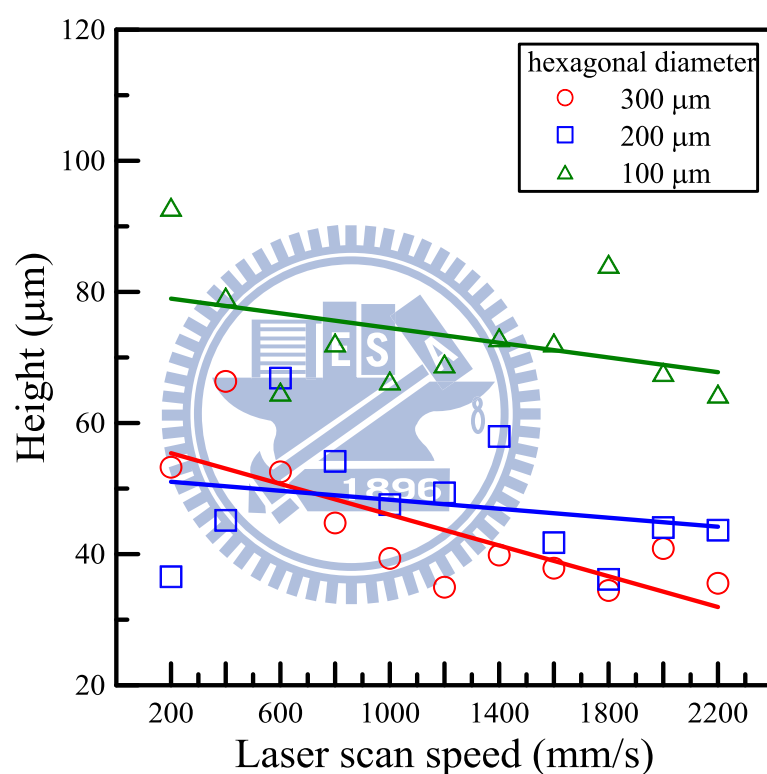


圖 4-12 雷射掃描速度與模仁結構高度之影響

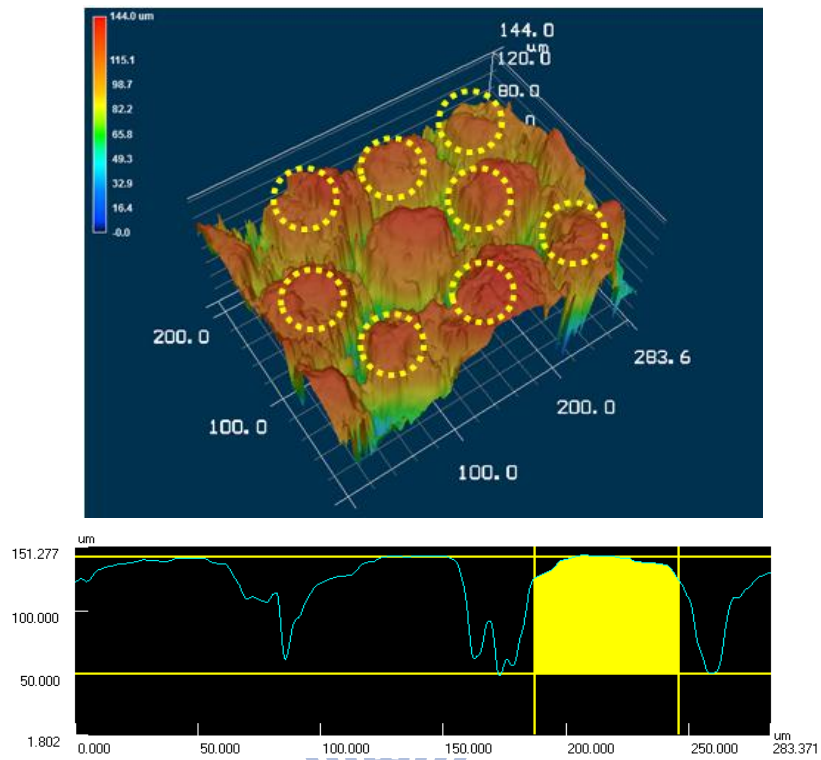


圖 4-13 外接圓尺寸為 100 μm 掃描速度 200 mm/s，標記為熔融區域

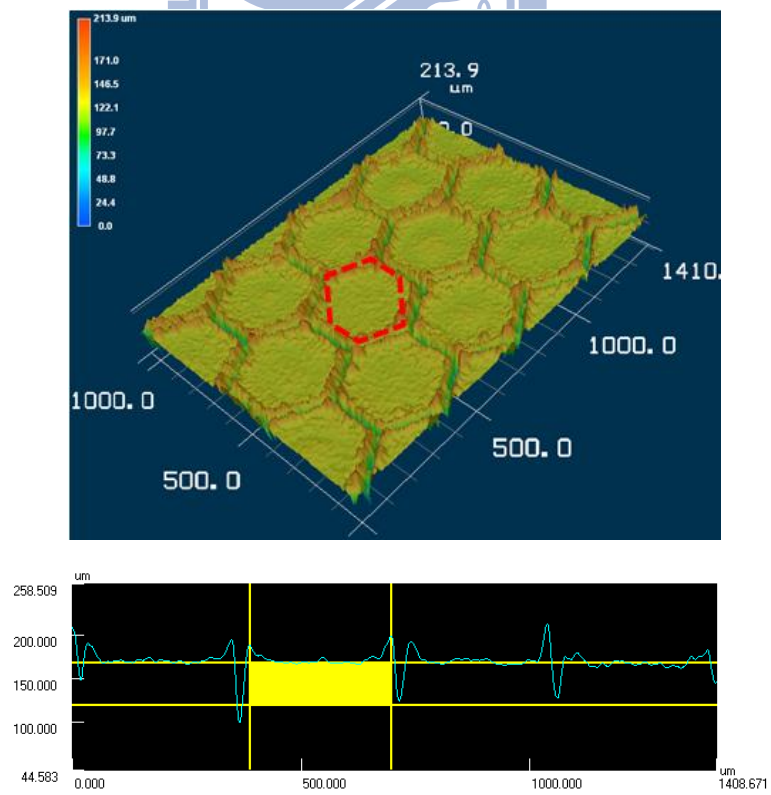


圖 4-14 外接圓尺寸為 200 μm 掃描速度 400 mm/s

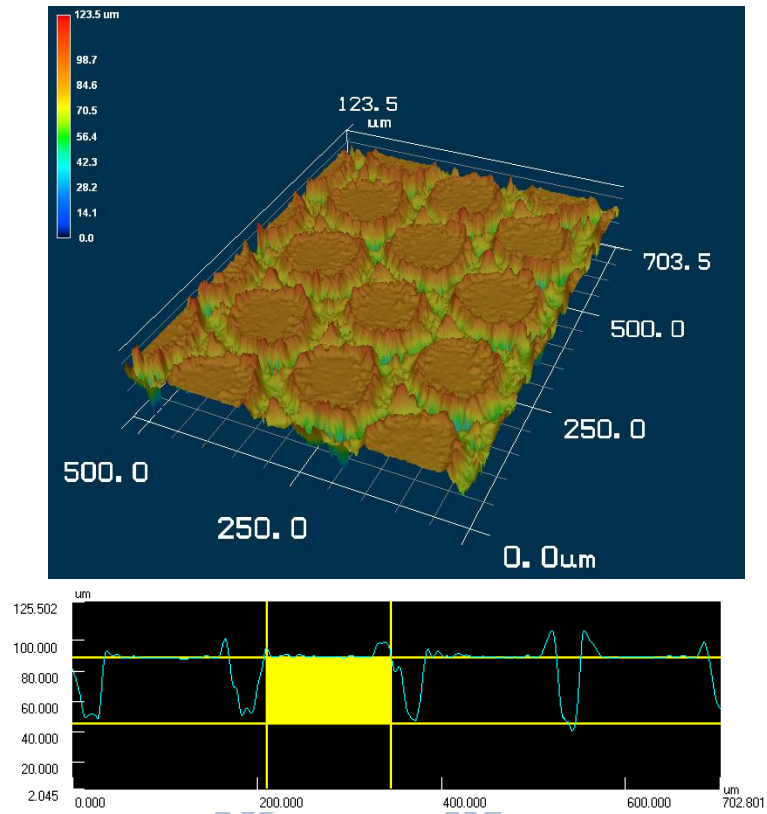


圖 4-15 外接圓直徑 200 μm 掃描速度 2200 mm/s

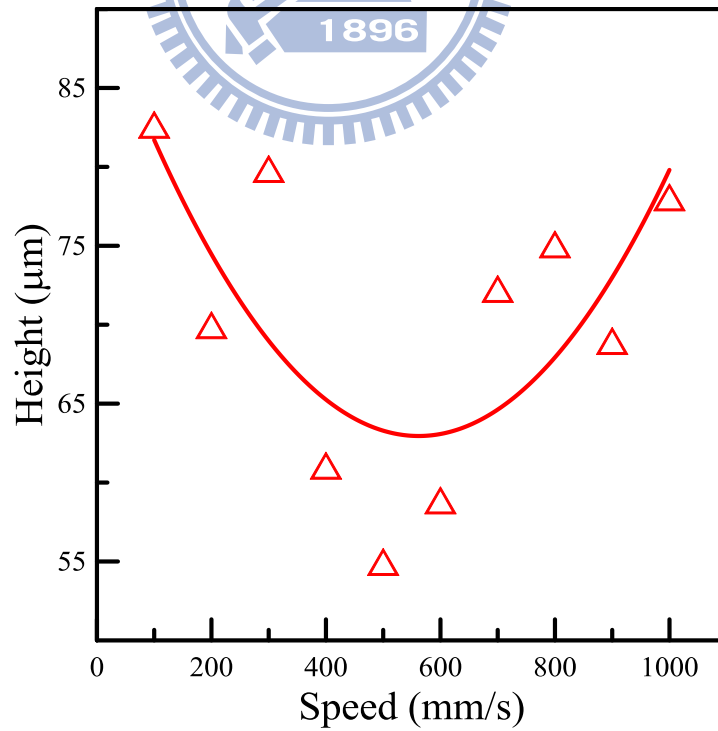


圖 4-16 脈衝重複頻率 110k 於外接圓尺寸 200 μm 之掃描速度

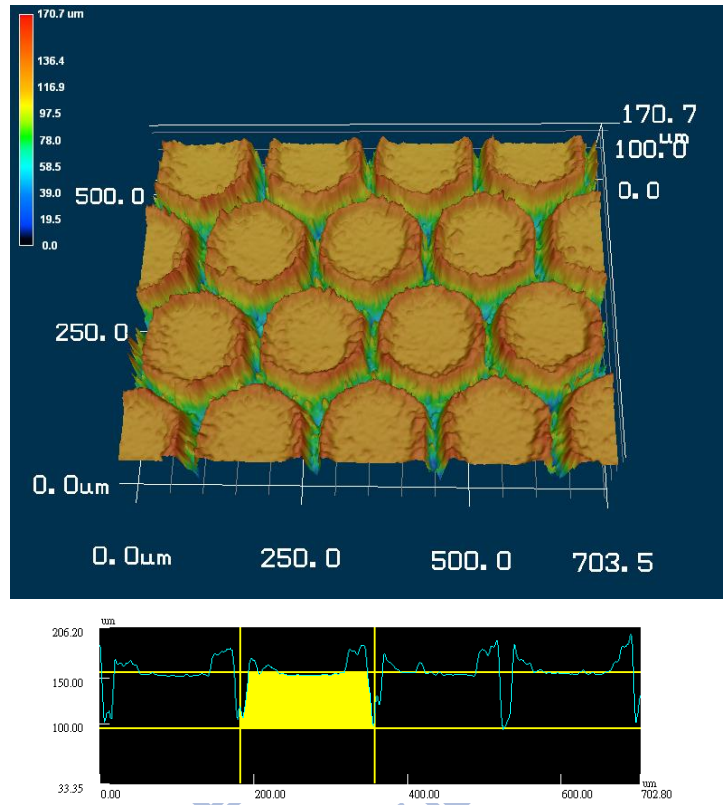


圖 4-17 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度為 900 mm/s

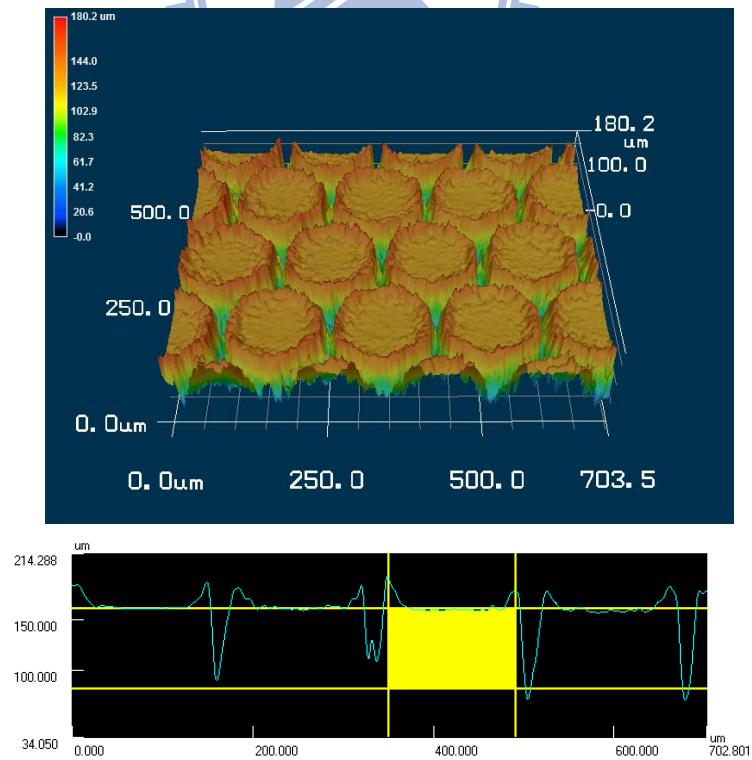


圖 4-18 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度為 1000 mm/s

圖4-19顯示微柱狀鏡陣列實驗中，雷射掃描速度與模仁微結構深度之關係。發現結構深度與雷射掃描速度成反比，如圖4-20所示。當雷射掃描速度為200 mm/s時，因速度較慢，熱量累積較多，造成過多的再鑄層堆積，導致結構高度不穩定。若掃描速度過快，例如2200 mm/s 時，即會產生因移動速度過快而導致加工痕跡不連續之現象，如圖4-23。因此在加工時間與品質上需取得一平衡點。由圖4-19中可看出在雷射掃描速度較慢的參數下(例如200 mm/s)雖然所接收到的雷射能量較大，理論上結構高度應較大，但是參照共軛焦顯微鏡3D圖形，可看出有過多的再鑄層堆積，影響結構輪廓，因此考量加工效率與結構輪廓，採用400 mm/s來製做矩形微結構，其表面輪廓如圖4-21所示。此參數同上實驗應用於10*10 mm加工範圍時，亦調整成1000 mm/s的雷射掃描速度。

圖4-19亦顯示矩形結構尺寸的影響，尺寸愈小的結構，雷射掃描輪廓愈接近，因此雷射所造成的熱影響區域重疊性愈高，所以熱能累積較多導致金屬熔融現象，造成結構高度減少，如圖4-22及圖4-23所示。欲獲得較大尺寸的單一微柱狀鏡，需要較大的矩形結構以及相對應的結構高度，實驗結果顯示，矩形深寬比需大於1：3，若深度不足，經過電解拋光製程後，不銹鋼模仁結構表面將趨於平緩而無法形成圓柱形結構，故本研究選擇200 μm 、250 μm 及300 μm 之矩形寬度進行後續實驗。

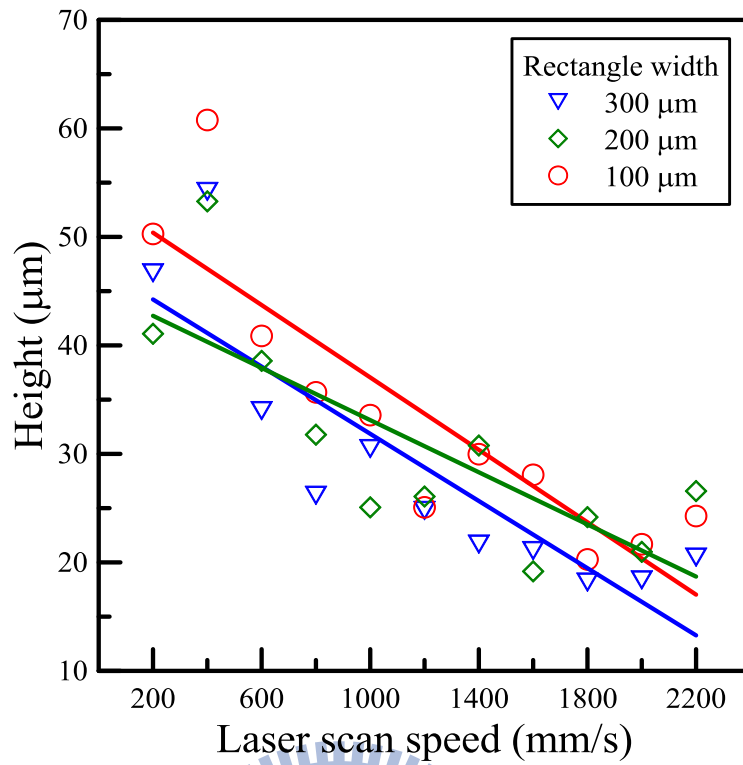


圖 4-19 雷射掃描速度與模仁結構高度之影響

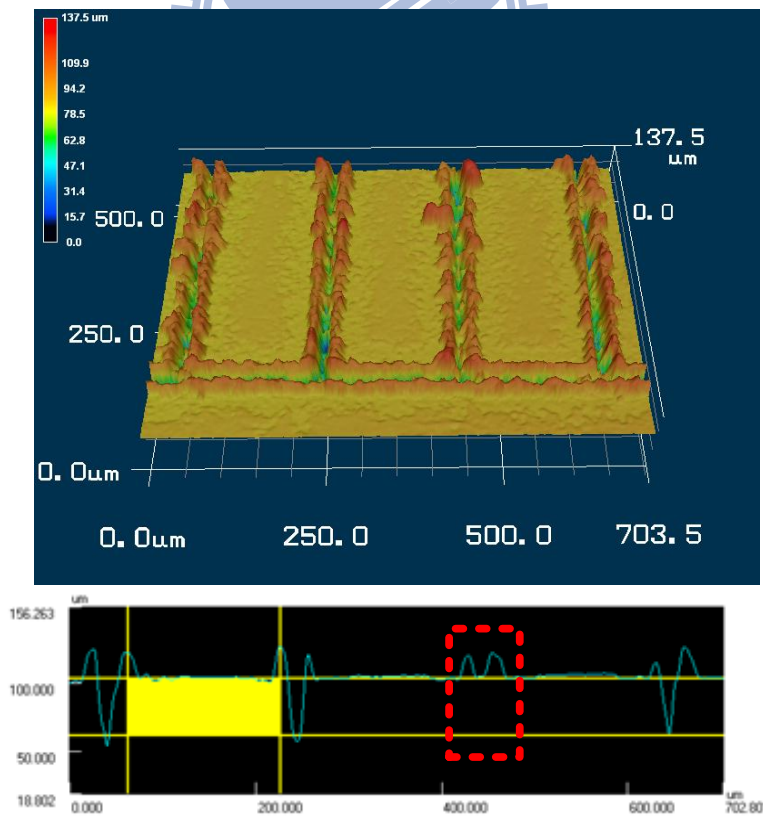


圖 4-20 掃描速度 200 mm/s 矩形寬度 200 μm，標記為金屬回流形成再鑄層

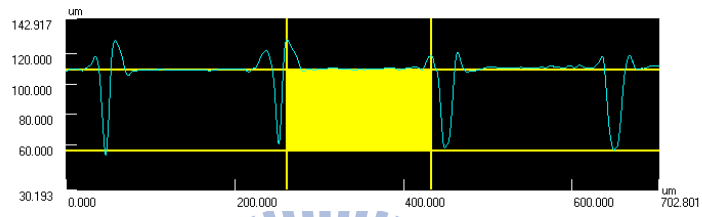
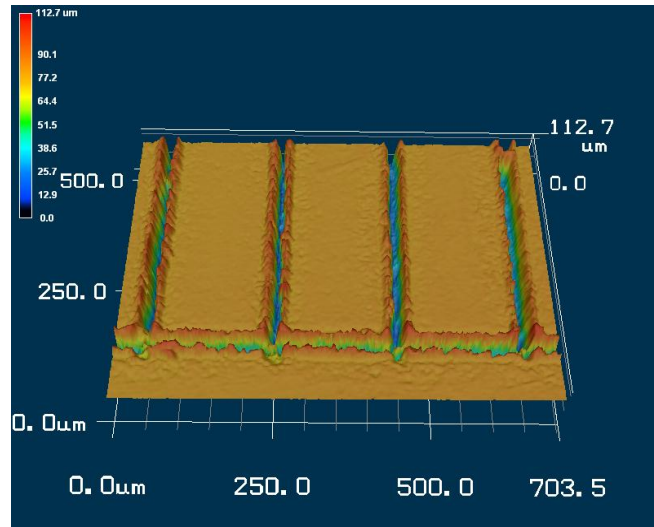


圖 4-21 掃描速度 400 mm/s 矩形寬度 200 μm

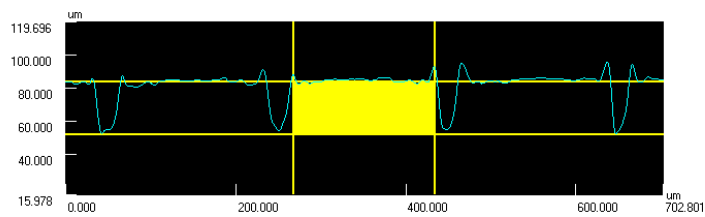
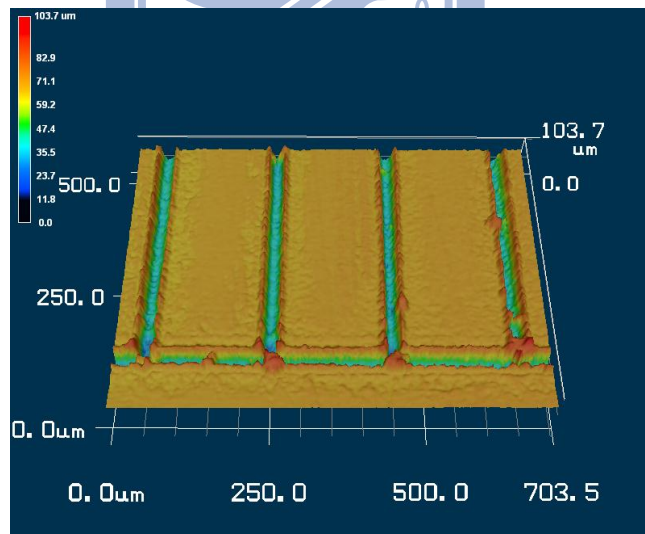


圖 4-22 掃描速度 800 mm/s 矩形寬度 200 μm

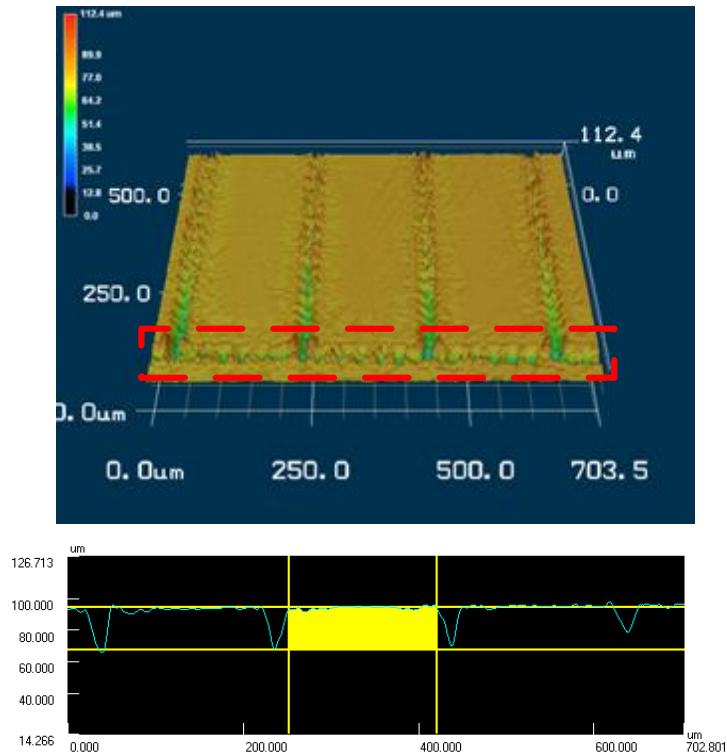


圖 4-23 掃描速度 2200 mm/s 矩形寬度 200 μm ，標記為雷射掃描不連續

4.2 電解拋光實驗

本實驗控制電解拋光時間來增加材料銳角處的移除率，藉此改變不銹鋼模仁表面形貌，使微透鏡陣列模仁微結構由六角形改變成為半球形，微柱狀鏡陣列模仁微結構由矩形改變成為半圓柱形。此外雷射加工後，金屬材料表面將會因熔融產生再鑄層，如圖4-24所示。本研究使用電解拋光技術消除再鑄層，並且改變微結構輪廓，作為微透鏡/微柱狀鏡陣列模仁，如圖4-25所示。電解拋光因透過電解液進行拋光，電解液可深入微小或複雜結構，故電解拋光技術除了對大尺寸系統可拋光外，其對複雜微結構亦可進行拋光，尤其對於不銹鋼材料的拋光效果最佳。

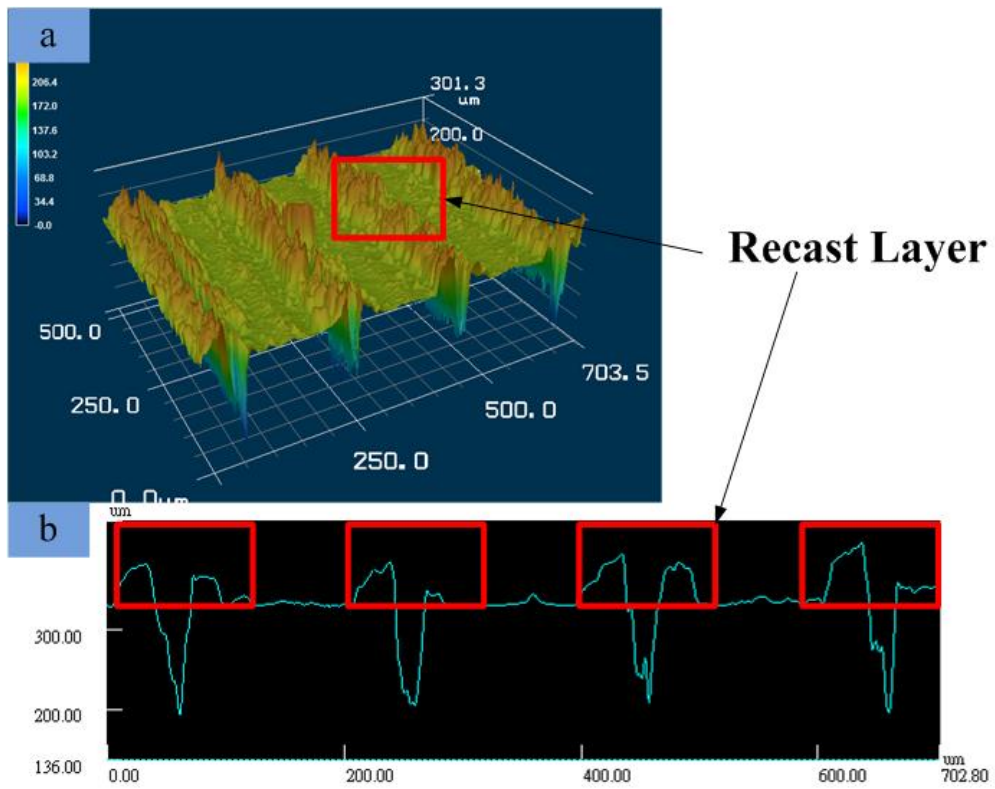


圖 4-24 經雷射加工後之模仁表面形貌

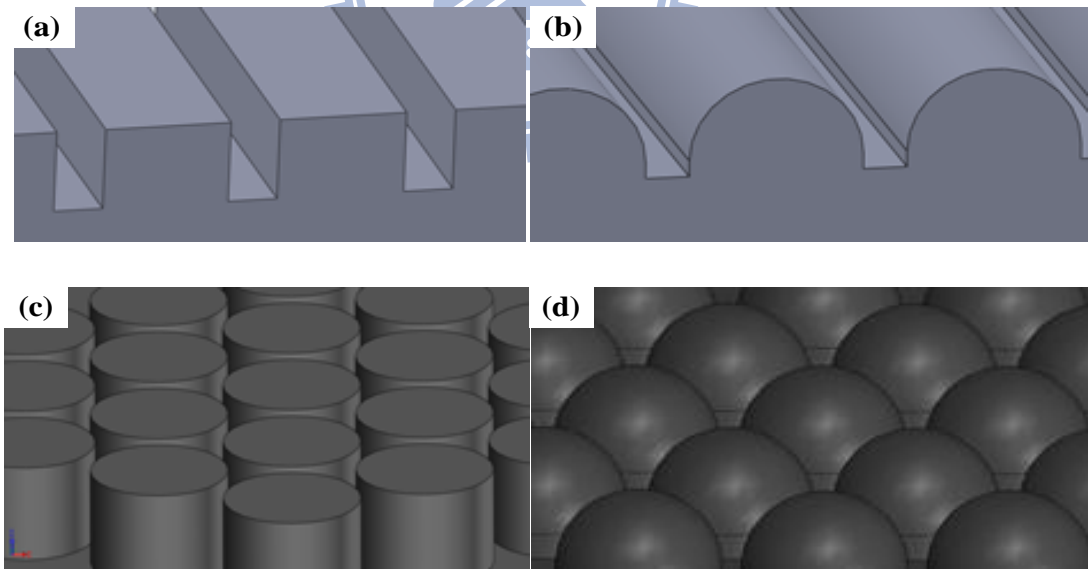


圖 4-25 (a) 微柱狀鏡陣列電解前(b)微柱狀鏡陣列電解後 (c)微透鏡陣列電解前(d)微透鏡陣列電解後之示意圖

4.2.1 電解時間對模仁表面形貌與結構高度之影響

為得知電解拋光製程的初始實驗條件，先利用田口法之 L16 直交表設計雷射參數，將所得之各不銹鋼試片，利用定電壓 10V 進行 30、60、90、120 分鐘的電解拋光實驗。圖 4-26 顯示各雷射加工參數所製作之不銹鋼試片，其模仁結構高度在不同電解時間下的變化。

實驗結果顯示，不銹鋼上之模仁結構高度會隨著電解時間越長而降低。此外，由後續的實驗結果得知，電解時間在 30 以及 60 分鐘的條件下，其微結構幾何形狀尚未達到本實驗之設計，亦即形狀尚未改變為半圓柱形或半圓形，故電解時間 30 以及 60 分鐘不列入本實驗中最佳化參數評估條件。

在模仁微結構突起的部分，是沒有經過雷射加工過的區域。電解加工製程在此區的主要目的是改變模仁外形，使其變成半圓柱或半圓形，因此，突起區域的高度因電解拋光製程的改變較小。而模仁微結構凹下的部分是雷射加工過的區域，比起原本不銹鋼材料的拋光表面，此區域的粗糙度較大，由實驗結果分析，電解時間在 90 分鐘以內時，電解拋光製程主要是修整表面粗糙度，而非增加結構高度，因此在電解時間 90 分鐘以內時，隨著時間增加，微結構高度愈低。然而電解時間 120 分鐘時，因雷射加工後表面粗糙結構已大幅減少，因此電解拋光製程針對微結構凹下的部分，主要作用在於增加結構高度，因此微結構高度在 120 分鐘時，其高度呈現增加的趨勢。

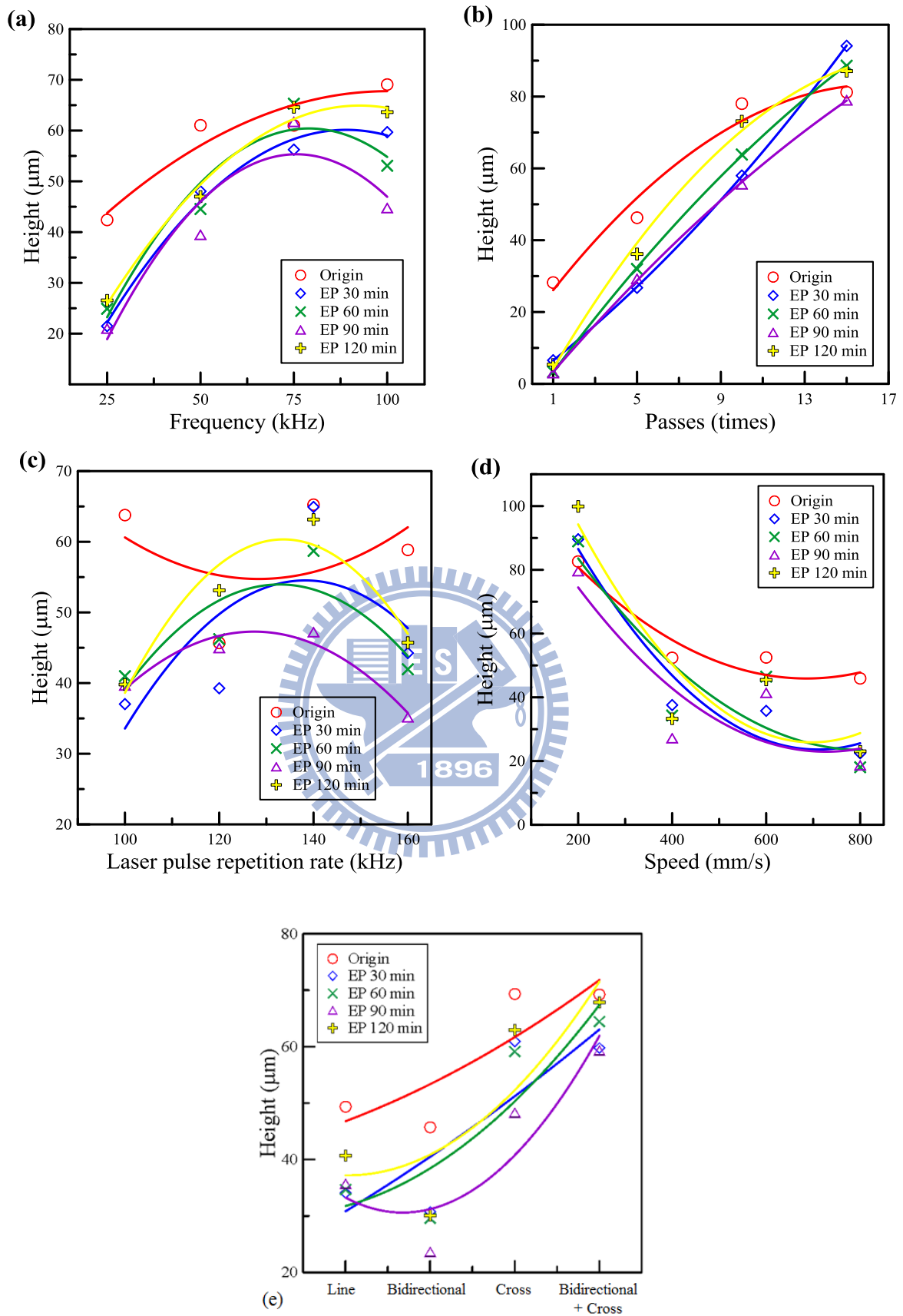


圖 4-26 雷射參數與電解拋光時間對模仁結構高度之影響

其機制如圖 4-27 所示，A 是平面的電解速率，B 是雷射加工後粗糙面的電解速率，雖粗糙面的電解速率較高， $B > A$ ，但是 B 的主要作用是將粗糙度降低，而非整體結構高度降低。圖(a)模仁未加工原始面，主要是作輪廓修整，電解拋光後形成圖(b)的半圓，而在圖(a)雷射加工後粗糙面，電解時間 90 分鐘內是做表面粗糙度的修整，故雷射未加工面高度改變不大，只有粗糙度改變。而雷射加工後之粗糙面的高度，於電解時間 120 分鐘時，因為粗糙面已經被整平了，所以電解速率從 B 變成 A，主要作用也變成使微結構高度增加。

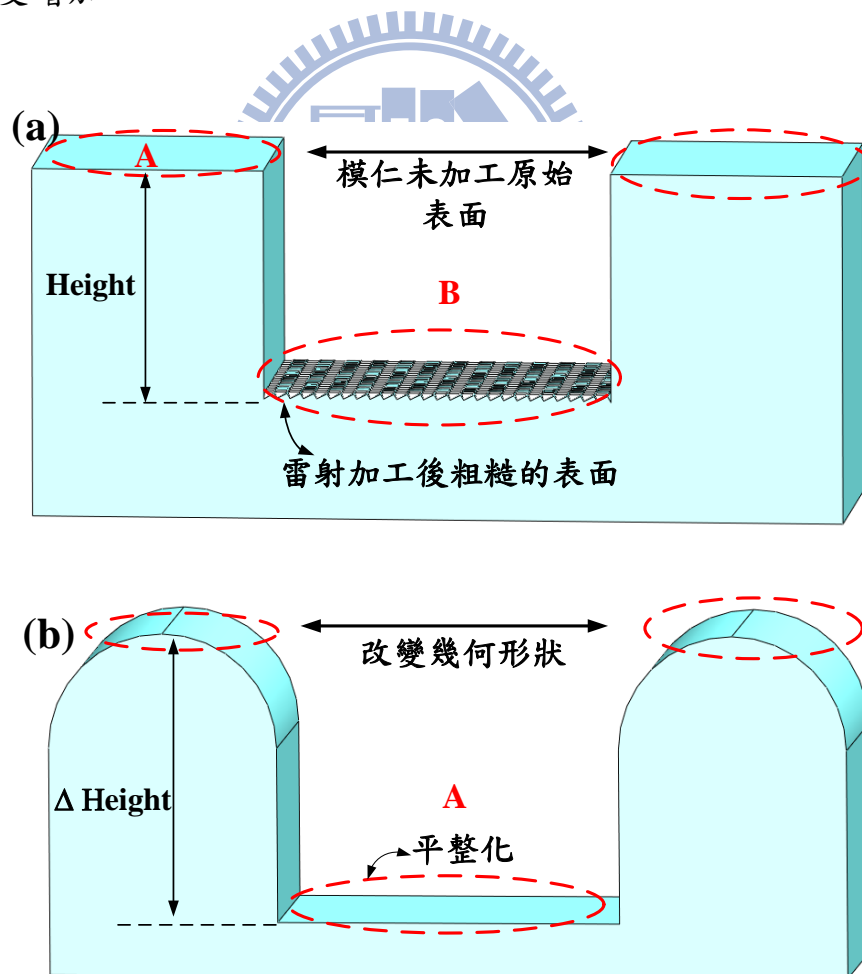


圖 4-27 電解拋光時間對模仁幾何形狀與高度之影響(a)電解前(b)電解後

4.2.2 電解時間對模仁粗糙度之影響

本實驗希望藉由電解拋光製程改善因雷射加工後而產生之不平整的表面，並降低不銹鋼之表面粗糙度。

首先利用由圖 4-28 所示在各種雷射加工參數下所製作之不銹鋼試片，研究於不同電解時間參數對不銹鋼表面粗糙度之影響。由圖中可發現雷射加工能量累積越大之參數固然可達到較好的加工效果，但表面粗糙度也會隨著能量的累積而增加。此外在電解拋光時間越長的條件下，不銹鋼表面之粗糙度也會隨著降低。實驗中發現電解時間 90 與 120 分鐘時，在降低不銹鋼表面粗糙度之效率相近。

經電解拋光後表面粗糙度最低可降至 $1.1\ \mu\text{m}$ ，其結果亦如文獻[38]所提，所謂平整效應為電解後之表面粗糙度平均起伏約 $1\ \mu\text{m}$ 。

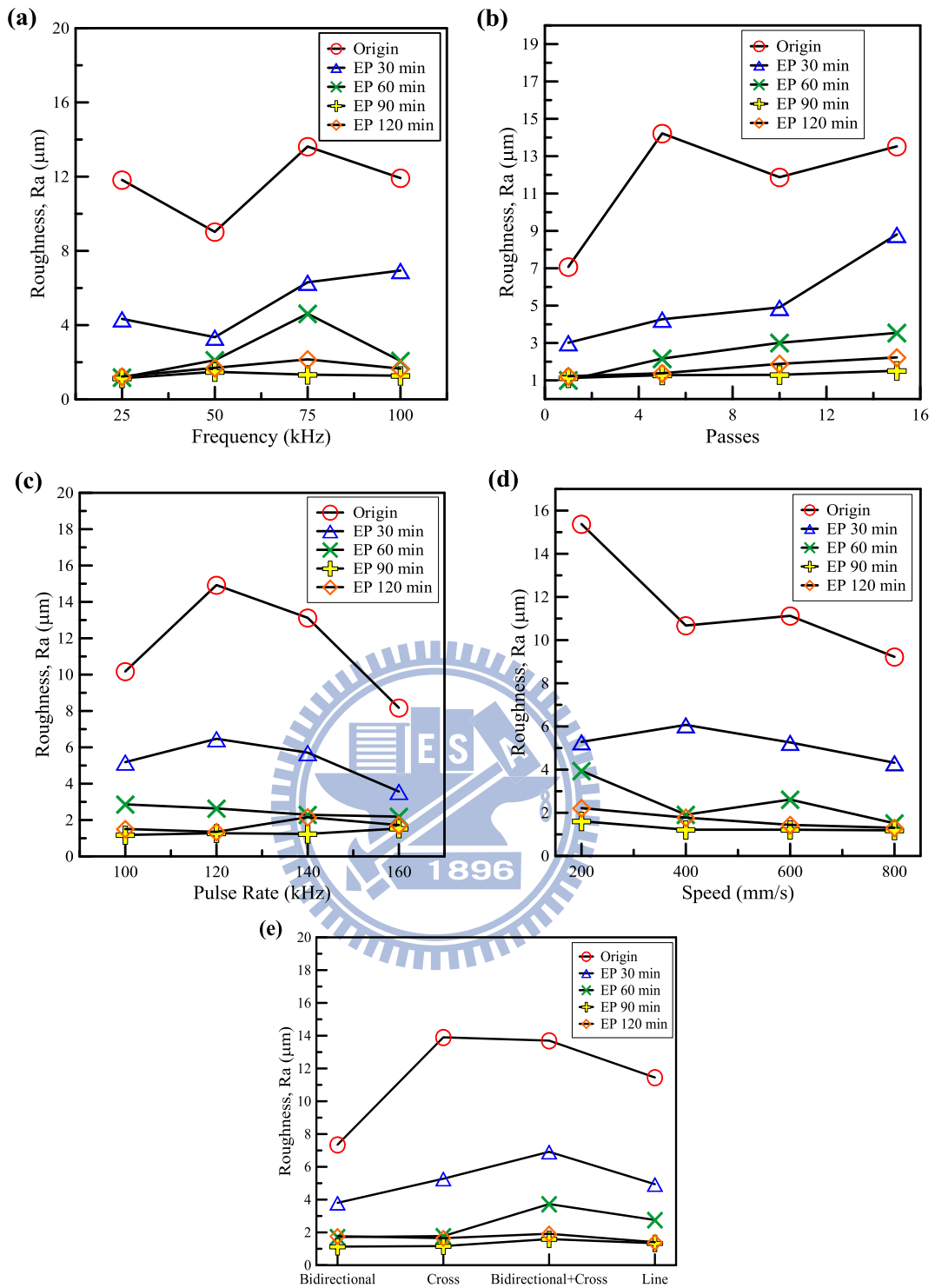


圖 4-28 雷射參數與電解拋光時間對模仁微結構表面粗糙度之影響

4.2.3 微透鏡陣列模仁之電解拋光實驗

電解拋光可修整因雷射加工而產生的粗糙表面，並能將六角柱狀結構

改變為圓頂形結構。雷射參數選用掃描速度 900 與 1000 mm/s、雷射脈衝重複頻率 110 kHz 來製作不銹鋼微結構模仁。探討電解拋光時間對結構高度及幾何形貌的影響，根據實驗分析結果繪製關係圖，如圖 4-29。經由 3D 共軛顯微鏡，量測經不同電解時間後，掃描速度為 900 與 1000 mm/s 之不銹鋼模仁的 3D 表面輪廓，由於本研究期望利用電解拋光造成幾何形狀的改變甚至可達到表面精修，實驗結果顯示，若電解時間太長時，容易產生結構頂端較為尖銳或者結構邊角殘留等現象，無法產生有曲率的輪廓；但電解時間太短，則微結構幾何外型亦無法產生趨於圓頂之表面形貌，如圖 4-30 至 4-34 所示。因此考慮高度及表面形貌是否趨近圓頂型，獲得最佳參數組合為雷射掃描速度 1000 mm/s 搭配電解拋光時間 75 分鐘，如圖 4-35 所示。圖 4-36 至 4-38 為利用光學顯微與雷射顯微鏡觀察不銹鋼模仁經電解拋光後表面形貌。

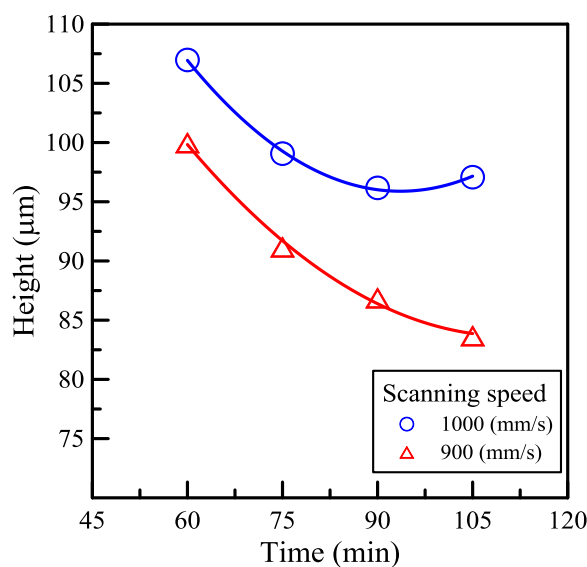


圖 4-29 電解拋光時間與模仁微結構高度之影響

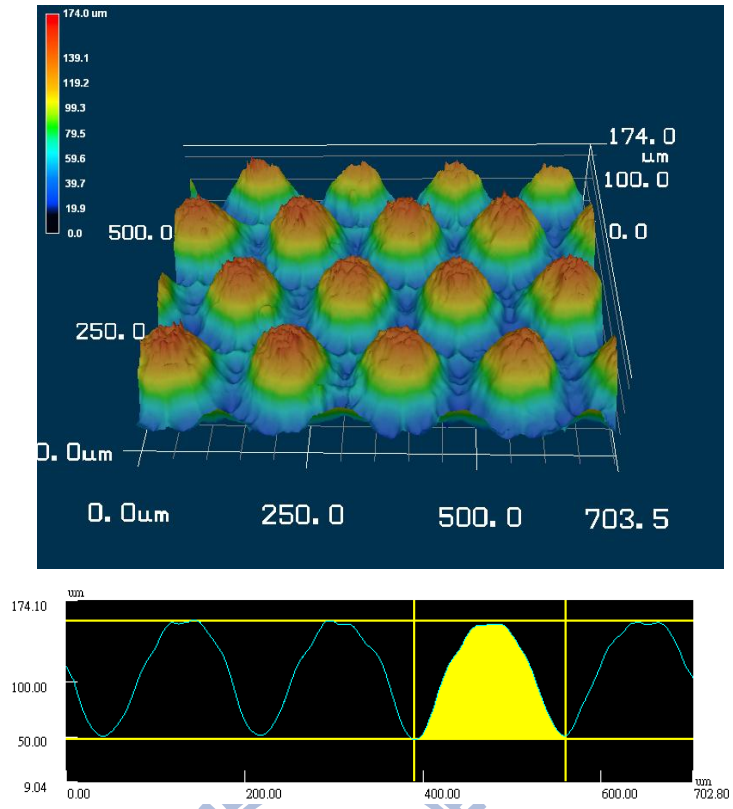


圖 4-30 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 900 mm/s，電解時間 60 min

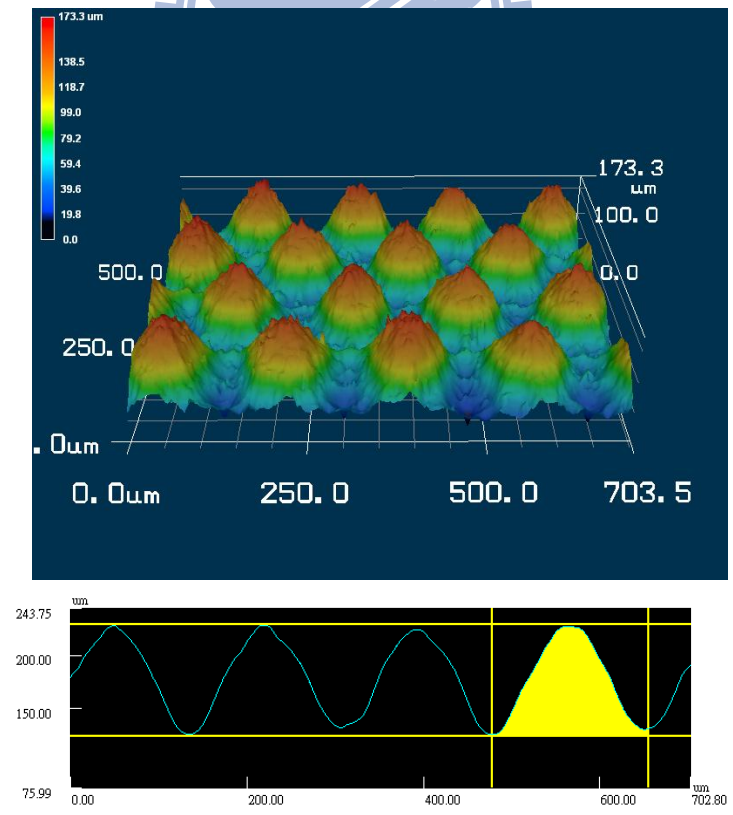


圖 4-31 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s，電解時間 60 min

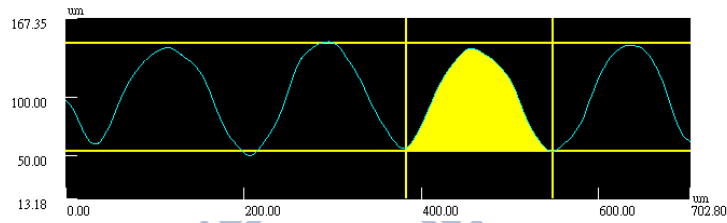
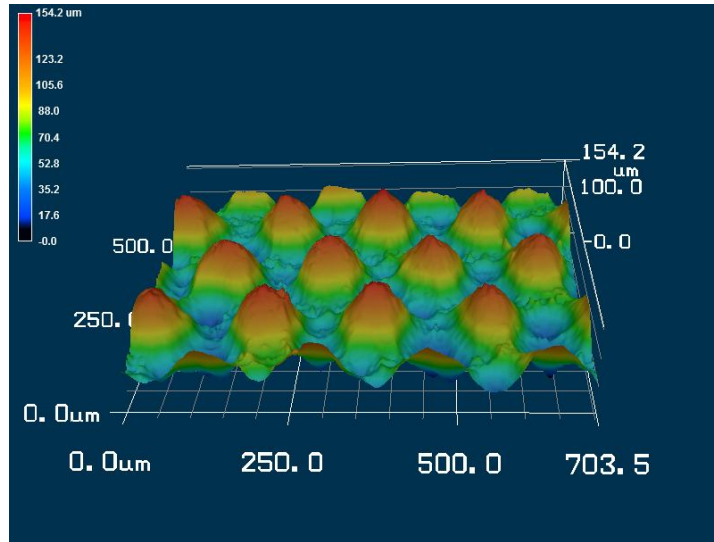


圖 4-32 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 900 mm/s，電解時間 75 min

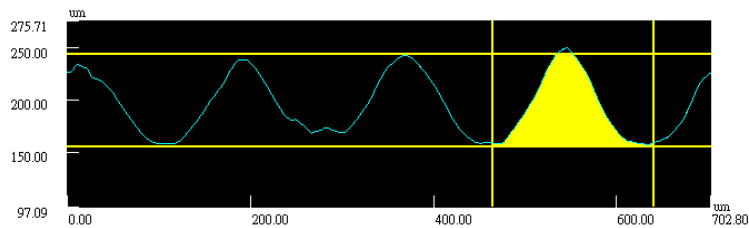
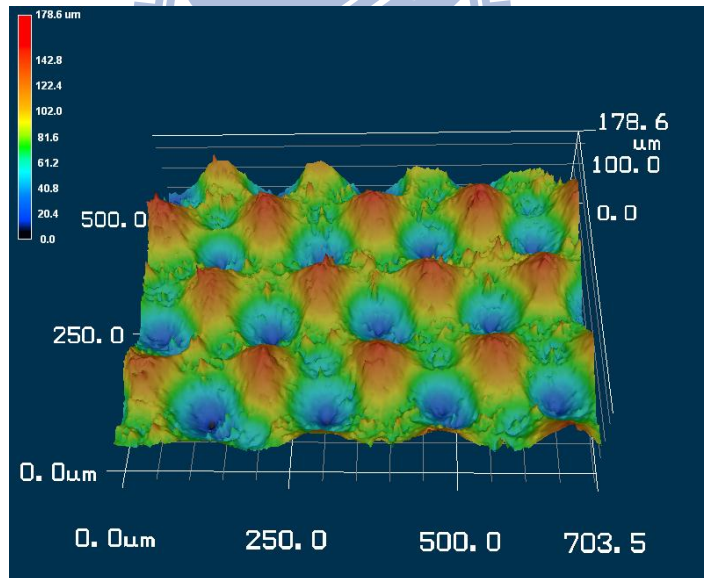


圖 4-33 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 900mm/s，電解時間 90 min

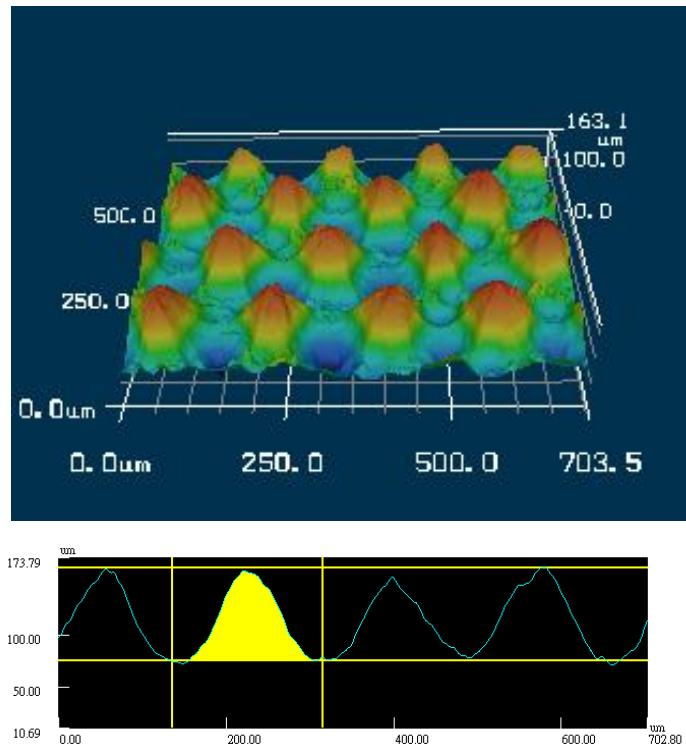


圖 4-34 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s, 電解時間 90 min

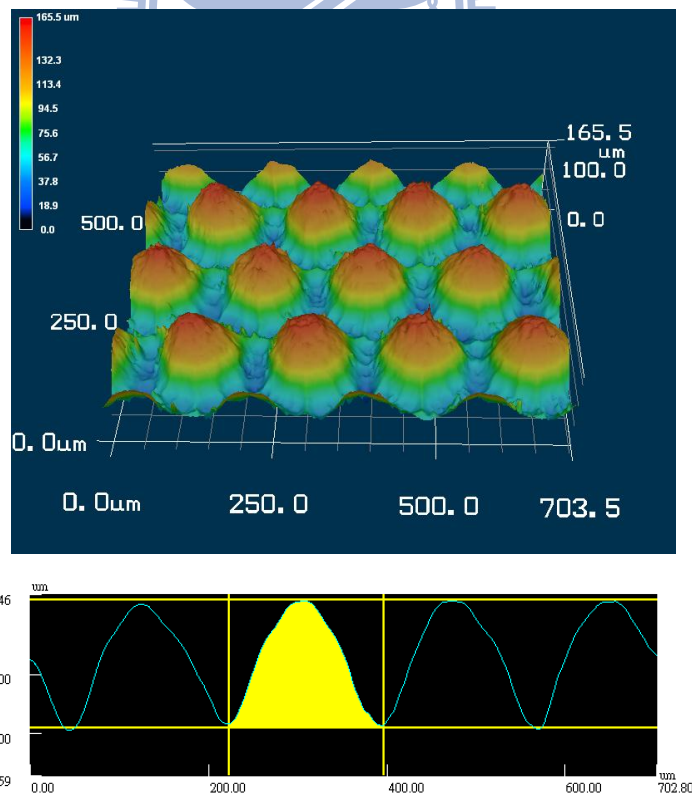


圖 4-35 外接圓尺寸 200 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s, 電解時間 75 min

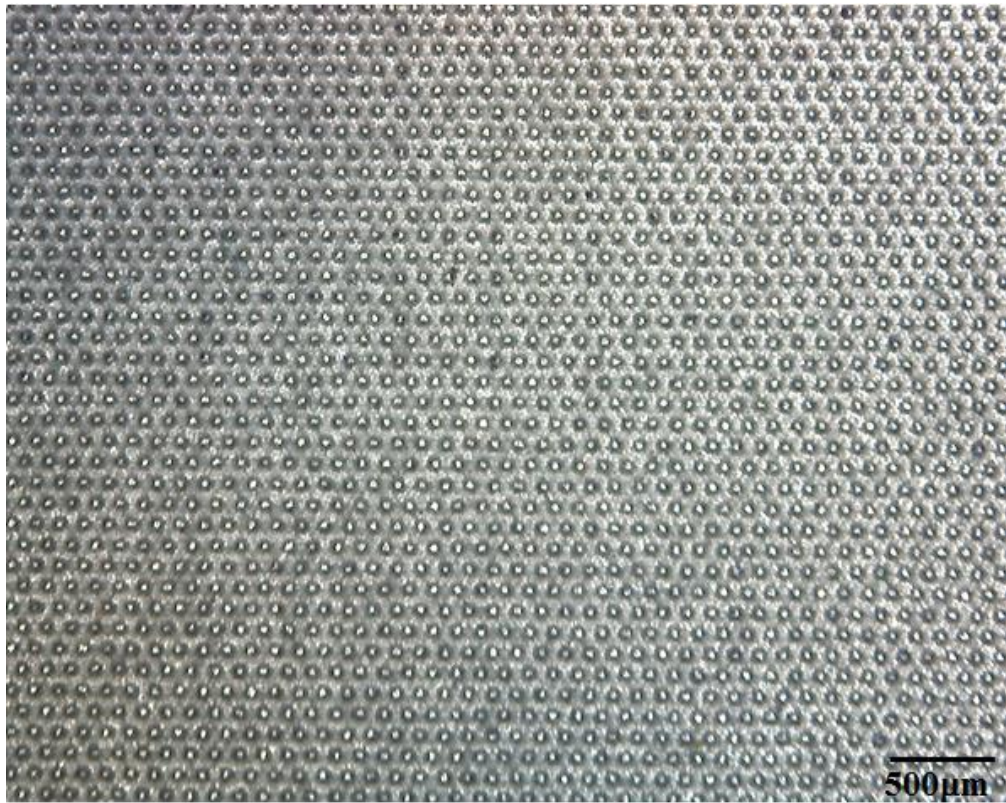


圖 4-36 雷射加工後模仁表面形貌

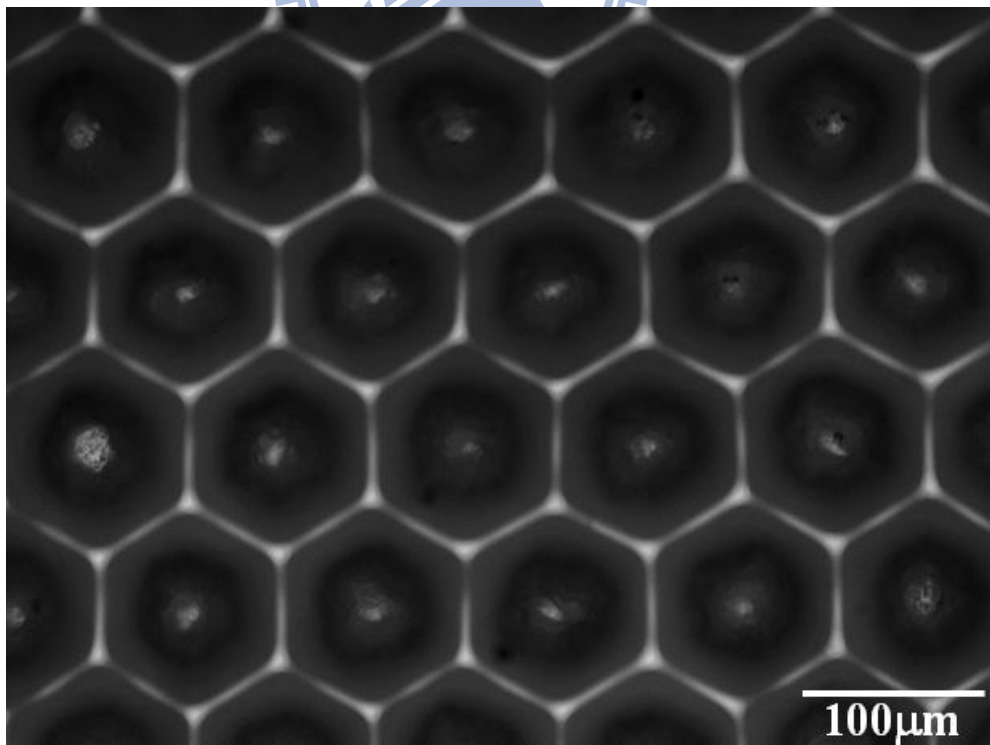


圖 4-37 經電解拋光後之模仁表面形貌

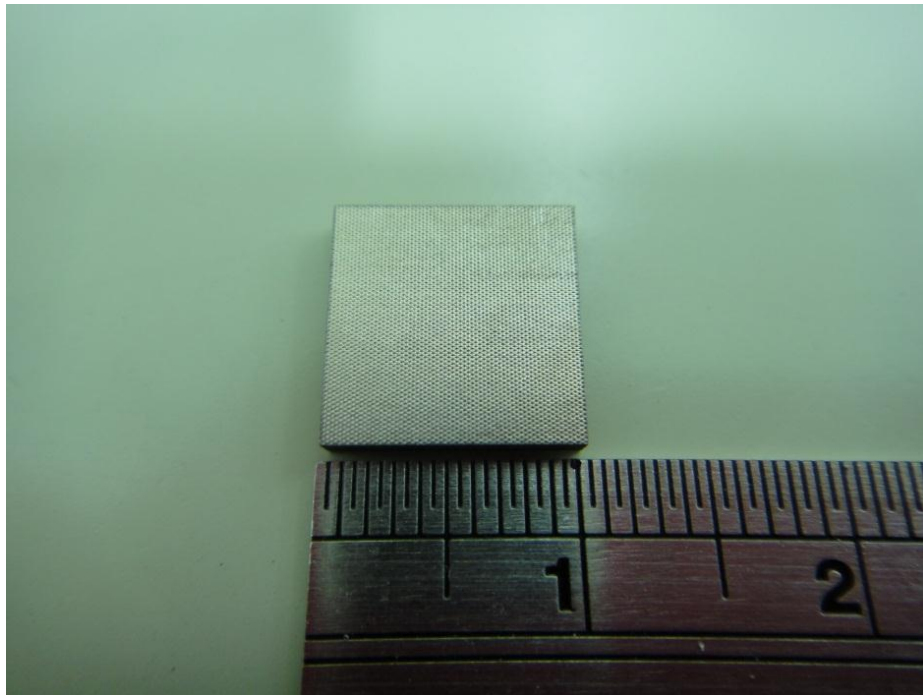


圖 4-38 不銹鋼模仁之微透鏡陣列實際圖片

4.2.4 微柱狀鏡陣列模仁之電解拋光

電解拋光可修整因雷射加工而產生的粗糙表面，並能將矩形狀結構改變為圓柱狀結構。雷射參數選用掃描速度為 1000 mm/s、雷射脈衝頻率 110 kHz 來製作不銹鋼微結構模仁。

圖 4-39 為探討電解拋光時間對結構高度及幾何形貌的影響。實驗結果顯示，經電解拋光後，若電解時間不足時則容易導致微結構過於方正，無法產生有曲率的輪廓，如圖 4-40 與 4-41 所示。此外亦須考慮高度及表面形貌是否趨近圓柱形，故最佳參數為電解拋光時間 125 分鐘。圖 4-42 為利用共軛焦顯微鏡觀察不銹鋼模仁經電解拋光後表面形貌。圖 4-43 及 4-44 為利用光學顯微鏡觀察不銹鋼模仁經電解拋光後表面形貌。

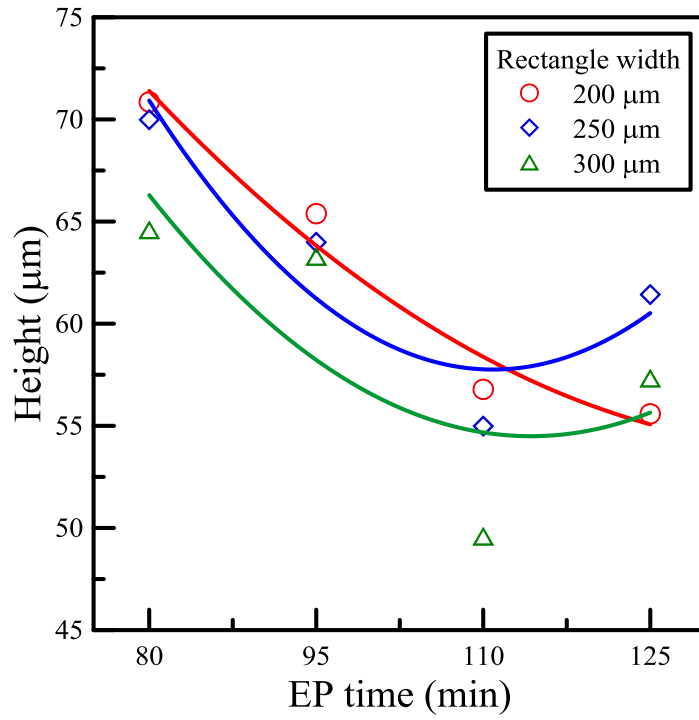


圖 4-39 電解拋光時間與模仁微結構高度之影響

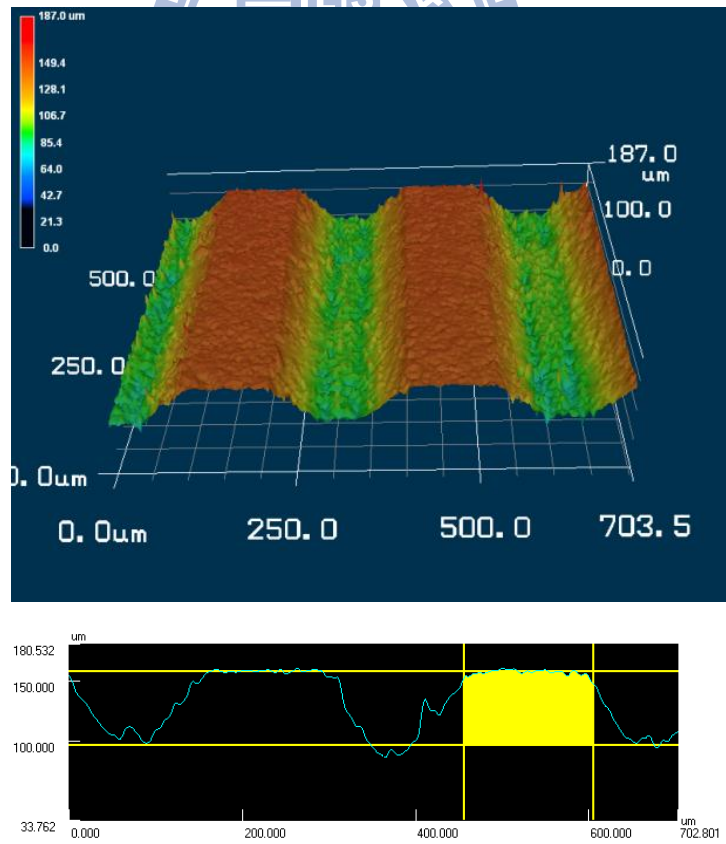


圖 4-40 矩形寬度 250 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s 電解時間 95 min

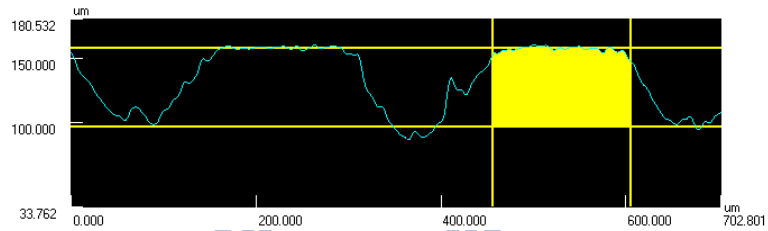
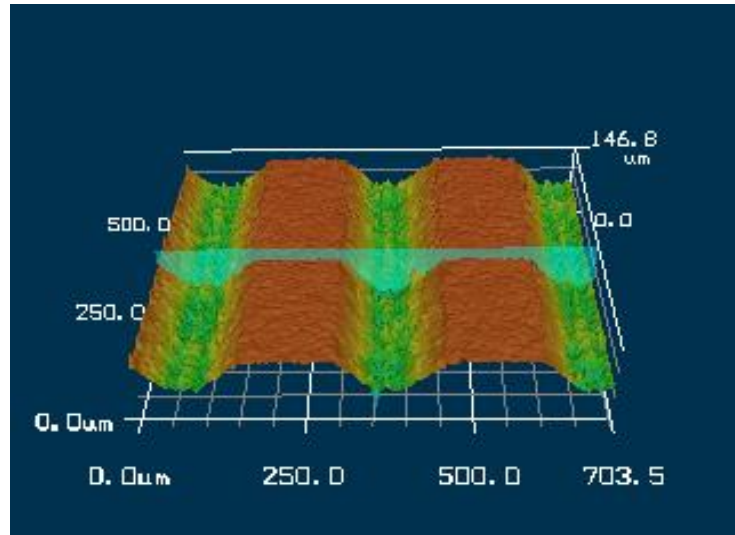


圖 4-41 矩形寬度 250 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s 電解時間 125 min

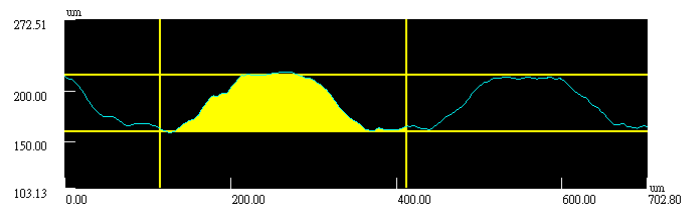
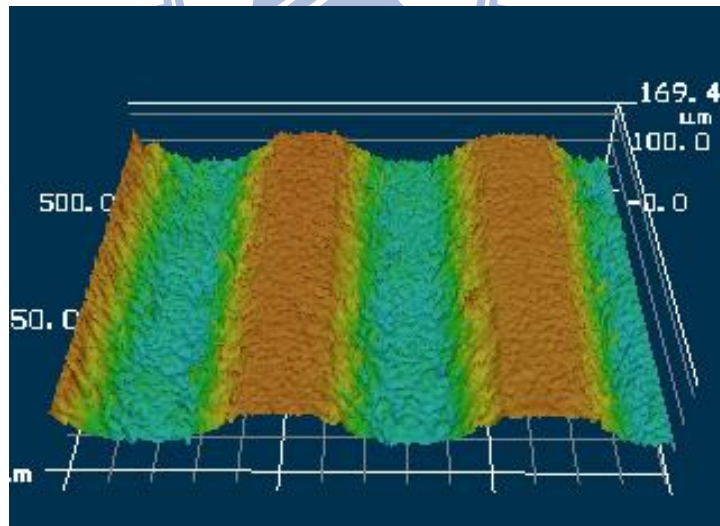


圖 4-42 矩形寬度 250 μm 雷射掃描速度 1000 mm/s 電解時間 125 min

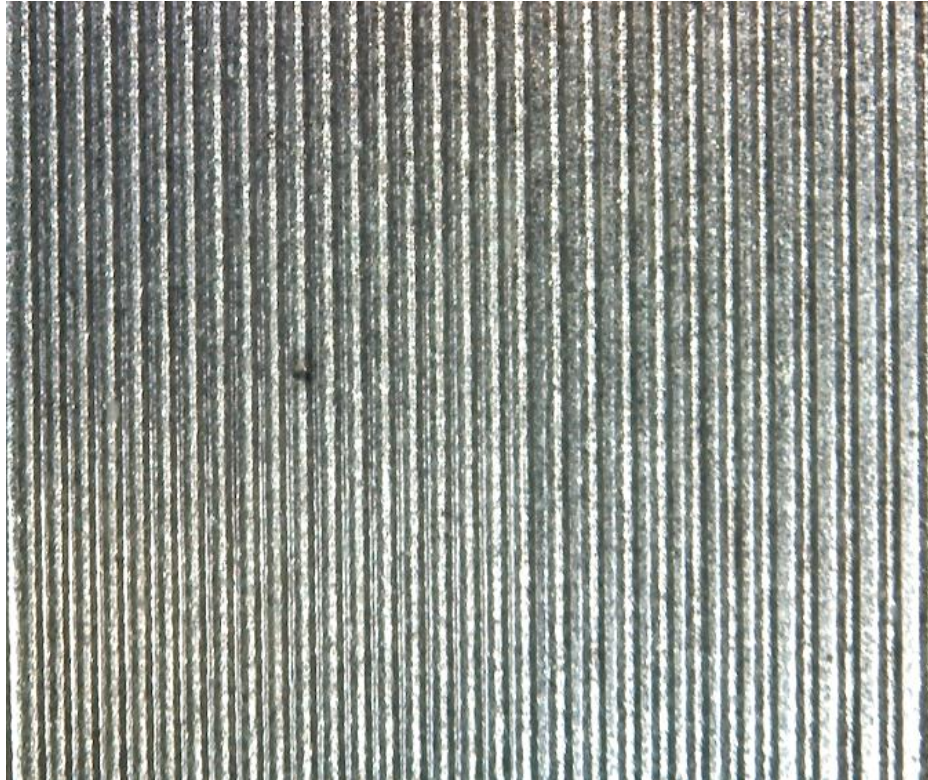


圖 4-43 電解拋光後不銹鋼微柱狀鏡模仁之光學顯微鏡圖

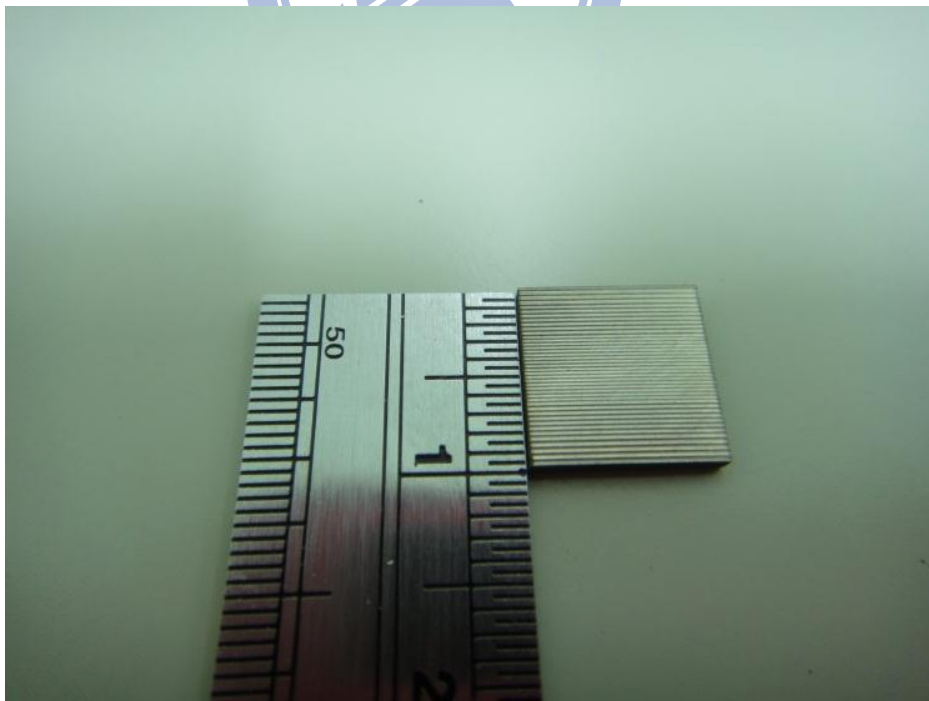


圖 4-44 不銹鋼模仁之微柱狀鏡陣列實際圖片

4.3 玻璃模造熱壓實驗

本實驗使用鈉玻璃(soda lime glass)進行玻璃模造熱壓實驗，利用精密線切割放電加工機將電解拋光後之模仁切割為尺寸 10 * 10 * 2 mm，再利用此模仁在 10 * 10 * 1.2 mm 鈉玻璃上進行熱壓實驗。

本章節首先探討玻璃材料在經過熱壓歷程後，溫度與降溫速率對玻璃折射率之影響。此外也討論不同成形方法與不同腔體環境對玻璃填充率的影響，並經由實驗結果得到各實驗條件之最佳參數。

4.3.1 熱壓參數對折射率影響

玻璃的折射係數與光線入射波長及環境溫度均有關係，折射率隨溫度變化的現象可藉由折射率的溫度係數來表示，其數值可能為正值或負值。圖4-45為絕對折射率的溫度係數在不同溫度下的關係，其測試光線波長為 435.8 nm。其中相對折射率的溫度係數 n_{rel}/T ，其表示介質為空氣且壓力為 $0.10133 \cdot 10^6$ Pa；絕對折射率的溫度係數 dn_{abs}/dT 則表示介質為真空。利用公式(4-5)可計算出其他溫度與波長下的絕對折射率的溫度係數[39]。

$$\frac{dn_{abs}(\lambda, T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2 \cdot n(\lambda, T_0)} \cdot \left(D_0 + 2 \cdot D_1 \cdot \Delta T + 3 \cdot D_2 \cdot \Delta T^2 + \frac{E_0 + 2E_1 \cdot \Delta T}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \right) \quad (4-5)$$

其中 T_0 為參考溫度 20 °C、 T 為環境溫度(°C)、 ΔT 為溫度變化量、 D_0, D_1, D_2, E_0, E_1 與 λ_{TK} 為不同種類玻璃的常數。

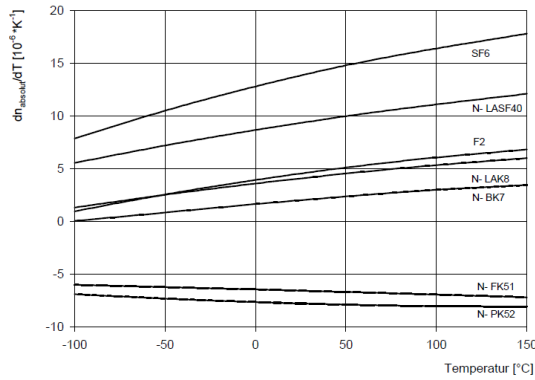


圖4-45 溫度與不同光學玻璃之絕對折射率溫度係數的關係[39]

玻璃之光學性質主要取決於化學成分的組成與熔融時的熱處理程序。

其中玻璃的冷卻速率在轉化溫度範圍時，可影響玻璃一定範圍內的折射係數，一般而言越慢的冷卻速率可得到越高的折射率，見公式(4-6)所示。圖4-46所示為不同光學玻璃之絕對折射率的溫度係數對退火速率（冷卻速率）之影響，參考冷卻速率值為7 K/h。

$$n_d(h_x) = n_d(h_0) + m_{nd} \cdot \log((h_x)/h_0) \quad (4-6)$$

其中 h_0 為原始的冷卻速率、 h_x 為改變後的冷卻速率、 m_{nd} 為各種類玻璃的折射率冷卻係數。

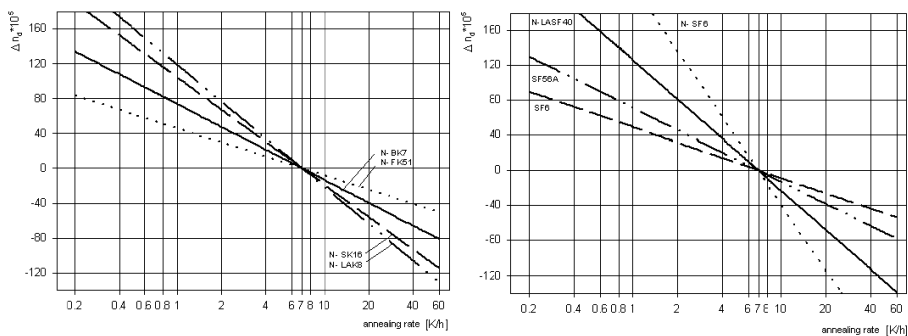


圖4-46 不同光學玻璃之絕對折射率的溫度係數對冷卻速率之影響[39]

在光學系統當中，折射率會影響整個系統的光學性質優劣。在玻璃熱壓的製程中，玻璃經過升溫與降溫的過程，依據其冷卻速度與模造溫度的變化推論，將會對折射率造成影響，因此若沒有將此影響補正回光學系統的設計參數，將直接影響系統的光學性質。

於此實驗中，我們使用的玻璃厚度分別為 1.2 mm 與 5 mm，將其分別經歷一次相同參數的模造歷程，再利用阿貝氏折射率量測儀進行折射率的量測。圖 4-47 為厚度 5mm 之玻璃，在不同模造溫度與冷卻速率條件下與折射率變化量之關係。其中在冷卻速率的改變，其折射率變化量由 0.0005 上升至 0.03 n_D 。反觀模造溫度的變化對折射率影響則介於小數下第三位至第四位之間，影響較不顯著。

圖 4-48 為厚度 1.2 mm 之玻璃，於不同模造溫度與冷卻速率條件下與折射率變化量之關係。於此實驗中可發現模造溫度與冷卻速率對折射率均沒有顯著之影響，折射率變化量的改變均在小數下第四位。由此結果研判在玻璃厚度較薄的情況下，導致對應模造溫度與冷卻速率的折射率之變化量，其敏感度降低。

因本實驗使用之材料為 1.2 mm 厚度之鈉玻璃，由以上結果可佐證本實驗之玻璃經模造歷程後，其折射率之變化可忽略不計。

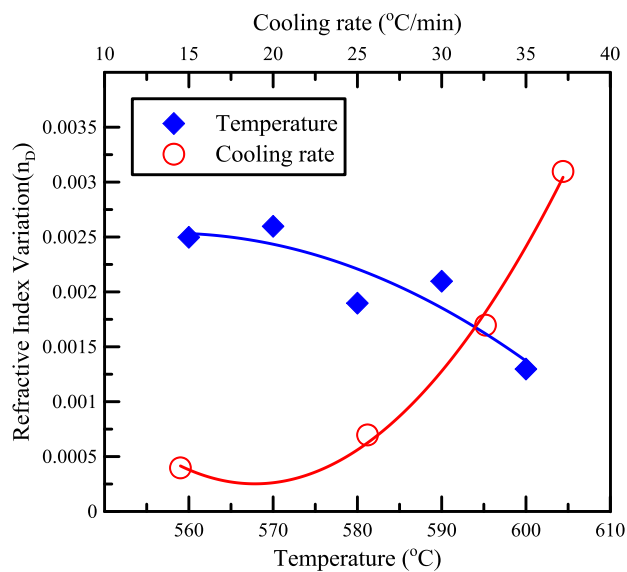


圖 4-47 玻璃厚度 5 mm，冷卻速率與溫度之折射率變化量

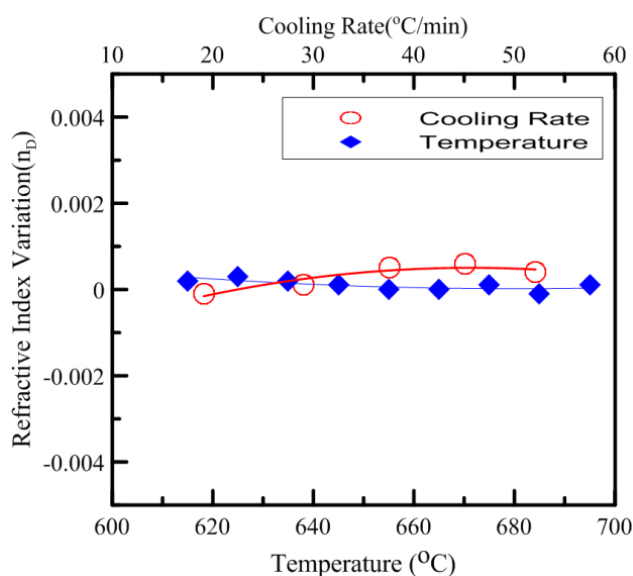


圖 4-48 玻璃厚度 1.2 mm，冷卻速率與溫度之折射率變化量

4.3.2 單段熱壓成形之影響

玻璃模造製程中，熱壓方式可選擇單段熱壓成形或二段熱壓成形。兩者差別在於二段熱壓成形在第一段熱壓之後，將會在設定的溫度區間內降低模造壓力，使玻璃所承受的壓力降低，之後再進行第二段的加壓成形。

針對單段熱壓參數對玻璃成形之影響，其主要影響參數為模造溫度與成形壓力。其他實驗參數分別為真空中成形、模造時間為 90 秒。圖 4-49 所示為單段熱壓歷程；A 區是指開始加溫至上下模座溫度維持穩定，溫度穩定後進入 B 區進行保溫，保溫結束後進入 C 區，此為熱壓成形階段，熱壓完成後進入 D 區冷卻至開模溫度。

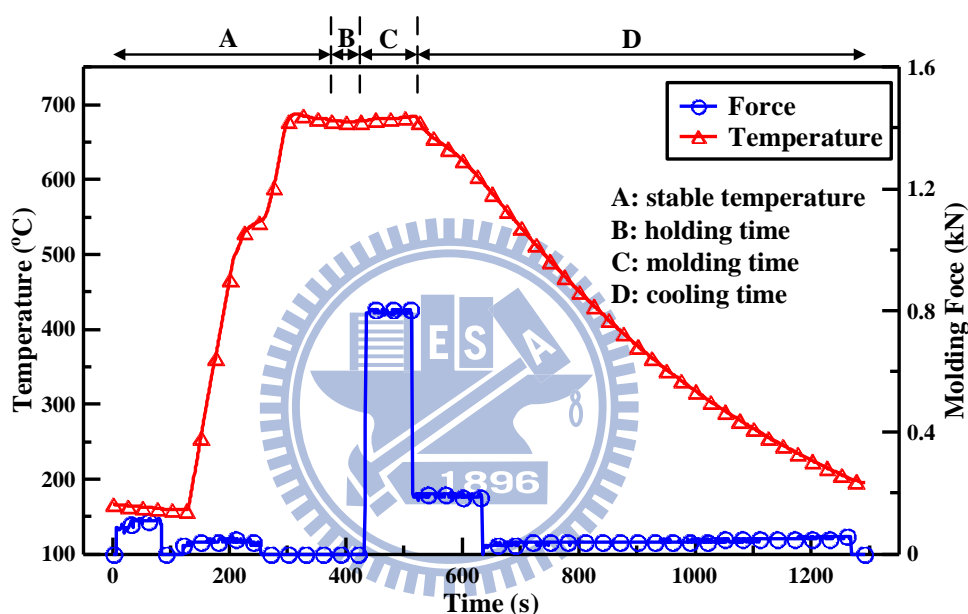


圖 4-49 單段熱壓成形溫度與壓力對時間之歷程圖

圖 4-50 為固定溫度下，不同壓力對填充率的影響。填充率定義為玻璃微結構的深度與模仁微結構高度的比值，填充率愈高表示微結構的轉寫率/成形性愈佳，由壓力實驗結果可發現壓力與填充率為正相關成長，但是當壓力太高時，容易造成玻璃裂痕產生，甚至嚴重碎裂。若壓力太低則玻璃無法達到高的填充率而導致微結構輪廓失真。

此外在微柱狀鏡陣列實驗當中，可發現成形力量需達到 9 kN 才能達到填充率 92%。但如圖 4-50(a)所示，在微透鏡陣列實驗中，成形力量卻只要 0.8 kN。原因在於熱壓時，微柱狀鏡陣列結構為線形接觸後為圓柱面接觸，其接觸面積大於微透鏡陣列的點接觸後為圓球面接觸，故其所需壓力遠大於微透鏡陣列，如圖 4-53 所示。以本實驗結果而言微柱狀鏡陣列與微透鏡陣列之最佳填充率壓力參數分別為成形力量 9 kN 與 0.8 kN。

圖 4-52 為固定模造壓力下，不同的模造溫度與填充率的關係曲線。實驗結果可發現模造溫度與填充率為正相關成長，且模造溫度是模造製程中極敏感的參數。若溫度低於 670 度時，玻璃軟化不足黏度過高，模仁微結構幾乎無法轉印於玻璃上且容易造成模仁的損壞，若溫度高於 690 度時，容易造成玻璃與模仁的沾黏，亦會造成模仁損壞，且熱壓後玻璃會呈現嚴重扭曲變形，故以實驗結果而言 685 至 690 度為最理想之模造溫度。

在熱壓製程當中，針對未造成模仁與玻璃損壞的參數範圍而言，溫度越高或壓力越大能夠達到更高的填充率。但就實際生產情況而言，則是以最低的壓力與溫度，而能達到設定的品質為最佳參數，較低的模造溫度能使冷卻時間減少並加快整個製程循環週期。而低的成形壓力能保護模仁，使模仁壽命增加，故較低的模造溫度與成形壓力可有效降低生產成本。下一節我們探討利用二段熱壓成形的方式來進行熱壓實驗，希望能利用藉由二

段熱壓成形技術來消除熱壓後的殘留應力與提高填充率。

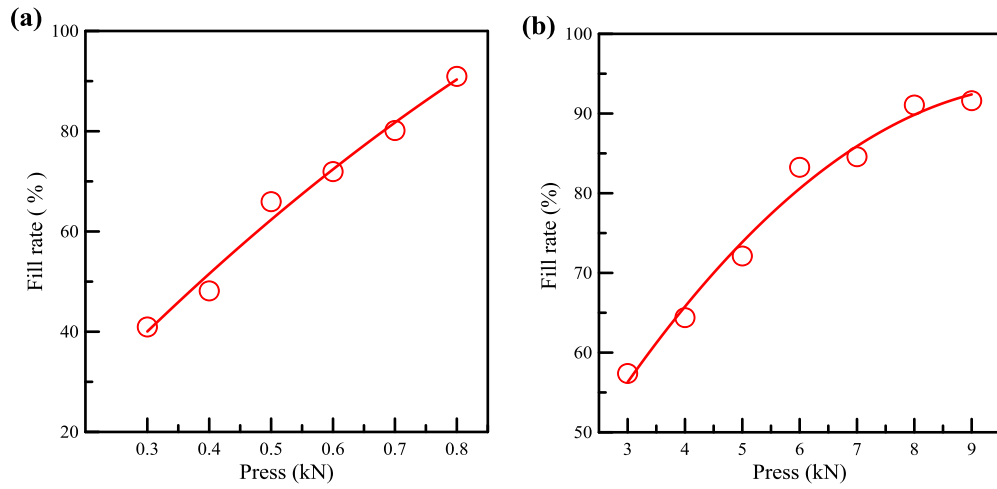


圖 4-50 成形壓力對填充率之影響(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列

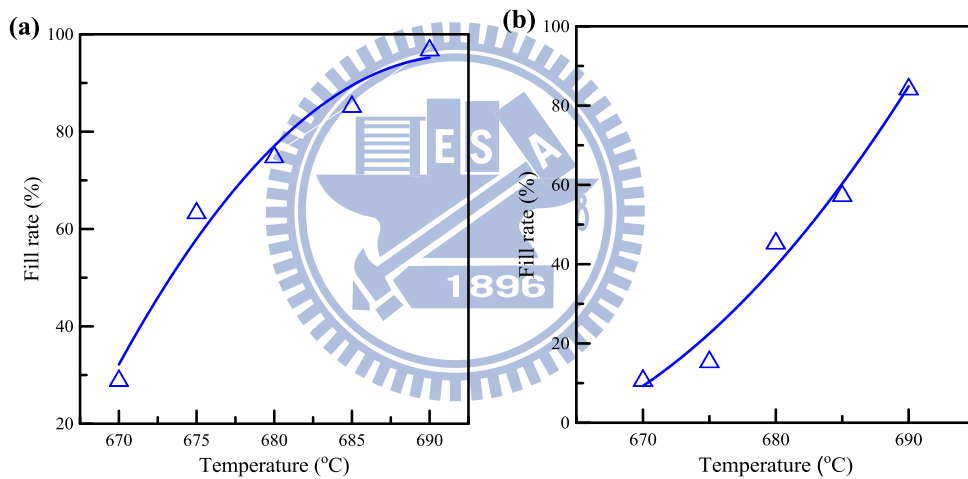


圖 4-51 溫度對填充率之影響(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列

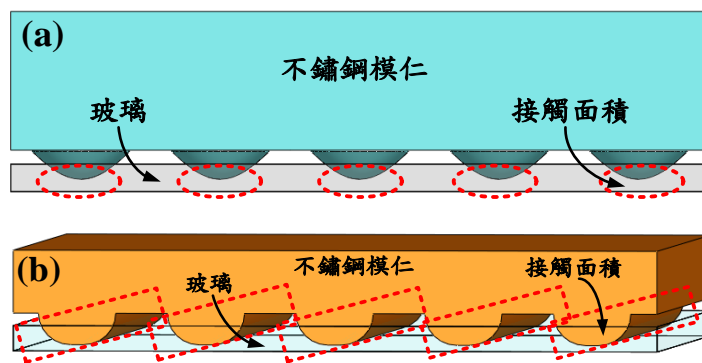


圖 4-52 接觸面對熱壓阻力示意圖(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列

4.3.3 二段熱壓成形之參數影響

根據文獻[1]，如圖 4-53 所示，模造溫度在降伏點以上、軟化點附近時，因為變形的能量大而容易成形，隨著冷卻收縮量大，會產生所謂的凹斑而降低玻璃的成形精度。因此提出了二段成形的製程方法來降低凹斑現象的產生，二段成形意即再度加壓一次來改善玻璃元件成形精度與釋放內部的殘留應力。

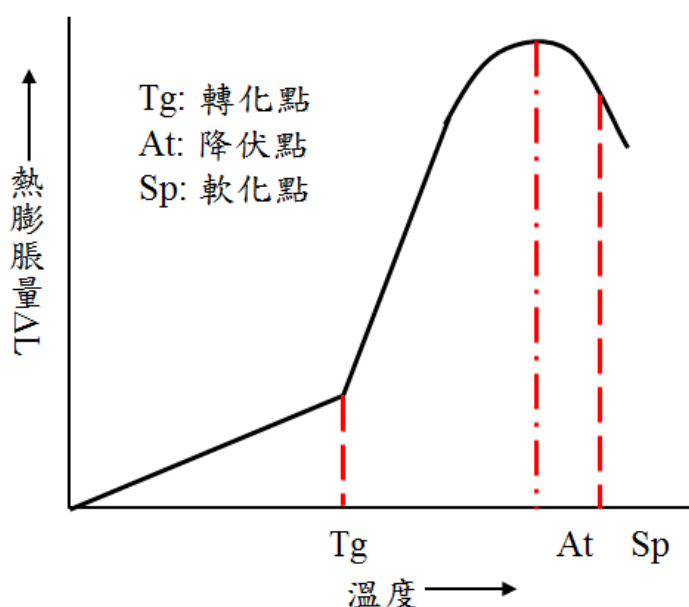


圖 4-53 玻璃溫度與熱膨脹量的關係[1]

探討二段熱壓成形實驗中，主要探討參數為熱壓時的壓模速度、保溫時間、模造溫度、首次成形力量、與二次成形力量，工作環境為真空狀態；參數代號如表 4-3 所示。由於二段熱壓成形實驗探討參數較多，本實驗使用田口法，利用 L16 直交表來進行實驗分析並取得最佳參數。

表 4-3 玻璃模造熱壓實驗之參數代號

V (mm/s)	壓模速度
PT1 (s)	模造時間
T (°C)	模造溫度
Force 1 (kN)	首段成形力量
Force 2 (kN)	二次成形力量

圖 4-54 為二段熱壓歷程。A 區為開始加熱至上下模座溫度穩定，穩定後進入 B 區開始保溫，保溫時間完成後進入 C 區開始第一次熱壓成形，熱壓結束後進行壓力釋放，此時同步進行降溫，並進入 D 區再一次進行熱壓，結束後進入 E 區開始冷卻至開模溫度。

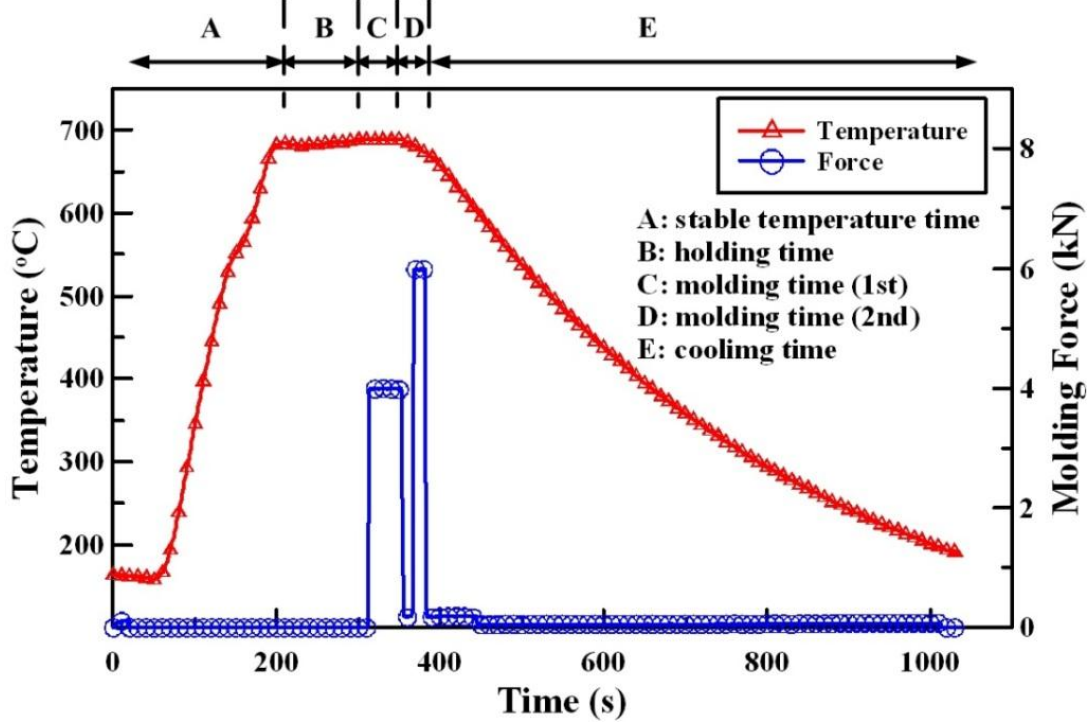


圖 4-54 二段熱壓成形溫度與壓力對時間之歷程圖

其中 B 區保溫時間的目的在於使模座、模仁以及玻璃預形體溫度均勻穩定，降低因溫度不均而造成玻璃破裂的現象。但過長的保溫時間，除了耗費能源、增加製程時間、降低模座與模仁壽命外，亦會使玻璃預形體累積過多熱能，容易造成玻璃元件品質不穩定。因此，選擇適當的保溫時間可降低成本並獲得較佳的成品良率。

圖 4-55 為利用 L16 直交表進行微柱狀鏡陣列二段熱壓實驗後所得之各參數。得到的最佳化參數組合為；首段成形力量 Force 1= 4 kN，二段成形力量 Force 2= 6 kN，壓模速度 V=15 mm/s，模造時間 PT1=75 s，模造溫度 T=690 °C。表 4-4 為 L16 直交表參數組合與實驗結果。由結果中可發現在二段熱壓實驗中，Force 1 力量在大於 4 kN 時，容易造成模仁微結構尖端的損毀，故其填充率呈現不穩定的現象。而針對 Force 2 而言，則與填充率呈現正相關的線性關係。但若力量大於 6 kN，亦容易產生玻璃結構破裂現象。針對壓模速度而言，過快的上升速度，將導致模座動能過大，結果造成模仁或玻璃元件的微結構受損，進而降低填充率，由實驗結果分析而得知壓模速度大於 15 mm/s 時，其填充率將會下降。未達到相對模造壓力下的填充率上限值時，模造時間與填充率呈正比關係，但在玻璃或模仁未損壞的前提下，每個模造壓力都有其填充率的上限值，當達到其上限值時，模造時間雖然持續增加，其填充率卻極緩慢增加甚至停滯，因此由實驗結果，選擇模造時間 75 秒為最佳值。玻璃模造製程中，溫度參數是最重要的，

依據玻璃材料的溫度特性、玻璃及模仁的尺寸、形狀等要素來設定溫度，
 實驗結果顯示在 690 °C 的溫度下，可獲得較高之填充率。

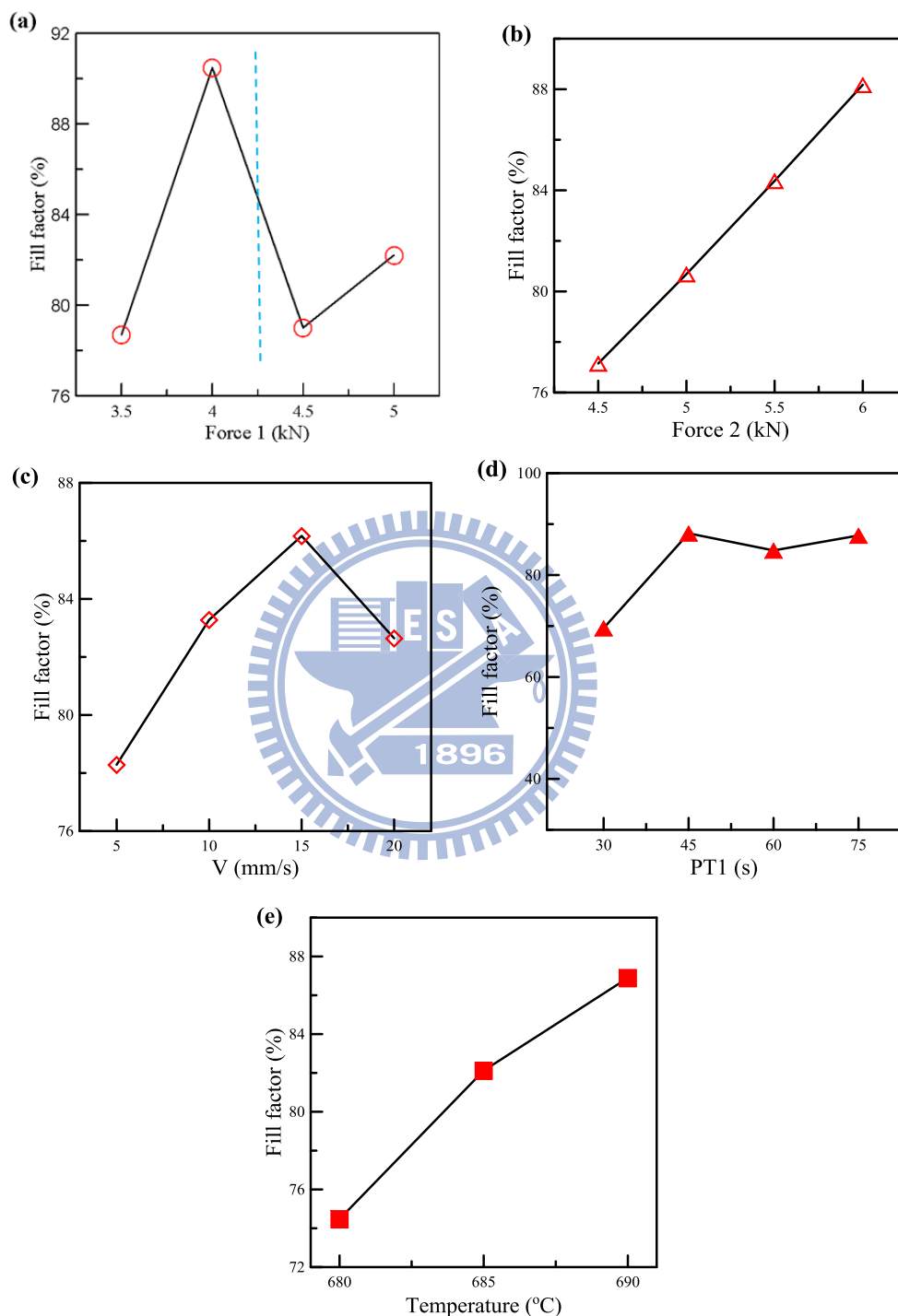


圖 4-55 田口直交表分析結果(a)一段成形力量(b)二段成形力量(c)壓模速度
 (d)模造時間(e)成形溫度

表 4-4 田口 L16 直交表實設計參數與實驗數據-微柱狀鏡陣列

L16	V (mm/s)	Force 1 (kN)	Force 2 (kN)	PT1 (s)	T (°C)	填充率
1	5	3.5	4.5	30	680	48%
2	5	4	5	45	685	89%
3	5	4.5	5.5	60	690	82%
4	5	5	6	75	690	94%
5	10	3.5	5	60	690	85%
6	10	4	4.5	75	690	94%
7	10	4.5	6	30	685	72%
8	10	5	5.5	45	680	82%
9	15	3.5	5.5	75	685	89%
10	15	4	6	60	680	94%
11	15	4.5	4.5	45	690	88%
12	15	5	5	30	690	74%
13	20	3.5	6	45	690	93%
14	20	4	5.5	30	690	85%
15	20	4.5	5	75	680	74%
16	20	5	4.5	60	685	79%

圖 4-56 為利用 L16 直交表進行微透鏡陣列二段熱壓實驗後所得之各參數。其最佳參數組合為；首段成形力量 Force 1=4 kN，二段成形力量 Force 2=4.5 kN，壓模速度 V=10 mm/s，模造時間 PT1=75 s，模造溫度 T=690 °C，表 4-5 為 L16 參數組合與實驗結果。由結果中可發現在二段熱壓實驗中，Force 1、Force 2 壓力對填充率方面影響呈現正相關成長。但若力量分別大於 4 與 4.5 kN 時，亦容易造成玻璃裂紋的產生或結構破裂現象。針對壓模速度而言，發現與微柱狀鏡陣列相同之結果，過快的上升速度容易造成模仁或玻璃的損壞，進而降低填充率。由實驗結果分析而得知壓模速度大於 10 mm/s 時，其填充率將會下降。模造時間太短時，易造成在相同壓力下的

填充率不足。由實驗結果，模造時間選擇 75 秒。溫度參數經實驗結果顯示在 690 °C 的溫度下，可獲得較高之填充率。

熱壓實驗中，工作腔體中若含有空氣與污染粒子，容易造成模仁的氧化，降低模仁及膜層的壽命，汙染粒子則易沾黏至玻璃中，故一般實驗均要求真空環境或充填氮氣之環境。但若腔體為真空環境，在加熱過程時，即少了氣體的熱對流作用，僅有熱傳導以及熱輻射作用來加熱模仁與玻璃，對於玻璃溫度的均勻性與黏度有極大的影響。在下一章節將探討在熱壓實驗中，腔體內充滿氮氣與真空環境條件下對填充率的影響。

表 4-5 田口 L16 直交表實驗設計參數與實驗數據-微透鏡陣列

L16	V (mm/s)	Force 1 (kN)	Force 2 (kN)	PT1 (s)	T (°C)	填充率
1	5	1	1.5	30	680	14%
2	5	2	2.5	45	685	38%
3	5	3	3.5	60	690	82%
4	5	4	4.5	75	690	86%
5	10	1	2.5	60	690	55%
6	10	2	1.5	75	690	64%
7	10	3	4.5	30	685	83%
8	10	4	3.5	45	680	60%
9	15	1	3.5	75	685	82%
10	15	2	4.5	60	680	56%
11	15	3	1.5	45	690	29%
12	15	4	2.5	30	690	79%
13	20	1	4.5	45	690	48%
14	20	2	3.5	30	690	44%
15	20	3	2.5	75	680	66%
16	20	4	1.5	60	685	37%

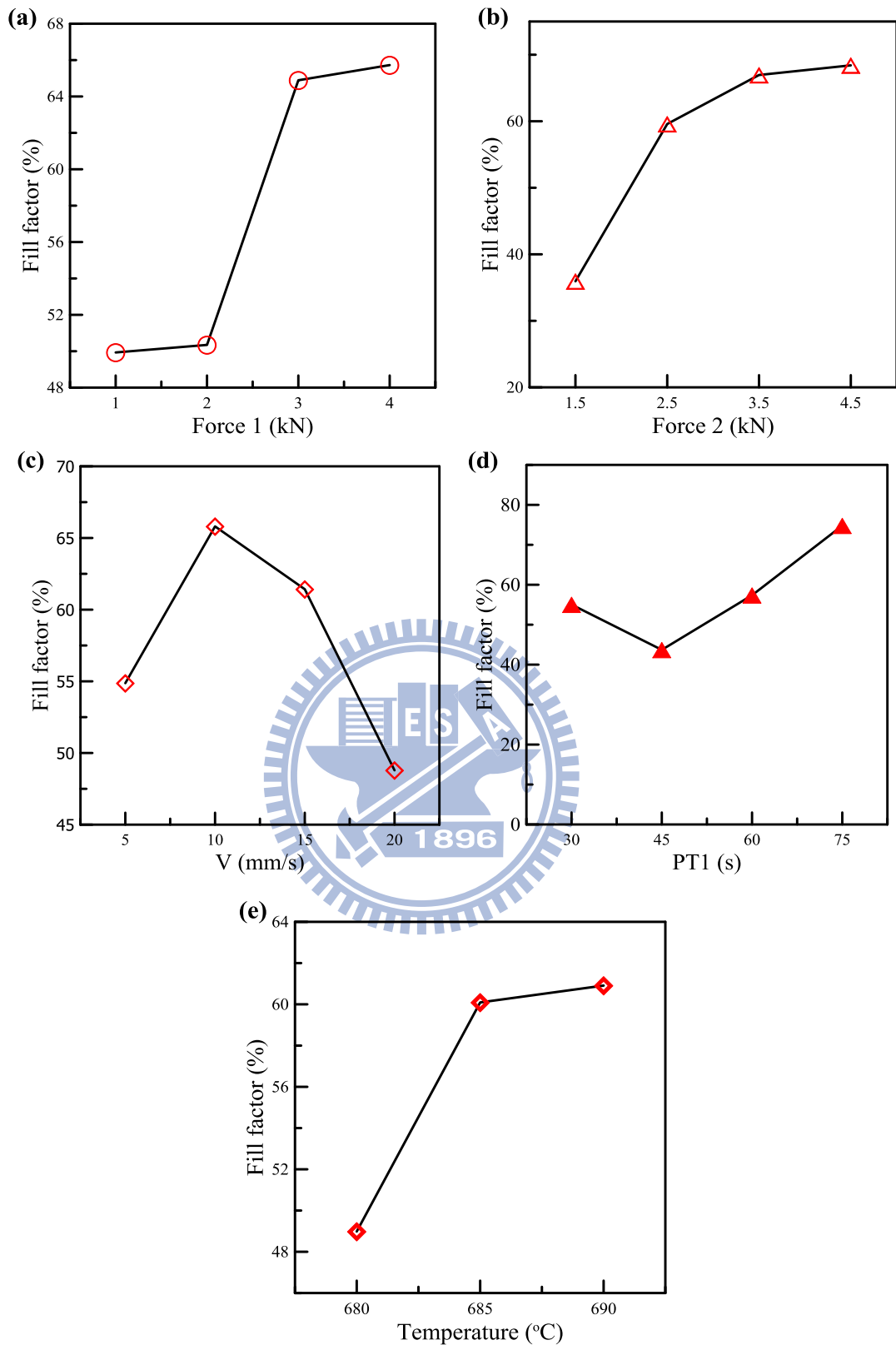


圖 4-56 田口直交表分析結果(a)首段成形力量(b)二段成形力量(c)壓模速度
(d)模造時間(e)成形溫度

4.3.4 比較二段熱壓成形時腔體含氮氣與真空狀態的影響

在玻璃熱壓實驗中，溫度改變與玻璃黏度的變化之間的關係相當重要，圖 4-57 為不同的玻璃材料其溫度與黏滯係數的關係，可明顯發現當溫度上升時，其黏滯係數將會下降。隨著不同玻璃的種類而有不同的工作溫度範圍，其適合成形的黏度亦不相同。

一般在玻璃成形加工中，玻璃黏度控制在工作點(working point)與軟化點(softening point)之間。以本研究所使用之鈉玻璃而言，適合的工作溫度約在 680 度至 1000 度之間。

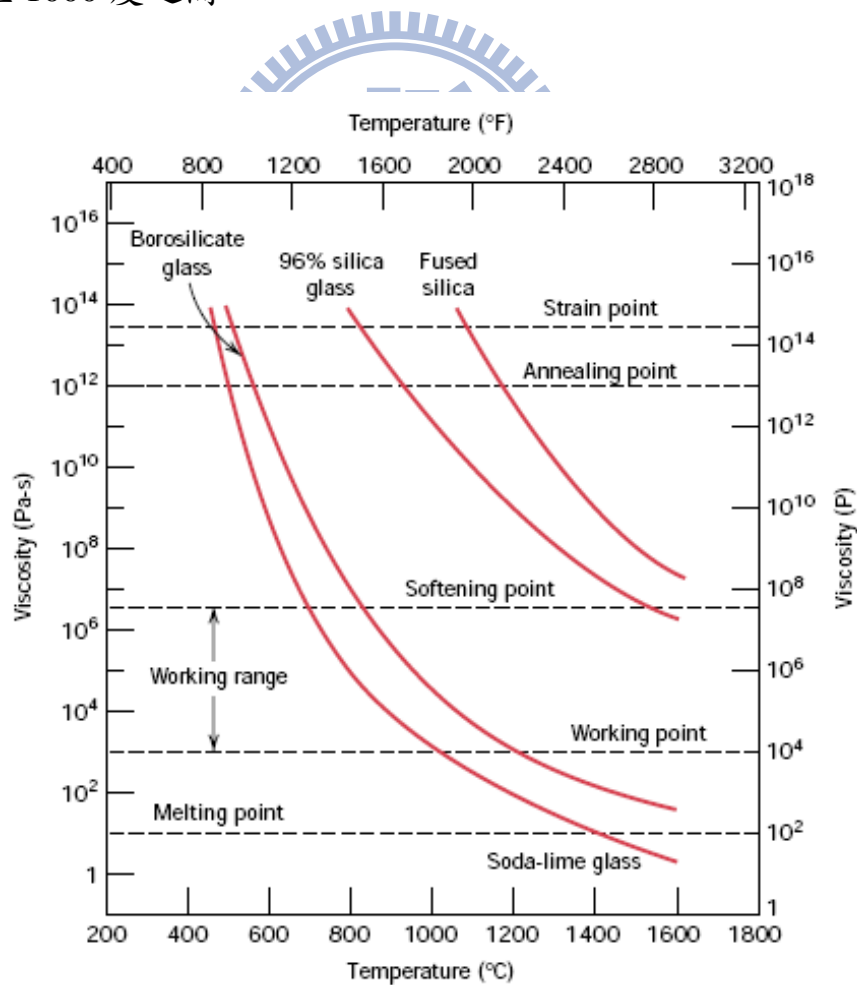


圖 4-57 玻璃溫度對黏滯係數之關係[40]

玻璃是種非結晶的材料，其變形機制不同於一般的金屬材料有差排滑動的情形，由於其原子排列為無序的結構，故玻璃材料在成形中，需依靠外在施加的壓力造成內部原子間的互相斷鍵，再與其他原子鍵結，藉此而進行移動與變形。一般玻璃材料在研判成形難易度時，以黏度(Viscosity)當作判斷之標準[40]。

以 μ 來表示其中黏度並定義為剪應力與剪應變率的比值：

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dy} = \frac{F/A}{dv/dy} \quad (4-7)$$

其中 τ 為剪應力，而 v 為速度，而黏度的單位為 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

本實驗探討腔體內為氮氣或真空狀態下對於二段熱壓成形之參數影響，其圖中真空環境與氮氣環境分別代表真空與充填氮氣之腔體條件。

真空條件下代表熱壓全程腔體均為抽真空狀態；氮氣條件則代表加熱前開始抽真空並於固定秒數後停止，之後通入設定流量之氮氣後停止充氣，使腔體內充滿氮氣並隨之開始加熱。

圖 4-58 顯示在固定溫度為 685 度下，探討不同成形力量對填充率之影響。於實驗中發現在腔體內含有氮氣的情況下成形力量只需到達 0.85 kN(首段)與 0.9 kN(二段)時，填充率即可到達 99.5%，然而在腔體內真空的狀態下，則需首段成形力量 4 kN 與二段成形力量 4.5 kN，方可達到填充率 99.2%。

圖 4-59 為在固定力量參數為 1 與 1.5 kN(一段、二段壓力)的情況下探討不同模造溫度與填充率之影響。由實驗中可發現在腔體內為氮氣時，在模造溫度 680 度下填充率即有 80.5%之效果，於 690 度時可到達 99.6%之填充率。然而當腔體內為真空時，於 690 度時填充率僅 44.6%。

本實驗所得之結果符合上敘之理論，亦證實在腔體內無氣體存在時，因缺少了氣體的熱傳影響導致玻璃受熱不均勻，甚至軟化程度不足；在玻璃材料受熱不均及軟化程度不足之情況下，影響材料之黏度係數並間接對熱壓參數與玻璃精度有嚴重的影響。

依照公式(4-7)，若在溫度降低的情況下，玻璃黏度也隨之提高，故在相同的剪切應力之下，剪切應變率亦然減少。甚至當黏度高於模造溫度範圍時，玻璃成形的難度亦會隨者黏度提高而增加。

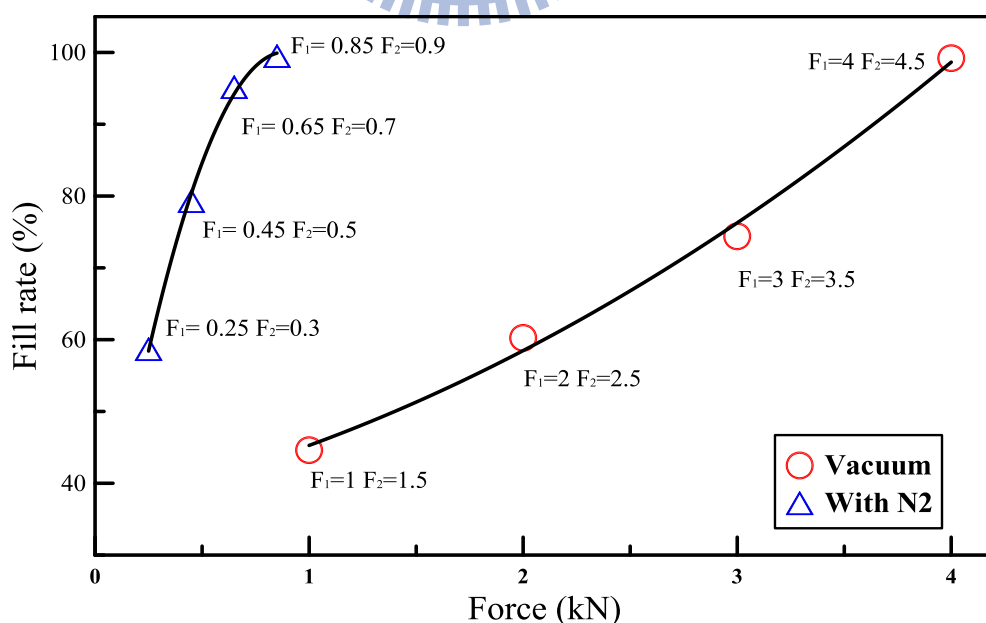


圖 4-58 二段熱壓成形-比較腔體條件為真空或氮氣時壓力對填充率之影響

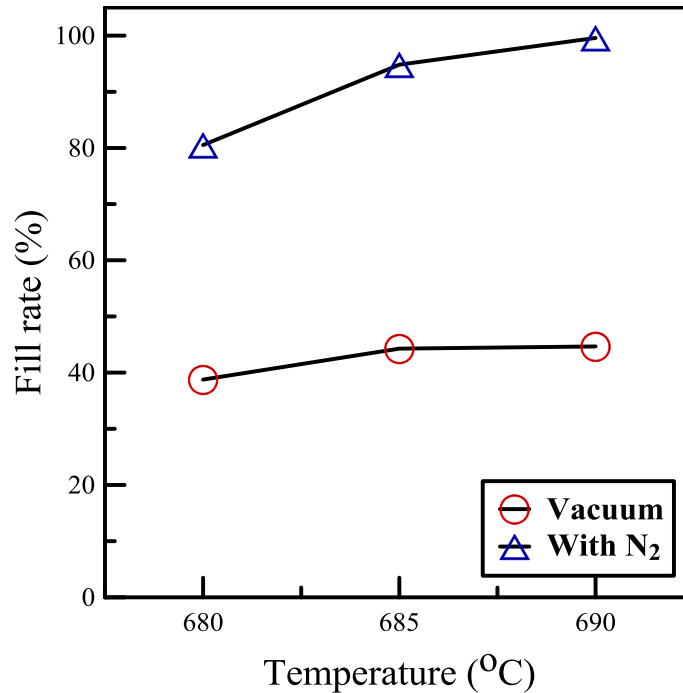


圖 4-59 二段熱壓成形-比較腔體條件為真空或氮氣時溫度對填充率之影響

由上述上之 L16 田口實驗結果，可以得知使用最佳參數的條件下，可將玻璃熱壓製程之填充率提高到近乎百分之百。但因本研究製作之模仁是利用電解拋光的方式改變其頂端的形狀，故在微結構底部為非曲率之矩形或多邊形結構；當填充率到達百分之百時，得到之微結構輪廓較不理想。

故以 L16 實驗所得之最佳參數與腔體氣體為氮氣狀態時做為參考基準，將參數微調為；微透鏡陣列，成形力量 Force 1= 0.45 kN，壓模速度 V=10 mm/s，模造時間 PT1=90 s，模造溫度 T= 690 °C；微柱狀鏡陣列，成形力量 Force 1= 0.65 kN，壓模速度 V=15 mm/s，模造時間 PT1=90 s，模造溫度 T= 690 °C。以此參數條件，獲得範圍 10mm*10mm，深度 39.3 μm、曲率 58.1 μm、間距 180 μm 之微透鏡陣列，圖 4-60 為利用共軛焦顯微鏡拍攝，

放大倍率 1000 倍。圖 4-61 所示為透鏡實際表面形貌；以及獲得範圍 10mm*10mm，深度 37 μm 、曲率 79.8 μm 、間距 250 μm 之微柱透鏡陣列。圖 4-62 為利用共軛焦顯微鏡拍攝，放大倍率 1000 倍。圖 4-64 為放大倍率 1000 倍之拼接圖。圖 4-65 為微柱狀鏡陣列實際表面形貌。

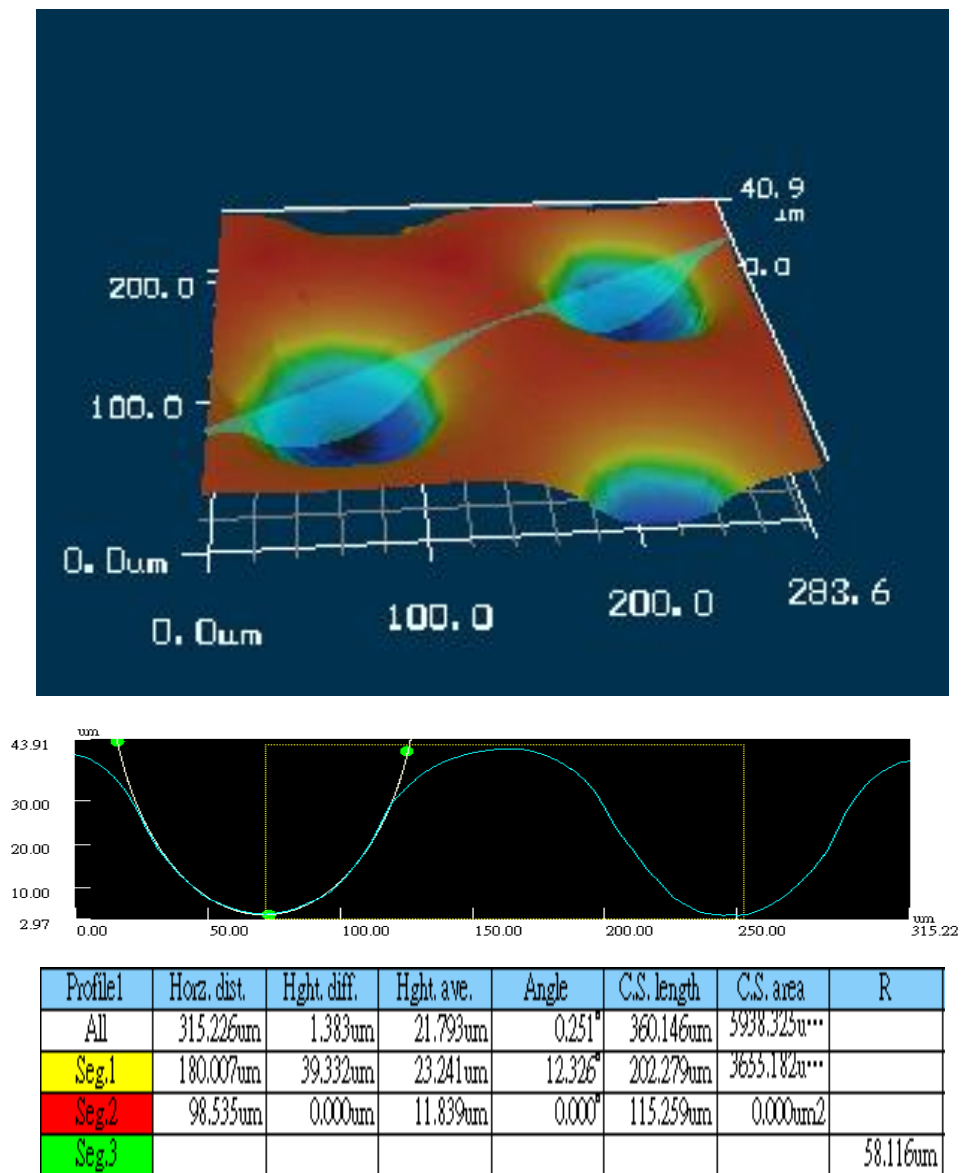


圖 4-60 最佳化之微透鏡陣列 3D 表面輪廓與量測值

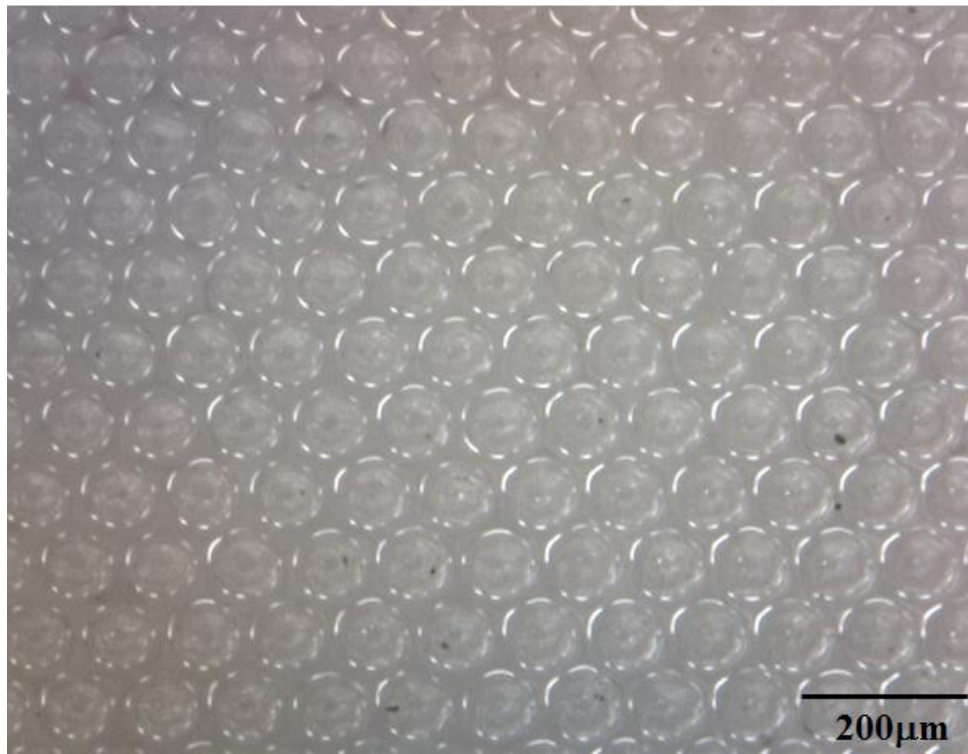


圖 4-61 玻璃微透鏡陣列實際玻璃表形貌

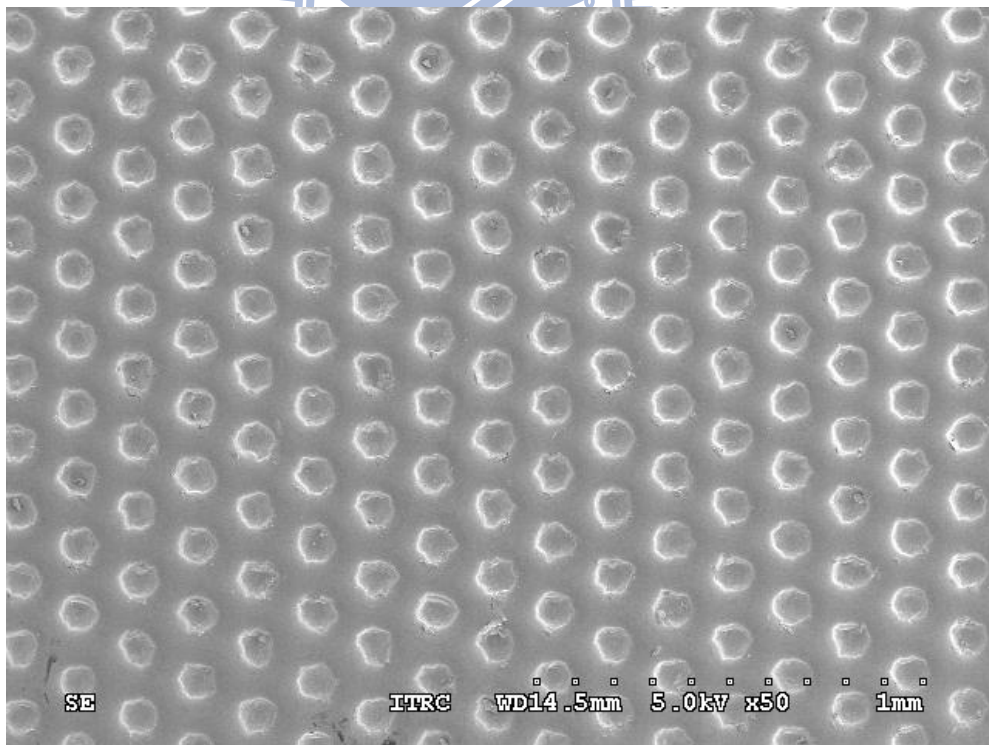
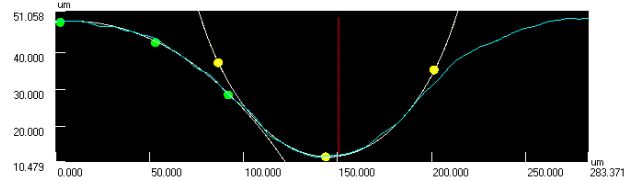
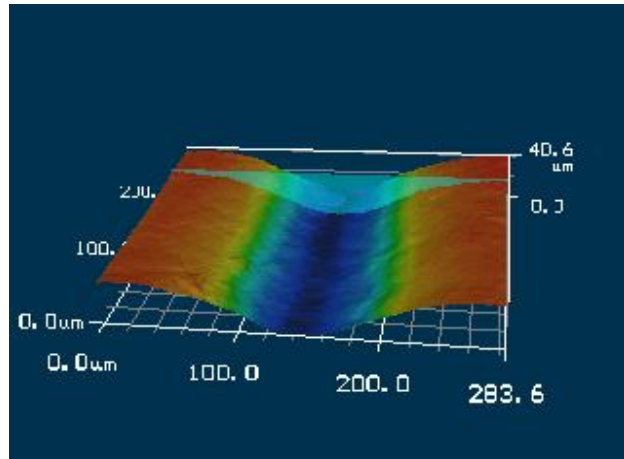
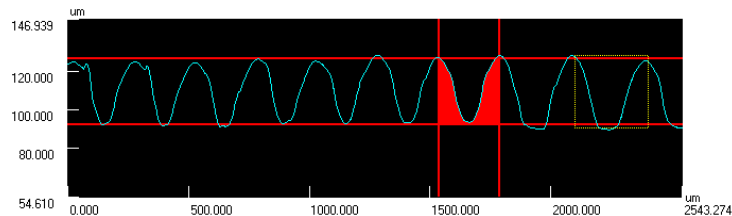
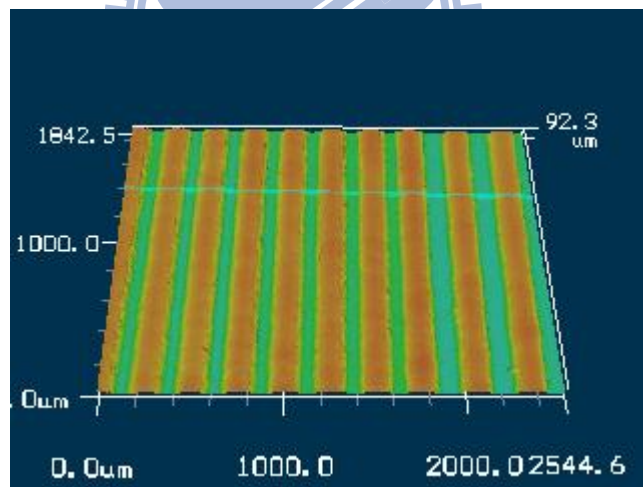


圖 4-61 玻璃微透鏡陣列 SEM 圖



Profile1	Horz. dist	Hght. diff.	Hght. ave.	Angle	C.S. length	C.S. area	R
All	283.371um	0.623um	33.557um	0.126°	297.239um	6546.106u...	
Seg.1							79.825um
Seg.2	0.383um	37.064um	12.175um	89.407°	0.384um	0.347um ²	
Seg.3							191.328um

圖 4-62 最佳化之微柱狀鏡陣列 3D 表面輪廓與量測值



Profile1	Horz. dist	Hght. diff.	Hght. ave.	Angle	C.S. length	C.S. area	R	Comment
All	2543.274um	33.369um	109.821um	0.752°	2678.063um	140491.672...		
Seg.1	299.411um	37.077um	106.825um	7.059°	312.985um	5010.411u...		
Seg.2	251.230um	34.169um	110.986um	7.745°	264.178um	4682.046u...		

圖 4-63 放大倍率 1000 倍拼接圖之微柱狀鏡陣列 3D 表面形貌與量測值

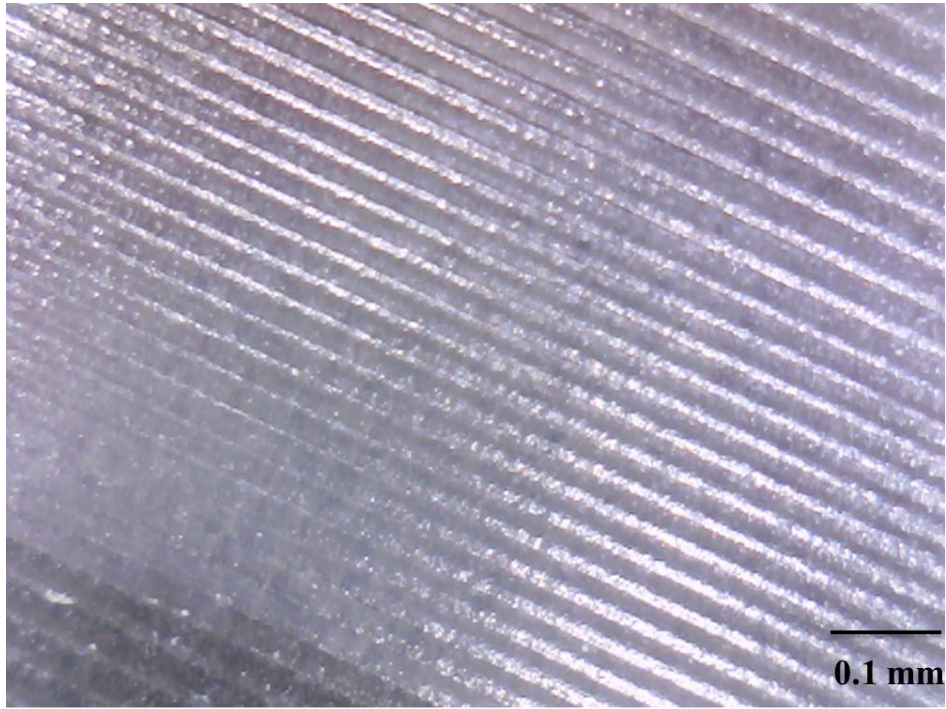


圖 4-64 玻璃微柱狀鏡陣列實際玻璃表形貌

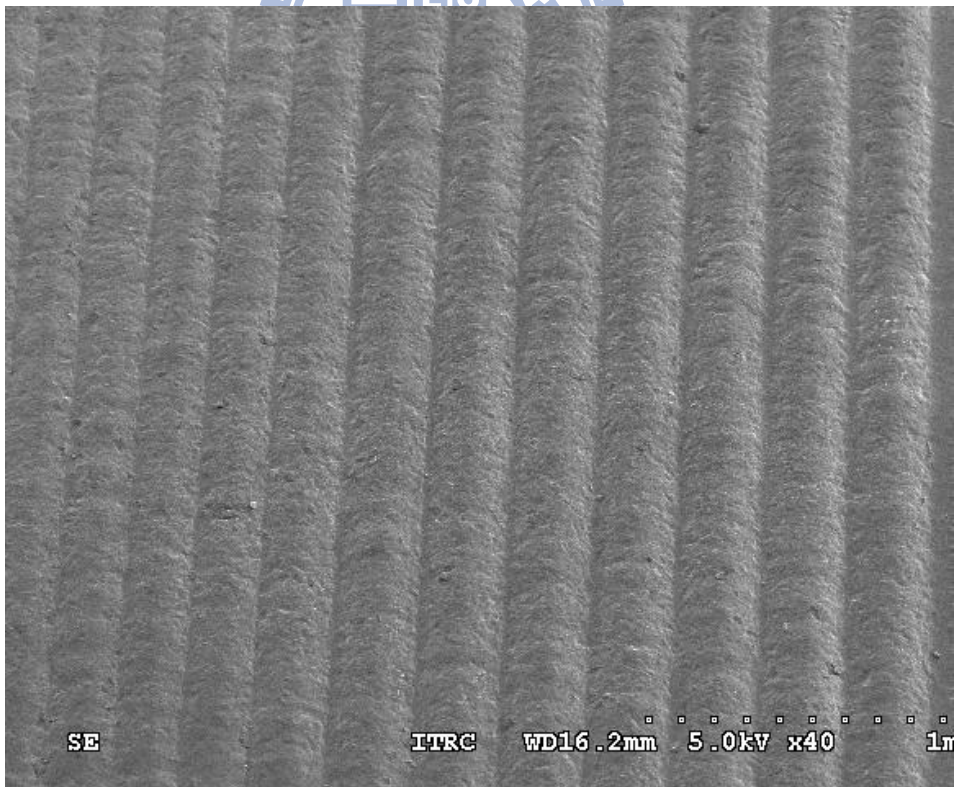


圖 4-64 玻璃微柱狀鏡陣列 SEM 圖

第五章、 結論

本研究探討利用雷射微加工技術於不銹鋼模仁上製作六角柱形與矩形之陣列微結構，再利用電解拋光技術改變模仁上微結構之表面形貌與消除經雷射微加工後所造成之再鑄層，並於不銹鋼材料上製作出微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列微結構；最後利用精密玻璃模造技術將微結構熱壓於鈉玻璃平板上，完成玻璃微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列。其研究結果可提出下列幾點結論：

1. 運用 UV 雷射直寫於不銹鋼材料時，其因加工機制為熱剝蝕，故容易造成熱量的累積與金屬的過度熔融，故其可加工之微結構直徑最小為 100 μm ，此外雷射掃描速度過慢與雷射脈衝重複頻率過低時亦容易造成過度之能量累積導致金屬熔融與再鑄層產生。與目前主流的鑽石輪磨技術比較而言，雷射直寫技術沒有刀具損耗而導致加工品質不穩定的問題，且加工間距極限亦小於鑽石輪磨技術的 1 mm。
2. 雷射加工最佳化參數為，脈衝重複頻率 110 kHz、掃描速度 1000 mm/s、掃描路徑為交叉路徑(cross)。利用此最佳參數，可獲得再鑄層較少以及表面形貌較佳之微結構。
3. 於電解拋光實驗中，成功將不銹鋼模仁上之六角柱與矩形微結構改變為半球形與半圓柱形，並將模仁微結構上之再鑄層消除達到降低表面粗糙度之目的。

4. 電解拋光的效率與各微結構表面積及多邊形邊數有關，表面積愈大或邊數愈多，電解效率愈快。因此，微六角柱狀結構較矩形結構之電解效率高。由實驗結果可得知電解拋光時間最佳化參數為，微透鏡陣列 75 分鐘、微柱狀鏡陣列 125 分鐘。於此時間參數下，可獲得最佳的微結構表面形貌。
5. 於玻璃模造實驗中發現，腔體充填氮氣與真空狀態進行熱壓時，因真空狀態少了氣體之熱對流，故玻璃容易受熱不均而導致黏度上升，使成形壓力與溫度增加。此外，在過高之溫度與壓力下容易造成模仁與玻璃的沾黏或玻璃容易有裂紋的現象產生甚至破損，若使用脫模劑或鍍硬膜則能改善上述現象。
6. 玻璃模造最佳化參數如下表：

	力量 (kN)	壓模速度 (mm/s)	模造時間 (s)	模造溫度 (°C)	腔內氣體
微透鏡陣列	0.45	10	90	690	氮氣
微柱狀鏡陣列	0.65	15	90	690	氮氣

7. 本研究成功於 10*10 mm 鈉玻璃上熱壓出深度 39.3 μm 、曲率 58.1 μm 、間距 180 μm 之微透鏡陣列與深度 37 μm 、曲率 79.8 μm 、間距 250 μm 之微柱透鏡陣列。

第六章、未來工作

本研究建立了一套新的玻璃元件的加工製程，提供一個降低模仁成本與模仁快速製作的方法。但整個製程中，尚有下列幾點不足仍待克服之處：

1. 於雷射直寫系統上，目前尚未建立真空之工作環境，若以真空的條件下進行模仁的直寫，可大幅度的降低不銹鋼材料表面氧化與再鑄層產生之情況，進而可增加雷射加工之效率與降低加工後之表面粗糙度。
2. 在電解拋光方面，其參數不容易掌控。且目前研究唯討論電解時間之影響，日後研究可加入文獻中所提到之電解液溫度、濃度、加入外加擾動、攪拌速度、與電極距離等。可望進一步降低模仁之表面粗糙度，達到光亮之定義，並能更精準的控制模仁各幾何尺寸之精度與曲率並提高其良率與重現性。
3. 將微結構之幾何尺寸中加入光學設計，增加此二陣列元件之光學效率，以求達到於業界實際應用。

參考文獻

- [1] 儀科中心,光學元件精密製造與檢測,初版,儀科中心發行,(2007).
- [2] C. Tsou, et al. , ”Novel direct-view LED backlight unit with an aspheric microlens array and a rough-texture sheet”, *Journal of the SID*, Vol.18, Issue 5, pp. 336-345,(2010).
- [3] VanBerkel C, Clarke JA, “Characterisation and optimisation of 3D-LCD module design”, *Proc SPIE*, Vol. 3012,pp. 179-186, (1997).
- [4] Mimhailov S,Lazare S, “Fabrication of refractive microlens arrays by excimer laser ablation of amorphous Teflon”, *Applied Optics*, Vol. 32,Issue. 31,pp. 6211-6218, (1993).
- [5] Nikolajeff F, Hard S, Curtis B, “Diffractive microlenses replicated in fused silica for excimer laser-beam homogenizing”, *Applied Optics* Vol. 36, Issue 32, pp. 8481-8489, (1997).
- [6] 林暉雄,“微光學元件之設計技術與應用”, 科儀新知, 第25卷第4期, (2004)。
- [7] Robert Hook, *Micrographia*. London:Royal Society,(1664).
- [8] Macfarlane D.L, et al., “Microjet fabrication of microlens array”, *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, Issue. 9,pp. 1112-1114, (1994) .
- [9] Lazare S, et al. , “Microlenses Fabricated by Ultraviolet Excimer Laser Irradiation of Poly (methyl methacrylate) Followed by Styrene Diffusion”, *Applied Optics*, Vol.35, Issue 22, pp. 4471-4475, (1996).
- [10]Yang Chen, et al., “A reflow process for glass microlens array fabrication by use of precision compression molding”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, Issue 5,(2008).
- [11] Gregory C, et al. “Precision laboratory apparatus for high temperature compression molding of glass lenses”, *American Institute of Physics*, Vol. 76, Issue. 6, (2005).
- [12]許精益、黃乙白,“3D立體顯示技術之發展與研究”, 光學工程, 第九十八期, (2007)。
- [13]C.L. Lee ,“Micro-cylindrical and micro-ring lenses in CVD diamond”,

- Diamond & Related Materials* ,16, pp.944–948, (2007).
- [14]Shouyue Wu, et al., “The orthogonal gradient index micro-cylinder lens arrays used for LD beam shaping”, *SPIE*, Vol. 7158 715805-1, (2009).
- [15]Wakaki M, Komachi Y, Kanai G, “Microlenses and microlens arrays formed on a glass plate by use of a CO2 laser”, *Applied Optics*, Vol. 37, Issue 4, pp. 627-631, (1998).
- [16]Nieto D, et al., “Laser direct-write technique for fabricating microlens arrays on soda-lime glass with a Nd:YVO4 laser”, *Applied Optics*, Vol. 49, Issue 26, pp. 4979-4983, (2010).
- [17]Hong-Tsu Young, et al. , “超快雷射加工之研究與展望”, *科儀新知*, 第二十九卷第六期, (2008).
- [18]“Electropolishing”, *Metal Finishing*, (1982).
- [19]Charles L. Faust, “Electropolishing I: The practical side” , *Metal Finishing*, pp.21-25, (1982).
- [20]J Hopenfeld and R.R. Cole, ”Electrochemical Machining—Prediction and Correlation of Process Variables”, *Journal of Engineering for Industry*, pp.455-461, (1966).
- [21]張 泊 鈞, “電解拋光製程參數對316L不銹鋼反射率及粗糙度之影響”, 逢大學紡織工程研究所, 碩士論文, (2007)。
- [22]US patent 3833347, “Method of Molding glass lenses”, Eastman Kodak Company Sep.3,(1974).
- [23]Takahashi M, et al., “Large area micro hot embossing of Pyrex glass with GC mold machined by dicing”, *Microsyst Technol* , Vol. 13, Issue 3-4, pp. 379-384,(2007).
- [24]G. C. Firestone ,A. Y. Yi, “Precision compression molding of glass microlenses and microlens arrays—an experimental study”, *Applied Optics*, Vol. 44, No. 29,(2005).
- [25]Ray-Quen Hsu, Hsing-Bun Wang, Da-Lan Liang, “Hot Embossing of Parallel v-Groove Microstructures on Glass”, *Journal of the American Ceramic Society* , Vol. 92, Issue 11, pp. 2605-2608,(2009).
- [26]財團法人光電科技工業協進會, 1996年光學元件與器材產業及技術動態

調查報告，1997年。

[27]Schott公司玻璃毛胚品種圖。

[28]蘇品書,“雷射原理與實用技術”第二版，復漢出版社，(1983)。

[29]周敏傑,“微/奈米製造技術”講義,(2009)。

[30]黃克寧,“原子物理發展近況”，*物理雙月刊*，廿三卷五期,(2001)

[31]楊宏智、林芳妃、黃欣怡,“超快雷射加工之研究與展望”，*科儀新知*，第二十九卷第六期,(2008)。

[32]郭寬淵,“電解拋光鋁合金微流道模具之研究”，國立中央大學，碩士論文,(2008)。

[33]http://www.ljuhv.com/product_sub_type.php?st_ID=11

[34]http://www.techplasma.com.tw/ch_product_list97e1.html?FkindNo=F000712&SKindNo=S001023

[35]<http://www.toshiba-machine.co.jp/english/product/high/contents/molding.html>

[36]http://en.wikipedia.org/wiki/Soda-lime_glass

[37]<http://www.keyence.com.tw/>

[38]G.P. Rothwell, et al., *Electrochimica Acta*, Vol.10, pp.403, (1965).

[39]http://www.schott.com/advanced_optics/german/download/schott_tie-29_refractive_index_v3_jan_2007_en.pdf

[40]呂英嘉,“次微米級玻璃結構直接壓印成型之理論分析與實驗研究”，國立清華大學動力機械工程學系，碩士論文,(2008)。