

國立交通大學

機械工程學系

博士論文

精密玻璃模造相關技術於
光學元件之應用與研究

Applications and Researches on Optical Components

by Precision Glass Molding Related Techniques

研究生：黃建堯

指導教授：周長彬 教授

中華民國一十年十二月

精密玻璃模造相關技術於光學元件之應用與研究
Applications and Researches on Optical Components by
Precision Glass Molding Related Techniques

研究生：黃建堯

Student : Chien-Yao Huang

指導教授：周長彬

Advisor : Chang-Pin Chou

國立交通大學



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

December 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年十二月

精密玻璃模造相關技術於光學元件之應用與研究

研究生：黃建堯

指導教授：周長彬 教授

國立交通大學機械工程學系

摘要

玻璃材料相較於高分子材料，具有更耐熱、耐候、抗刮、抗腐蝕、較優異的光學特性等，因此在某些特殊環境僅能使用玻璃材料，例如高能雷射系統或是嚴苛氣候條件。精密玻璃模造技術可快速地製作高精度玻璃元件，但因玻璃模造關鍵技術，如模仁之硬膜鍍膜技術及模造製程參數，皆為各廠商的商業機密。且光學玻璃材料種類繁多，在玻璃模造製程參數測試初期，需要耗費許多時間才能獲得適合該材料特性的穩定製程參數，導致後人較難以先前研究墊基。因此，本研究針對各種欲成形之玻璃材料進行實驗分析，以獲得最佳的模造製程參數。後續相關研究學者只要依照元件外形微調本論文之製程參數，即可迅速地完成相似光學元件。

本論文以精密玻璃模造技術為核心，發展開放式及封閉式兩種玻璃模造實驗方法，進行元件成形探討。實驗結果發現開放式模造製程中，因有氮氣的對流熱傳加熱效果，玻璃預形體及模仁升溫效率較封閉式佳，所以適合用來成形微結構，但因其缺乏定位導銷而無法使鏡片之兩面定心，因此若要製作精密曲面光學元件，則需採用封閉式模造製程。本實驗利用開放式製程對微結構元件進行成形機制探討，包括微柱狀透鏡陣列、單面/雙面微透鏡陣列，且利用封閉式製程探討精密曲面元件成形，包括平面積體光學元件與非球面透鏡。最後利用具有微結構與精密曲面的菲涅耳透鏡，來驗證微結構與精密曲面的研究成果。

目前精密玻璃模造技術之模仁多使用碳化鎢材料並透過超精密鑽石輪磨技術製作，然而鑽石輪磨技術針對複雜性或微結構輪廓有其加工限制。因此，本論文提出除了使用鑽石輪磨技術所加工之模仁外，亦透過線切割放電加工技術在導電的碳化鎢材料上製作模仁結構，以及利用雷射加工技術在碳化矽與不銹鋼材料上製作微結構陣列，並利用電解拋光技術改變不銹鋼微結構輪廓，完成微陣列模仁，本論文所提出之製程方法，使玻璃模造之模仁加工法不必再侷限於精密鑽石輪磨製程。

在模造製程中，本論文發現提高模造溫度、降低模造力量或是減少降溫速率，可有效的解決元件破裂現象，而降低模造溫度可減少沾黏現象。在模造環境方面，充填氮氣的狀態下，模仁以及玻璃預形體的受熱方式較多，因此溫度較高且成形性較佳，然而真空模造環境可避免元件產生氣泡，因此，可藉由增加上下模座之間距、增加保溫時間以及提高模造溫度，使玻璃元件在真空模造環境成形。若玻璃元件尺寸大於15 mm，可增加保溫時間至180秒以上，使玻璃元件溫度更均勻，降低破裂現象的產生，且減緩降溫速率，可減少折射率的變化量，對小尺寸非球面透鏡而言，使用18.5 °C/min之降溫速率可獲得較穩定的鏡片品質。

在開放式模造製程方面，利用線切割放電加工技術可加工高硬度材料，製作微長條形溝槽陣列於碳化鎢模仁，以N-FK5材料完成外徑20 mm、厚度5 mm，其上有高度234 μm、曲率3.42 mm之微柱狀透鏡陣列，並利用雷射光束驗證其經過微柱狀透鏡陣列之後，原為圓形光斑之雷射輪廓轉變為線形雷射輪廓。此外，還利用雷射技術非接觸加工的特性製作微結構陣列於碳化矽模仁，以鈉玻璃完成鏡片外徑20 mm、厚度1.2 mm，其上具有曲率半徑為851 μm，寬度與高度分別為460 μm及52 μm，透鏡間距為700 μm之雙面微透鏡陣列。以及使用雷射加工不銹鋼模仁，經電解拋光技術去除再鑄層，以鈉玻璃完成曲率為58.1 μm，高度為39.3 μm之微透鏡陣列以及曲率79.8 μm，高度為37 μm之微柱狀鏡陣列，其陣列範圍皆為10 mm*10 mm。

在封閉式模造製程方面，模仁材料皆使用碳化鎢，且利用超精密鑽石輪磨技術加工，在最佳模造溫度750 °C時，完成外徑53 mm、高度6 mm，具有拋物面結構之N-BK7平面積體光學元件。並使用K-VC79玻璃材料，於最佳模造溫度585 °C時，完成外徑4.47 mm，表面精度小於0.5 λ (0.316μm)之非球面透鏡。亦使用K-CSK120玻璃材料，在最佳模造溫度560 °C時，完成填充率達99 %之菲涅耳透鏡，其外徑為15 mm。

關鍵字：玻璃模造技術、雷射、電解拋光、柱狀鏡陣列、微透鏡陣列、菲涅耳透鏡、非球面透鏡

Applications and Researches on Optical Components by Precision Glass Molding Related Techniques

Student : Chien-Yao Huang

Advisor : Chang-Pin Chou

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Glass offers better anti-thermal, anti-environmental, corrosion resistance, and optical properties than polymer materials. Therefore, glass can be used in demanding environments such as high-energy laser systems or severe weather conditions. Precision glass molding (PGM) techniques can be used in rapid fabrication of highly accurate optical components. However, key aspects of PGM techniques, such as the hard coating for mold protection and the operating parameters, are kept confidential by manufacturers. Because various types of optical glass have different characteristics, the initial testing period of the PGM process is time consuming. Therefore, researchers are difficult to follow the optimal molding parameters from previous studies. Consequently, this thesis focuses on the analysis of glass materials and the optimization of molding parameters.

In order to understand the molding mechanism for producing microstructures and precision curves components, the open-type and close-type PGM approaches were studied in this thesis. According to experimental results, the thermal absorptivity of glass in open-type PGM processing is better than the close-type due to glass can be heated by thermal convection of nitrogen in open-type PGM processing. Therefore, open-type PGM processing is suitable for forming microstructures. However, it is difficult to align two surfaces of components in this type of processing. To fabricate components with precision curves, closed-type PGM processing is needed. This thesis studies open-type PGM processing of microstructure arrays such as micro cylindrical lens arrays and one- or double-sided microlens arrays and close-type PGM processing of planar-integrated micro-optical components and high-precision aspheric lenses. Finally, a Fresnel lens, which combines microstructure and precision curve, was used to verify the experimental results of above experiments.

Precision diamond grinding technique was usually used to fabricate the mold of PGM processing on tungsten carbide (WC) material. But Precision diamond grinding technique was not easily to generate the complex and tiny microstructure. Hence, this thesis used not only diamond grinding technique but also wire electrical discharge machining technique on WC and laser machining on silicon carbide and stainless steel to fabricate the mold of glass molding. Besides, the electro polishing has been used to change the shape of micro structure on mold. The processing methods using in this thesis offers the various ways to manufacture molds.

This thesis obtains, the fracture of glass components can be avoid with increasing molding temperature, decreasing molding force and decreasing cooling rate in the PGM processing. Furthermore, decreasing molding temperature can reduce adhesive phenomenon. Besides, the thermal absorptivity of mold and glass in nitrogen atmosphere are better than vacuum environment, the deformable level of glass can be increased. But molding in vacuum environment can avoid bubbles product on glass. Therefore, increasing space of upper and under mold, temperature holding time and molding temperature are effective to form glass components in vacuum environment. If size of component larger than 15 mm, temperature holding time longer than 180 s is useful to uniform temperature and avoids fracture of glass. Moreover, slower cooling rate reduces the variation of refractive index. For small lens, 18.5 °C/min in cooling rate obtains the stable quality.

In this thesis, the wire electrical discharge machining process, which is suitable for machining hard materials such as WC, was used to fabricate a microgroove array on a WC mold in the open-type PGM approach. N-FK5 glass was used, and a micro cylindrical lens array 20 mm in diameter and 5 mm thick was successfully obtained. Cylindrical lenses 234 μm in height and 3.42 mm in curvature were fabricated in the array. In addition, a laser ablation approach, which offers the advantage of noncontact machining, was adopted to generate a microstructure array on a silicon carbide mold, and a double-sided microlens array 20 mm in diameter and 1.2 mm thick was obtained on soda-lime glass. The microlens components were 851 μm in curvature, 460 μm in width, 52 μm in height, and 700 μm in pitch. Furthermore, electro polishing was used to remove the recasting layer used in laser ablation, and a stainless steel mold was used. A microlens array 58.1 μm in curvature and 39.3 μm in height on soda-lime glass and a micro cylindrical lens array 79.8 μm in curvature and 37 μm in height were obtained. Both these components were 10 mm × 10 mm in size.

WC molds were successfully fabricated by a precise diamond grinding technique using

in close-type PGM processing. The optimal molding temperature was 750 °C. N-BK7 glass was used to obtain planar-integrated micro-optical components 53 mm in diameter and 6 mm in height. K-VC79 glass was used to obtain a high-precision aspheric lens with a surface accuracy (peak to valley) of less than 0.5λ (0.316 μm) at an optimal molding temperature of 585 °C. With an optimal molding temperature of 560 °C, a Fresnel lens 15 mm in diameter was fabricated from K-CSK120 glass, and a fill rate of 99% was achieved.

Keywords: Precision glass molding technique, Laser, Electro polishing, Cylindrical lens array, Micro lens array, Fresnel lens, Aspheric lens



誌謝

馬太福音 6：33 『你們要先求他的國和他的義，這些東西都要加給你們了。』

謝謝一直陪伴在旁的家人們，爸爸黃江漢先生、媽媽黃楊錦雲女士、太太湘琴、剛出生的兒子、建崇、碧珊、綉雯，因著有你們的陪伴與支持，讓我能夠順利的完成學業，在工作與課業忙碌的時間當中，看到你們的臉孔，聽到你們的聲音，帶給我很大的前進力量。

謝謝俊傑、文澤、源傑、朝輝、耿碩、俊仁、至柔、治偉、釋鋒、俊成、文龍、秀姊、陳峰志副主任、黃吉宏副主任、周曉宇廠長、黃國政組長的協助，給予論文的建議與協助，若沒有你們，這本論文不會這麼迅速的完成。更感謝周長彬老師的支持與協助，老師的樂觀開朗性格，讓研究壓力減輕大半，老師對論文的指導與建議，讓我受益良多。

感謝聖三位、鄭約書亞牧師以及周炫世牧師在信仰上的教導，還有教會中弟兄姊妹的禱告，讓我在屬靈上面不虞匱乏，能夠在學術領域見證神的恩典，一切榮耀歸給神。

黃建堯

新竹, 2011/12

目錄

摘要	i
Abstract.....	iii
誌謝	vi
目錄	vii
表目錄	xi
圖目錄	xii
一、前言	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究目的.....	15
二、實驗原理與實驗材料	17
2.1 玻璃模造技術.....	17
2.1.1. 模仁材料.....	22
2.1.1.1. 碳化鎢	22
2.1.1.2. 碳化矽	23
2.1.1.3. 不銹鋼	24
2.1.2. 玻璃材料.....	24
2.1.2.1. N-FK5	29
2.1.2.2. N-BK7	30
2.1.2.3. K-VC79	31
2.1.2.4. K-CSK120	32
2.1.2.5. Soda lime glass (鈉玻璃)	33
2.1.3. 玻璃預形體.....	33
2.2 雷射加工技術.....	35

2.3	線切割放電加工技術.....	37
2.4	鑽石輪磨技術.....	38
2.5	鍍膜技術.....	38
2.6	電解拋光技術.....	39
2.7	檢測儀器.....	41
2.7.1	雷射共軛焦顯微鏡.....	41
2.7.2	掃瞄式電子顯微鏡.....	42
2.7.3	表面輪廓量測儀.....	43
2.7.3.1.	自由曲面輪廓量測儀(UA3P)	43
2.7.3.2.	輪廓量測儀 Talysurf PGI 2540 (Taylor Hobson).....	44
2.7.4	厚度檢測儀.....	45
2.7.5	三次元量床.....	45
2.7.6	阿貝式折射率量測儀.....	46
三、微結構成形		48
3.1	光學微柱狀透鏡陣列.....	49
3.1.1	實驗方法與步驟.....	50
3.1.2	結果與討論.....	52
3.1.2.1.	溝槽尺寸與透鏡表面輪廓.....	52
3.1.2.2.	模造溫度與透鏡表面輪廓.....	53
3.1.2.3.	模造力量與透鏡表面輪廓.....	54
3.1.2.4.	下壓行程與透鏡表面輪廓.....	55
3.1.2.5.	小結.....	55
3.2	雙面微透鏡陣列.....	58
3.2.1	實驗方法與步驟.....	58
3.2.1.1.	雷射加工技術.....	59
3.2.1.2.	玻璃模造技術.....	60

3.2.2	結果與討論.....	61
3.2.2.1.	微孔間距的影響.....	62
3.2.2.2.	雷射脈衝重複頻率的影響.....	63
3.2.2.3.	雷射掃描速度的影響.....	65
3.2.2.4.	模造腔體環境的影響.....	67
3.2.2.5.	玻璃模造溫度與力量的影響.....	68
3.2.2.6.	模造製程對玻璃材料折射率的影響.....	70
3.2.2.7.	小結.....	73
3.3	光學微結構陣列.....	74
3.3.1	實驗方法與步驟.....	74
3.3.2	結果與討論.....	76
3.3.2.1.	雷射脈衝重複頻率對模仁高度之影響.....	76
3.3.2.2.	雷射掃描速度對模仁表面輪廓之影響.....	79
3.3.2.3.	電解拋光時間對模仁粗糙度之影響.....	80
3.3.2.4.	電解拋光時間對微結構形貌影響.....	81
3.3.2.5.	模造參數之影響.....	82
3.3.2.6.	腔體中充填氮氣與真空狀態的影響.....	85
3.3.2.7.	小結.....	86
四、精密曲面成形.....		91
4.1	平面積體微光學元件.....	92
4.1.1	實驗方法與步驟.....	92
4.1.1.1.	模仁設計與製作.....	93
4.1.1.2.	模造製程.....	94
4.1.2	結果與討論.....	96
4.2	非球面透鏡.....	100
4.2.1	實驗方法與步驟.....	100

4.2.2	結果與討論.....	105
4.2.2.1.	模造參數對鏡片尺寸的影響.....	105
4.2.2.2.	模造參數對鏡片表面精度的影響.....	108
4.3	菲涅耳透鏡.....	116
4.3.1	實驗方法與步驟.....	116
4.3.2	結果與討論.....	119
五、結論.....		125
參考文獻.....		128
簡歷.....		133



表目錄

表 1 微透鏡陣列製程比較表[22]	9
表 2 高溫玻璃模造機規格	20
表 3 碳化鎢物質特性表[41-43]	23
表 4 碳化矽物質特性表[42,45]	23
表 5 不銹鋼物質特性表[41]	24
表 6 光學玻璃與光學高分子材料[46]	25
表 7 光學鏡片材料特性比較表[47]	25
表 8 鈉玻璃物質特性表[53]	33
表 9 預形體應用範圍列表[48,51,55]	34
表 10 雷射系統規格表	36
表 11 玻璃模造模具鍍膜特性比較[57]	39
表 12 電解拋光與傳統機械研磨之比較[60]	40
表 13 電解液成分	41
表 14 雷射脈衝重複頻率與輸出功率關係表	64
表 15 不同腔體環境與透鏡形貌之關係表	68
表 16 模造參數	96
表 17 非球面鏡片規格表	100

圖目錄

圖 1 再熔法製作微透鏡陣列[3]	2
圖 2 體型微加工技術製作微透鏡陣列[8]	3
圖 3 微液滴法製作微透鏡[9]	3
圖 4 LIGA 技術製作微透鏡[11]	4
圖 5 灰階光罩法製作微透鏡[13]	4
圖 6 紫外光成形法製作微透鏡[15]	5
圖 7 電子束加工法製作微透鏡陣列[17]	6
圖 8 微透鏡陣列之橫截面 3D 輪廓[18].....	6
圖 9 共軛焦顯微鏡觀察(a)正方形(b)三角形之微透鏡陣列[19]	7
圖 10 雷射拖拉法加工微透鏡[20]	7
圖 11 滾輪成形微透鏡陣列[21].....	8
圖 12 超精密鑽石車削技術加工微透鏡[22]	8
圖 13 (a)GC 模仁微結構 (b)熱壓後玻璃[24].....	10
圖 14 玻璃模造示意圖 (a)不同邊角之影響 (b)微透鏡成形[25]	11
圖 15 鍍板上之連續水平陣列(a)上視圖(b)側視圖[26]	11
圖 16 玻璃模造技術成形之鏡片[27]	12
圖 17 非球面透鏡[29]	12
圖 18 鑽石輪磨加工模仁[30]	13
圖 19 線切割放電加工技術加工碳化鎢[31]	13
圖 20 不同雷射加工參數下的不銹鋼表面[32]	14
圖 21 論文架構	16
圖 22 傳統非球面鏡片製程	17
圖 23 玻璃元件加工法	18

圖 24 精密玻璃模造製程	18
圖 25 模造製程流程圖	19
圖 26 高溫玻璃模造機	20
圖 27 開放式與封閉式模造方法示意圖	21
圖 28 加熱方式示意圖	21
圖 29 Schott 公司玻璃毛胚品種圖[48]	26
圖 30 冷卻速率對不同光學玻璃折射率之影響[49]	27
圖 31 玻璃溫度對黏滯係數之關係[50]	28
圖 32 N-FK5 材料特性[48]	29
圖 33 N-BK7 材料特性[48].....	30
圖 34 K-VC79 材料特性[51].....	31
圖 35 K-CSK120 材料特性[51].....	32
圖 36 預形體外形[54]	34
圖 37 UV 雷射加工架構	36
圖 38 雷射掃描路徑示意圖	37
圖 39 線切割放電加工機	38
圖 40 電解槽示意圖	40
圖 41 3D 彩色雷射共軛焦顯微鏡(a)組成架構(b)實際形貌 [37].....	42
圖 42 冷場式掃描電子顯微鏡(SEM)	42
圖 43 UA3P 外觀	44
圖 44 雷射干涉式探針量測輪廓儀	44
圖 45 厚度檢測儀	45
圖 46 三次元量床	46
圖 47 (a)阿貝氏折射率量測儀(b)臨界角之分界	47
圖 48 雷射線形產生器[66].....	49

圖 49 實驗流程圖	50
圖 50 微柱狀透鏡陣列製程示意圖	51
圖 51 TracePro 軟體模擬	51
圖 52 溝槽寬度與透鏡表面輪廓	53
圖 53 溝槽寬度與幾何形狀關係	53
圖 54 模造溫度與幾何形狀關係	54
圖 55 模造力量與幾何形狀關係	54
圖 56 模造下壓行程與幾何形狀關係	55
圖 57 微柱狀透鏡陣列模仁	56
圖 58 玻璃微柱狀透鏡陣列	56
圖 59 線形分佈之雷射輪廓	57
圖 60 雙面微透鏡陣列成形示意圖	58
圖 61 實驗流程圖	59
圖 62 雷射系統架構示意圖	60
圖 63 (a)金屬(不銹鋼)與(b)燒結材料(碳化矽)經雷射加工後表面形貌	60
圖 64 玻璃模造製程成形歷程	61
圖 65 模仁微孔之共軛焦顯微鏡影像	62
圖 66 模仁 (a)孔徑 500 μm 間距 700 μm (b) 孔徑 400 μm 間距 600 μm	63
圖 67 雷射脈衝重複頻率與微孔深度關係	64
圖 68 不同雷射脈衝重複頻率加工之微孔	65
圖 69 雷射掃瞄速度與微孔深度關係圖	66
圖 70 不同雷射掃瞄速度所加工之模仁	66
圖 71 碳化矽模仁	66
圖 72 在(a) 真空 (b) 氮氣 環境中成形的微透鏡	67
圖 73 氮氣影響示意圖	68

圖 74 模造力量/溫度與微透鏡高度關係.....	69
圖 75 模造力量/溫度與微透鏡曲率關係.....	69
圖 76 模造溫度及降溫速率對折射率的影響 (t=1.2 mm).....	70
圖 77 模造溫度及降溫速率對折射率的影響 (t=5 mm).....	71
圖 78 微透鏡剖面圖(a) 400 倍 (b) 200 倍 (c) 400 倍.....	71
圖 79 微透鏡陣列之光學顯微鏡與電子顯微鏡圖.....	72
圖 80 微透鏡陣列之表面形貌圖(b)200 倍 (c)400 倍 (d)1000 倍.....	72
圖 81 50 mm * 50 mm 之碳化矽模仁與微透鏡陣列.....	72
圖 82 實驗流程圖.....	75
圖 83 經雷射加工後之模仁表面形貌.....	76
圖 84 模仁電解前後示意圖.....	76
圖 85 雷射脈衝重複頻率與模仁結構高度關係.....	77
圖 86 雷射脈衝重複頻率 100 kHz 加工之外接圓尺寸 100 μ m 模仁.....	78
圖 87 雷射脈衝重複頻率與模仁結構高度關係.....	78
圖 88 雷射脈衝重複頻率 110 kHz 所加工之不銹鋼模仁.....	78
圖 89 雷射掃描速度與微透鏡陣列模仁結構高度關係.....	79
圖 90 雷射掃描速度與微柱狀鏡陣列模仁結構高度關係.....	80
圖 91 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.....	80
圖 92 電解時間 75 min 後之微透鏡陣列模仁輪廓.....	81
圖 93 電解時間 125 min 後之微柱狀透鏡陣列模仁輪廓.....	81
圖 94 電解拋光時間與模仁微結構高度之關係.....	82
圖 95 不銹鋼模仁之微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列.....	82
圖 96 單段熱壓成形歷程.....	83
圖 97 成形力量對填充率之影響(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列.....	83
圖 98 接觸面示意圖(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列.....	84

圖 99 溫度對填充率之影響(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列	84
圖 100 腔體環境與模造力量的影響	85
圖 101 腔體環境與模造溫度的影響	86
圖 102 最佳化之微透鏡陣列 3D 表面輪廓與量測值	87
圖 103 玻璃微透鏡陣列實際玻璃表形貌	88
圖 104 玻璃微透鏡陣列 SEM 圖	88
圖 105 最佳化之微柱狀鏡陣列 3D 表面輪廓與量測值	89
圖 106 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	89
圖 107 玻璃微柱狀鏡陣列實際玻璃表形貌	90
圖 108 玻璃微柱狀鏡陣列 SEM 圖	90
圖 109 平面積體微光學元件外形	92
圖 110 平面積體元件製程圖	93
圖 111 平面積體元件光路示意圖	94
圖 112 平面積體元件之模仁示意圖	94
圖 113 預形體體積計算	95
圖 114 模造成形歷程	96
圖 115 模造溫度/力量與填充率關係	97
圖 116 氣泡與裂痕	98
圖 117 元件頂部輪廓	98
圖 118 輪廓誤差	99
圖 119 平面積體微光學元件	99
圖 120 非球面鏡片外形	100
圖 121 非球面模仁	101
圖 122 模仁組裝圖	102
圖 123 非球面凹面(R1)模仁與其剖面輪廓	102

圖 124 非球面凸面(R2)模仁與其剖面輪廓.....	102
圖 125 預形體.....	103
圖 126 模仁表面檢查.....	104
圖 127 模造溫度不足之鏡片.....	105
圖 128 鏡片內部裂痕.....	106
圖 129 模仁沾黏.....	106
圖 130 沾黏後之玻璃鏡片表面.....	107
圖 131 模造溫度及模造力量與中心厚度關係圖.....	108
圖 132 模造溫度對表面精度的影響.....	109
圖 133 模造力量對表面精度的影響.....	110
圖 134 保溫時間對表面精度的影響.....	111
圖 135 降溫速率對表面精度的影響.....	111
圖 136 非球面鏡片模造歷程.....	112
圖 137 非球面鏡片.....	112
圖 138 R1 表面精度.....	113
圖 139 R2 表面精度.....	113
圖 140 外徑重複性.....	114
圖 141 中心厚度重複性.....	114
圖 142 表面精度重複性.....	115
圖 143 菲涅耳透鏡[47].....	116
圖 144 特製鑽石砂輪外形示意圖[71].....	117
圖 145 菲涅耳透鏡之模仁.....	117
圖 146 菲涅耳透鏡模仁輪廓.....	118
圖 147 菲涅耳透鏡預形體.....	118
圖 148 菲涅耳透鏡模造製程示意圖.....	119

圖 149 模造溫度不足結果	120
圖 150 玻璃破裂	120
圖 151 模仁沾黏	121
圖 152 玻璃沾黏現象	121
圖 153 微結構破裂	122
圖 154 模造溫度及模造力量與填充率關係圖	122
圖 155 菲涅耳透鏡模造歷程	123
圖 156 菲涅耳玻璃透鏡	123
圖 157 菲涅耳透鏡雷射共軛焦顯微鏡影像	124



一、前言

1.1 研究動機

市場對於手機、相機等產品所使用的鏡頭不僅要求微小化、輕量化，對解析度及品質穩定性的要求也日益增加，因此導致非球面玻璃鏡片的需求持續增多[1]。而在鏡片的材質上，玻璃材料相較於塑膠材料而言更具有許多優點，包含抗變形、抗高溫、抗濕性、化學穩定性佳、高硬度、高折射率、較寬之光穿透頻譜以及較佳表面抗刮性等性質。目前玻璃鏡片的量產製程有傳統研拋方法與精密玻璃模造技術，採用精密玻璃模造技術可縮減多道研拋法的製程，因此目前業界皆採用玻璃模造技術來批量生產良率佳的高精度玻璃光學元件。而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，例如平面光學元件、微透鏡陣列、次波長光學元件、紅外線波段元件及生醫晶片等。

然而精密玻璃模造技術涉及多項技術，例如模仁設計與製作、玻璃預形體設計與製作、膜層設計與鍍製技術、玻璃模造參數規劃以及精密檢測技術，且不同的模仁材料或玻璃材料，也會影響玻璃模造製程參數的調整，玻璃模造製程參數中，以模造溫度、模造力量、模造環境以及製程中各階段所設定時間影響最巨，然而以上的技術多為各廠商之商業機密，且玻璃模造技術亦需依賴豐富的經驗來判斷玻璃元件的品質，以此來適時調整模造溫度、模造力量與時間等參數，適時調整製程參數除了可提高產品良率外，亦可避免模仁或膜層因參數不良而受損。

因此本研究將針對不同模仁材料、模仁加工法以及不同玻璃材料進行分析，期望建立相關參數資料，並透過實例分析，來解決玻璃光學元件模造過程中會遇到的問題。此外，在光學元件的分類上，以外形可區分為精密曲面以及微結構鏡片，精密曲面包括球面或是拋物面、非軸對稱曲面、自由曲面等非球面鏡片，微結構鏡片則包括 V 溝、錐狀鏡陣列以及透鏡陣列等，本研究亦規劃整合精密曲面與微結構成形製程。且除了精密鑽石輪磨技術製作模仁外，亦探討雷射加工技術、線切割放電加工技術以及電解拋光技術

對於模仁製程的應用，以期減少模仁加工時間、降低模仁製作成本和提高玻璃模造技術應用領域。

1.2 文獻回顧

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，例如液晶顯示器的背光模組、3D 裸視技術、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 [2]。

近年來學者提出許多微透鏡陣列之製程方法，例如 Popovic 與 Hutley 分別於 1988 及 1990 使用再熔(reflow)法[3,4]，如圖 1，圖 1(a)顯示將鋁膜沈積在石英基版上，並在其上製作 15 μm 圓形孔洞，圖 1(b)將直徑 30 μm 光阻沈積在圓形孔洞上，圖 1(c)再將直徑 25 μm 高 12 μm TF-20 光阻沈積在其上，最後以 140 $^{\circ}\text{C}$ 溫度加熱，使光阻熔化形成微透鏡陣列，如圖 1(d)。再熔法除了圓形光阻外，亦有學者提出使用矩形、六角形或是橢圓形柱狀陣列來加熱形成微透鏡陣列[5-7]。

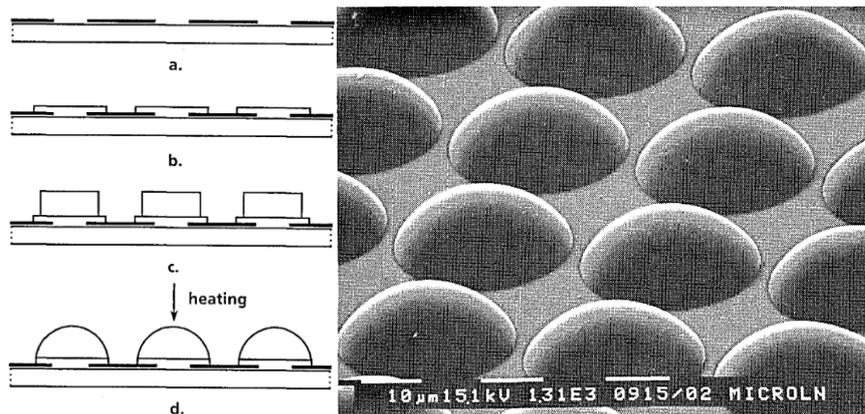


圖 1 再熔法製作微透鏡陣列[3]

Lee 等人於 2001 年利用體型微加工技術(bulk micromachining technology)[8]製作微

Lee 等人在 2002 年使用 LIGA 技術製作微透鏡[11]，利用光蝕刻技術使 PMMA 材料融化形成微透鏡，藉由控制 PMMA 材料尺寸，可形成直徑 30-1500 μm 範圍的微透鏡。

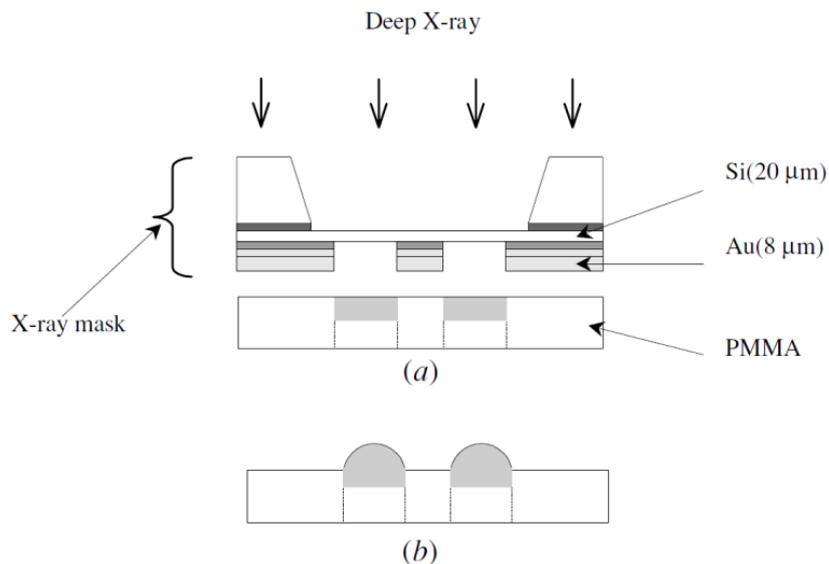


圖 4 LIGA 技術製作微透鏡[11]

Yao 等人利用灰階光罩法來製作微透鏡陣列，灰階光罩是具有不同光密度(Optical density)的光罩，利用不同的曝光密度造成蝕刻速率不同，以此製作微透鏡陣列，如圖 5。[12-14]

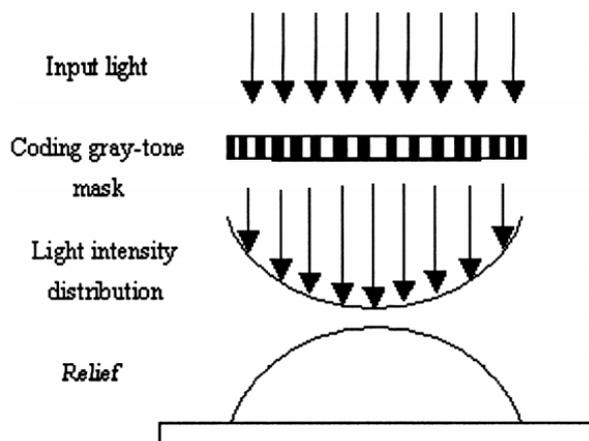
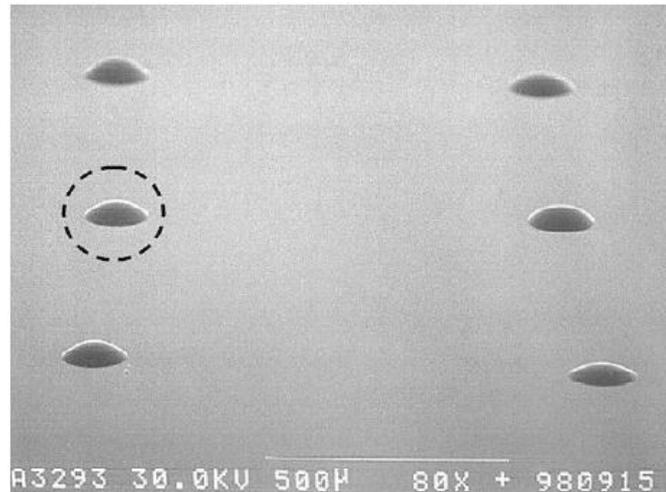
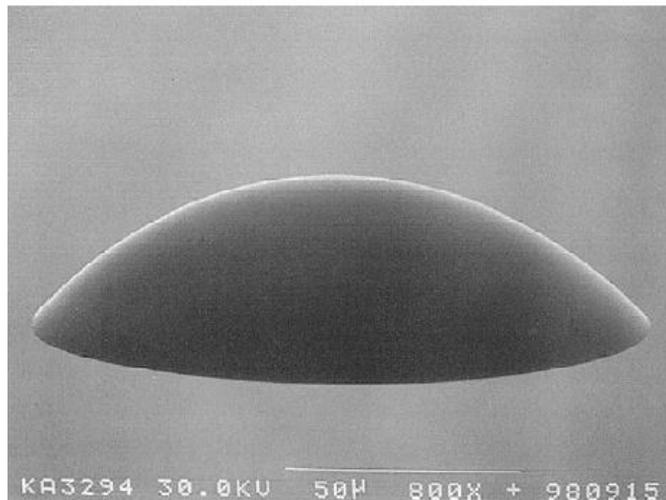


圖 5 灰階光罩法製作微透鏡[13]

Park 等人於 1999 年使用紫外光成形膠法製作微透鏡[15]，透過控制初始紫外光固化膠體的尺寸，可輕易的控制微透鏡曲率，且微透鏡間距亦可調配，最後完成半徑 $81\ \mu\text{m}$ 以及矢高 $40\ \mu\text{m}$ 之微透鏡，如圖 6。



(a)



(b)

圖 6 紫外光成形法製作微透鏡[15]

亦有學者使用電子束，在 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 溶膠-凝膠混合的材料，其針對不同曝光劑量下會有不同膨脹體積的特性，以三維立體掃描電子束的方式來製造微透鏡陣列，如圖 7 所示，藉由不同的掃描路徑可以製造出一般球面或者是複雜的繞射元件結構。[16,17]

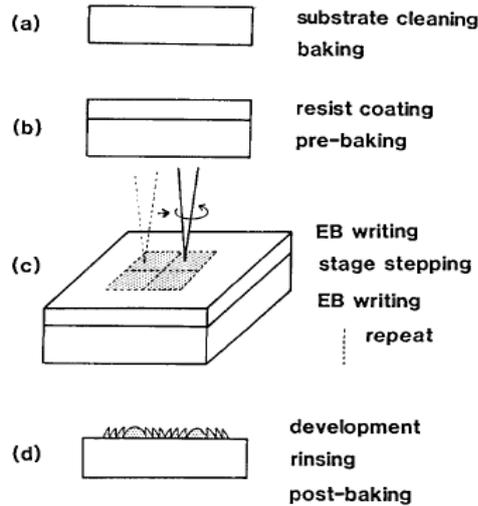


圖 7 電子束加工法製作微透鏡陣列[17]

除了上述介紹的半導體製程外，雷射微加工技術亦可製作微透鏡，雷射微加工技術可對任何可吸收雷射波長之材料加工，且為非接觸式加工，可快速的製作任意微結構圖形並具有高深寬比。1997 年 Wakaki 等人提出利用波長為 $10.6 \mu\text{m}$ 之 CO_2 雷射[18]，直接加工玻璃基板(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°C for Corning 7059)，雷射照射周圍區域，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直接影響透鏡尺寸。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， CO_2 雷射照射時間越長可得到尺寸越大的微透鏡，如圖 8 所示。

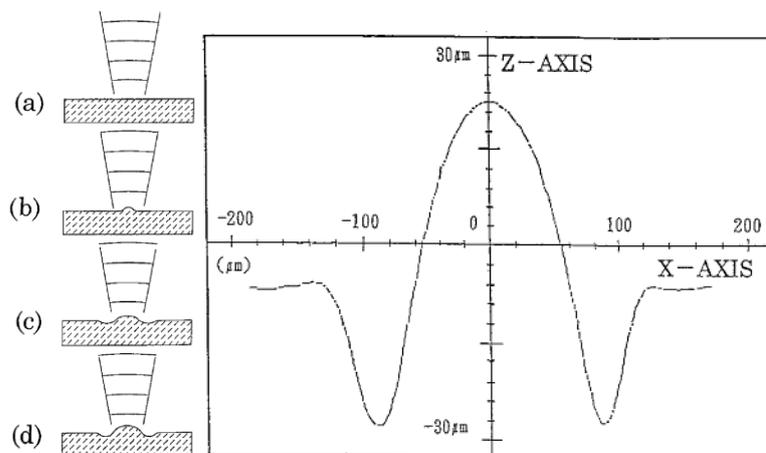


圖 8 微透鏡陣列之橫截面 3D 輪廓[18]

此外 2010 年 Nieto[19]等人利用 Nd:YVO₄(摻釹鈮酸鈮)雷射，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，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 9 所示。

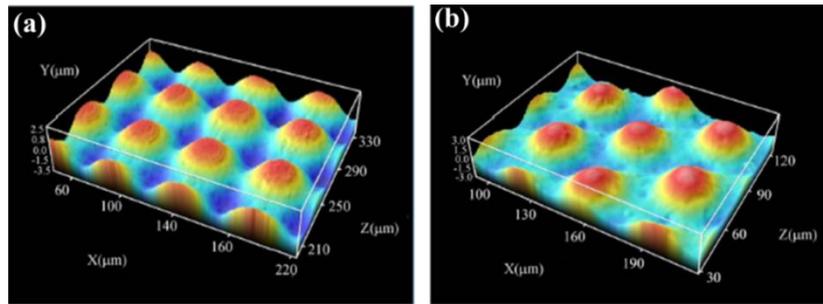


圖 9 共軛焦顯微鏡觀察(a)正方形(b)三角形之微透鏡陣列[19]

雷射拖拉加工法是利用光罩以投影方式直接加工基材，並配合光罩拖拉方式製作不同配置的微透鏡陣列，例如角度旋轉 90 度拖拉兩次，即可加工方型微透鏡陣列，以角度 60 度拖拉三次，則可加工六角型微透鏡陣列，如圖 10。[20]

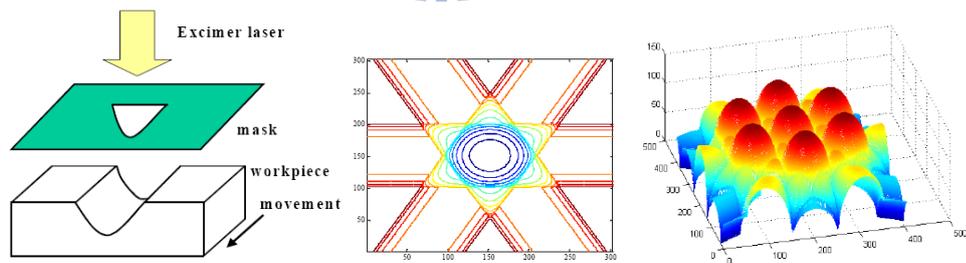


圖 10 雷射拖拉法加工微透鏡[20]

滾輪成形(roll to roll)法也可用來量產微透鏡陣列，將製作好微透鏡陣列的滾輪一邊滾過 UV 膠一邊做 UV 光硬化成形，如此可快速的製作微透鏡陣列塑膠薄膜，如圖 11。

[21]

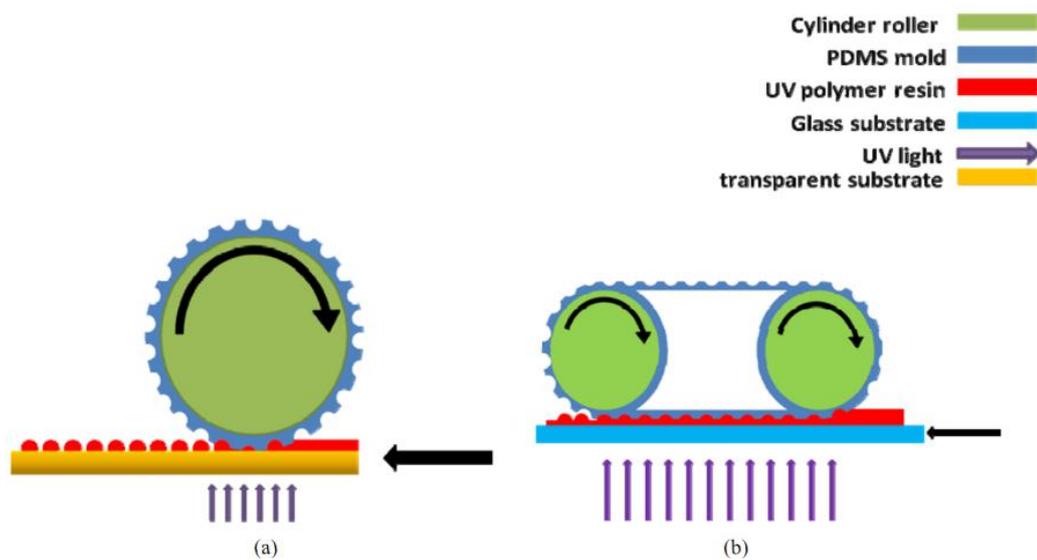


圖 11 滾輪成形微透鏡陣列[21]

Chen 於 2010 年利用超精密鑽石車削技術，使用慢刀伺服功能加工晶圓級光學所需對稱排列的微透鏡陣列，加工出形狀精度及表面粗糙度分別小於 $0.2 \mu\text{m}$ 及 5nm ，具有非球面的百分之一百填充率的微透鏡陣列，每顆微透鏡形狀精度的均勻度小於 $0.05 \mu\text{m}$ ，如圖 12。[22]

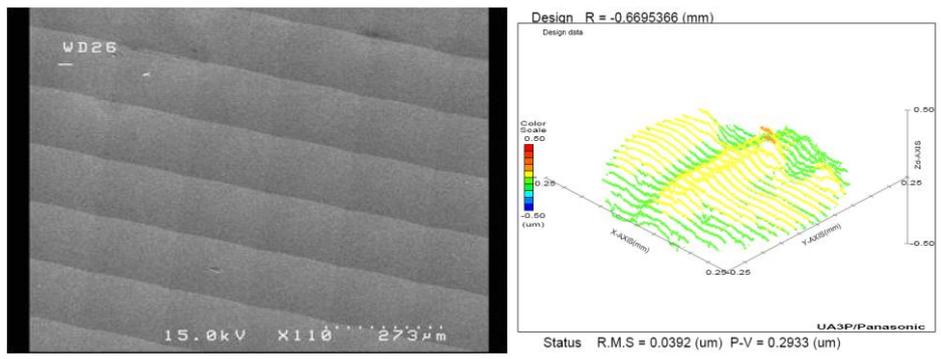


圖 12 超精密鑽石車削技術加工微透鏡[22]

表 1 為微透鏡陣列製程比較表，可看出各製程方法的優劣差異性，所述製程方法，多為使用高分子材料製作微透鏡。欲製作精密玻璃透鏡陣列，目前可利用雷射微加工技

術、超精密鑽石輪磨技術以及精密玻璃模造技術來達成。但是雷射微加工技術表面粗糙度不佳，而鑽石輪磨技術產能較低、成本較高且有鑽石砂輪磨耗及對刀校正等技術問題，因此不適合應用於量產，僅適合用於加工量產用之精密模具，故藉由精密玻璃模造技術來成形光學玻璃元件，可批量的快速製作且維持高精度的品質。

表 1 微透鏡陣列製程比較表[22]

	熱熔法	灰階光 罩製作	電子 束法	噴墨 印刷法	疏水性 製作法	雷射 拖拉	超精密 加工法	玻璃模 造技術
有效面積 填充率	△	○	○	×	×	○	○	○
複雜度	△	○	○	×	×	△	○	○
均勻度	△	○	○	△	△	○	○	○
形狀 精度	△	△	△	×	×	○	○	○
表面 粗糙度	○	△	×	○	○	△	○	○
玻璃材料	×	×	×	×	×	○	△	○
量產性	×	×	×	×	×	×	△	○
○：優 △：可 ×：差								

玻璃模造技術最早是 1974 年由 Eastman Kodak 美國專利(US patent 3833347)提出 [23]，至今已 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Takahashi等人[24]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。Takahashi認為濕式蝕刻的加工解析度太低以及表面精度太差，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13所示。此外Takahashi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、化學穩定度較高以及對於UV光線吸收低等優點，所以比塑膠材料更適合應用於光學微機電以及生醫流體機電上。

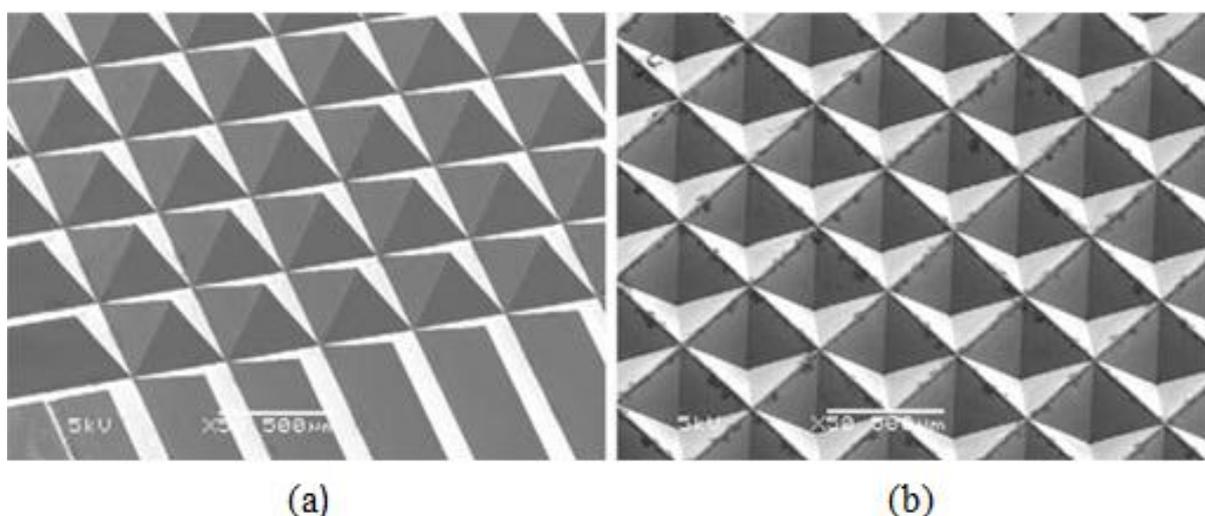


圖 13 (a)GC 模仁微結構 (b)熱壓後玻璃[24]

2005年Firestone與Yi [25]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14所示，其微孔直徑為3.4 mm。

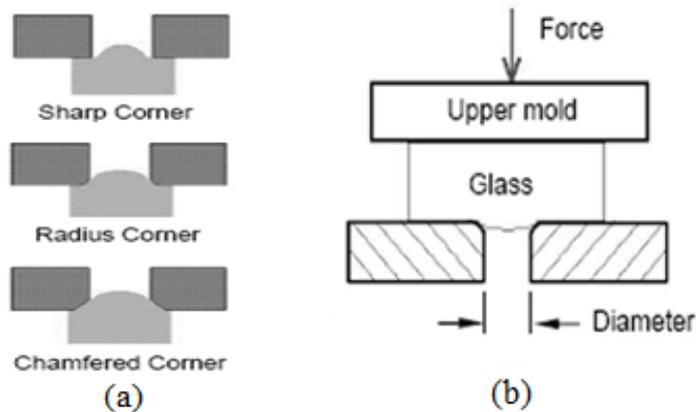


圖 14 玻璃模造示意圖 (a)不同邊角之影響 (b)微透鏡成形[25]

2009年Hsu [26]等人利用鑽石切削技術在電解鎳模仁上製作出平行的V溝陣列，並結合玻璃模造技術於FCD1(Hoya)與SF2(Ohara)玻璃上熱壓出V溝陣列。研究結果顯示成形溫度高於 T_g 點(glass transition temperature) $35-55^{\circ}\text{C}$ 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15所示。

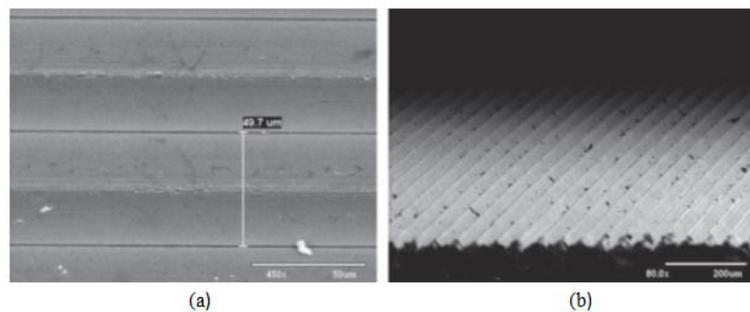


圖 15 鎳板上之連續水平陣列(a)上視圖(b)側視圖[26]

玻璃模造技術除了成形上述的微結構之外，亦可針對球面或非球面透鏡成形，Yan利用有限元素法分析玻璃材料在模造製程中的熱影響[27]，並透過實驗驗證模擬結果，如圖16，所使用的玻璃材料是L-BAL42。

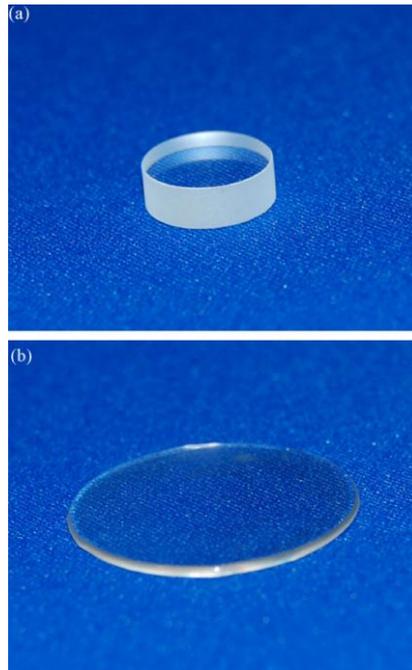


圖 16 玻璃模造技術成形之鏡片[27]

Cha等人於2011年利用玻璃模造技術成形非球面透鏡[28,29]，其鏡片表面粗糙度Ra為4.2 nm，玻璃材料使用Ohara公司的L-BSL7，模仁材料為碳化鎢，所成形鏡片如圖17。



圖 17 非球面透鏡[29]

在玻璃模造製程中，模仁多為高硬度材料，因此絕大多數採用精密鑽石輪磨加工技術來製作模仁，如Saeki等人在2001年利用鑽石輪磨技術製作碳化鎢模仁[30]，並介紹不同路徑的加工方法，如圖18。

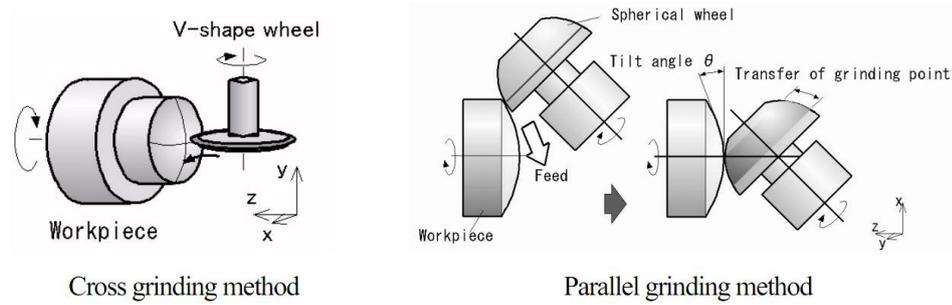


圖 18 鑽石輪磨加工模仁[30]

因鑽石輪磨技術製作模仁，需要冗長的加工時間與昂貴成本，因此本論文除了使用鑽石輪磨技術製作模仁外，亦使用雷射以及線切割放電加工法來製作模仁，放電加工法可以加工導電材料，而不受限於材料的機械性質，因此廣泛被使用在模具加工產業。相關研究如2011年Shah等人利用田口實驗法，分析線切割放電加工法對碳化鎢的加工品質影響，例如材料移除率與表面粗糙度，實驗架構如圖19[31]。

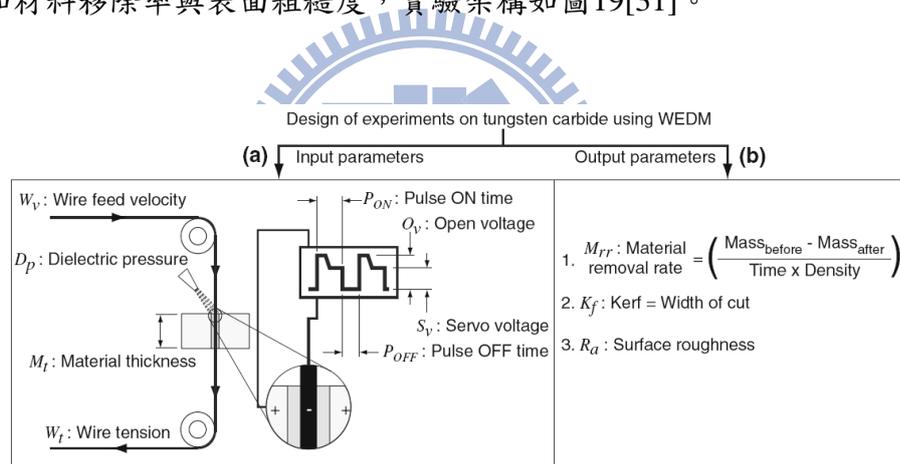


圖 19 線切割放電加工技術加工碳化鎢[31]

針對模仁加工方面，亦可利用雷射進行加工，例如Trtica等人於2001年利用CO₂雷射加工AISI 316以及AISI M2不銹鋼，並比較其加工特性[32]，不同參數加工下的結果如圖20。2007年楊宏智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[33]。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，較高的雷射脈衝重複頻率，能達到較佳的表面加工精度。

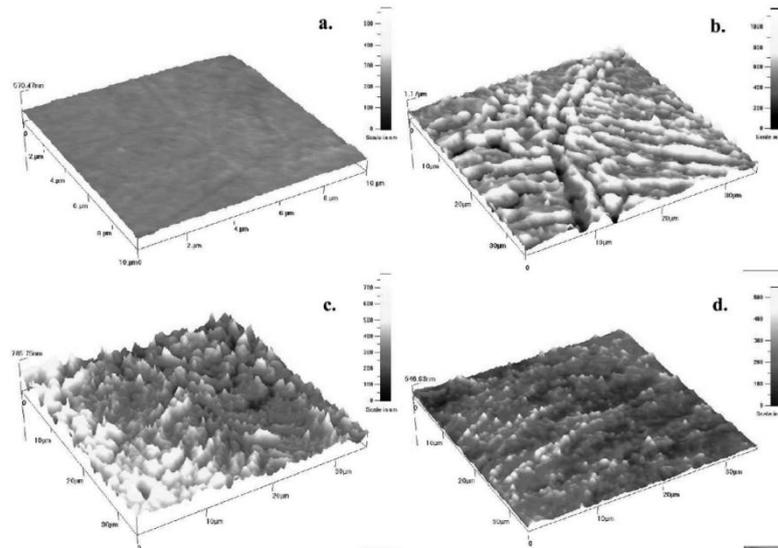


圖 20 不同雷射加工參數下的不銹鋼表面[32]

雷射加工金屬材料會產生再鑄層，因此利用電解拋光技術來消除，電解拋光相關文獻如 1982 年 Faust[34]指出電解拋光過程中在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 Hopfenfeld[35]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[36]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。

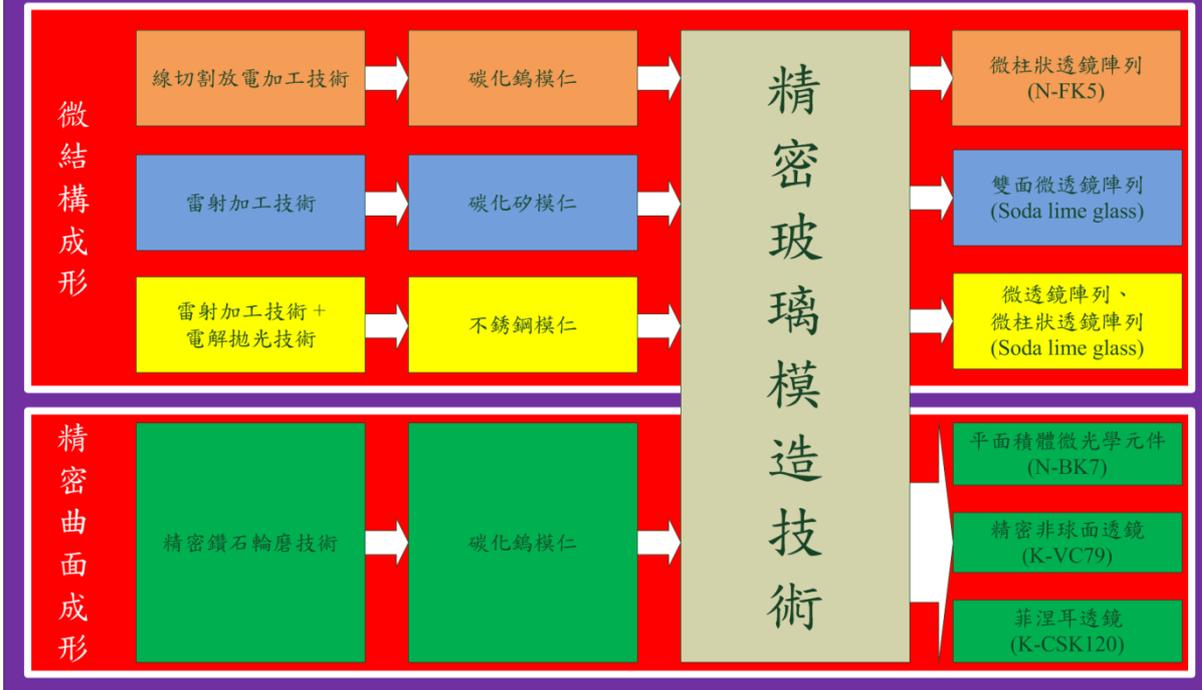
1.3 研究目的

本論文旨在探討精密玻璃模造技術應用於光學元件之研究，規劃探討微結構成形以及精密曲面成形，在微結構成形方面，包含微柱狀透鏡陣列成形、雙面微透鏡陣列成形以及微結構陣列成形，而在精密曲面成形方面，包含平面積體光學元件成形以及非球面透鏡成形，最後分析具有微結構之精密曲面的菲涅耳透鏡成形製程研究，論文架構如圖 21，本論文預計達成以下結果：

1. 探討模仁製程技術，包括精密鑽石輪磨技術、雷射加工技術、線切割放電加工技術以及電解拋光技術，藉由不同的製程技術，探討多樣化的模仁製程以及多樣化的模仁結構。
2. 利用不同模仁材料，建立相關製程資料，包括碳化鎢、碳化矽以及不銹鋼材料。
3. 探討不同玻璃材料以及不同尺寸和結構的成形特性，建立模造溫度、模造力量以及模造製程時間等參數資料。
4. 探討不同輪廓，包含微結構陣列以及精密曲面，分析不同輪廓的玻璃模造製程參數差異。
5. 希望完成微結構陣列玻璃元件以及精密曲面玻璃元件。



精密玻璃模造相關技術於光學元件之應用與研究



二、實驗原理與實驗材料

2.1 玻璃模造技術

非球面玻璃元件的製造方法可分為三種：一為傳統研拋方法，如圖 22，二是超精密鑽石輪磨加工法，以及精密玻璃模造法，如圖 23 之分類。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，如圖 24[37]，因此可快速批量生產良率佳的高精度光學元件[38-40]。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，例如平面光學元件、微透鏡陣列、次波長光學元件及生醫晶片等。

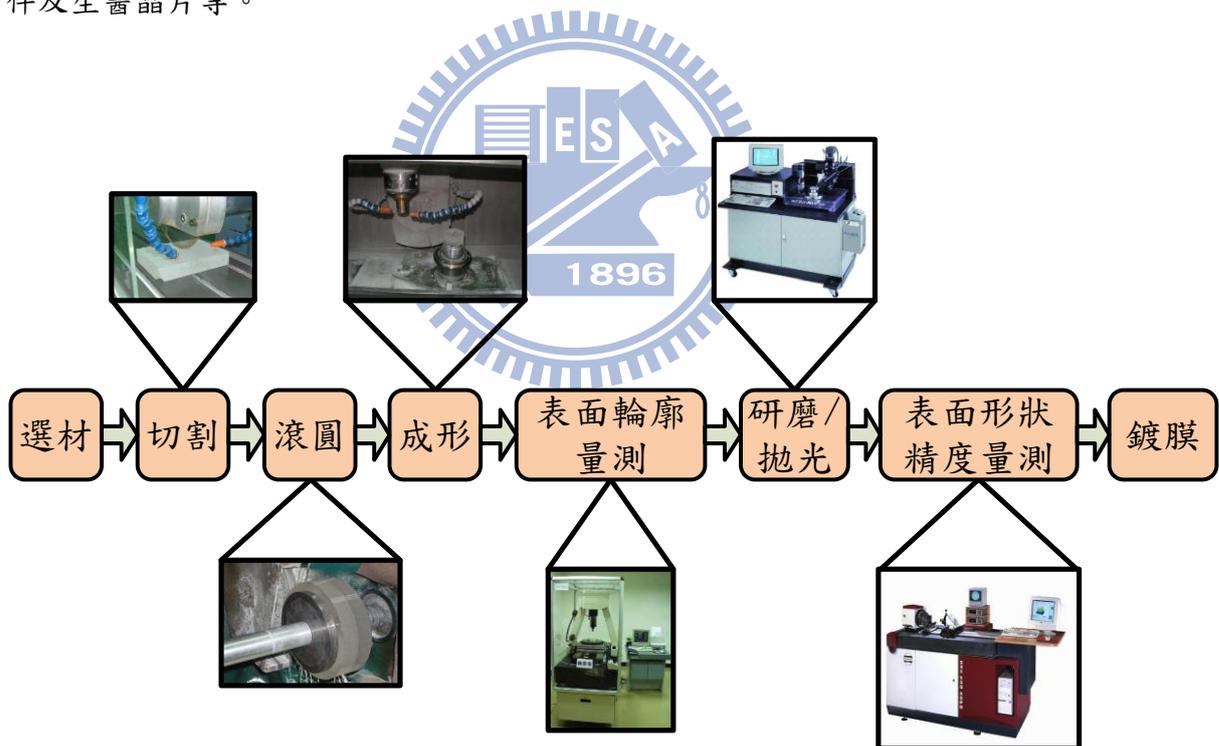


圖 22 傳統非球面鏡片製程



圖 23 玻璃元件加工法

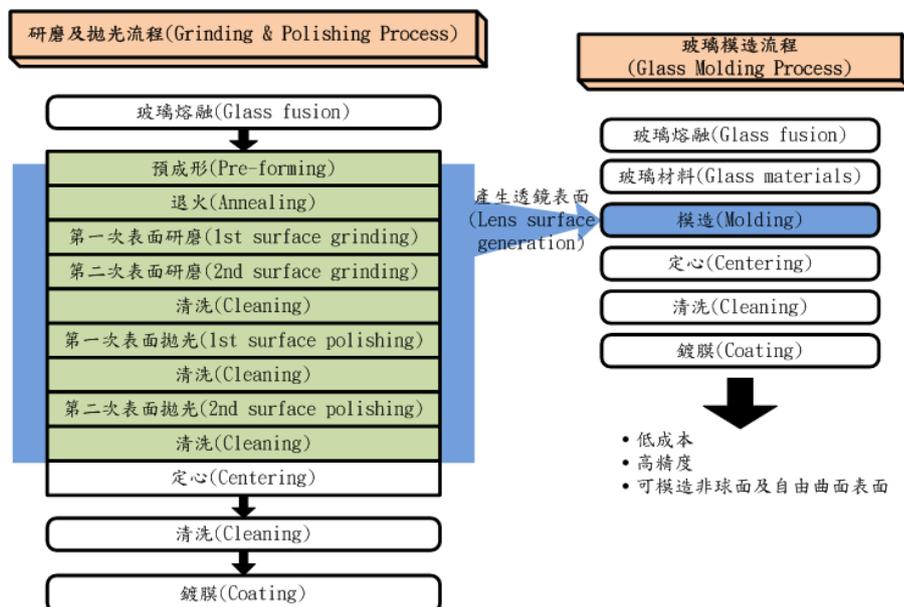


圖 24 精密玻璃模造製程

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，此技術包含模仁設計及製作、預形體設計與製作以及檢測技術。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25為玻璃模造製程流程圖，首先將玻璃預形體放在模造設備內之模仁上，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，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降伏點溫度，也就是俗稱的At點溫度以及玻璃的外形，利用石英燈管加熱，最高可以達到1500 °C，甚至可以對石英玻璃進行加工。加熱過程中，亦可控制腔體的環境為氮氣環境或是真空環境，經過保溫時間後，模仁以及玻璃的溫度趨於穩定，可控制力量以及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玻璃元件，通常在生產線中，都是由機械手臂自動化進行模造製程。圖26為本系列研究所使用之模造設備，其為日本Toshiba之207HV高溫玻璃模造機，表2為其規格。

模造製程流程圖

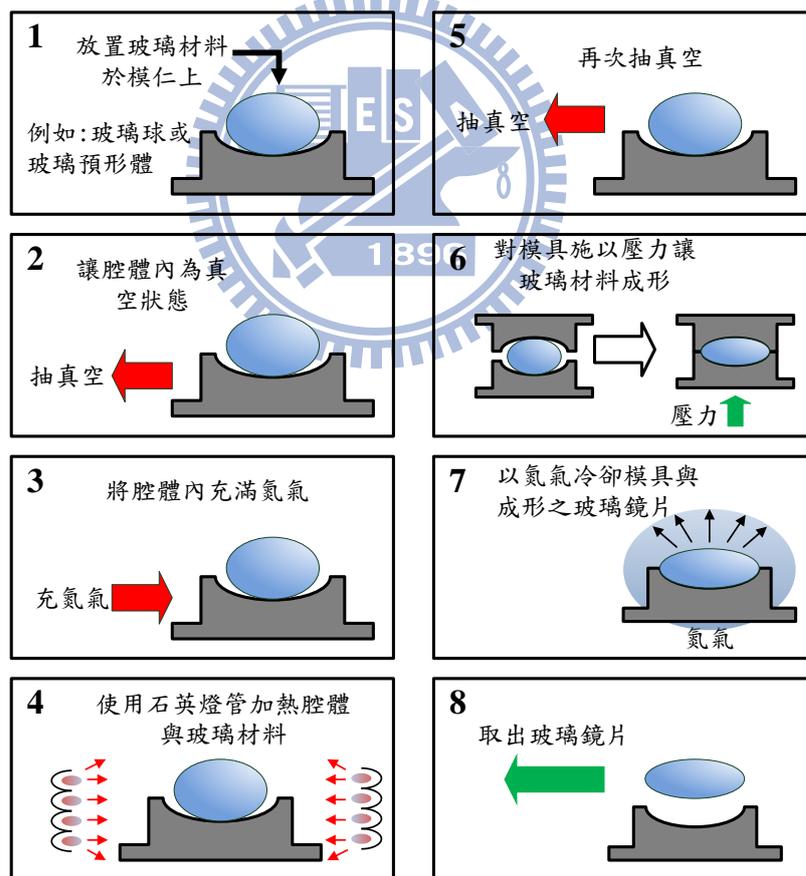


圖 25 模造製程流程圖



圖 26 高溫玻璃模造機

表 2 高溫玻璃模造機規格

機型	GMP-207HV
玻璃模造最高溫度	1500 °C
加熱方式	紅外線燈管
冷卻方式	腔體充氮氣
玻璃模造最大加壓力	20 kN
加壓力軸驅動方式	AC 伺服馬達和滾珠螺桿
加壓力軸最大行程	90 mm
加壓力軸位移檢測精度	1 μm
可成形玻璃最大外徑	100mm(800°C), 60mm(1500°C)
模造時抽真空	可, ≤ 1.0 Pa

玻璃模造製程依照合模方式，可分為開放式與封閉式兩種模式，如圖27所示，開放式模造製程中的玻璃預形體及模仁，增加氮氣為介質的熱傳加熱方式，因此熱傳效果較封閉式佳，如圖28，所以適合用來成形微結構，例如透鏡陣列等，但開放式模造製程的

缺點為無法定位，若要製作精密曲面光學元件，考量鏡片偏心量的要求，則需採用封閉式模造製程，且封閉式模造製程可保壓並確保玻璃材料不產生溢料現象，故本論文中第三章微結構成形利用開放式模造製程，而第四章精密曲面成形則選用封閉式模造製程。由圖中亦可看出上下模仁各有一溫度感測器，可在製程中即時監控模仁溫度。

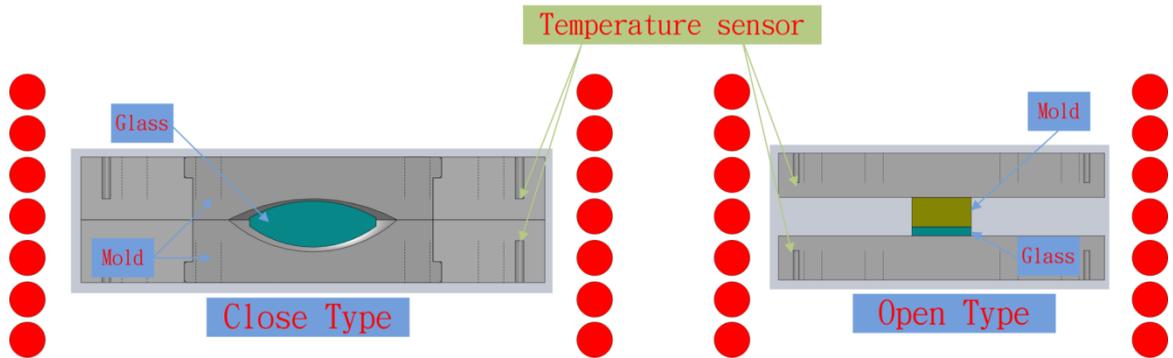


圖 27 開放式與封閉式模造方法示意圖

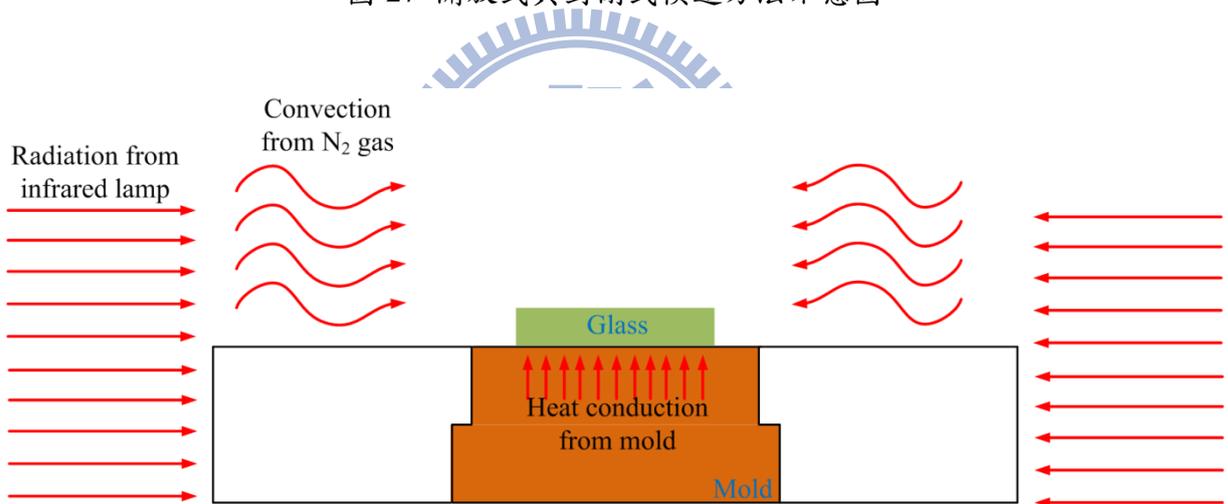


圖 28 加熱方式示意圖

玻璃模造製程常見的參數有模造溫度、模造力量、保溫時間、模造方式、模造時間、腔體環境以及降溫速率，其說明如下：

模造溫度：模造系統加熱至所設定的模造溫度時，開始進行熱壓程序，模造溫度是製程中最重要參數，通常根據玻璃的轉化點溫度(T_g)或降伏點溫度(A_t)，並考慮玻璃元件尺寸與外形輪廓來選擇，溫度不足，玻璃元件無法成形，溫度過高，玻璃預形體容易與模仁上之膜層產生沾黏現象。

模造力量：模造力量是指在模造製程中，當達到設定的模造溫度時，模造設備主軸

施加給模仁的力量，藉由此力量，使模仁上的輪廓結構轉寫至玻璃預形體，進而完成符合設計規格之玻璃元件。

保溫時間：當達到模造溫度設定值時，因玻璃預形體為一具有體積之固體，因此需要讓系統溫度固定，並維持一段時間，使玻璃預形體整體溫度均勻，減少溫度不均造成的破裂現象，此一所需時間即稱為保溫時間。

模造方式：可分為開放式與封閉式，亦可分為一段式以及二段式，二段式亦即當第一段熱壓程序結束後進行模造力量釋放，此時同步進行降溫，並再一次進行熱壓，而二段式通常用來改善玻璃元件成形精度與釋放內部的殘留應力。

模造時間：模造製程中，模造力量作用的時間稱為模造時間，若時間不足將導致玻璃元件無法成形。

腔體環境：為了避免模仁以及膜層因模造製程時的高溫氧化而受損，通常會在設備腔體中充填氮氣或抽真空，以避免模造製程中腔體內部有過多氧氣存在。

降溫速率：模造系統使用氮氣降溫，可藉由控制氮氣流量來調整降溫速度，降溫速度愈慢，玻璃元件冷卻過程愈穩定，破裂機率愈小。

2.1.1. 模仁材料

玻璃模造製程所使用的模仁，因模仁需要在數百度高溫保持良好的剛性，材料多使用碳化矽、碳化鎢(WC)或玻璃碳(glassy Carbon, GC)。本實驗除了使用碳化鎢做為模仁材料外，因雷射加工技術對金屬材料加工將會產生再鑄層，因此亦選擇碳化矽作為模仁材料，且為了透過電解拋光技術改變微結構形貌，故也使用不銹鋼做為模仁材料，以下將分別介紹各模仁的材料特性。

2.1.1.1. 碳化鎢

碳化鎢是在玻璃模造製程中最常被使用的材料，相較於碳化矽較不易碎裂，且價格比玻璃碳材料便宜。表3為碳化鎢特性，本研究微柱狀透鏡陣列、平面積體光學元件、非球面透鏡以及菲涅耳透鏡皆是使用碳化鎢做為模仁材料。

表 3 碳化鎢物質特性表[41-43]

特性	碳化鎢
密度 (g/cc)	15.7
熔點 (°C)	2800-2870
熱傳導率 (W/(m·K))	63
斷裂韌性 (MPa·m ^{0.5})	5.0
硬度 (Rockwell A)	90
楊氏係數 (GPa)	550

2.1.1.2. 碳化矽

碳化矽(SiC)硬度高且耐高溫，但碳化矽屬於硬脆材料且不導電，一般傳統機械加工法無法對其加工，通常使用鑽石輪磨技術來加工，本實驗因要製作微結構，鑽石輪磨技術有其幾何尺寸的限制，因此選擇雷射加工技術來製作微結構，高能雷射光束對任何可吸收雷射波長之材料皆可加工，依不同的加工路徑可快速地製作出多樣性結構，在經過雷射加工後，模仁表面再鑄層[44]較少，可保持良好的輪廓。碳化矽的熔點為2730 °C，在1500 °C以內的模造溫度下，依然可以不因溫度而變形，表4為碳化矽之物質特性。

表 4 碳化矽物質特性表[42,45]

特性	碳化矽
密度 (g/cm ³)	3.21
熔點 (°C)	2730
熱傳導率 (W/(m·K))	126
斷裂韌性 (MPa·m ^{0.5})	4.6
硬度 (Mohs)	9.15
楊氏係數 (GPa)	450

2.1.1.3. 不銹鋼

本實驗所使用之模仁材料為SUS 304沃斯田鐵型不銹鋼，成分組成為18~20 %的鉻(Cr)、8~10.5 %的鎳(Ni)和66~74 %的鐵(Fe)。不銹鋼熔點高，在其表面製作微結構時，因其為金屬材料，故在高溫時，微結構不易碎裂，因微結構幾何尺寸小，所以採用雷射加工技術來製作微結構，但因雷射加工金屬材料容易產生再鑄層，因此透過電解拋光技術來消除微結構上的再鑄層。表5為不銹鋼材料特性表。

表 5 不銹鋼物質特性表[41]

特性	不銹鋼
密度 (g/cc)	8.00
熔點 (°C)	1400-1455
熱傳導率 (W/(m·K))	21.5
斷裂韌性 (MPa·m ^{0.5})	76.0 - 165
硬度 (Vickers)	129
楊氏係數 (GPa)	193-200

2.1.2. 玻璃材料

光學元件中以高分子材料與玻璃材料使用的最為廣泛，然而玻璃的光學成像品質、抗刮性、耐有機物質腐蝕能力、吸水性低以及耐高溫等優點，是高分子材料所不能及的。表6為玻璃與高分子材料特性之比較，表7則是幾種常見的鏡片材料特性比較表。光學玻璃成分主要是使用高含量的矽與硼、鈉、鉀、鋅、鉛、鎂、鈣、鋇等元素的氧化物，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 6 光學玻璃與光學高分子材料[46]

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	70~130 × 10 ⁻⁷	More than glass 10 times
Specific Weight	2.2~7.3	1.0~1.5

表 7 光學鏡片材料特性比較表[47]

特性	玻璃	PMMA	PC	COP	Silicone
折射率	◎	○	○	○	○
穿透率	◎	◎	○	○	○
耐 UV 性	◎	△	×	×	◎
耐熱性	◎	×	△	△	◎
硬度	◎	○	○	○	△
吸水性	◎	×	×	○	△
加工性	×	◎	◎	○	○
價格	×	◎	◎	○	△
◎：佳 ○：普通 △：差 ×：極差					

如圖29[48]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, vd)與折射率(Refractive index, nd)來進行分類並加以編號。主要分為冠冕玻璃(Crown Glass)與火石玻璃(Flint Glass)。冠冕玻璃(nd<1.60, vd>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(nd>1.60, vd<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則代表折射率 n_d 為1.501、阿貝數 v_d 為56.4以及玻璃密度為2.52。

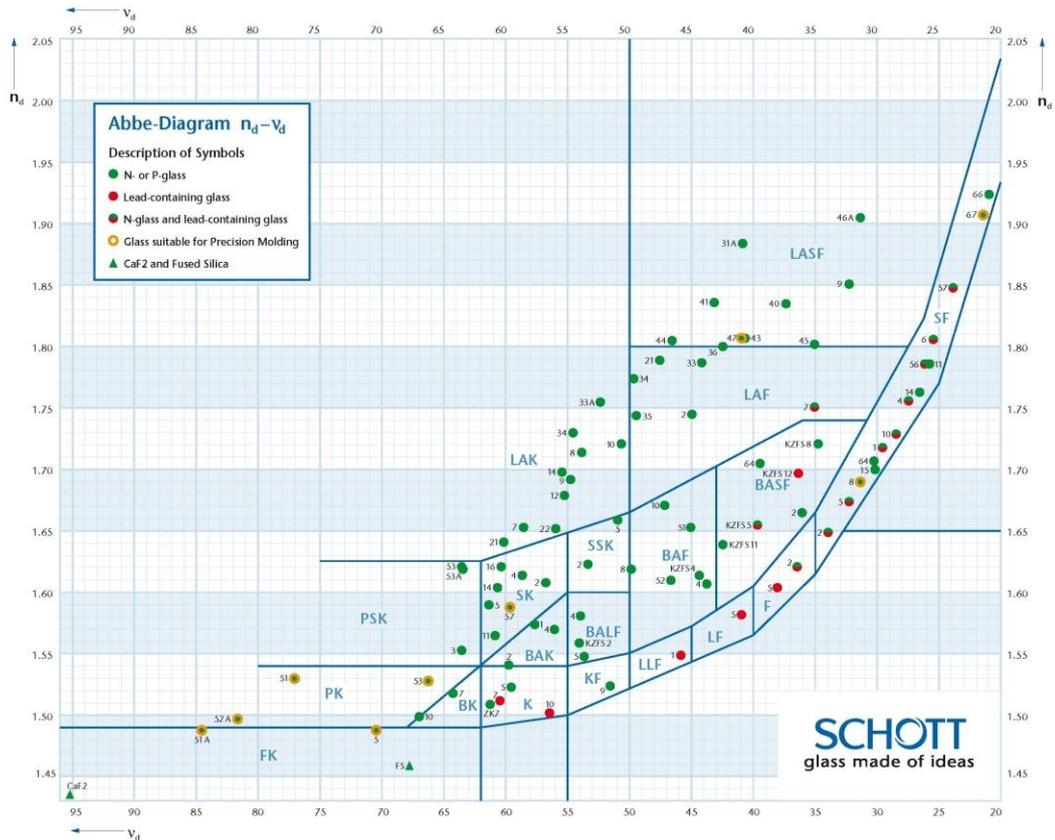


圖 29 Schott 公司玻璃毛胚品種圖[48]

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，如公式(1)，玻璃模造製程歷經昇溫與降溫，因此模造溫度以及降溫速率是否對玻璃鏡片折射率產生影響，也是在製程中需要考慮的。圖30所示為不同光學玻璃的退火速率(冷卻速率)對折射率之影響，參考冷卻速率值為7 K/h。

$$n_d(h_x) = n_d(h_0) + m_{nd} \cdot \log\left(\frac{h_x}{h_0}\right) \quad (1)$$

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。

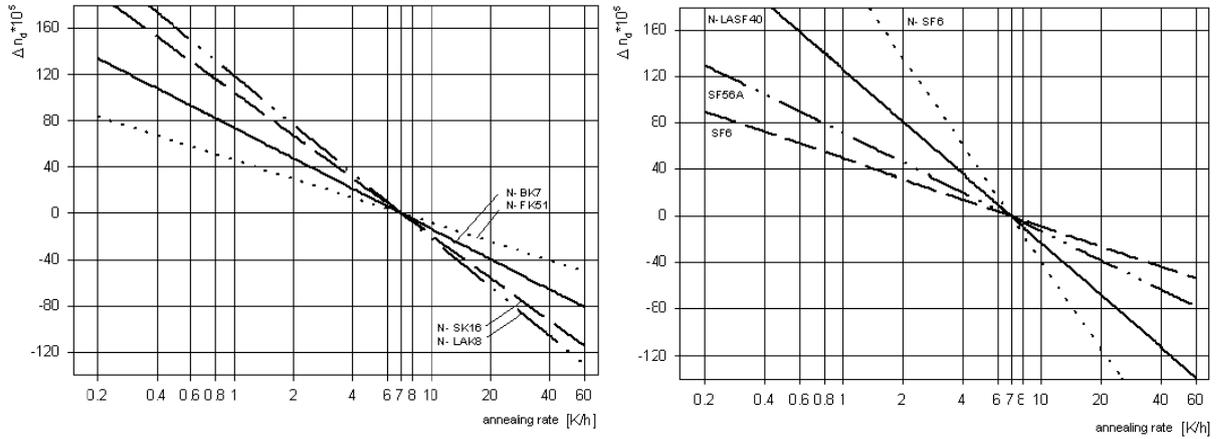


圖 30 冷卻速率對不同光學玻璃折射率之影響[49]

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31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會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。

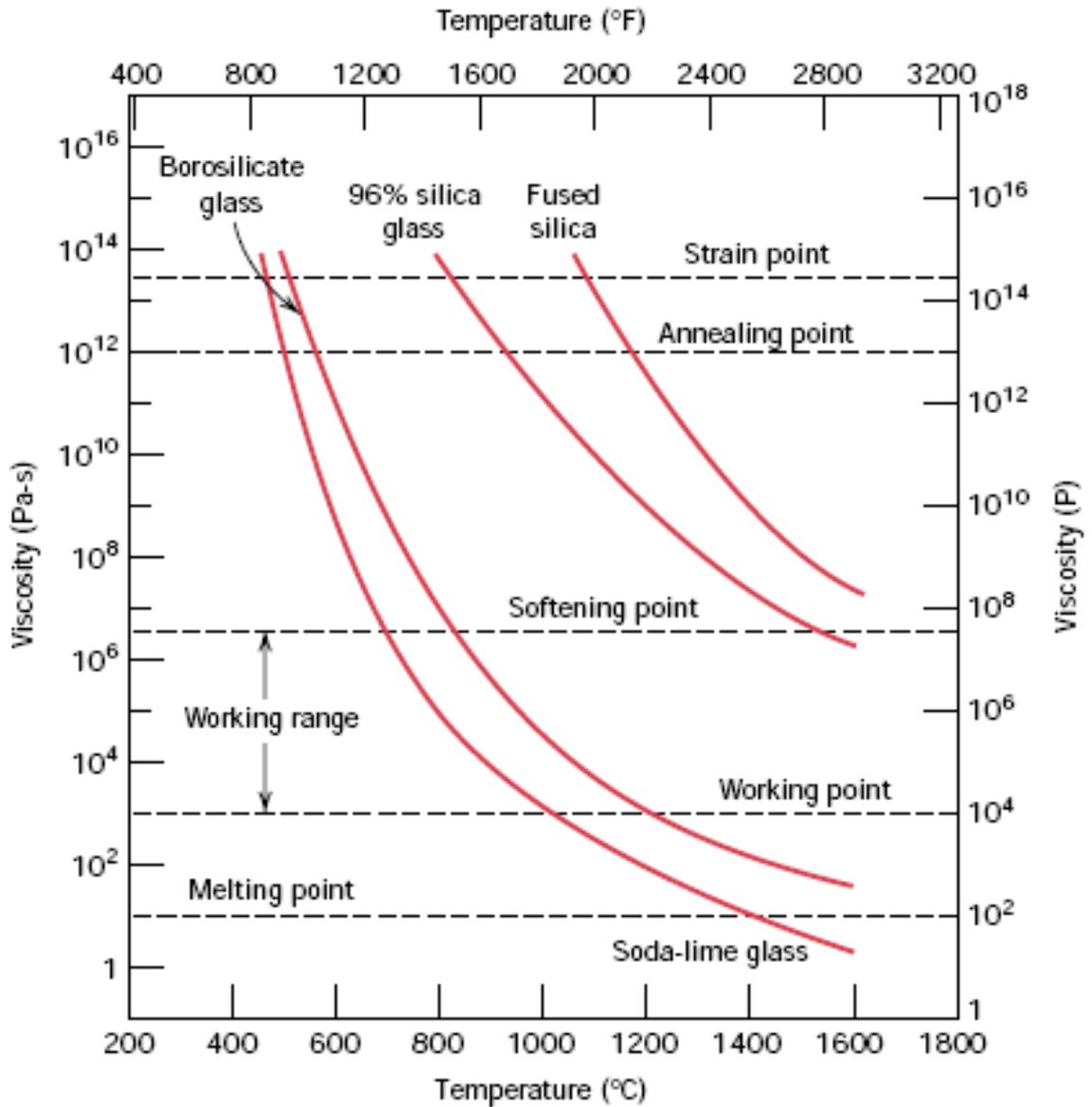


圖 31 玻璃溫度對黏滯係數之關係[50]

以下整理出本論文所使用的玻璃材料特性，包括 Schott 公司的 N-FK5 與 N-BK7，以及 Sumita 公司的 K-VC79 與 K-CSK120，另外亦使用鈉玻璃(Soda lime glass)做為模造微結構實驗的試片。

2.1.2.1. N-FK5

N-FK5 為 Schott 公司專為玻璃模造製程所開發的玻璃材料，玻璃轉化點(Tg)為 466 °C，玻璃模造專用材料特點為轉化點溫度較低，且不易與模仁產生沾黏反應，材料特性表如圖 32。本實驗利用 N-FK5 做為微柱狀透鏡陣列材料。

Data Sheet			SCHOTT					
N-FK5 487704.245			$n_d = 1.48749$ $v_d = 70.41$ $n_F - n_C = 0.006924$ $n_e = 1.48914$ $v_e = 70.23$ $n_F' - n_C' = 0.006965$					
Refractive Indices			Internal Transmittance τ_l			Relative Partial Dispersion		
	λ [nm]		λ [nm]	τ_l (10mm)	τ_l (25mm)	$P_{s,t}$		
$n_{2325.4}$	2325.4	1.461810	2500	0.68	0.38	$P_{C,s}$	0.574	
$n_{1970.1}$	1970.1	1.467380	2325	0.83	0.63	$P_{d,C}$	0.3097	
$n_{1529.6}$	1529.6	1.473120	1970	0.971	0.930	$P_{e,d}$	0.2388	
$n_{1060.0}$	1060.0	1.478550	1530	0.986	0.965	$P_{g,F}$	0.529	
n_t	1014.0	1.479120	1060	0.999	0.998	$P_{i,h}$	0.7319	
n_s	852.1	1.481370	700	0.998	0.996			
n_r	706.5	1.484100	660	0.998	0.994	$P'_{s,t}$	0.3232	
n_C	656.3	1.485350	620	0.997	0.993	$P'_{C,s}$	0.6201	
$n_{C'}$	643.8	1.485690	580	0.998	0.994	$P'_{d,C'}$	0.2584	
$n_{632.8}$	632.8	1.486010	546	0.998	0.994	$P'_{e,d}$	0.2374	
n_D	589.3	1.487430	500	0.997	0.993	$P'_{g,F'}$	0.4704	
n_d	587.6	1.487490	460	0.997	0.993	$P'_{i,h}$	0.7276	
n_e	546.1	1.489140	436	0.997	0.993	Deviation of Relative Partial Dispersions ΔP from the "Normal Line" $\Delta P_{C,t}$ 0.0202 $\Delta P_{C,s}$ 0.007 $\Delta P_{F,e}$ 0.0001 $\Delta P_{d,F}$ 0.0036 $\Delta P_{i,g}$ 0.0322		
n_F	486.1	1.492270	420	0.997	0.993			
$n_{F'}$	480.0	1.492660	405	0.998	0.994			
n_G	435.8	1.495930	400	0.998	0.994			
n_h	404.7	1.498940	390	0.998	0.994			
n_i	365.0	1.504010	380	0.996	0.990			
$n_{334.1}$	334.1	1.509390	370	0.997	0.992			
$n_{312.6}$	312.6	1.514280	365	0.997	0.992			
$n_{296.7}$	296.7	1.518670	350	0.995	0.987			
$n_{280.4}$	280.4	1.524150	334	0.989	0.972			
$n_{248.3}$	248.3		320	0.971	0.930	Other Properties $\alpha_{-30/+70^\circ C}$ [$10^{-6}/K$] 9.2 $\alpha_{+20/+300^\circ C}$ [$10^{-6}/K$] 10.0 T_g [°C] 466 $T_{10^{13.0}}$ [°C] 469 $T_{10^{7.6}}$ [°C] 672 c_p [J/(g·K)] 0.808 λ [W/(m·K)] 0.925 ρ [g/cm ³] 2.45 E [10^3 N/mm ²] 62 μ 0.232 K [10^{-6} mm ² /N] 2.91 $HK_{0.1/20}$ 520 HG 3 B 1.00 CR 2 FR 1 SR 4 AR 2 PR 2.3		
Constants of Dispersion Formula B_1 0.844309338 B_2 0.344147824 B_3 0.910790213 C_1 0.00475111955 C_2 0.0149814849 C_3 97.8600293			Color Code λ_{80}/λ_{5} 30/27 (*= λ_{70}/λ_{5})					
Constants of Dispersion dn/dT D_0 $-7.24 \cdot 10^{-6}$ D_1 $1.58 \cdot 10^{-8}$ D_2 $-9.51 \cdot 10^{-12}$ E_0 $3.51 \cdot 10^{-7}$ E_1 $4.61 \cdot 10^{-10}$ λ_{TK} [μm] 0.156			Remarks suitable for precision molding					
Temperature Coefficients of Refractive Index								
	$\Delta n_{rel}/\Delta T$ [$10^{-6}/K$]			$\Delta n_{abs}/\Delta T$ [$10^{-6}/K$]				
[°C]	1060.0	e	g	1060.0	e			g
-40/ -20	-1.5	-1.2	-0.9	-3.5	-3.2			-2.9
+20/ +40	-1.4	-1.0	-0.6	-2.6	-2.3			-2.0
+60/ +80	-1.2	-0.7	-0.3	-2.2	-1.8			-1.4

As of /09/03/2001, Subject to change

3/ Overview

圖 32 N-FK5 材料特性[48]

2.1.2.3. K-VC79

K-VC79 玻璃轉化點溫度(Tg)為 516 °C，材料特性表如圖 34。本實驗利用 K-VC79 做為非球面透鏡材料。

Optical Glass for Precision Molding				K-VC79			
609578 MFA		nd 1.60970	ν d 57.8	nF-nC 0.01055			
K-VC79		ne 1.61221	ν e 57.4	nF'-nC'	0.01067		

屈折率 Refractive Indices			部分分散及び部分分散比 Partial Dispersions and Relative Partial Dispersions				内部透過率 τ Internal Transmittance		
	λ nm		nC-nt	nC-nA'	nd-nC	ne-nC	10mm	25mm	
nt	1014.0	1.59777							
nA'	768.2	1.60280	0.00872	0.00369	0.00321	0.00572	270	0.02 ₂	
nr	706.5	1.60465	θ C,t	θ C,A'	θ d,C	θ e,C	280	0.10 ₃	
nC	656.3	1.60649	0.827	0.350	0.304	0.542	290	0.26 ₀	0.03 ₄
nC'	643.9	1.60698	ng-nd	ng-nF	nh-ng	ni-ng	300	0.37 ₈	0.08 ₈
nD	589.3	1.60960	0.01307	0.00573	0.00477	0.01288	310	0.66 ₉	0.36 ₈
nd	587.6	1.60970	θ g,d	θ g,F	θ h,g	θ i,g	320	0.79 ₉	0.57 ₁
ne	546.1	1.61221	1.239	0.543	0.452	1.221	330	0.89 ₁	0.75 ₁
nF	486.1	1.61704	nC'-nt	ne-nC'	nF'-ne	ni-nF'	340	0.93 ₉	0.85 ₄
nF'	480.0	1.61765	0.00921	0.00523	0.00544	0.01800	350	0.96 ₄	0.91 ₃
ng	435.8	1.62277	θ 'C,t	θ 'e,C'	θ 'F,e	θ 'i,F'	360	0.97 ₈	0.94 ₇
nG'	434.1		0.863	0.490	0.510	1.687	370	0.98 ₂	0.95 ₇
nh	404.7	1.62754					380	0.98 ₅	0.96 ₄
ni	365.0	1.63565					390	0.98 ₅	0.96 ₄
							400	0.98 ₅	0.96 ₄
							420	0.98 ₅	0.96 ₄
							440	0.98 ₈	0.97 ₁
							460	0.99 ₀	0.97 ₅
							480	0.99 ₁	0.97 ₈
							500	0.99 ₂	0.98 ₂
							550	0.99 ₄	0.98 ₅
							600	0.99 ₄	0.98 ₅
							650	0.99 ₇	0.99 ₂
							700	0.99 ₇	0.99 ₂
							800	0.99 ₈	0.99 ₈
							1060	0.99 ₈	0.99 ₈
							1500	0.99 ₇	0.99 ₂
							2000	0.97 ₈	0.94 ₇

分散式の常数 Constans of Dispersion Formula		機械的性質 Mechanical Properties		熱的性質 Thermal Properties	
A0	2.5493930	ヌープ硬度 Hk Knoop Hardness	599 (6)	転移点 Tg (°C) Transformation Point	516
A1	-1.0966263 × 10 ⁻²	ビッカース硬度 Hv Vickers Hardness	609	屈伏点 At (°C) Yielding Point	553
A2	1.4872612 × 10 ⁻²	磨耗度 Ha Abrasion	120	線膨張係数 α × 10 ⁻⁷ Thermal Expansion (100-300°C)	93
A3	3.1043762 × 10 ⁻⁴	ヤング率 E (10 ⁹ N/m ²) Young's Modulus	1008	備考 Remark s	
A4	-9.0553419 × 10 ⁻⁶	剛性率 G (10 ⁹ N/m ²) Modulus of Rigidity	401		
A5	6.7268873 × 10 ⁻⁷	ポアソン比 σ Poisson Ratio	0.256	その他 Other Properties	
		化学的性質 Chemical Properties		泡 B Bubbles	
		耐水性(粉末法) RW Water Resistance	1	着色度 C Color Degree	34/29
		耐酸性(粉末法) RA Acid Resistance	4	比重 S.g Specific Gravity	3.09
		耐候性(表面法) DW Weather Resistance	2	脈理 S Striae	

異常分散性 Deviation of Relative Partial Dispersions	
$\Delta \theta$ C,t	0.0107
$\Delta \theta$ C,A'	0.0038
$\Delta \theta$ g,d	-0.0079
$\Delta \theta$ g,F	-0.0076
$\Delta \theta$ i,g	-0.0214

SUMITA OPTICAL GLASS, INC.

圖 34 K-VC79 材料特性[51]

2.1.2.4. K-CSK120

K-CSK120 玻璃轉化點溫度(Tg)為 489 °C，材料特性表如圖 35，本實驗利用 K-CSK120 做為菲涅耳透鏡材料。

Optical Glass for Precision Molding				K-CSK120					
587596		nd 1.58700	ν d 59.6	nF-nC 0.00985					
K-CSK120		ne 1.58935	ν e 59.4	nF'-nC' 0.00993					
屈折率 Refractive Indices			部分分散及び部分分散比 Partial Dispersions and Relative Partial Dispersions				内部透過率 τ Internal Transmittance		
nt	1014.0	1.57575	nC-nt	nC-nA'	nd-nC	ne-nC	λ nm	10mm	25mm
nA'	768.2	1.58048	0.00823	0.00350	0.00302	0.00537	270		
nr	706.5	1.58224	θ C,t	θ C,A'	θ d,C	θ e,C	280		
nC	656.3	1.58398	0.836	0.355	0.307	0.545	290		
nC'	643.9	1.58446	ng-nd	ng-nF	nh-ng	ni-ng	300		
nD	589.3	1.58691	0.01217	0.00534	0.00444	0.01198	310	0.07 ₉	
nd	587.6	1.58700	θ g,d	θ g,F	θ h,g	θ i,g	320	0.38 ₈	0.09 ₂
ne	546.1	1.58935	1.236	0.542	0.451	1.216	330	0.67 ₉	0.38 ₁
nF	486.1	1.59383	nC'-nt	ne-nC'	nF'-ne	ni-nF'	340	0.84 ₃	0.65 ₄
nF'	480.0	1.59439	0.00871	0.00489	0.00504	0.01676	350	0.92 ₃	0.81 ₈
ng	435.8	1.59917	θ 'C,t	θ 'e,C'	θ 'F,e	θ 'i,F'	360	0.96 ₃	0.91 ₂
nG'	434.1		0.877	0.492	0.508	1.688	370	0.97 ₂	0.93 ₂
nh	404.7	1.60361					380	0.98 ₄	0.96 ₂
ni	365.0	1.61115					390	0.99 ₀	0.97 ₅
			機械的性質 Mechanical Properties		熱的性質 Thermal Properties				
分散式の常数 Constans of Dispersion Formula			ヌーブ硬さ Hk Knoop Hardness 582 (6)	転移点 Tg (°C) Transformation Point 489					
A0	2.4738310		ピッカース硬さ Hv Vickers Hardness 572	屈伏点 At (°C) Yielding Point 525					
A1	$-7.4195677 \times 10^{-3}$		磨耗度 Ha Abrasion 110	線膨張係数 $\alpha \times 10^{-7}$ Thermal Expansion (100-300°C) 95					
A2	1.8102711×10^{-2}		ヤング率 E (10 ⁹ N/m ²) Young's Modulus 930	備考 Remark s					
A3	$-1.0196185 \times 10^{-3}$		剛性率 G (10 ⁹ N/m ²) Modulus of Rigidity 372						
A4	1.6280277×10^{-4}		ポアソン比 σ Poisson Ratio 0.250	その他 Other Properties					
A5	$-7.6589188 \times 10^{-6}$		化学的性質 Chemical Properties		泡 B Bubbles				
異常分散性 Deviation of Relative Partial Dispersions			耐水性(粉末法) RW Water Resistance 1		着色度 C Color Degree 35/31				
$\Delta \theta$ C,t	0.0113		耐酸性(粉末法) RA Acid Resistance 4		比重 Sg Specific Gravity 3.00				
$\Delta \theta$ C,A'	0.0073		耐候性(表面法) DW Weather Resistance 2		脈理 S Striae				
$\Delta \theta$ g,d	-0.0077								
$\Delta \theta$ g,F	-0.0059								
$\Delta \theta$ i,g	-0.0120								

SUMITA OPTICAL GLASS, INC.

圖 35 K-CSK120 材料特性[51]

2.1.2.5. Soda lime glass (鈉玻璃)

鈉玻璃透光性佳、表面平整、厚度薄且價格便宜，成分為 SiO_2 73 %、 Na_2O 13 %、 CaO 10 %、 MgO 3 % 以及 Al_2O_3 1 %，為含鹼金屬玻璃，多應用於 LCD 顯示器[52]，材料特性表如表 8，利用鈉玻璃做為雙面微透鏡陣列以及微結構陣列實驗材料。

表 8 鈉玻璃物質特性表[53]

特性	鈉玻璃
玻璃轉化溫度, T_g ($^{\circ}\text{C}$)	564
熱膨脹係數(ppm/K), $\sim 100\text{-}300^{\circ}\text{C}$	9.5
20°C 時折射率 (nD)	1.520
20°C 時色散, $104 \times (n_F - n_C)$	87.7

2.1.3. 玻璃預形體

模造玻璃鏡片需先製作預形體，目前業界都是採購玻璃棒或玻璃板，然後經過裁切研磨、拋光的作業流程製作出玻璃球，作為壓製鏡片所需之預形體[1]。預形體除了常見的玻璃球之外，尚有水滴狀、棒狀以及特製形狀，愈接近成形鏡片輪廓的預形體，在模造製程中，所需透過模造製程改變的輪廓愈少，成品良率將可大幅提高，但是加工步驟愈多的預形體製作成本愈高，因此決定預形體時，通常在預形體外形與製作成本之間做均衡的考量。此外，預形體的體積精度非常重要，體積不足，將導致模造後鏡片產生空孔等缺陷，而體積過多，將造成鏡片殘留邊角，甚至會沾黏在模具上，故在模造製程中，通常使用玻璃球做為預形體，也是因其體積較易控制。圖36是Schott公司針對玻璃模造製程所製作的各類外形預形體。表9為預形體應用範圍列表。



圖 36 預形體外形[54]

表 9 預形體應用範圍列表[48,51,55]

Target product	Recommend- able form	Advantages	Disadvantages
Sphere lens	Gob	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cost containment ➤ Short delivery time 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Low weight accuracy ➤ Limited choices
	Preformed ball	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Precision weight ➤ Possibility of edge molding ➤ High effect for a small diameter product 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Costliness ➤ Poor availability for a large diameter or various formed product
Asphere lens	Gob	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cost containment ➤ Short delivery time 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Low weight accuracy ➤ Limited choices
	Preformed ball	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Precision weight ➤ Possibility of edge molding ➤ High effect for a small diameter product 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Costliness ➤ Poor availability for a large diameter or various formed product
	Sphere lens	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Possibility of self-procurement if polishing machine provided ➤ Precision weight ➤ High effect for a big diameter product 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Poor availability for a small diameter product
Micro structure	Disc Cylinder	<ul style="list-style-type: none"> ➤ High effect to replicate micro-pattern 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vacuum molding process required

2.2 雷射加工技術

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)。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。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。

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 $1\ \mu m$ 。且因受限於熱影響區的大小，奈秒雷射加工不易製作小於 $1\ \mu m$ 的形狀特徵，本研究即為此機制。

本研究使用波長為 $355\ nm$ 之UV雷射系統AVIA 355-14 (COHERENT Inc.)，此系統是以二極體激發Nd:YVO₄的固態Q開關雷射，以提供高功率、高重複頻率的UV雷射光源，其雷射光束移動方式使用振鏡式掃描。圖37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，在模仁上加工微結構。表10為雷射系統規格表。

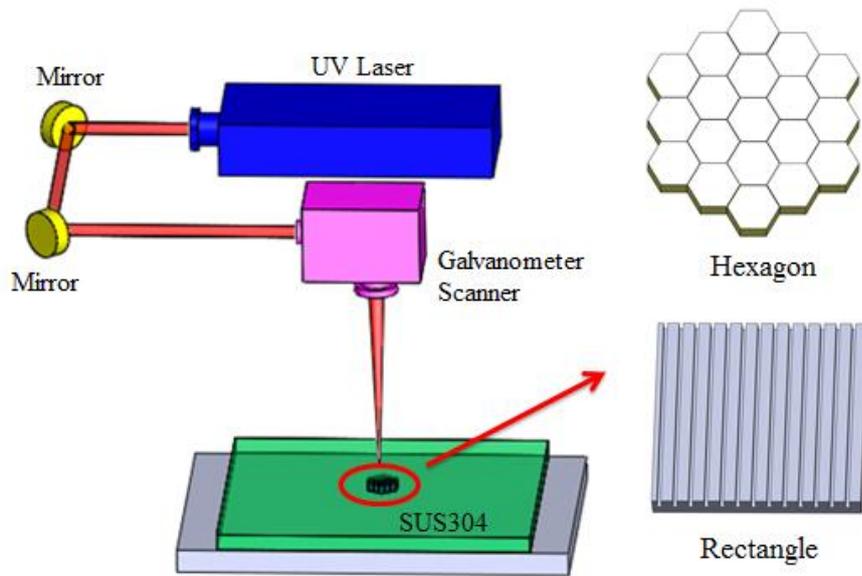


圖 37 UV 雷射加工架構

表 10 雷射系統規格表

Items	Values
Wavelength	355 nm
Pulse repetition rate range	≥ 100 kHz
Average power @ 100 kHz	> 10 W
Pulse width @ 100 kHz	≤ 40 ns
Spatial mode	TEM00
Beam quality factor, M^2	≤ 1.3

雷射加工製程常見的參數有雷射脈衝重複頻率、雷射掃瞄速度、雷射掃瞄路徑以及掃瞄次數，其說明如下：

雷射脈衝重複頻率：其定義為雷射每秒可以作用次數，而材料所接收到的單發雷射能量決定於脈衝重複頻率，重複頻率越高則雷射功率隨之下降。

雷射掃瞄速度：雷射掃瞄速度快，可以縮短加工時間，節省加工成本，但雷射速度過快，每個單位面積接收到的雷射能量就愈小，因此加工量會降低，過快的加工速度，甚至會超過雷射系統中的振鏡運作速度極限，將會導致雷射

光斑重疊率不足，造成掃瞄輪廓不連續。

掃瞄次數：雷射掃瞄次數愈多，加工時間將愈長，材料移除量也會愈多，然而針對金屬材料，因會產生再鑄層，當加工次數達到一定的程度時(因材料而異)，因再鑄層累積，材料移除量將會趨緩。

雷射掃瞄路徑：本論文所使用之雷射系統可選擇四種掃瞄路徑，分別是Line、Cross、Bidirectional以及Bidirectional + Cross，其示意圖如圖38所示，依照不同的加工輪廓及加工表面需求來選擇適當的掃瞄路徑。

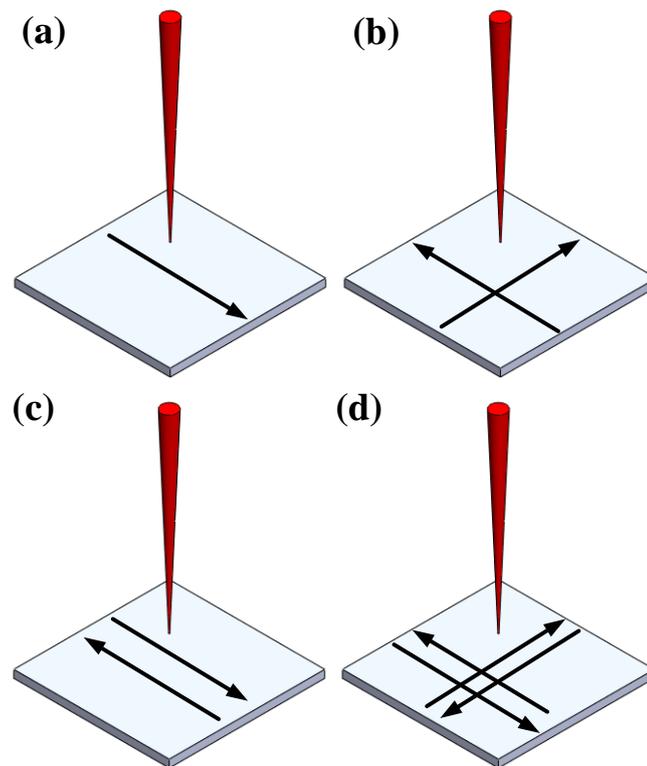


圖 38 雷射掃瞄路徑示意圖

(a) Line (b)Cross (c)Bidirectional (d) Bidirectional + Cross[2]

2.3 線切割放電加工技術

線切割放電加工技術(Wire Electrical Discharge Machining, WEDM)使用銅線做為電極，利用伺服控制，使工件與電極間維持一極短間距，產生火花放電，利用高溫來熔融、蒸發工件，而將材料去除，只要被加工件能導電，不論材料機械性質為何，均可進行加工。線切割放電加工使用電阻值高之去離子水當絕緣液[56]。

本實驗所使用之線切割放電加工機是徠通公司所生產之高精度機型Au500i，利用線切割放電加工不受限於導電材料的機械性質特性，對高硬度的模仁材料碳化鎢加工，且線切割放電加工技術的加工極限寬度決定於線徑大小，例如使用0.1 mm的加工線，可加工出約0.12 mm的溝槽，適合來對硬脆材料進行微加工。圖39為本研究所使用的線切割放電加工設備。



圖 39 線切割放電加工機

2.4 鑽石輪磨技術

超精密鑽石輪磨加工通常用來加工硬脆材料，而玻璃模造製程中所需的模仁大部分使用碳化矽、碳化鎢或玻璃碳等高硬度材料，所以目前多使用鑽石輪磨技術來加工，依照不同的模仁輪廓，修整鑽石砂輪外形，以避免加工時幾何干涉[57]，現今鑽石輪磨技術已可加工硬脆材料表面形狀精度達 $0.1\ \mu\text{m}$ 。本論文中的精密曲面成形章節中所使用的模仁，皆是使用精密鑽石輪磨技術所製作。

2.5 鍍膜技術

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]。在玻璃模造製程中，為避免玻璃沾黏在模具上，也為了降低表面摩擦力，通常會在模具成形面上鍍製保護膜，常見的保護膜有Ni-P、Ni-W、TiN、CrN、類鑽石

膜(DLC)、Pt-Ir、B-N和C-B-N等[57]，其特性比較如表11所示，本實驗中所使用的膜層為Pt-Ir。

表 11 玻璃模造模具鍍膜特性比較[57]

薄膜種類 薄膜特性	Ni-P or Ni-W	TiN or CrN	DLC or a-C:H	a-C (含 F)	Diamond	Pt-Ir	B-N or C-B-N	備註
低溫強度	○	◎	◎	○	◎	○	◎	若在低溫或塑膠鏡片模具上使用，所有薄膜的強度都合於要求。
高溫強度	×	◎	○	△	◎	△	◎	Pt-Ir 合金雖然高溫強度不佳，但因厚度僅 2 μm，在高溫模造時即使發生變形，形狀精度仍可控制在可接受的範圍。
薄膜應力	○	△	△	△	×	○	×	薄膜彈性係數愈高或熱膨脹係數差異愈大，薄膜應力就愈大。
脫模性 (抗沾黏)	×	△	○	○	◎	◎	○	低溫時，DLC, a-C(F)薄膜可降低摩擦係數，脫模效果佳，但溫度超過 450°C 即急劇失效。高溫玻璃模造僅 Pt-Ir 系列合金及鑽石薄膜最能滿足抗沾黏及脫模性佳的特性。
高溫氧化	×	△	×	×	◎	◎	○	模造溫度超過 450°C 以上時，僅 Pt-Ir 系列合金及鑽石薄膜能維持化學穩定性，不會氧化，即使通以保護氣體仍無法完全避免氧化問題。
高溫與玻璃反應	×	×	×	△	○	◎	○	DLC 和 a-C(F) 內部含有不穩定的碳，高溫時易和玻璃發生反應，碳會迅速的還原玻璃內的氧化物造成模具表面急遽磨損，因此也無法長期有效的保護模具。高溫時僅 Pt-Ir 系列合金不易與玻璃反應。
鍍膜品質穩定性	◎	◎	○	○	○	◎	△	鍍膜品質穩定性和薄膜成份及鍍膜機台有關。濺鍍法和電漿輔助化學氣相沈積法皆可製作 TiN、DLC 和 a-C(F)，其中 DLC, a-C(F) 薄膜中碳是主要成份，易造成腔體污染使鍍膜品質穩定性變差。a-C(F) 薄膜中含 F，還須特別考慮氣體安全性等問題。鑽石薄膜則須考慮應力及表面拋光問題，不穩定性高。Pt-Ir 貴金屬鍍膜製程穩定性最佳，但須解決附著力問題。
鍍膜成本	◎	○	○	○	△	△	△	Pt-Ir 列系列合金鍍膜，製程設備及靶材皆較昂貴。
模具壽命	×	△	△	△	○	◎	○	Pt-Ir 合金抗玻璃沾黏特性佳，故模具使用壽命長。

2.6 電解拋光技術

電解拋光(electro polishing)之理論於1936年Jaquet[58]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，表12為電解拋光與傳統機械研磨之比較。

電解拋光，是非傳統加工方式，在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[59]。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40為電解拋光機示意圖。表13為本實驗所使用之電解液成分。

表 12 電解拋光與傳統機械研磨之比較[60]

	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

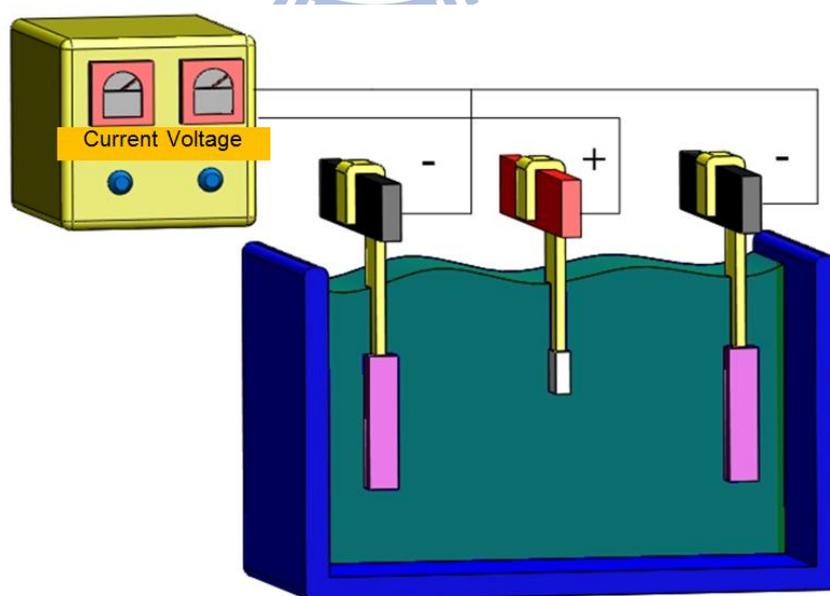


圖 40 電解槽示意圖

表 13 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%

2.7 檢測儀器

不論是實驗室研發或是生產線量產，品質檢測是在製程中不可或缺的一部分，正確且穩定的檢測技術，可以幫助實驗分析更精確，特別是微結構或精密製程，因差異通常僅有數微米，若量測技術不穩定，將會發生誤差值大於實驗差異值，導致實驗分析的困難度，甚至造成實驗結果判斷誤差。因此，本論文利用雷射共軛焦顯微鏡、掃描式電子顯微鏡、表面輪廓量測儀、厚度檢測儀、三次元量床以及折射率量測儀來對所探討的微結構和精密曲面進行量測，以下針對每一量測設備進行介紹。

2.7.1 雷射共軛焦顯微鏡

共軛焦顯微鏡是由雷射、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。工作原理為：雷射光源經由第一凸透鏡在第一共軛焦孔洞處聚焦，之後通過分光鏡到達第二凸透鏡，第二凸透鏡將光源聚焦在待測樣品上，此時樣品位於聚焦面。從樣品上反射的光，會再穿過第二凸透鏡到達雙色鏡處。雙色鏡會將光源反射且聚焦到第二共軛焦孔洞，再藉由CCD攝影機擷取樣品在聚焦面處的影像。

圖41(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。

本論文所使用之雷射共軛焦顯微鏡為Keyence VK9700，使用十倍物鏡時，每次量測範圍為1.3 mm* 1.0mm，系統可做四百張量測圖形的拼接，亦即量測範圍可達26 mm* 20 mm，解析度為1 nm，除了可顯示樣品立體形貌外，亦可量測表面輪廓以及表面粗糙度。

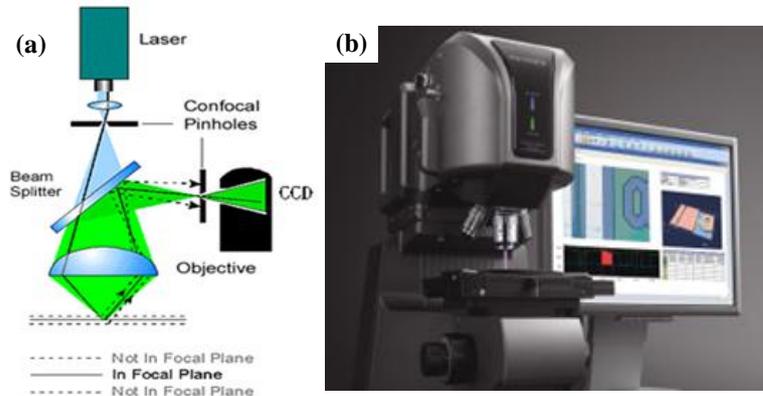


圖 41 3D 彩色雷射共軛焦顯微鏡(a)組成架構(b)實際形貌 [37]

2.7.2 掃描式電子顯微鏡

本研究使用的掃描式電子顯微鏡為Hitachi fe-s4300冷場發射式之機型，並外加能量分散光譜儀，如圖42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(0.5~30 keV)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且亮度高，其解析度可達1.5 nm，並可在最低電壓0.3 kV底下操作。



圖 42 冷場式掃描電子顯微鏡(SEM)

2.7.3 表面輪廓量測儀

此處介紹兩種表面輪廓量測儀，分別為自由曲面輪廓量測儀(UA3P)以及單軸向輪廓量測儀(Talysurf)，自由曲面輪廓量測儀可做多軸量測以及面形輪廓量測，但其量測區域小，而單軸向輪廓量測儀雖僅能量測單軸向，但其量測距離長。兩種輪廓儀皆是接觸式量測，可使用紅寶石探針或是鑽石探針。

2.7.3.1. 自由曲面輪廓量測儀(UA3P)

UA3P採用He-Ne雷射定位來計算探針的位移量，且X、Y、Z各軸的量測參考鏡(reference mirror)皆與量測點共線，減少阿貝誤差(Abbe error)的發生。UA3P-4可量測行程為100 mm * 100 mm * 35 mm，若採用45°對角線方向量測，可量測行程為141mm，量測角度在60°以內時，精確度可達0.3 μm 以下。此外，UA3P內建所使用的632.8 nm穩頻雷射以及校正探針所用的標準球，可追溯至世界長度標準所使用的穩頻雷射，所以UA3P量測的數據具有相當高的可信度。

UA3P為3-D的自由曲面輪廓量測儀，與一般2-D的表面輪廓儀相較，UA3P的量測接觸力僅為0.15 mN，因為接觸力小，可提高量測的準確度，而且可以避免探針對精密光學元件表面的傷害，例如刮傷等。

量測非球面光學元件時，若表面斜率過大可能會影響量測精度，UA3P的量測角度可高達60°，最大可量測1,000,000點。在三軸的精度方面，X、Y軸精度可達0.05 $\mu\text{m}/100\text{mm}$ ，在30°內量測時，Z軸精度可達0.05 μm 。且UA3P可作六軸(X、Y、Z、a、b、c)自動校正(Auto alignment)，也可自動雙軸尋心(X、Y centering)，若量測直徑50mm的3-D輪廓量測，僅需15分鐘。



圖 43 UA3P 外觀

2.7.3.2. 輪廓量測儀 Talysurf PGI 2540 (Taylor Hobson)

雷射探針輪廓量測儀是利用雷射同調光干涉特性，使用探針接觸待測件表面，於探針末端連接一稜鏡，隨探針起伏使得光程改變，而後端與參考光產生干涉，最後於光接收器接收其干涉資訊，算出探針 Z 軸的起伏量，得到表面輪廓後與設計值比較，可計算出形狀誤差(form error)，以P-V(peak to valley)值表示。雷射干涉式探針輪廓量測儀可應用於平面、球面、非球面、拋物面與雙曲面之形狀精度量測。輪廓量測儀使用直線量測的方式，所量測到的資料為二維曲線，若搭配非球面拋光機，可以將量測到的形狀誤差輸入至非球面拋光機，對軸對稱的非球面光學元件做補償拋光。[1]

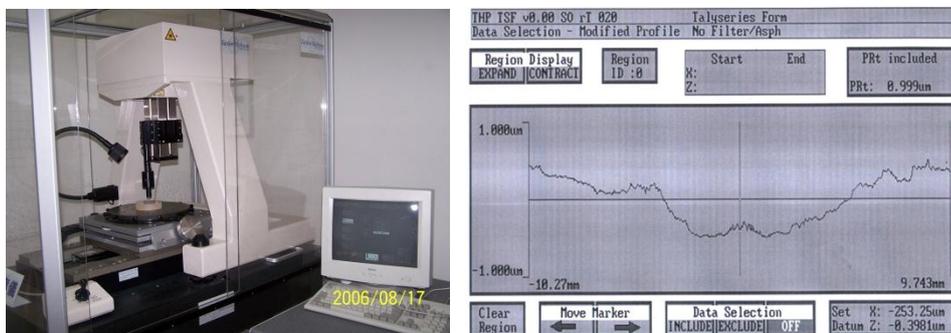


圖 44 雷射干涉式探針量測輪廓儀

2.7.4 厚度檢測儀

本研究所使用之厚度檢測儀為 Mitutoyo 之檢測儀，量測解析度至 0.001 mm，厚度檢測儀主要用來檢測鏡片的中心厚度，中心厚度在玻璃模造製程中是最先用來檢測模造參數的觀察指標，在鏡片沒有破損沾黏的情況下，中心厚度達到設計規格時，表示玻璃鏡片其他幾何尺寸已達到規格，模造製程中的模仁已經完全密合，因此，厚度的檢測精度在模造製程中是相當重要的。且為了避免刮傷鏡片，通常會使用非金屬探頭來檢測。



圖 45 厚度檢測儀

2.7.5 三次元量床

三次元量床(Coordinate Measuring Machine, CMM)廣泛使用於工程相關領域，其具有操作簡易，量測快速，結果準確等優點，通常應用於逆向工程、曲線與曲面量測及加工製程檢驗分析等，單點量測或連續掃描。中心所使用之三次元量床為Brown & Sharpe 之 GLOBAL IMAGE，建置設備時將可快速測量各種幾何尺寸、位置公差、擁有多感應器設計及連續掃描功能等規範要求列入評估，因此除一般量測外也適用於逆向工程作業使用，本三次元量床量測精度為 $1.7 + 3L/1000 \mu\text{m}$ ，其中L表示量測長度。例如量測距離

為1000 mm，則量測精度為4.7 μ m。其X、Y與Z軸之量測行程分別為900mm、1200mm與800mm。

三次元量測可量測許多特徵元素，例如點、線、面、圓、圓柱、圓錐、球體等，量測完成特徵元素之後，即可輸出待測件自身或相關的量測數據，例如待測件本身的位置、角度、尺寸大小，或是兩元素之間的相對位置及角度、平行度、同心度等。



圖 46 三次元量床

2.7.6 阿貝式折射率量測儀

折射率(refractive index, n):材料的折射率為光在真空中的速度(c)跟光在材料中的速度(v)之比，可用來檢測材料的組成及純度。

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

使用不同波長光源量測同伴樣品，所得到之折射率將會不同，因此折射率量測結果需標明使用何種波長光源量測，例如 n_D 即是使用波長589.2 nm鈉光源量測之折射率， n_d 是使用波長587.6 nm光源量測之折射率，本實驗採用鈉光源所量測之折射率 n_D 。

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。本研究使用之折射量測儀為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47所示。

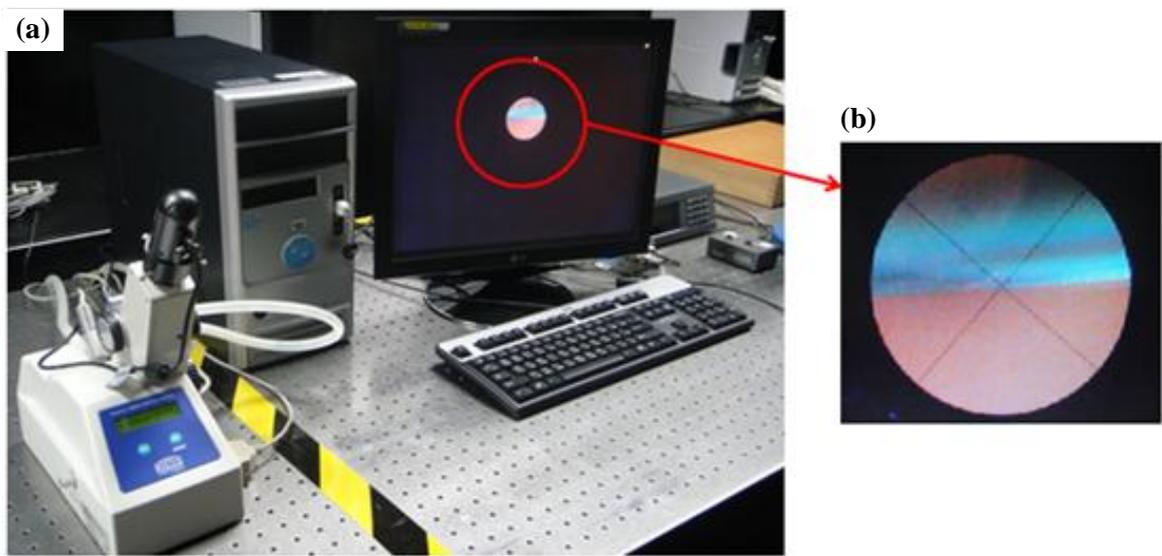


圖 47 (a)阿貝氏折射率量測儀(b)臨界角之分界

三、微結構成形

隨著產品朝向微小化，所需的光學系統也得隨之縮小外觀尺寸，例如手機、數位相機、微投影機以及平版電腦等商用產品，在其中的光學系統及元件，強調的不外乎在維持或小幅犧牲光學系統規格下，體積要盡量縮減，因此，微光學元件在近年來的需求日趨頻繁。微光學元件中，除了體積縮小的球面/非球面透鏡外，尚有微光學元件陣列，利用週期性的陣列結構，來達成所需的功能，例如微透鏡陣列可以使用在光學系統中，達成將光束能量均勻化的勻光功能，或是改變光學系統設計，微透鏡陣列亦可作為光通訊功能中所需的多通道元件。此外，若是微柱狀透鏡陣列，可將光束由圓形分布轉變為線形分布，可作為準直、校準或是檢測等用途，目前裸視型的3D立體技術，其中的關鍵元件也是微柱狀透鏡陣列。

目前製造玻璃微結構陣列的方法，若是系統打樣測試或是小量產，可以採用精密鑽石輪磨製程來製造，但若要量產，則多是採用精密玻璃模造技術。玻璃模造技術製程，花費成本較高的是模仁的製作，包括模仁材料、加工以及表面鍍膜，通常而言，一組模仁約需花費30-60萬，若是精度要求更高，委由國外加工製作，則需百萬元以上以及冗長的交期。因此，本研究利用線切割放電加工法以及雷射微加工技術來製作玻璃模造技術所需模仁，以下將分別探討微柱狀透鏡陣列、雙面微透鏡陣列以及微結構陣列的成形製程。

3.1 光學微柱狀透鏡陣列

線形產生器可應用在校正、機械視覺與製程控制等領域，而在線形產生器中的關鍵元件即為柱狀透鏡，若為柱狀透鏡陣列更可將高斯分佈的光強度整形為均勻的線形光束[61-65]。圖48即為市售之雷射線形產生器[66]，因其為低功率雷射，故其中柱狀鏡使用塑膠材料。

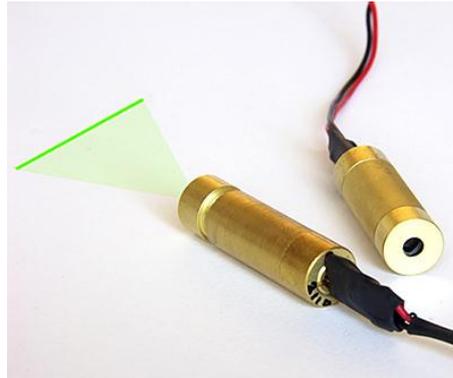


圖 48 雷射線形產生器[66]

然而利用鑽石輪磨技術製作微柱狀透鏡陣列之模仁，有其加工幾何形狀的限制，需要利用特製外形的鑽石砂輪加工，耗時又費工。且若要使用封閉式模造製程，直接將模仁表面加工為鏡面精度，在模仁製作上極其困難，因此本研究利用線切割放電加工技術製作模仁，搭配玻璃材料因加熱而軟化後，模仁結構在玻璃上擠壓形成微柱狀透鏡陣列，因使用非接觸式加工方法，因此模仁溝槽表面粗糙度並不會影響鏡片表面精度，大幅降低模仁加工表面的要求，最後並利用表面輪廓儀量測其外形，以及透過雷射驗證其光束由圓形分布經過微柱狀透鏡陣列後整形為線形分布，實驗流程如圖49所示。

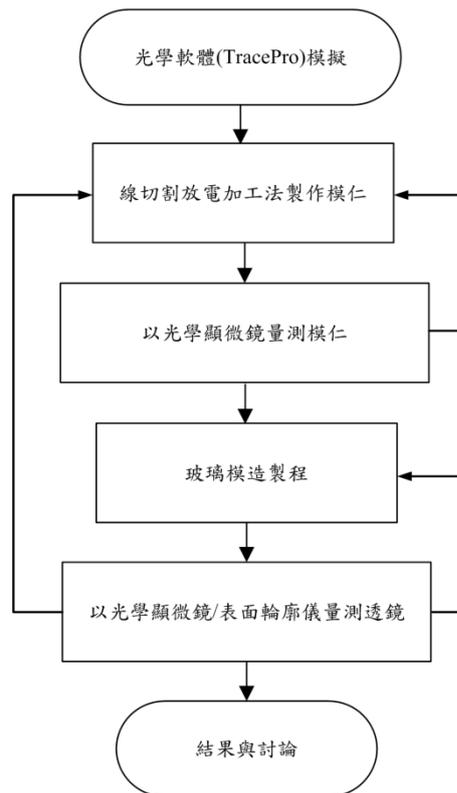


圖 49 實驗流程圖

3.1.1 實驗方法與步驟

1. 模仁及微柱狀鏡製作

利用精密線切割放電加工技術，使用線徑0.15 mm之黃銅線，搭配一次精修加工，在直徑20 mm且厚度10 mm之碳化鎢模仁表面製作微溝槽陣列，溝槽寬度由0.3 mm至2.1 mm，溝槽間距及深度皆為1 mm。相較於精密鑽石輪磨技術，線切割放電加工速度快，加工成本極低，且透過調整加工參數，使模仁表面溝槽之間產生不規則條紋狀的加工痕跡，經過玻璃模造製程後，會在玻璃表面形成條紋狀結構，具有類光柵的功能，對於勻光效果有非常大的助益。

模仁加工完成後，使用精密玻璃模造設備，利用玻璃材料因模仁加壓而在玻璃素材上成形微柱狀鏡陣列，本文所使用的玻璃材料是專為模造技術所研發的模造玻璃FK5[49,54]。微柱狀透鏡陣列成形示意圖如圖50所示。

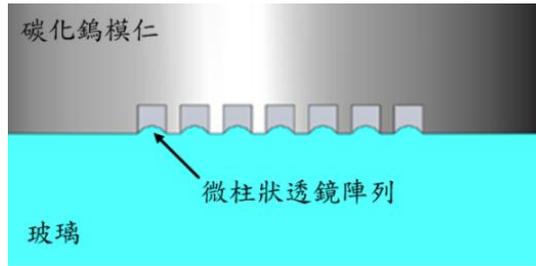


圖 50 微柱狀透鏡陣列製程示意圖

對一平凸柱狀鏡而言，焦長與曲率的關係可簡略表示為：

$$f = \frac{R}{n-1} \quad (3)$$

其中 f 為焦長， n 是材料的折射率， R 是曲率。由實驗結果，可得知各實驗參數對微柱狀鏡的幾何形狀影響。

此外，藉由光學軟體(TracePro)的模擬，可計算出較佳的设计參數，雷射光源為高斯分佈，因此，微柱狀透鏡陣列愈靠中心軸的位置，其透鏡曲率要愈小，愈外側曲率愈大，才可有效的將高斯分佈的光強度均勻化，如圖51所示，其中綠色線條即為初始高斯分佈之光強度，藍色線條是經過微柱狀鏡陣列之線形光強度分佈，利用此模擬結果，調整碳化鎢模仁的溝槽寬度與玻璃模造時的參數設定，可製作出優化後的微柱狀透鏡陣列，並利用波長為532 nm以及功率50 mW之綠光雷射進行驗證。

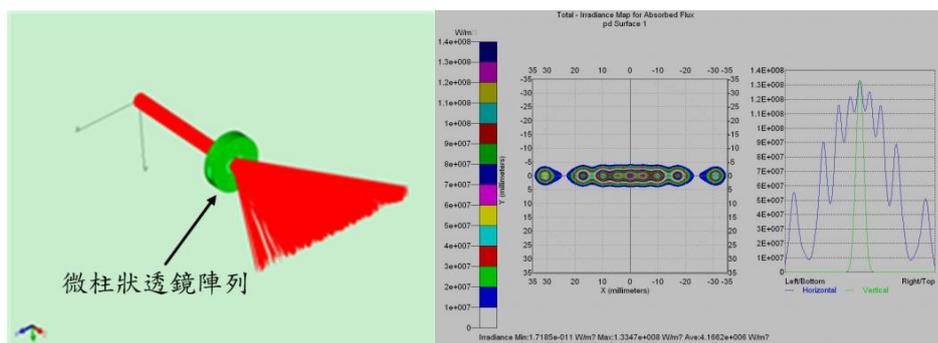


圖 51 TracePro 軟體模擬

精密玻璃模造技術中，影響玻璃成品品質有許多因素，在此探討模造溫度、模造力量、下壓行程與模仁溝槽寬度等參數與微柱狀透鏡陣列之幾何外形關係。為取得精確的量測結果，使用精密表面輪廓儀(Talysurf PGI 2540, Taylor Hobson)來量測微柱狀鏡曲面輪廓。

3.1.2 結果與討論

影響光學特性的參數之一就是鏡片的表面粗糙度，本實驗所使用的方法，利用模仁溝槽擠壓軟化玻璃表面形成微柱狀鏡，模具溝槽底部並不會接觸到微柱狀鏡的曲面，因此模仁的溝槽表面品質並不會對微柱狀鏡的表面粗糙度造成影響。

3.1.2.1. 溝槽尺寸與透鏡表面輪廓

圖52是以精密表面輪廓量測儀所量測出來的微柱狀透鏡陣列表面輪廓，橫軸為柱狀鏡的寬度，縱軸為柱狀鏡的高度，將不同尺寸的微柱狀鏡圓心在橫軸對齊，實驗之模造溫度為570 °C、模造力量為0.3 kN以及降溫速率為26.7 °C/min，由圖中可得知不同的模仁溝槽寬度與微柱狀鏡的幾何外形為正比關係，溝槽愈寬，微柱狀鏡寬度及高度愈大。此外，利用程式計算與圖形擬合方法，可得到圖53的關係圖，由圖53可明顯看出溝槽寬度與柱狀鏡高度呈正比關係，寬度為2.1 mm的模仁溝槽，其所造成之柱狀鏡高度為0.17 mm，而0.3 mm的模仁溝槽，其所造成的柱狀鏡高度為0.012 mm。由圖53中，亦可得知模仁溝槽寬度與曲率亦為正比關係，溝槽寬度愈寬，曲率愈大，寬度為2.1 mm的模仁溝槽，其所造成之柱狀鏡曲率為14.72 mm，而0.3 mm的模仁溝槽，其所造成的柱狀鏡曲率為0.53 mm。

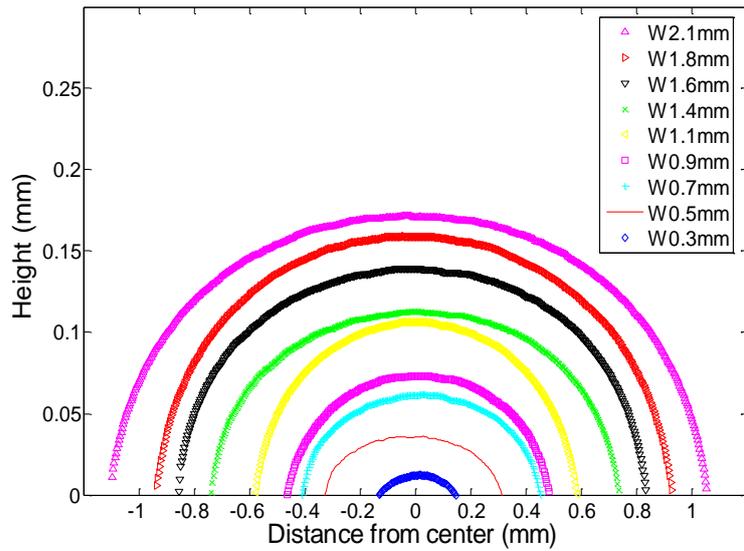


圖 52 溝槽寬度與透鏡表面輪廓

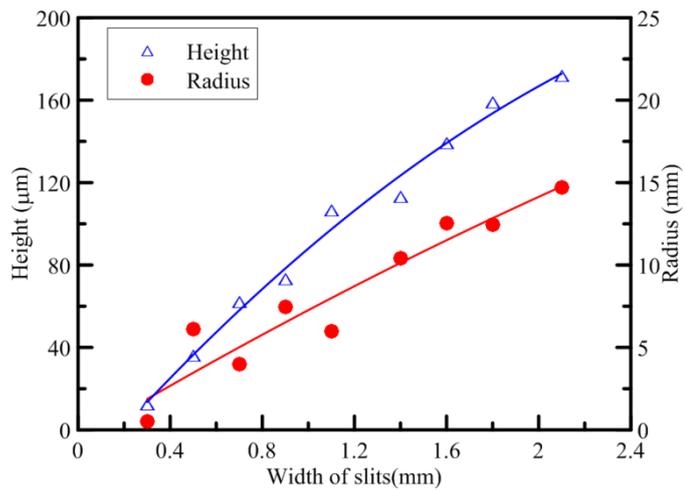


圖 53 溝槽寬度與幾何形狀關係

3.1.2.2. 模造溫度與透鏡表面輪廓

模造溫度愈高，玻璃材料軟化程度愈高，流動性愈好，為了更深入瞭解模造溫度與微柱狀鏡幾何外形的關連，本文針對 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的模造溫度範圍討論。實驗結果如圖54所示，其模造力量為 0.4 kN 以及降溫速率為 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，在模造溫度為 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 時，微柱狀鏡高度為 0.234 mm ，相較於 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 時的 0.08 mm 高，且介於其中的模造溫度，所形成的微柱狀鏡高度為正比關係，這是因為模造溫度高，黏滯係數較低，材料變形更容

易，所以可形成高度更高的微柱狀鏡。同理，由於模仁溝槽寬度相等，所以高度較高的微柱狀鏡，其曲率較小，在 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的模造溫度範圍裡為反比關係。

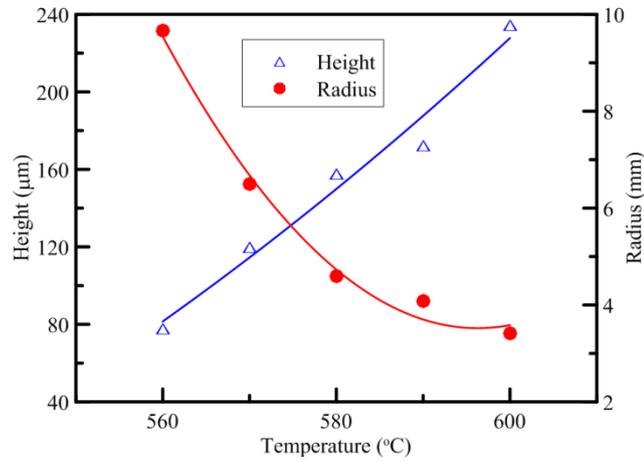


圖 54 模造溫度與幾何形狀關係

3.1.2.3. 模造力量與透鏡表面輪廓

力量愈大，模仁下壓的深度愈深，所以微柱狀鏡的高度將愈高，因為模仁溝槽尺寸固定，隨著高度愈高，微柱狀鏡的曲率將愈小，實驗結果如圖55，其模造溫度為 $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及降溫速率為 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。力量為 0.5 kN 時，微柱狀鏡高度為 0.148 mm ，曲率為 4.56 mm 。力量與高度成正比關係，與曲率半徑成反比關係，但力量過大，將造成微柱狀鏡不易脫模，嚴重時亦會發生材料碎裂現象。

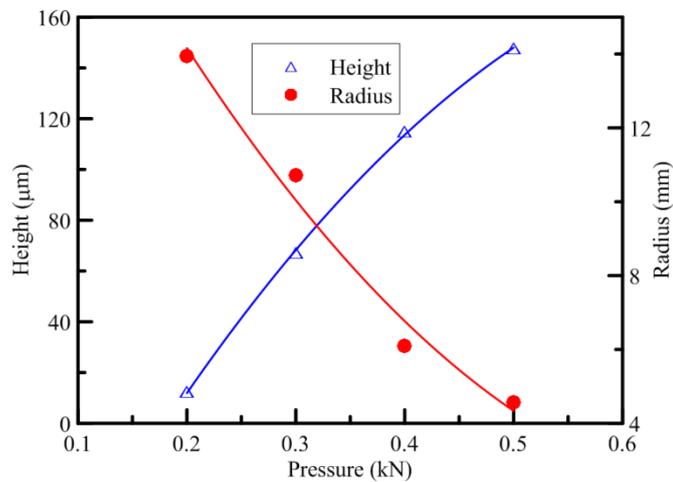


圖 55 模造力量與幾何形狀關係

3.1.2.4. 下壓行程與透鏡表面輪廓

如圖56，其模造溫度為 $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模造力量為 0.4 kN 以及降溫速率為 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，過大的下壓行程將會導致玻璃材料破碎，下壓行程為 0.5 mm 時，微柱狀鏡高度為 0.268 mm ，曲率為 2.53 mm 。

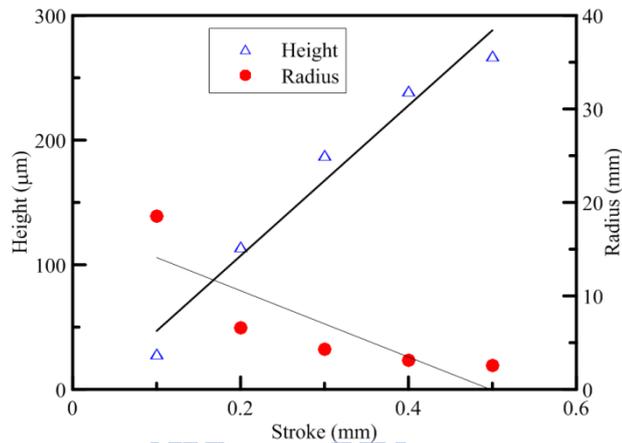
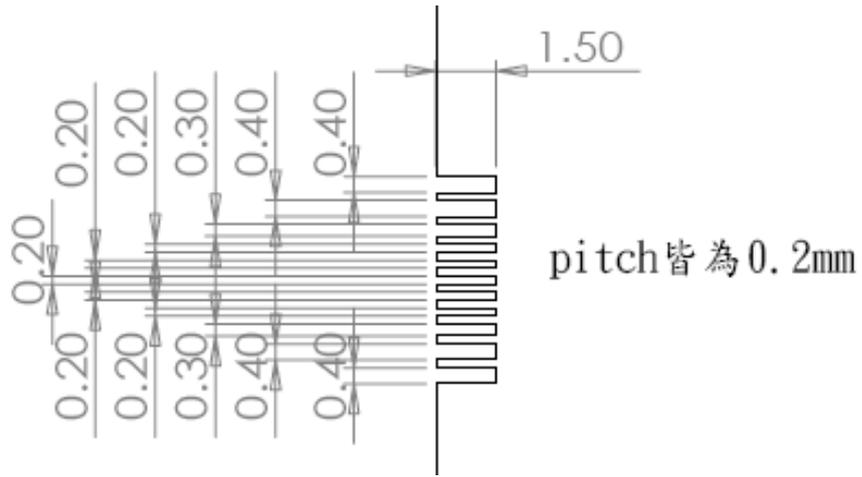


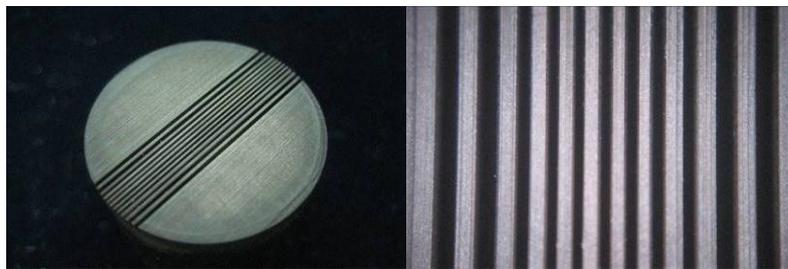
圖 56 模造下壓行程與幾何形狀關係

3.1.2.5. 小結

由上述實驗結果，搭配不同溝槽寬度與模造參數條件，設計並製作最佳之碳化鎢模仁如圖57所示，利用此模仁，可製作出圖58之微柱狀鏡陣列，並利用波長為 532 nm 以及功率 50 mW 之綠光雷射進行驗證，可得到如圖59之結果，由圖中可看出，經過微柱狀鏡陣列之後，原為圓形光斑之雷射輪廓轉變為線形雷射輪廓，成功以低成本且快速的方法製作出可量產之精密微柱狀透鏡陣列。



(a) 模仁溝槽設計圖

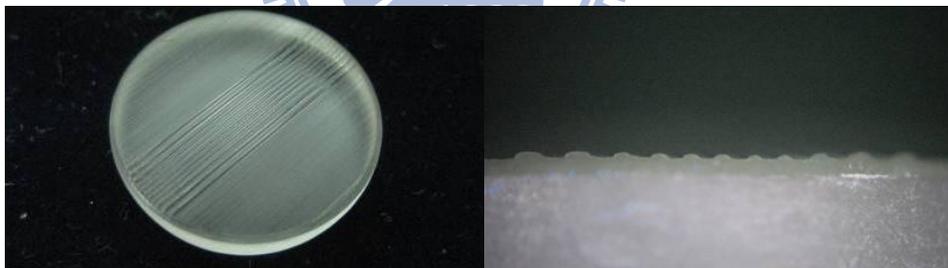


(b) 模仁實體圖

(c) 模仁表面放大圖



圖 57 微柱狀透鏡陣列模仁



(a) 微柱狀透鏡陣列實體圖

(b) 微柱狀透鏡陣列放大圖

圖 58 玻璃微柱狀透鏡陣列



微柱狀透鏡陣列

圖 59 線形分佈之雷射輪廓

3.2 雙面微透鏡陣列

近年來，微透鏡陣列已成為光學系統中的重要元件，微透鏡陣列的其中一個應用即是將光的能量均勻化，相較於單面微透鏡陣列，雙面微透鏡陣列的對位結構更容易[67]。微透鏡陣列若由玻璃材料製作，可應用在高溫環境或高能量系統，例如雷射系統等。玻璃微透鏡陣列可利用雷射加工、光微影技術或精密玻璃模造技術等方法來製造，但是雷射加工技術和光微影技術並不適合量產。因此，本研究利用雷射加工技術來製作模仁，並利用玻璃模造技術來製作雙面微透鏡陣列。

3.2.1 實驗方法與步驟

使用紫外光(UV)雷射(AVIA 355-14, Coherent Inc.)在外徑20 mm之碳化矽模仁表面製作孔徑500 μm 、深度200 μm 且間距為700 μm 之圓孔陣列，使用此模仁，透過精密玻璃模造系統(207HV, Toshiba)在鈉玻璃表面擠壓成形雙面微透鏡陣列，如圖60所示，因微透鏡表面並不會接觸到微孔底部，亦即經過雷射加工後的模仁表面粗糙度不會影響透鏡表面粗糙度，故可降低對模仁的加工品質要求，減少加工成本。之後利用精密共軛焦顯微鏡(VK9700, keyence)、電子顯微鏡及阿貝式折射率量測儀量測其表面輪廓及折射率等性質，實驗流程如圖2。

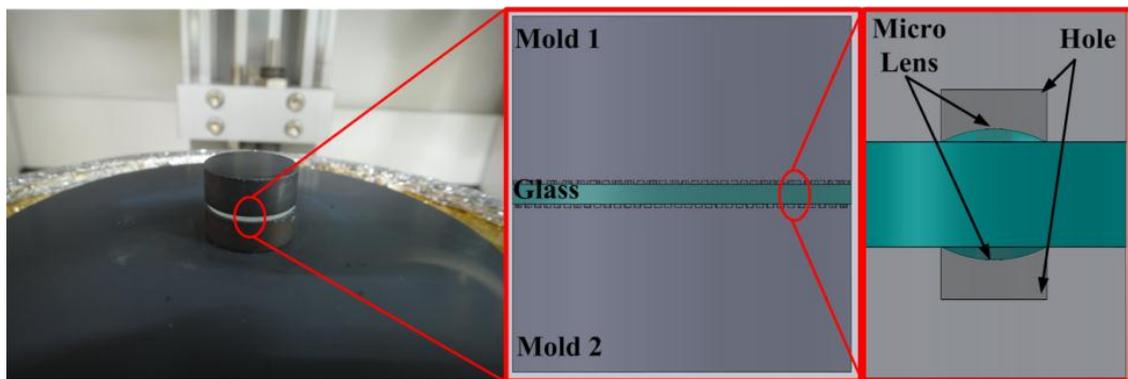


圖 60 雙面微透鏡陣列成形示意圖

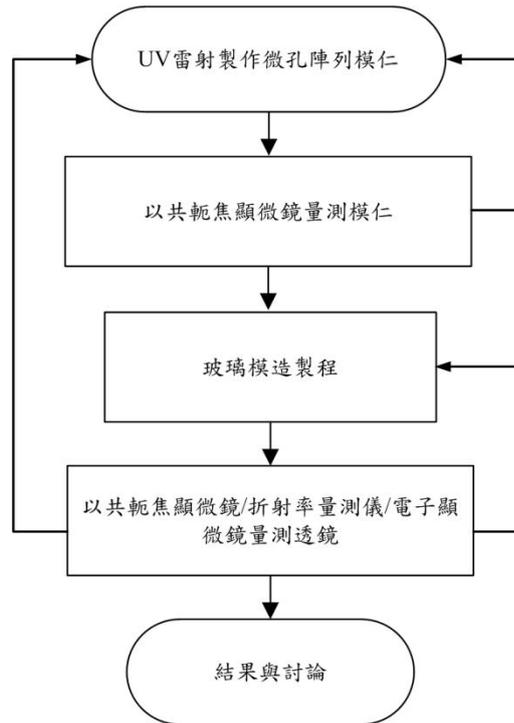


圖 61 實驗流程圖

3.2.1.1. 雷射加工技術

碳化矽是燒結的硬脆材料，通常使用研磨或鑽石銑削的方式來製作外形或結構，但這兩種加工方式皆有其加工幾何尺寸的限制，對於微米結構較難加工，雷射光束聚焦尺寸小，例如本實驗所使用之紫外光雷射其聚焦尺寸約僅 $30\ \mu\text{m}$ ，故極適合加工微結構。圖62為雷射加工系統示意圖，雷射加工為非接觸式加工，加工過程中機械力極小，因此被加工材料僅需置放在加工平台上，不需額外夾持，可避免材料因夾持而受損。

雷射製程雖然加工金屬材料會產生再鑄層(recast layer)，但是對於燒結材料卻不會有此現象，因此適合使用雷射加工技術在碳化矽上成形所需的微孔結構，圖63為雷射加工金屬材料(不銹鋼)與燒結材料(碳化矽)之再鑄層比較圖，圖中可看出雷射加工金屬材料會產生嚴重的再鑄層堆積，嚴重影響微結構表面輪廓，而燒結材料幾乎沒有產生再鑄層。

雷射掃瞄速度是雷射加工中的重要控制參數，適當的雷射掃瞄速度可縮短加工時間、降低加工成本並獲得優良的加工品質，本實驗使用波長為 $355\ \text{nm}$ 之紫外光雷射系統，搭

配振鏡掃描系統對工件進行加工，針對加工速度50-500 mm/sec進行加工品質分析，所使用的輸出功率為14.3 W。此外，雷射脈衝重複頻率會影響雷射輸出功率大小，而微孔陣列結構的間距亦會影響微透鏡勻光效果，在本研究中亦會對其進行實驗分析。

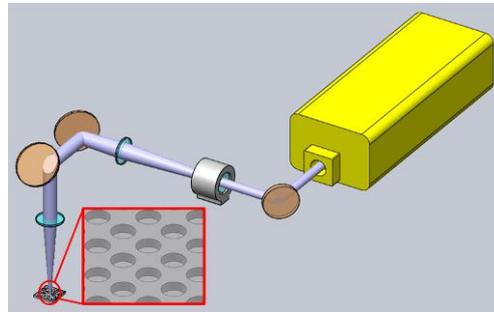


圖 62 雷射系統架構示意圖

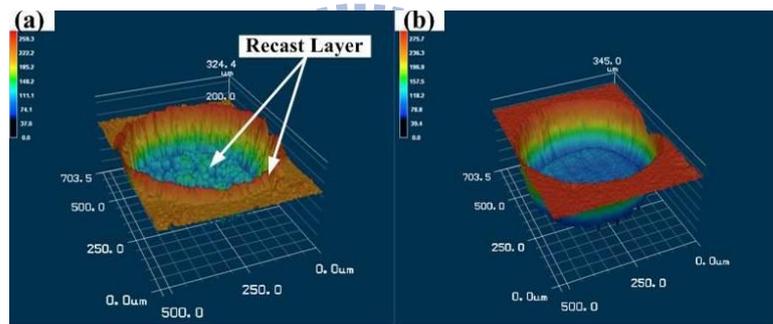


圖 63 (a)金屬(不銹鋼)與(b)燒結材料(碳化矽)經雷射加工後表面形貌

3.2.1.2. 玻璃模造技術

玻璃模造技術具有成形精度高、成形週期短以及可成形自由曲面輪廓元件等優點，近年來被廣泛用來量產高精度光學元件。其製程為將玻璃預形體加熱至模造成形所需溫度，之後施加力量於模仁上，模仁輪廓將轉寫至玻璃元件，冷卻後即完成光學元件成形製程，一般而言，外徑小於50 mm之元件，僅需30分鐘以內的成形週期。圖64為玻璃模造之二段成形歷程，玻璃模造製程中，溫度與力量是極為重要的參數，圖中之P1及P2分別代表第一段製程的模造力量與第二段製程的模造力量，本研究利用精密玻璃模造熱壓機，針對680 °C與690 °C的模造溫度與500-2500牛頓的模造力量評估其對微透鏡陣列

輪廓的影響。

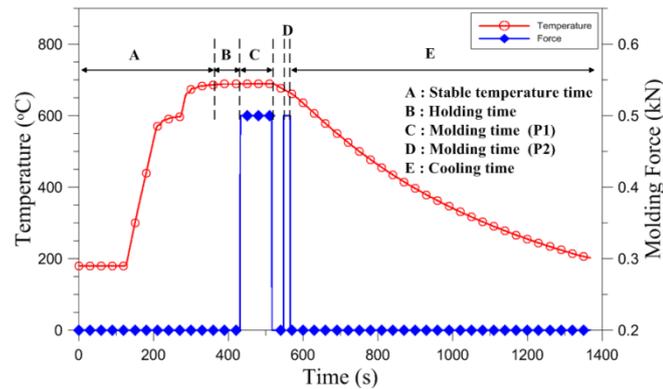


圖 64 玻璃模造製程成形歷程

玻璃模造製程歷經升溫與降溫，將玻璃軟化之後成形輪廓，因此將會影響材料折射率，而鏡片的折射率若與光學設計時不同，將會影響元件或系統的光學品質，儀科中心在今年建置經全國認證基金會(TAF)所核准針對折射率測試項目之測試實驗室，採用 ISO489:1999 的折射率量測方法與儀器，本文透過折射率測試分析，可得知經過玻璃模造製程後折射率變化趨勢，以此來補償光學設計參數，獲得較正確的光學模擬結果。

在玻璃模造製程時，通常會避免在大氣環境中成形，因高溫過程，大氣中的氧氣易與模仁以及模造設備中的治具產生氧化反應，降低模仁等零組件的使用壽命，因此在模造製程中，模造設備的腔體內部可設定為氮氣環境或是真空環境，本研究亦探討兩者之間的元件成形品質差異。

3.2.2 結果與討論

本研究是利用微孔來成形微透鏡，因此微孔的孔徑尺寸對微透鏡的影響極為重要，由實驗結果顯示，微孔孔徑愈大，其微透鏡之曲率愈大且高度愈小，過大的孔徑，甚至造成玻璃成為圓柱面，而無法成形有曲率的微透鏡，而過小的孔徑，容易在玻璃模造製程時過度填充玻璃材料，造成微透鏡破裂以及模仁因阻塞玻璃材料而無法使用，因此本研究選擇微孔孔徑為 500 μm 。以下將分別探討微孔間距、雷射脈衝重複頻率、雷射掃描速度、模造製程腔體環境、模造溫度與模造力量以及降溫速度來探討其對於雙面微透鏡陣列之幾何輪廓與折射率的影響。

3.2.2.1. 微孔間距的影響

微透鏡陣列的作用是藉由透鏡的曲面將光束能量均勻化，因此若透鏡間有平面結構，則視為對勻光功能無助益之無效區域，因此，透鏡上的平面結構愈少，透鏡陣列的勻光能力愈佳，而透鏡之平面結構即為微孔之邊緣間距區域，若邊緣區域不足，將直接影響模仁結構強度，導致模仁在玻璃模造製程中損壞，如圖65為不同微孔間距的雷射共軛焦顯微鏡影像，微孔尺寸為 $500\ \mu\text{m}$ ，因此微孔間距 $600\ \mu\text{m}$ 時，其微孔邊緣區域為 $100\ \mu\text{m}$ ，圖65(d)顯示微孔過於接近時，模仁微孔邊緣已破損，無法成形微透鏡。雷射加工的特色之一即為簡易的修改圖形參數，即可獲得不同孔徑與間距之模仁，圖66分別為孔徑 $500\ \mu\text{m}$ 搭配間距 $700\ \mu\text{m}$ 以及孔徑 $400\ \mu\text{m}$ 搭配間距 $600\ \mu\text{m}$ 之碳化矽模仁。考量模仁結構強度與透鏡無效平面區域，選擇孔徑 $500\ \mu\text{m}$ 與間距 $700\ \mu\text{m}$ 之設計作為後續實驗模仁。

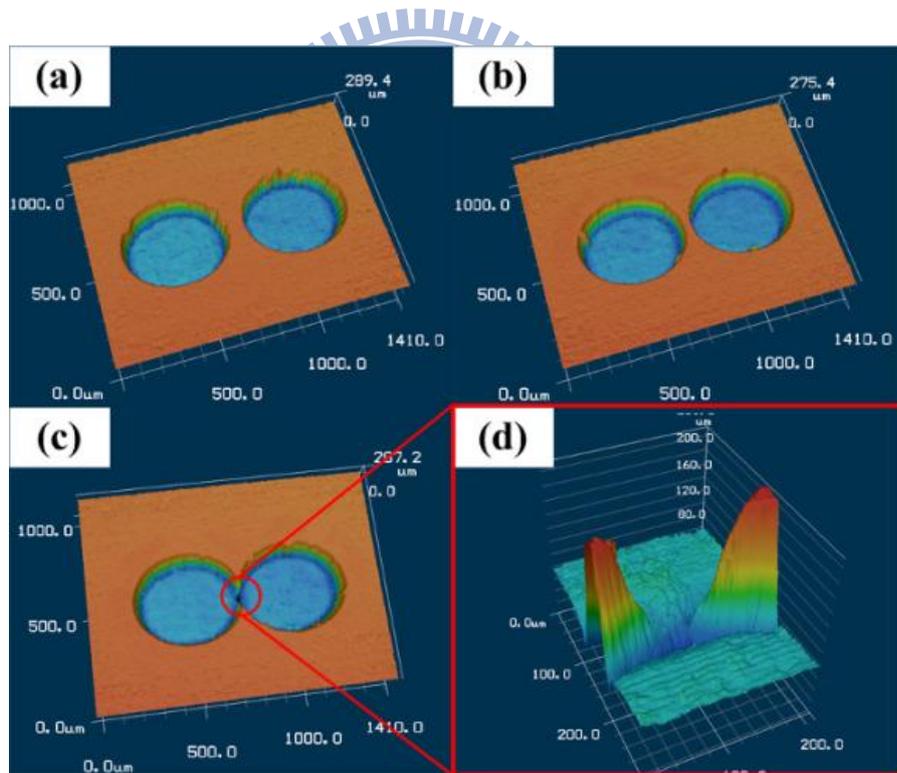


圖 65 模仁微孔之共軛焦顯微鏡影像

其間距與倍率為(a) $600\ \mu\text{m}$, 200X (b) $550\ \mu\text{m}$, 200X (c) $500\ \mu\text{m}$, 200X (d) $500\ \mu\text{m}$, 1000X.

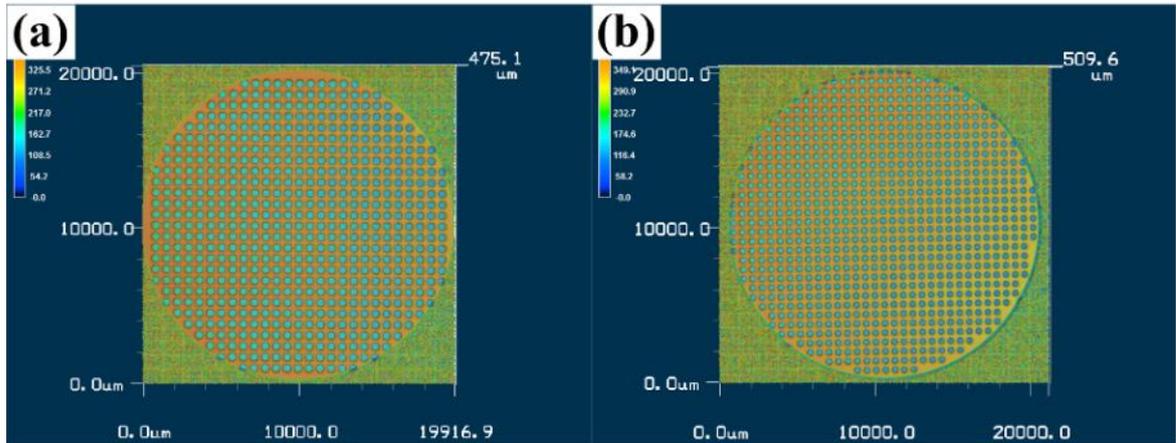


圖 66 模仁 (a)孔徑 500 μm 間距 700 μm (b) 孔徑 400 μm 間距 600 μm

3.2.2.2. 雷射脈衝重複頻率的影響

雷射加工的作用時間(t)可表示為：

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

其中 Δt 為脈衝時間，在雷射系統中設定為 30 μs ， f 則為脈衝重複頻率(pulse repetition frequency)。

單發的瞬間功率可以表示為 P_p ，其定義為：

$$P_p = \frac{P_a}{t} \quad (5)$$

其中 P_a 為平均功率，而單發雷射作用在工件上之能量 E 可定義如下：

$$E = \frac{P_p}{A} \quad (6)$$

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：

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (7)$$

其中d為雷射光束直徑，針對AVIA 355-14紫外光雷射，其雷射光束直徑為30 μm 。由公式(6)可知，材料所接收到的單發雷射能量決定於雷射脈衝重複頻率，脈衝重複頻率越高則雷射功率隨之下降，表14為不同的脈衝重複頻率參數下，其相對應的雷射輸出功率，可看出趨近於線性關係。故針對脈衝重複頻率對碳化矽微孔深度的影響進行實驗，雷射掃描速度為500 mm/s，加工10次，結果如圖67所示，亦為線性關係。選擇較低之脈衝重複頻率可獲得較大微孔深度，且因碳化矽為燒結材料，因此不會產生再鑄層，因此選用100 kHz之脈衝重複頻率來加工碳化矽模仁。圖68是不同脈衝重複頻率參數條件下所加工的微孔結果，可明顯看出頻率愈低，其微孔深度愈深，雖然雷射加工後表面呈現粗糙結構，但本研究之微透鏡陣列成形法，其微孔底部並不會接觸到玻璃材料，因此微孔底部的粗糙度對微透鏡表面品質並無任何影響。

表 14 雷射脈衝重複頻率與輸出功率關係表

脈衝重複頻率 (kHz)	輸出功率(W)
100	14.3
110	13.3
120	12.2
130	11.3
140	10.4

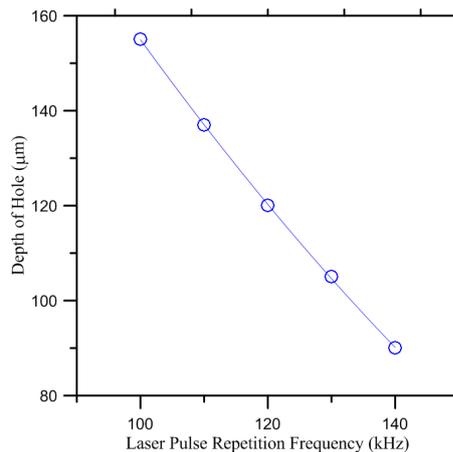


圖 67 雷射脈衝重複頻率與微孔深度關係

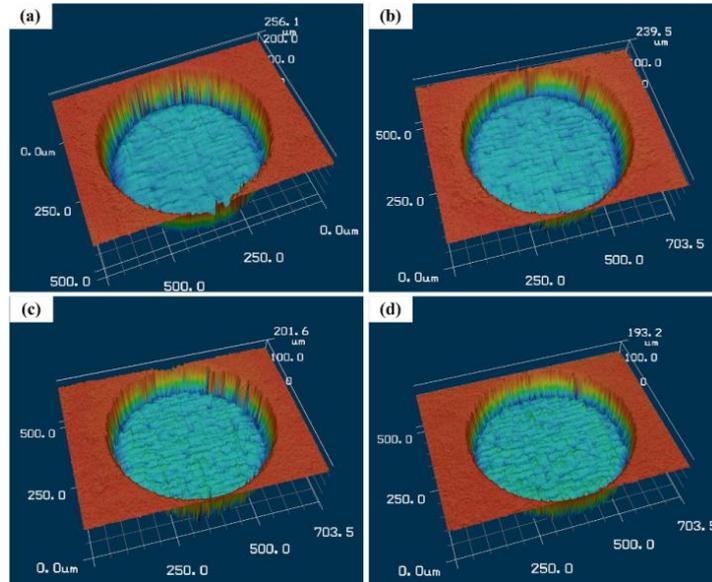


圖 68 不同雷射脈衝重複頻率加工之微孔
其頻率分別為(a) 110 kHz (b) 120 kHz (c) 130 kHz (d) 140 kHz

3.2.2.3. 雷射掃描速度的影響

雷射掃描速度快，可以縮短加工時間，節省加工成本，但雷射速度過快，每個微結構接收到的雷射能量就愈小，因此加工深度會降低，過快的加工速度，甚至會超過雷射系統中的振鏡運作速度極限，將會導致雷射光斑重疊率不足，造成微結構不連續。而過慢的加工速度，除了增加加工時間外，因振鏡運作速度較慢，碳化矽表面累積過多雷射能量，將造成微孔結構不平整，圖69為雷射掃描速度與微孔深度的關係圖，脈衝重複頻率為100 kHz，加工20次，隨著加工速度增加，雖然加工時間縮短，但是微孔深度也隨之下降。

圖70是不同雷射掃描速度製作之模仁，圖70(a)明顯看出因掃描速度過慢而造成的不平整微孔結構，因此考量加工時間與微孔深度，在雷射輸出功率為14.3 W的條件下，選擇加工速度400 mm/sec在碳化矽表面成形微孔陣列，圖71為碳化矽模仁上之微孔陣列，碳化矽外徑為20 mm，每一微孔直徑為500 μm，可明顯看出模仁表面並無任何再鑄層堆積。

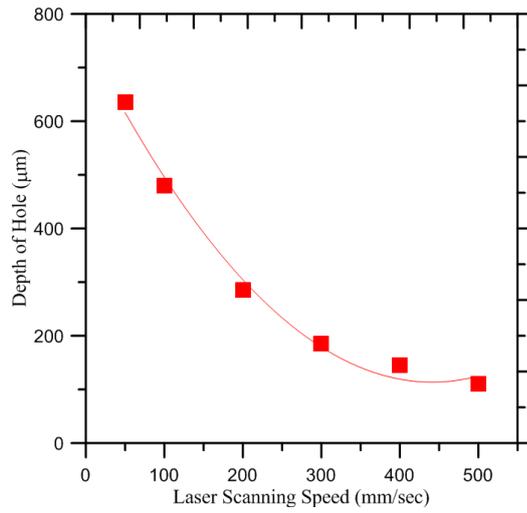


圖 69 雷射掃描速度與微孔深度關係圖

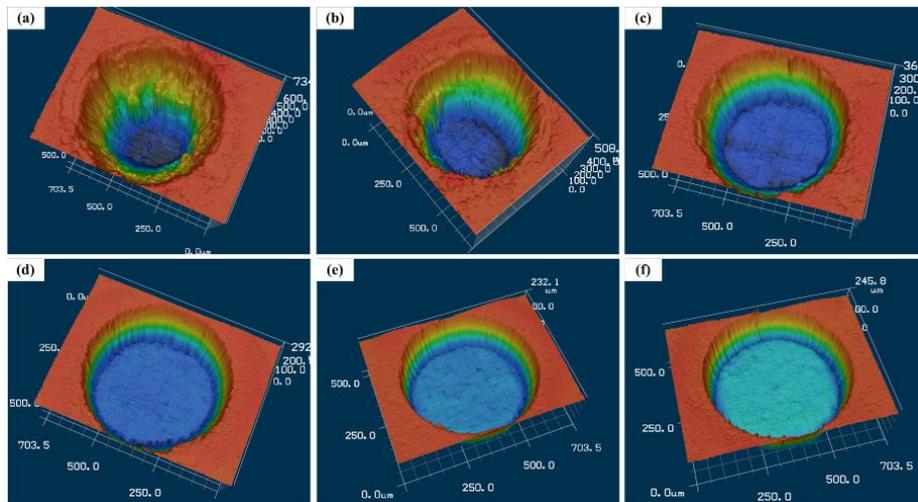


圖 70 不同雷射掃描速度所加工之模仁

其速度分別為 (a) 50 (b) 100 (c) 200 (d) 300 (e) 400 (f) 500 mm/sec

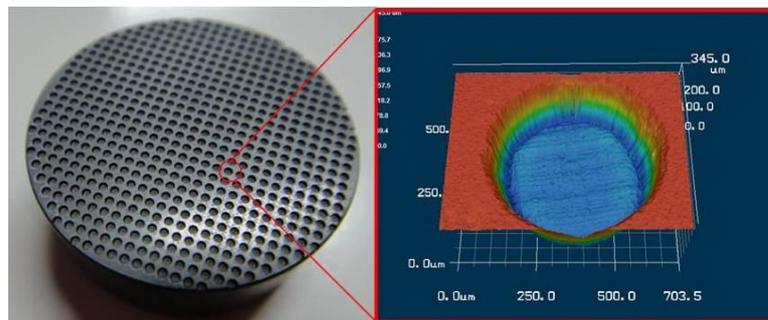


圖 71 碳化矽模仁

3.2.2.4. 模造腔體環境的影響

精密玻璃模造設備可分為單站式與連續式兩種機型，在單站式的設備中，為了避免模仁以及膜層因模造製程時的高溫氧化而受損，通常會在設備腔體中充填氮氣或抽真空，以避免模造製程中腔體內部有過多氧氣存在，一般而言，在製程中氧氣含量不超過30 ppm。而在腔體內部為真空狀態或是充填氮氣狀態時，玻璃元件成形的溫度與力量條件也不相同，圖72分別是在真空腔體環境中以及在氮氣腔體環境中成形的微透鏡，可明顯看出充填氮氣的腔體環境中，微透鏡的成形高度遠高於在真空環境中成形的微透鏡，表15列出的實驗結果顯示，在相同的溫度與力量條件下，充填氮氣下的微透鏡，其高度可達130 μm ，曲率可達523 μm ，但是真空狀態下的微透鏡，高度僅22 μm ，曲率3130 μm 。為降低實驗變數影響，在進行腔體環境實驗時，上模座與下模座保持固定微小距離，如圖73所示，因上下模座間距小，故熱輻射作用於模仁之影響有限，因此相較於真空環境，在充填氮氣的模造環境下，熱能傳遞的介質多了氮氣，因此可傳遞的熱能較多，使得玻璃預形體所獲得的熱能更多，因此，在真空腔體環境中，雖位在模仁中的溫度感測器(如圖27)已經偵測溫度達到設定值，而開始進行壓模製程，但此時玻璃預形體相較於同樣製程參數的氮氣環境中之預形體，其溫度較低，因此軟化程度較不足，所以導致微透鏡高度較低。因此，若在模造製程時採用真空環境中成形，則必須考慮玻璃預形體的受熱軟化程度，藉由增加上下模座間距、提高模造溫度或是增長保溫時間，可使得模仁與玻璃預形體達到適合的模造溫度，以符合元件的設計規格。

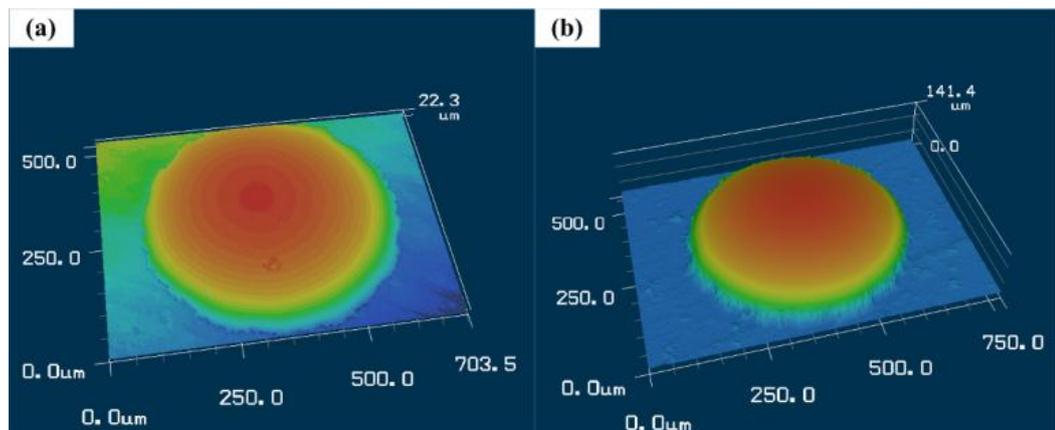


圖 72 在(a) 真空 (b) 氮氣 環境中成形的微透鏡

表 15 不同腔體環境與透鏡形貌之關係表

	Surface	Height (μm)	Radius (μm)
With Vacuum (2-step)	Upside surface	8	6919
	Underside surface	22	3130
With N ₂ (2-step)	Upside surface	121	560
	Underside surface	130	523

Parameters:
Molding temperature 690 °C
Molding force P1 : 0.5 kN P2 : 0.5 kN
Cooling rate : 26.7 °C/min

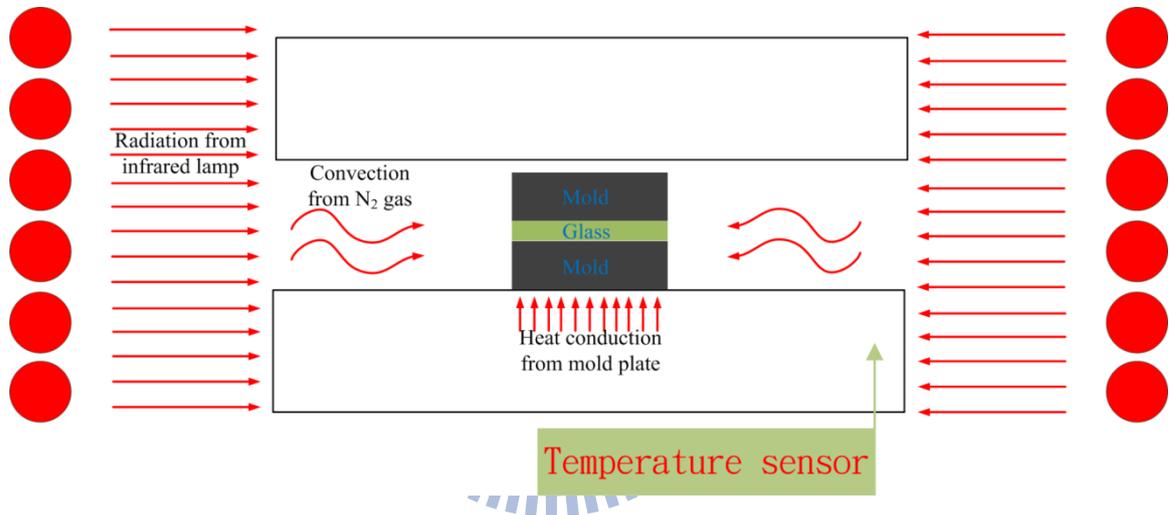


圖 73 氮氣影響示意圖

3.2.2.5. 玻璃模造溫度與力量的影響

玻璃模造製程中，最重要的兩個控制參數是模造溫度與模造力量，模造溫度愈高，玻璃材料軟化程度愈高，元件愈易成形，圖74顯示真空環境中，溫度為690 °C時，不論雙面微透鏡陣列的上面或下面曲面結構，其微透鏡高度皆高於680 °C時的高度，且透鏡高度隨著模造力量升高而增加，此外，透鏡下方的微透鏡高度皆大於上方高度，其原因為下模仁直接置於模造設備上（參考圖60），因此除了燈管的熱輻射方式加熱外，另有透過熱傳導方式加熱，因為玻璃預形體具有厚度差，因此玻璃下方的溫度會略高於上方，所以實驗結果皆顯現下方的透鏡高度高於上方，可透過拉大上下模座間距、提高模造溫度或增加保溫時間，使得玻璃預形體溫度較均勻，來減少微透鏡兩面高度的差異量。此

外模仁的微孔孔徑是固定值，因此，在相同的外徑下，透鏡高度愈高，其曲率半徑將愈小，如圖75所示。

此外由圖74、圖75中也可看出在溫度680 °C時，若模造力量小於1500牛頓，微透鏡將不會成形，導因於模造溫度與模造力量皆不足。但是較高的溫度，其升溫與降溫時間（降溫速率為26.7 °C/min）將愈長，增加能量的耗損，且溫度愈高將會降低模仁與膜層的使用壽命，亦會導致玻璃材料易沾黏在膜層上，導致膜層無法再使用，但模造溫度過低，將會造成玻璃不易成形，甚至在模造過程中產生玻璃材料破裂的現象，因此必須選擇適當的模造溫度來獲得最佳的效益。

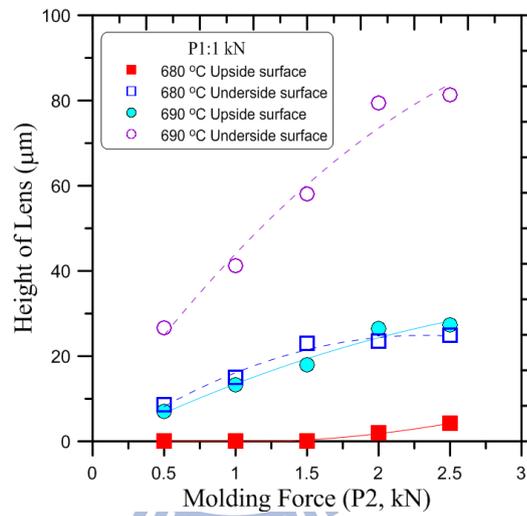


圖 74 模造力量/溫度與微透鏡高度關係

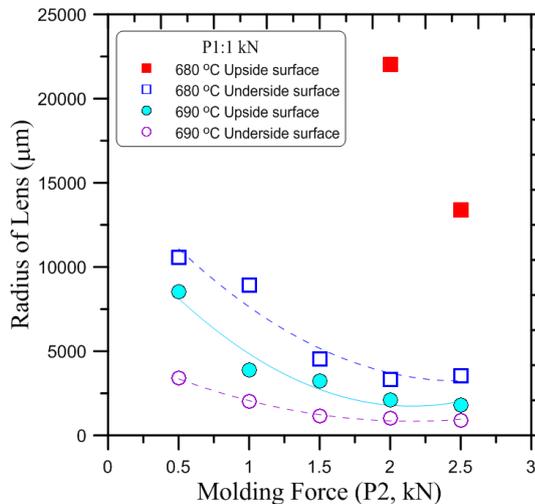


圖 75 模造力量/溫度與微透鏡曲率關係

3.2.2.6. 模造製程對玻璃材料折射率的影響

因為玻璃模造製程歷經升溫與降溫的步驟，針對玻璃材料而言，降溫速度的快慢會影響折射率數值的變化，因此，本研究利用實驗結果分析模造製程對玻璃材料折射率的影響，實驗結果如圖76，在模造溫度的影響方面，615 – 695 °C 的溫度對模造製程前後的材料折射率影響微乎其微，而較快的降溫速度雖對折射率的影響相對較大，但影響亦不超過0.001 n_D (n_D 為使用589.2 nm之波長光源量測折射率)，Huang等人[68]的實驗結果指出厚度5 mm的玻璃元件，在降溫速率37.2 °C/min時，模造製程前後折射率變化為0.003 n_D ，如圖77，其原因為本研究中的玻璃材料厚度為1.2 mm，因此模造製程中降溫速率對折射率的影響較小。

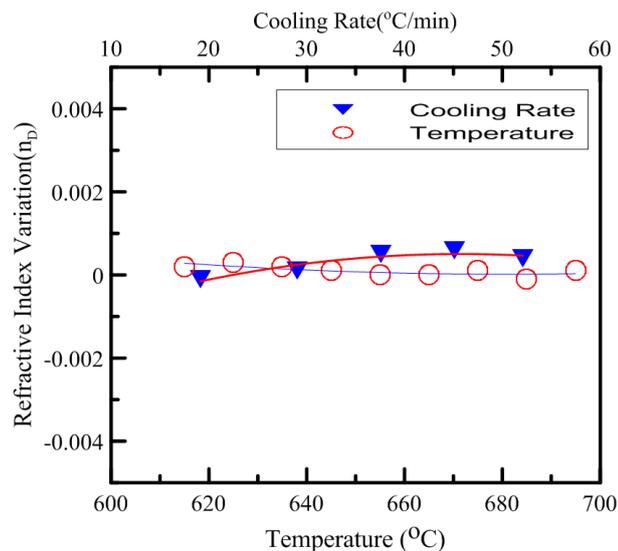


圖 76 模造溫度及降溫速率對折射率的影響 (t=1.2 mm)

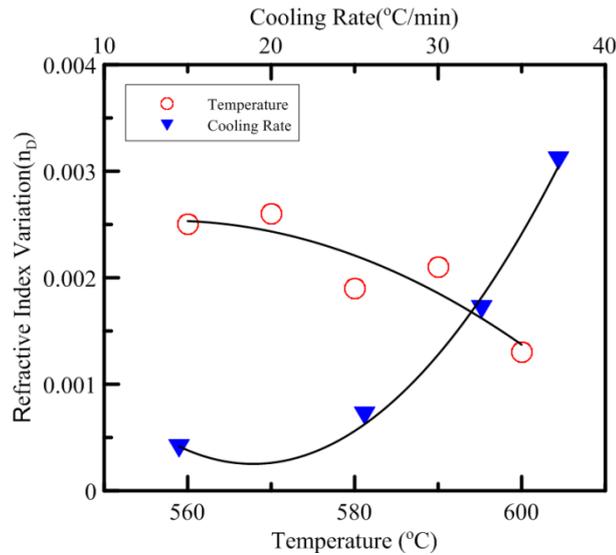


圖 77 模造溫度及降溫速率對折射率的影響 (t=5 mm)

圖78為雙面微透鏡陣列之剖面圖，由圖中可看出在鈉玻璃雙面已成形微透鏡陣列，圖78(a)(c)為其微透鏡之400倍放大圖。圖79為雙面微透鏡陣列之光學顯微鏡與電子顯微鏡圖。圖80(a)為雙面微透鏡陣列之實體照片，圖80(b)、(c)、(d)分別為其放大200、400、1000倍之共軛焦顯微鏡量測之立體圖形，圖80(e)為其輪廓量測結果，由圖中可看出其微透鏡曲率半徑為851 μm ，其寬度與高度分別為460 μm 及52 μm ，其透鏡間距為700 μm 。圖81則是利用50 mm * 50 mm，微孔孔徑為500 μm ，間距為700 μm 的碳化矽模仁製作直徑50 mm的雙面微透鏡陣列。

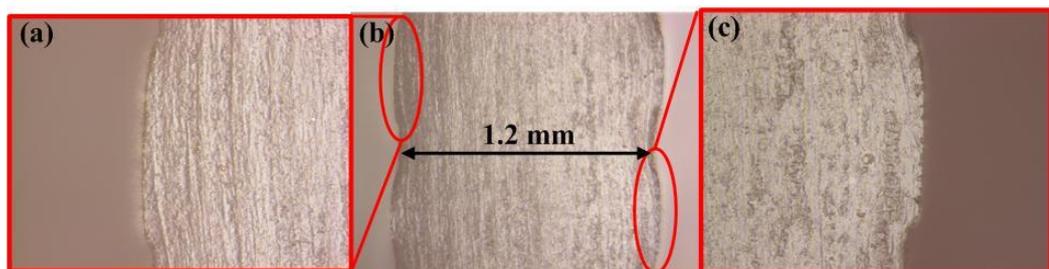


圖 78 微透鏡剖面圖(a) 400 倍 (b) 200 倍 (c) 400 倍

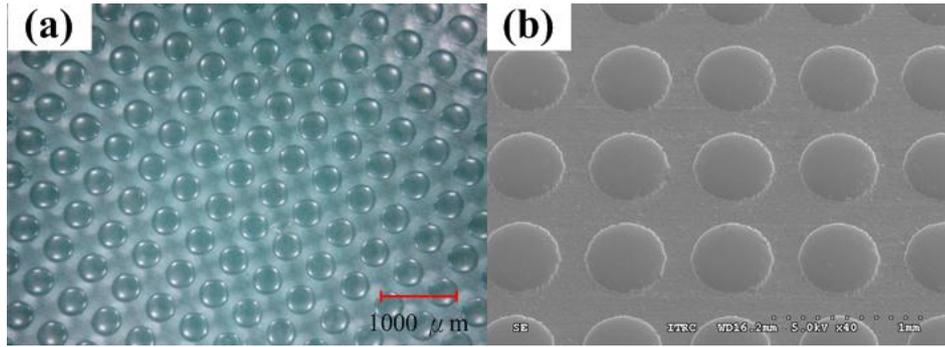


圖 79 微透鏡陣列之光學顯微鏡與電子顯微鏡圖

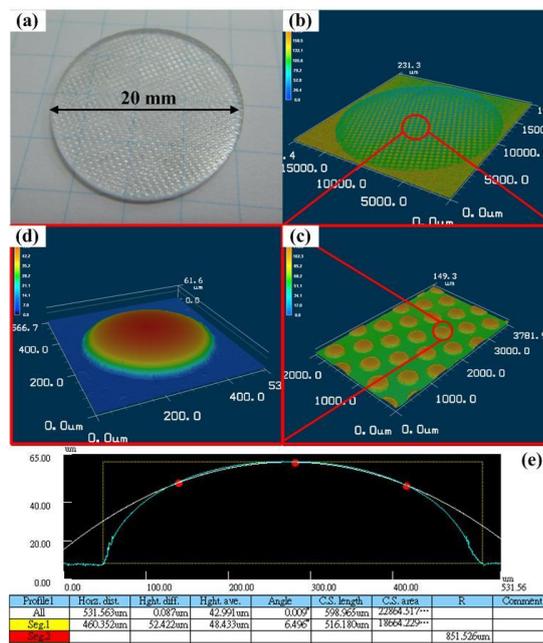


圖 80 微透鏡陣列之表面形貌圖(b)200倍 (c)400倍 (d)1000倍

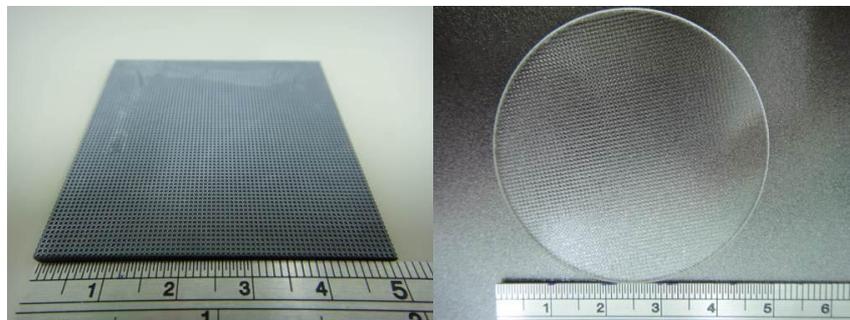


圖 81 50 mm * 50 mm 之碳化矽模仁與微透鏡陣列

3.2.2.7. 小結

本研究使用雷射加工技術在碳化矽模仁上製作微孔陣列，並透過精密玻璃模造技術在鈉玻璃上製作雙面微透鏡陣列，分析實驗結果，完成雷射脈衝重複頻率和掃描速度對微孔深度的關係圖，以及探討玻璃模造溫度與力量對微透鏡輪廓的影響，最後成功完成曲率半徑為 $851\ \mu\text{m}$ ，寬度與高度分別為 $460\ \mu\text{m}$ 及 $52\ \mu\text{m}$ ，透鏡間距為 $700\ \mu\text{m}$ 之雙面微透鏡陣列。透過此製程方法，依照所需設計可改變玻璃的材料、厚度或微透鏡曲率，使雙面微透鏡陣列適用於不同光學波段的光學系統。



3.3 光學微結構陣列

微光學陣列元件廣泛應用於光電產業。目前玻璃微光學元件可透過超精密鑽石輪磨或是精密玻璃模造技術來製造，但模具成本較高且加工耗時。因此本節結合雷射加工、電解拋光以及玻璃模造技術，製作玻璃微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列，可縮短製程周期與降低模仁成本。雖然不銹鋼經過雷射加工製程後會產生嚴重再鑄層堆積，但本實驗主要目的是利用電解拋光技術來改變模仁微結構表面輪廓，而電解拋光技術針對不銹鋼材料電解效果其佳，除可改變微結構輪廓外，亦可消除再鑄層，因此選用不銹鋼材料作為模仁。首先利用雷射在不銹鋼材料上製作六邊形與矩形之微結構陣列，並利用電解拋光技術去除因雷射加工而形成之再鑄層及改變微結構形貌，最後透過玻璃模造技術在鈉玻璃上製作10*10 mm之光學微陣列元件。

3.3.1 實驗方法與步驟

本節研究使用波長為355 nm之UV雷射系統AVIA 355-14 (COHERENT Inc.)來製做模仁上之微結構，包含微透鏡陣列以及微柱狀鏡陣列模仁。透鏡曲面間之間隙是對光學性質沒有作用之無效區域，因此為了減少透鏡間隙，選用六邊形之蜂巢狀結構作為模仁微結構圖形，利用雷射在不銹鋼材料(SUS 304)上製作外接圓100 μm 、200 μm 以及300 μm 之六角柱狀結構陣列與間距100 μm 、200 μm 以及300 μm 之矩形陣列，其範圍皆為10 mm * 10 mm，雷射加工過程中探討雷射脈衝重複頻率、掃描速度與不同微結構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輪廓並探討最佳雷射加工參數。之後探討電解拋光時間對表面輪廓的影響，最後利用玻璃模造技術成形玻璃微結構陣列元件。圖82為實驗流程圖。

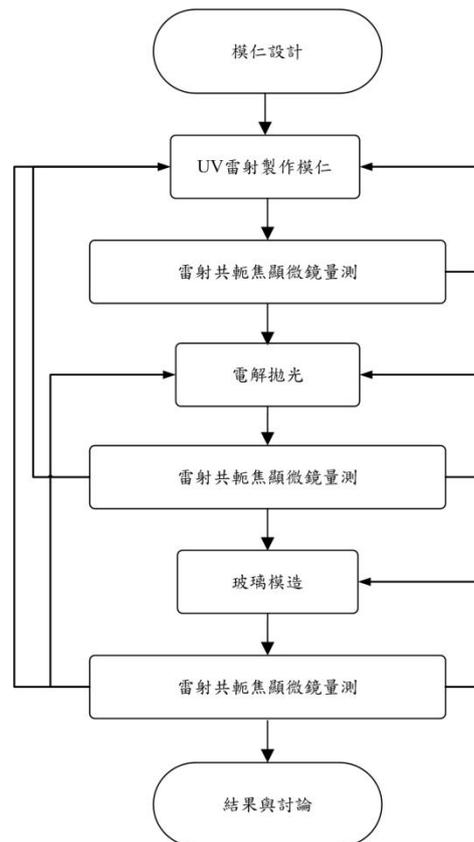


圖 82 實驗流程圖

經雷射加工後，不銹鋼模仁表面粗糙度變差且有大量熔渣堆積隆起，稱為再鑄層，如圖83，透過電解拋光，使其表面粗糙度降低，持續增加拋光時間，可使表面形貌改變，使微透鏡陣列模仁微結構由六邊形改變成為半球形，微柱狀鏡陣列模仁微結構由矩形改變成為半圓柱形，如圖84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。

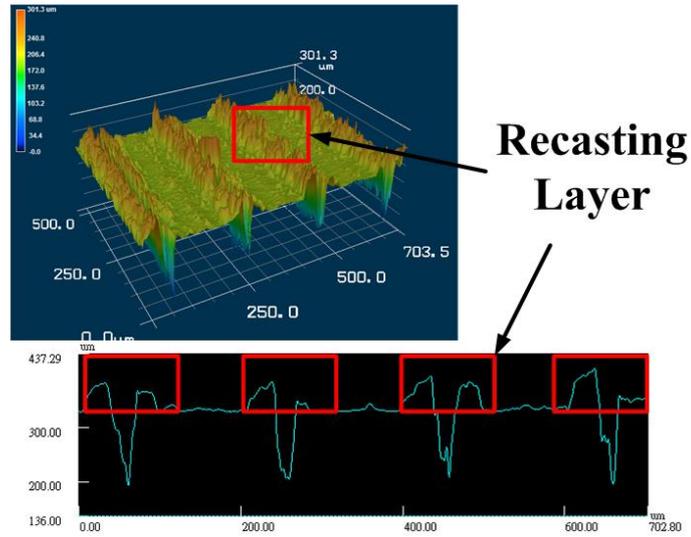


圖 83 經雷射加工後之模仁表面形貌

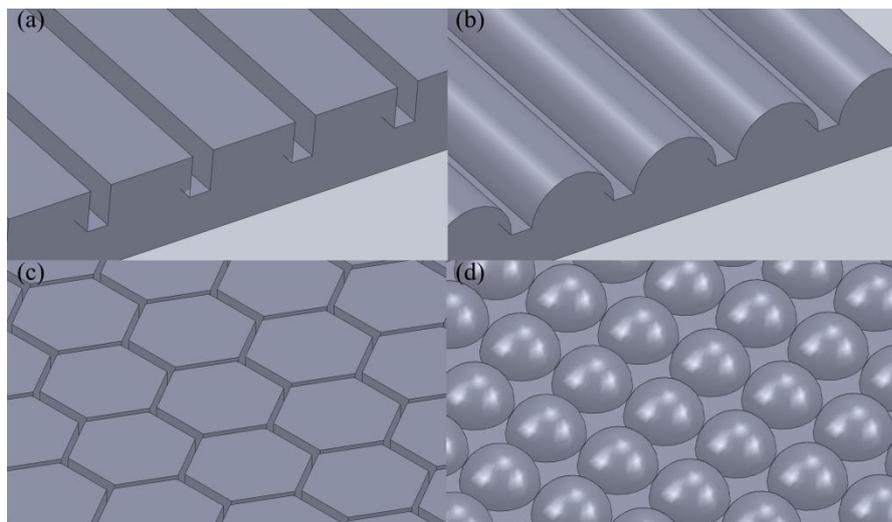


圖 84 模仁電解前後示意圖

- (a) 微柱狀鏡陣列模仁電解前 (b) 微柱狀鏡陣列模仁電解後
 (c) 微透鏡陣列模仁電解前 (d) 微透鏡陣列模仁電解後

3.3.2 結果與討論

3.3.2.1. 雷射脈衝重複頻率對模仁高度之影響

雷射脈衝重複頻率會影響雷射輸出功率，亦會對所加工之微結構造成影響，圖85顯示雷射脈衝重複頻率與加工深度成反比趨勢（掃瞄速度1000 mm/s加工50次），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，將導致加工表面再鑄層嚴重堆積，造成微結構形貌改變及高度不穩定的現象，如圖86為再鑄層嚴重堆積在微結構周遭區域，使用較高的重複頻率雖然能避免較多再鑄層產生，但也因為功率較小，而無法有效達到所需之結構高度。此外，微結構尺寸也嚴重影響模仁輪廓，圖86也顯示出因微結構尺寸太小，例如外接圓直徑僅為100 μm ，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，圖中標示圓形區域為再鑄層堆積現象。

本節實驗亦製作微柱狀鏡之矩形微結構模仁，圖87為雷射脈衝重複頻率對不銹鋼模仁微結構高度的影響（掃瞄速度1000 mm/s加工50次），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反比關係。若選擇不適當之雷射脈衝重複頻率與微結構矩形寬度，亦產生模仁微結構輪廓變形與再鑄層過多或微結構高度不足的現象。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10 * 10 mm之不銹鋼材料上製作微結構陣列，實驗結果之區域表面形貌如圖88所示。

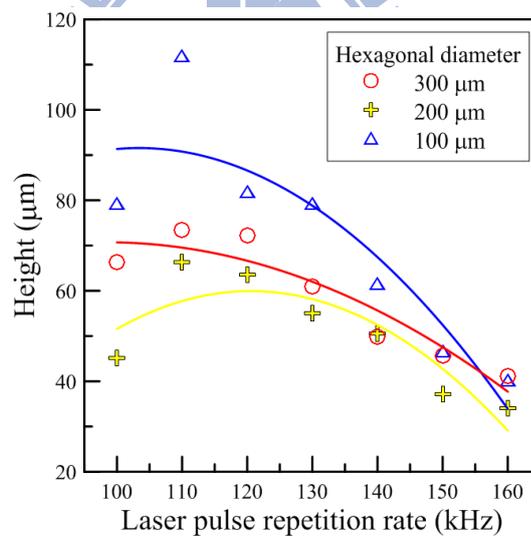


圖 85 雷射脈衝重複頻率與模仁結構高度關係

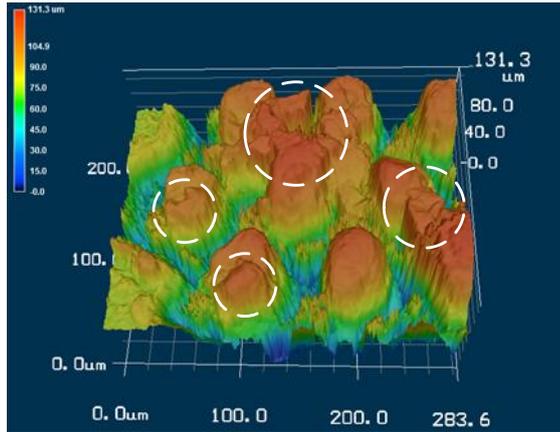


圖 86 雷射脈衝重複頻率 100 kHz 加工之外接圓尺寸 100 μm 模仁

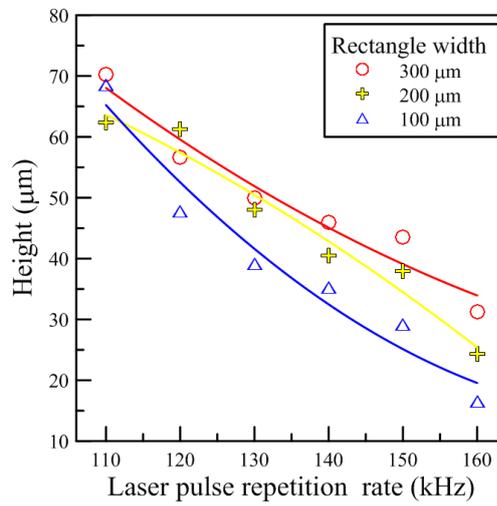


圖 87 雷射脈衝重複頻率與模仁結構高度關係

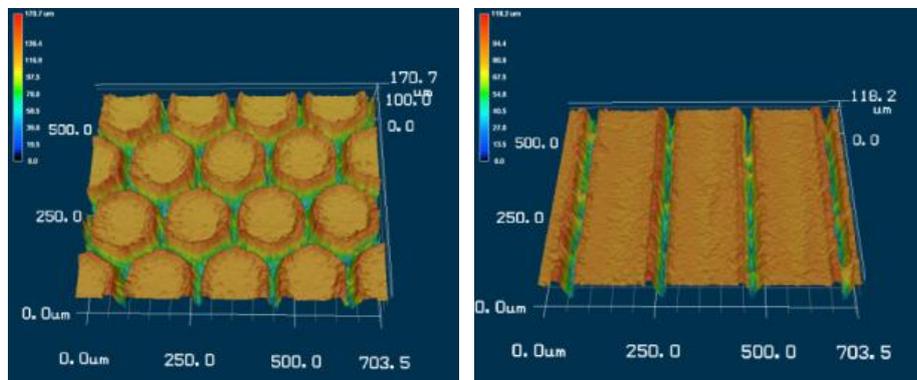


圖 88 雷射脈衝重複頻率 110 kHz 所加工之不銹鋼模仁

3.3.2.2. 雷射掃描速度對模仁表面輪廓之影響

雷射掃描速度越快代表被加工件之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，將導致圖形產生不連續的現象而失真。如圖89（脈衝重複頻率140 kHz加工50次），微透鏡陣列之六角形結構高度與雷射掃描速度成反比關係，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。六邊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 之六邊形外接圓結構尺寸較小，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，產生嚴重的熔融現象，造成再鑄層堆積，反之雷射掃描速度越快，熔融現象則較不明顯，因此本實驗選用200 μm 之六邊形外接圓結構進行後續實驗。

圖90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（脈衝重複頻率140 kHz加工50次）。發現結構高度與雷射掃描速度成反比。圖90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。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半圓柱形結構。由圖89及圖90，考量模仁微結構高度與表面形貌，使用1000 mm/s之掃描速度來加工不銹鋼模仁結構。

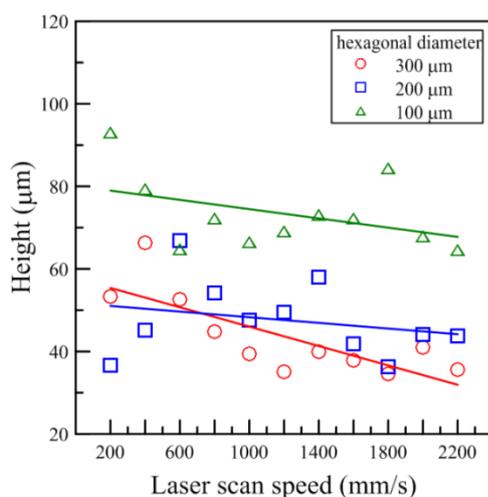


圖 89 雷射掃描速度與微透鏡陣列模仁結構高度關係

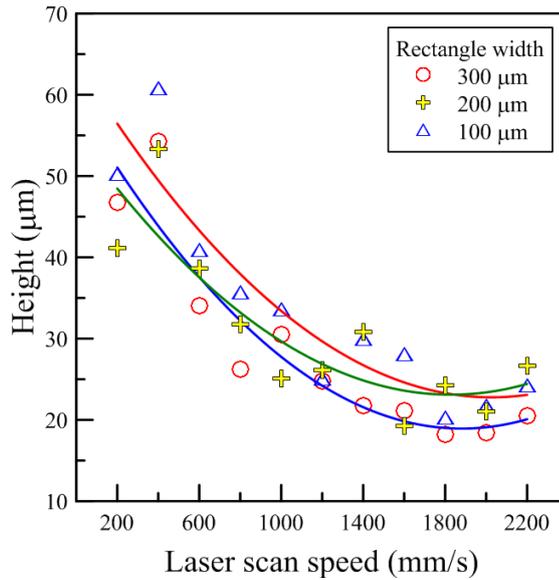


圖 90 雷射掃描速度與微柱狀鏡陣列模仁結構高度關係

3.3.2.3. 電解拋光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變微結構表面形貌，使其變為半球形與半圓柱形微結構陣列，並改善因雷射加工後產生之不平整表面，降低不銹鋼表面粗糙度。圖91是在不同的雷射脈衝重複頻率以及加工速度下所製作之不銹鋼試片，其經過不同電解拋光時間後對不銹鋼表面粗糙度之影響。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在90分鐘以上時，不銹鋼表面粗糙度(Ra)將降至3 μm以下。

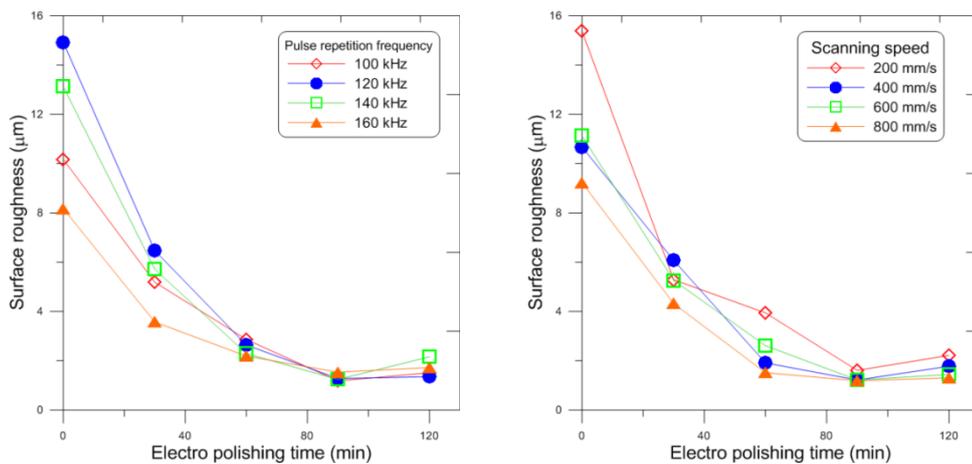


圖 91 雷射參數與電解拋光時間對模仁微結構表面粗糙度之影響

3.3.2.4. 電解拋光時間對微結構形貌影響

電解拋光可修整因雷射加工而產生的粗糙表面，並能將六邊形柱狀結構改變為半球形結構。雷射參數選用掃描速度1000 mm/s、雷射脈衝重複頻率110 kHz 來製作不銹鋼微結構模仁。經量測不同電解時間之不銹鋼模仁的表面輪廓，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，則微結構幾何外形亦無法產生趨於半球形之表面形貌。因此計算高度及表面形貌是否趨近半球形(具有曲率值)，選擇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，圖92是利用雷射共軛焦顯微鏡觀察不銹鋼模仁經電解拋光後表面形貌。

而針對微柱狀鏡陣列模仁實驗結果，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，此外亦須計算高度及表面形貌是否趨近半圓柱形(具有曲率值)，故最佳參數為電解拋光時間125分鐘，如圖93所示。圖94則為微透鏡陣列模仁與微柱狀鏡陣列模仁電解拋光結果，電解拋光時間愈長，雖然表面粗糙度會降低，但結構高度也會降低，圖95為微透鏡陣列以及微柱狀鏡陣列模仁的實體圖，其尺寸皆為10 mm*10 mm。

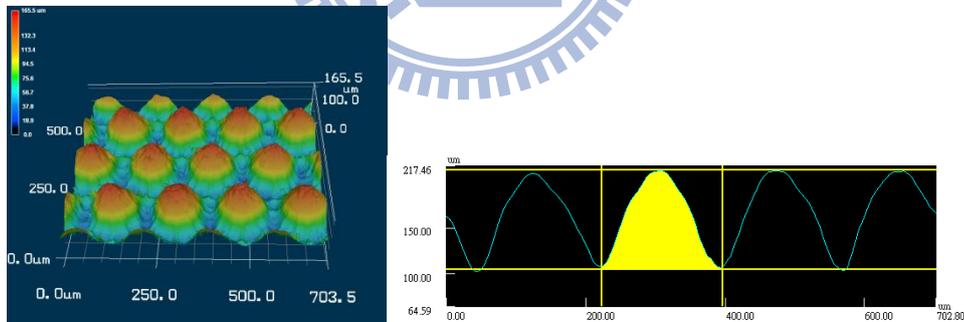


圖 92 電解時間 75 min 後之微透鏡陣列模仁輪廓

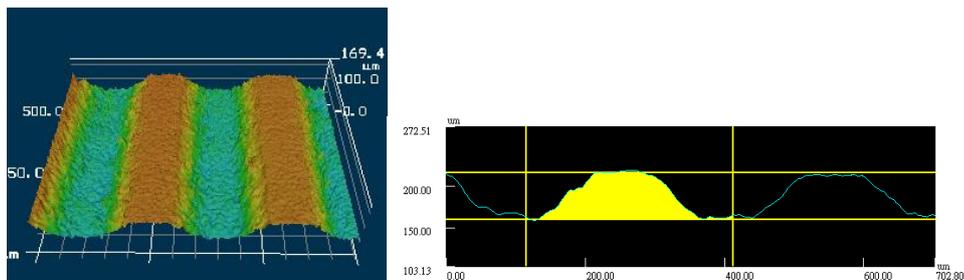


圖 93 電解時間 125 min 後之微柱狀透鏡陣列模仁輪廓

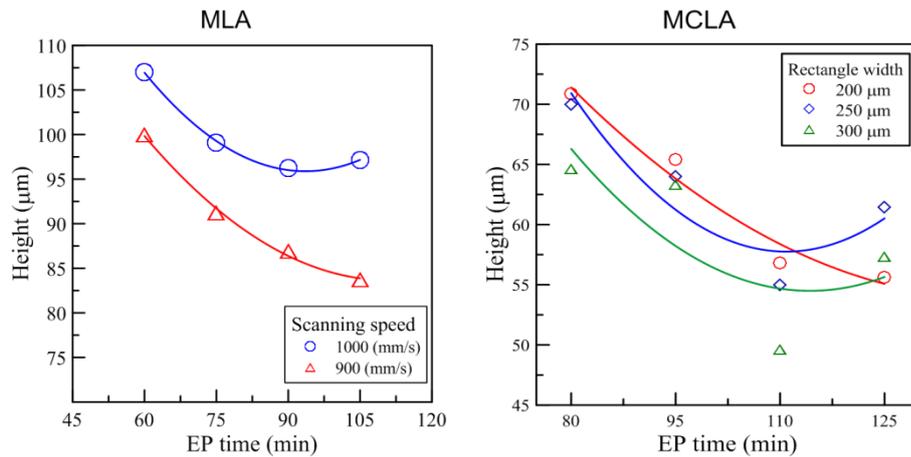


圖 94 電解拋光時間與模仁微結構高度之關係

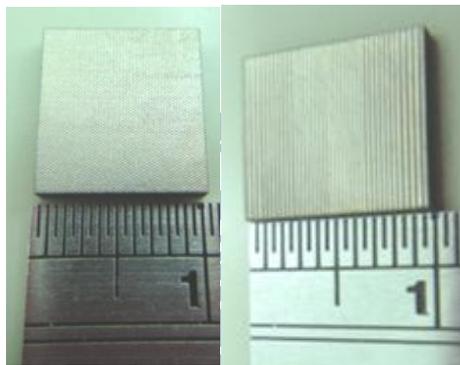


圖 95 不銹鋼模仁之微透鏡陣列與微柱狀鏡陣列

3.3.2.5. 模造參數之影響

圖96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，保溫時間結束後進入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。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模造力量，本節實驗中其他實驗參數分別設定為真空中成形以及模造熱壓時間為90秒。而玻璃材料使用10 mm*10 mm，厚度為1.2 mm之鈉玻璃。

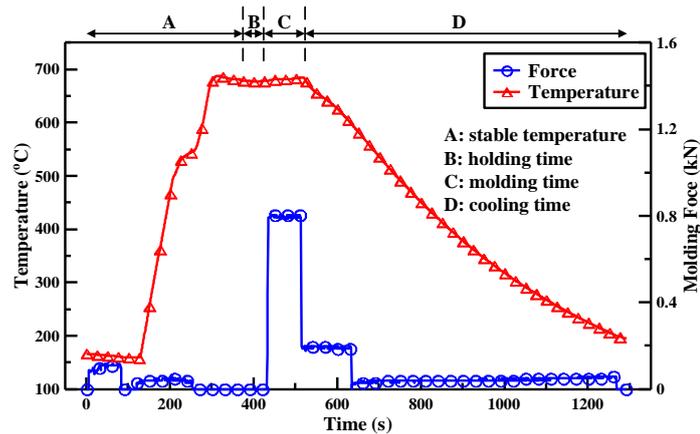


圖 96 單段熱壓成形歷程

圖97為模造溫度 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、保溫時間 60 s 以及降溫速率 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，不同模造力量對填充率的影響。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，由模造力量實驗結果可發現力量與填充率為正比關係，但是當模造力量太高時，容易造成玻璃裂痕產生，甚至嚴重碎裂。若力量太低則玻璃無法達到高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97(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，如圖98所示，故其所需力量遠大於微透鏡陣列。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力量參數分別為成形力量 9 kN 與 0.8 kN 。

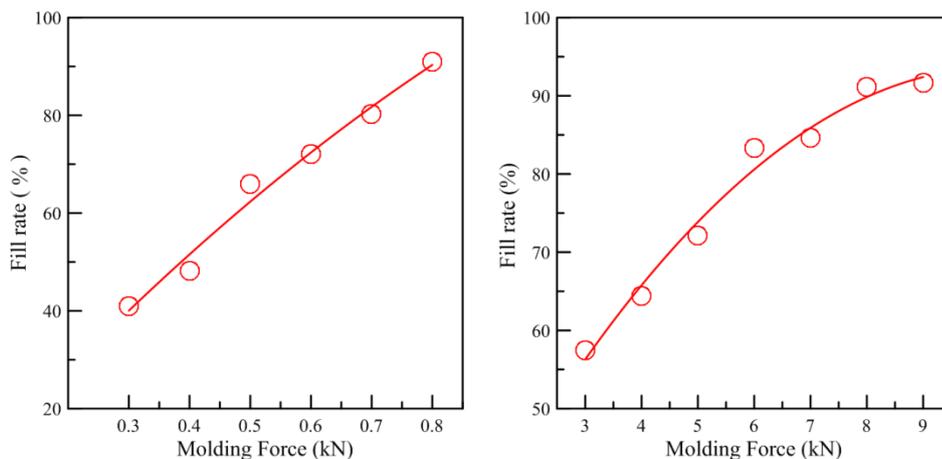


圖 97 成形力量對填充率之影響(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列

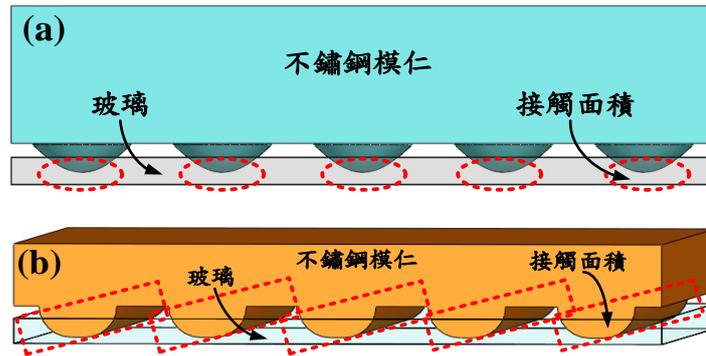


圖 98 接觸面示意圖(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列

圖99為保溫時間60 s、降溫速率26.7 °C/min以及固定模造力量時，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比關係，且模造溫度是模造製程中極敏感的參數。若溫度低於670 °C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 °C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，故分析實驗結果，以685 – 690 °C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，模造溫度越高或模造力量越大能夠達到更高的填充率。但較低的模造溫度能使冷卻時間減少並加快整個製程週期。而低的成形力量能保護模仁，使模仁壽命增加，故較低的模造溫度與模造力量可有效降低生產成本。

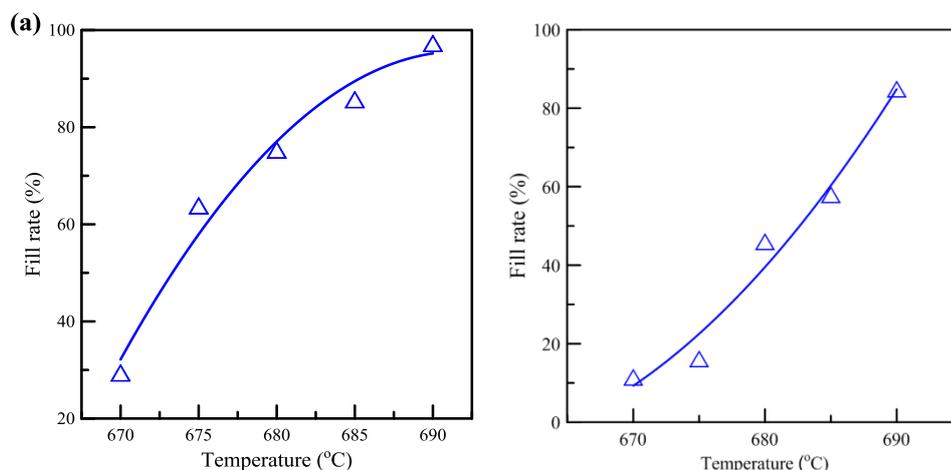


圖 99 溫度對填充率之影響(a)微透鏡陣列(b)微柱狀鏡陣列

3.3.2.6. 腔體中充填氮氣與真空狀態的影響

熱壓實驗中，工作腔體中若含有空氣或污染粒子，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，即少了氮氣氣體的熱傳作用，將降低玻璃預形體受熱程度，因此本節實驗將探討不同腔體環境對微結構表面形貌的影響。

腔體為真空條件下代表模造製程中，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100顯示在固定溫度為685 °C、保溫時間60 s以及降溫速率26.7 °C/min時，探討不同成形力量對填充率之影響。實驗中發現在腔體內充填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%，然而在腔體為真空狀態下，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101為在固定力量參數為1與1.5 kN(首段、二段力量)的情況下，且保溫時間為60 s以及降溫速率26.7 °C/min時，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 °C下填充率即有80.5%之效果，於690 °C時可達到99.6%之填充率。然而當腔體內為真空時，於690 °C時填充率僅44.6%。

本實驗所得之結果證實在腔體內無氣體存在時，將導致玻璃受熱程度不足，而導致軟化程度不足，影響材料之黏度係數並間接對熱壓參數與玻璃精度產生影響。

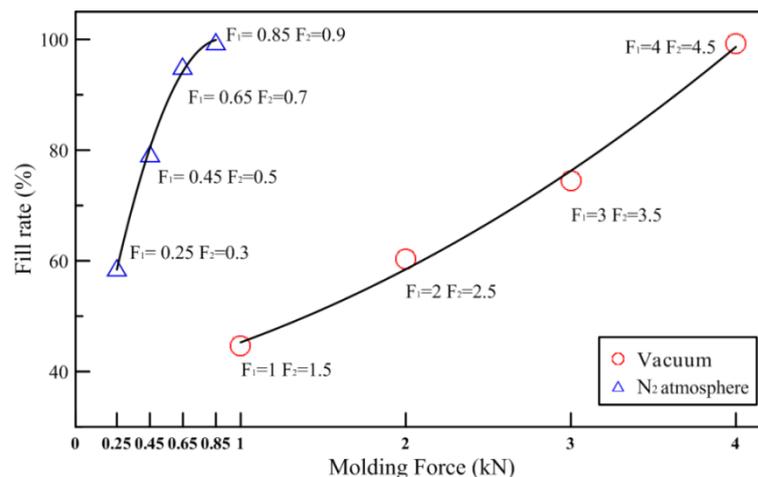


圖 100 腔體環境與模造力量的影響

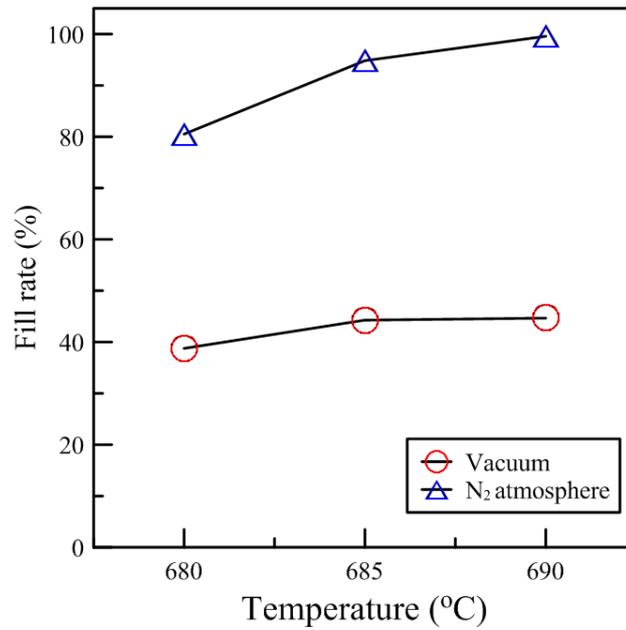


圖 101 腔體環境與模造溫度的影響

3.3.2.7. 小結

由上述實驗結果，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 0.45 kN

壓模速度 10 mm/s

模造時間 90 s

模造溫度 690 °C

微柱狀鏡陣列：

成形力量 0.65 kN

壓模速度 15 mm/s

模造時間 90 s

模造溫度 690 °C。

以此參數條件，獲得範圍10 mm*10 mm，深度39.3 μm、曲率58.1 μm、間距180 μm之微透鏡陣列，圖102為利用共軛焦顯微鏡拍攝，放大倍率1000倍，圖103所示為透鏡實際表面形貌，圖104為電子顯微鏡影像。以及獲得範圍10 mm*10 mm，深度37 μm、曲率79.8 μm、間距250 μm之微柱透鏡陣列，圖105為利用共軛焦顯微鏡拍攝，放大倍率1000倍，圖106為放大倍率1000倍之拼接圖，圖107為微柱狀鏡陣列實際表面形貌，圖108為電子顯微鏡影像。

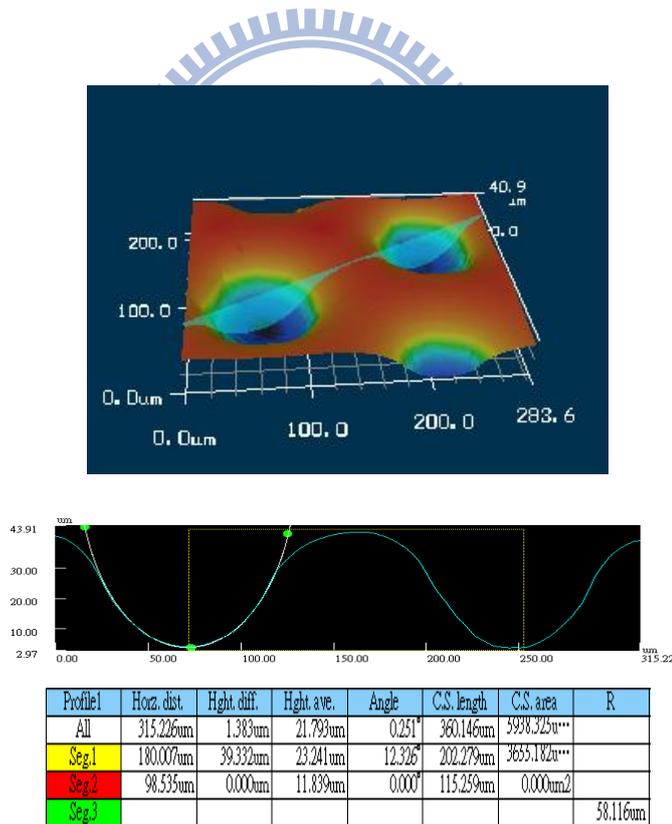


圖 102 最佳化之微透鏡陣列 3D 表面輪廓與量測值

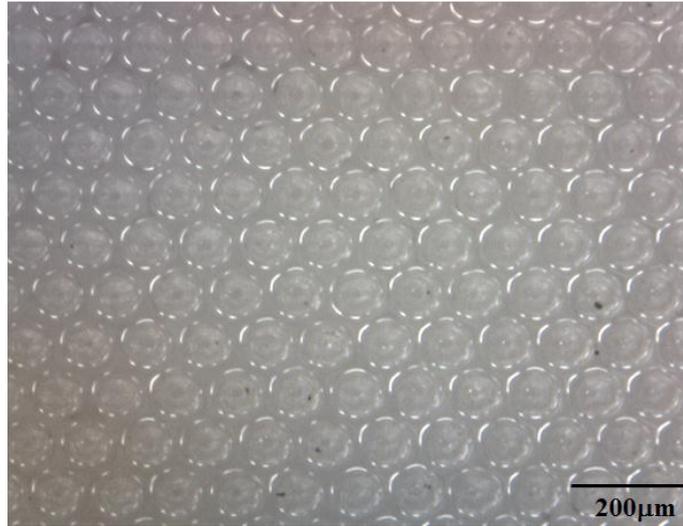


圖 103 玻璃微透鏡陣列實際玻璃表面形貌

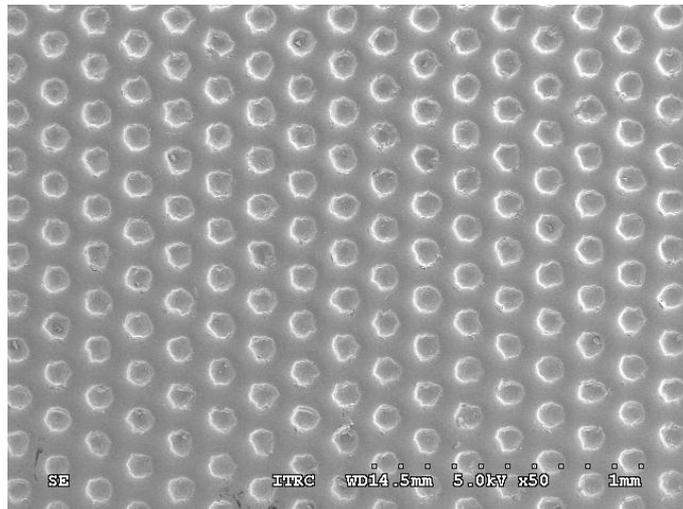
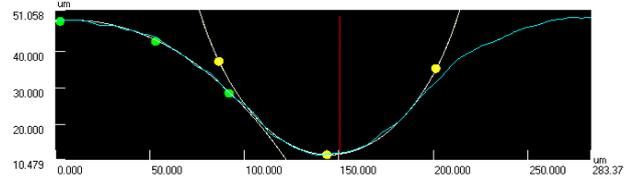
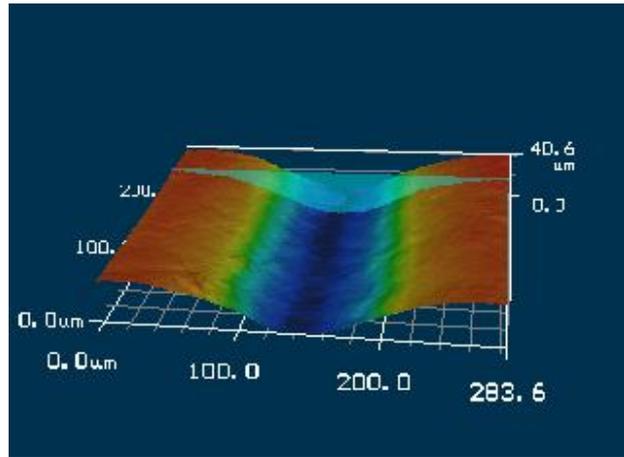


圖 104 玻璃微透鏡陣列 SEM 圖



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 105 最佳化之微柱狀鏡陣列 3D 表面輪廓與量測值

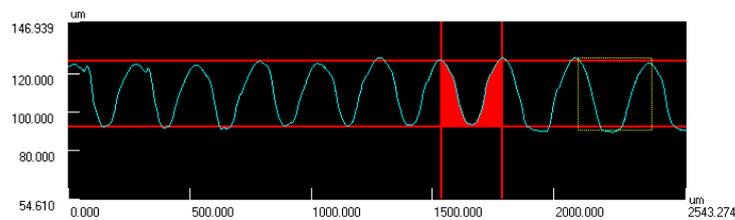
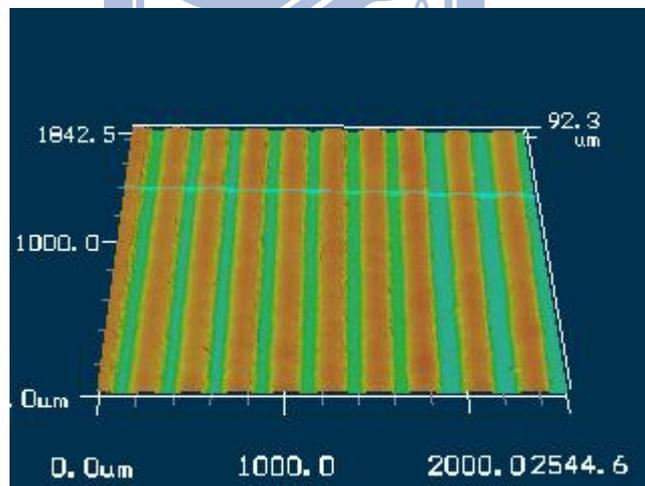


圖 106 放大倍率 1000 倍拼接圖之微柱狀鏡陣列 3D 表面形貌與量測值

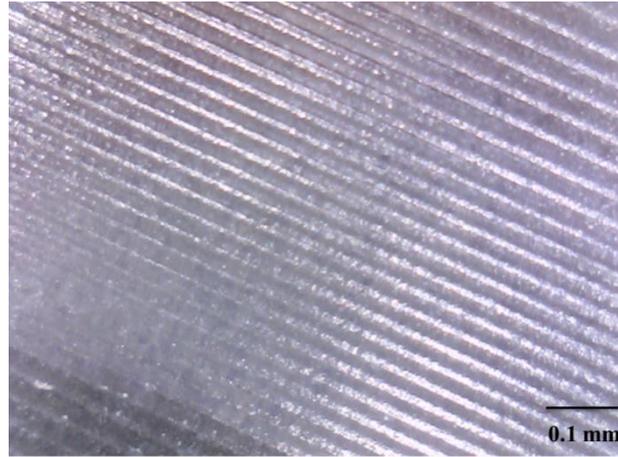


圖 107 玻璃微柱狀鏡陣列實際玻璃表面形貌

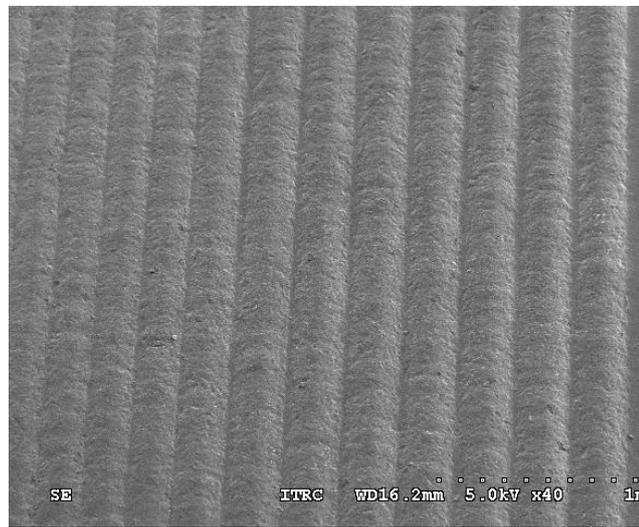


圖 108 玻璃微柱狀鏡陣列 SEM 圖

本實驗成功利用雷射微加工技術在不鏽鋼模仁上製作微結構陣列，並利用電解拋光技術去除因雷射加工所產生之再鑄層，利用此方法，可快速製作玻璃模造製程所需模仁，且本研究藉由實驗結果分析，獲得最佳之雷射加工參數以及電解拋光時間，分別為雷射掃描速度1000 mm/sec，雷射脈衝重複頻率110 kHz，電解拋光時間針對微透鏡陣列為75分鐘，針對為柱狀鏡陣列則為125分鐘，最後利用玻璃模造製程，在模造溫度690 °C的條件下，使用成形力量0.45 kN壓製微透鏡陣列；另使用成形力量0.65 kN壓製微柱狀鏡陣列，完成曲率為58.1 μm 之微透鏡陣列以及曲率79.8 μm 之微柱狀鏡陣列，其陣列範圍皆為10 mm*10 mm。

四、精密曲面成形

精密玻璃模造技術的特點即為低成本、高精度、成形週期短、可以成形非球面與自由曲面元件以及適合量產，相較於傳統研拋方法，玻璃模造技術可縮減多道製程，因此可快速生產良率佳的高精度光學元件。目前精密玻璃模造技術多用來量產手機、相機等3C產品中的非球面鏡片，因3C產品外觀尺寸日益縮減，因此光學系統的鏡片群勢必得縮小尺寸與鏡片片數，而縮減鏡片片數最有效的方法即是採用非球面鏡片，非球面鏡片可在達到同樣光學效果的條件下取代多片球面鏡片，因此廣泛使用在目前的高階3C商品中。

成形非球面鏡片的玻璃模造相關技術，包括模仁設計/加工製造、鍍膜技術、預形體設計與製作、模造製程參數以及模仁和玻璃的材料等，皆是各廠商的商業機密，所以在進行相關研發時，可取得的資料不多，因此，本章節針對平面積體微光學元件以及非球面透鏡進行實驗分析，期望建立相關數據，以讓相關產學研各界有所參考。此外，結合上章節微結構成形技術加上精密曲面成形技術，本章節亦討論在精密曲面上具有微結構之元件成形，亦即菲涅耳(Fresnel)透鏡之成形製程研究。



4.1 平面積體微光學元件

平面積體光學元件特點在於將數個不同尺寸幾何光學元件與繞射光學元件同時設計於同一塊基板表面，使平面積體光學元件具有最佳光學特性並微小化[69]。此元件可應用於微型投影顯示、光通訊系統、光學儲存裝置及綠色科技檢測技術上。因是複合元件，所以輪廓並非常見之球面或是非球面外形，而是如圖109之不規則外形，若要使用傳統研拋方法加工，需分段加工與研拋，且易在分段加工過程中損傷前段加工區域，此外，拋物面的外形在拋光上也有相當的難度，因此，使用玻璃模造技術來成形，是較佳的選擇。

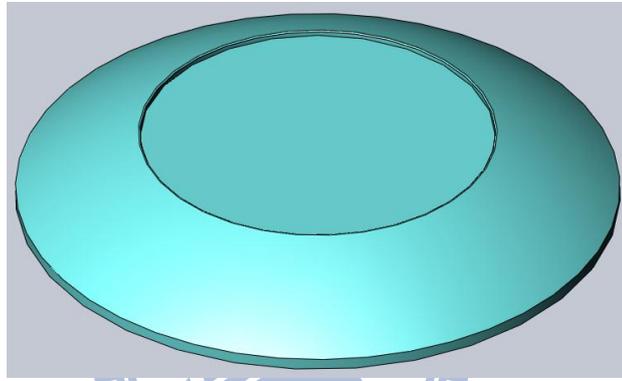


圖 109 平面積體微光學元件外形

4.1.1 實驗方法與步驟

首先利用光學設計軟體分析出最佳的設計參數，並利用精密鑽石輪磨加工技術製作碳化鎢模仁，接著使用玻璃模造技術，完成積體光學元件雛形，圖110為元件製作程序圖。後續在元件焦點處製鍍金屬材質，利用其所產生的電漿子效應以增強其檢測訊號，即可完成此光學元件。利用玻璃模造技術可將積體光學元件雛形製作時間，由使用傳統方法需費時數天減少至30分鐘以內，且保持表面精度(PV)為 $0.15\ \mu\text{m}$ 之表面品質，可大幅降低製作成本。

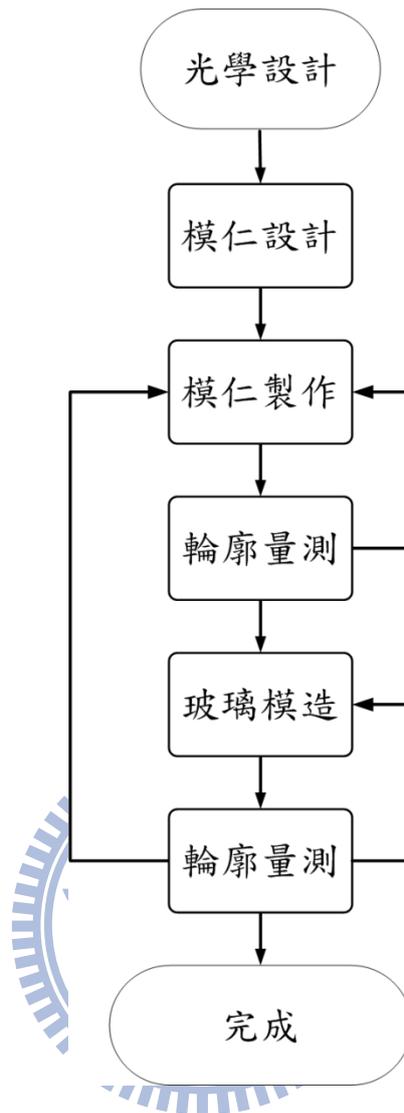


圖 110 平面積體元件製程圖

4.1.1.1. 模仁設計與製作

使用光學設計軟體模擬出最佳的平面積體光學元件，在玻璃基板同一表面設計高效能離軸偏轉聚焦鏡，其半徑約為42 mm，非球面係數圓錐常數 k 為 -1 之拋物面，使入射光線在微光學元件內部進行全反射，並通過焦點處之微結構，之後由入射平面之對稱側出射，藉此完成光學系統微小化，元件之光路示意圖如圖111所示。

依據平面積體光學元件外形來設計模仁幾何形狀，模仁設計分為上模仁與下模仁兩部份，此元件為一拋物面及一平面所構成之光學元件，模仁設計如圖112所示。精密玻璃模造技術關鍵之一即模仁是否有良好的品質，碳化鎢或碳化矽材質，此類材料在高溫

的穩定性及硬度皆佳，適合用於玻璃模造技術，本節實驗使用碳化鎢為模仁材料，碳化鎢硬度極高，要加工成為高精度的模仁，需要使用超精密鑽石輪磨技術，但是下模仁的形狀將會有幾何干涉的問題，因此，將下模仁設計為兩件式，分別為外圍拋物面圓環模仁以及底部平面模仁。另外，為避免玻璃材料於模造製程中沾黏於模仁表面，模仁表面將會鍍製貴金屬硬膜，一般膜層材料皆採用如 Pt-Ir 等材質以延長膜仁使用壽命。

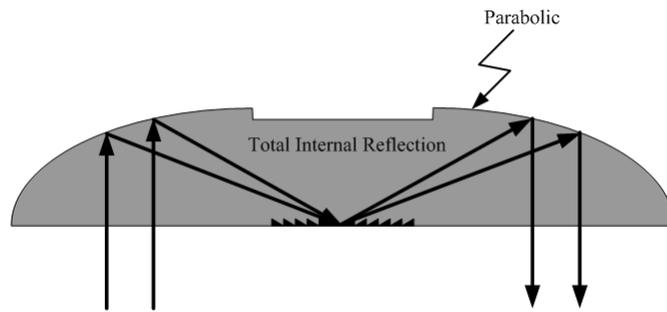


圖 111 平面積體元件光路示意圖

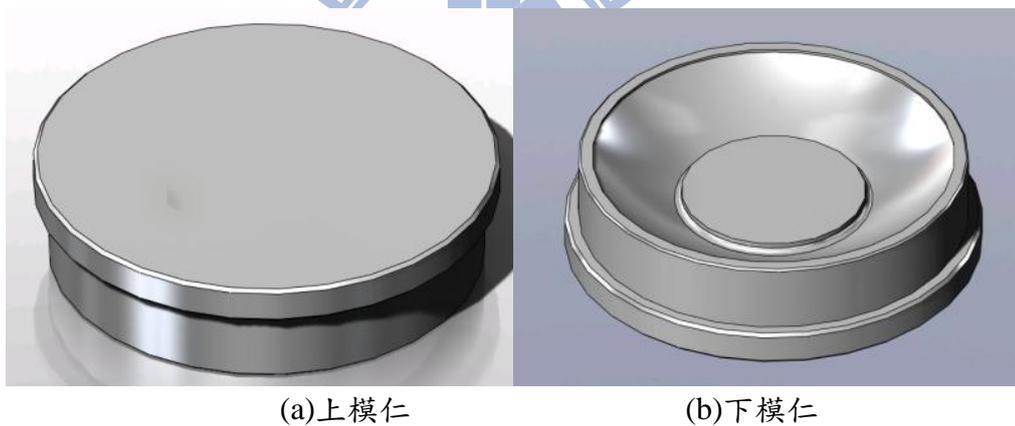


圖 112 平面積體元件之模仁示意圖

4.1.1.2. 模造製程

在模造製程中，除了需要有精密的模具外，玻璃預形體的尺寸精度亦非常重要。合適的預形體可提高玻璃模造技術的成品良率。預形體設計需同時考慮玻璃外形及體積，體積將決定是否在模造過程會有溢料或是因材料不足而產生空孔現象，體積可利用立體繪圖軟體計算，調整預形體的外形尺寸，使預形體體積為適當值。

預形體的外形將會決定模造製程中填充率是否容易達成，也就是材料是否容易成形，但預形體的形狀若不易製作，加工成本將大幅增加，例如球狀預形體成本高於平板狀預形體，故預形體外形需在加工成本與模造製程中是否容易成形做均衡考量。因為平面積體光學元件的外形一端為平面，另一端為拋物面含內孔的外形，由模造成形與加工成本的分析，預形體設計為上下兩面為平面，側邊為半徑約42 mm之球面外形，圖113顯示平面積體微光學元件外形及其體積計算，以此體積數值做為玻璃預形體體積。

N-BK7玻璃材料之轉化點溫度約為557 °C，經由初始的參數條件測試得知，模造溫度在690 °C以下無法成形，故選用模造實驗成形溫度範圍為690 – 750 °C，模造力量為0.25 – 2.75 kN區間進行分析，並在腔體為真空環境下完成玻璃模造製程，成形歷程參數資料如圖114及表16所示。玻璃元件宜在均溫的狀態下進行模造製程，隨著玻璃元件幾何形狀的尺寸，會對保溫時間作調整，元件愈大，需要愈長的保溫時間來讓預形體內部溫度均勻。



圖 113 預形體體積計算

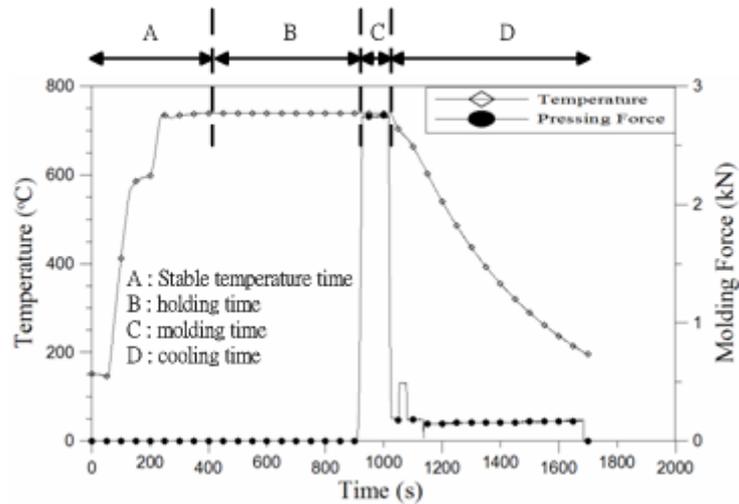


圖 114 模造成形歷程

表 16 模造參數

參數	數值
溫度	750 °C
模造力量	2.75 kN
保溫時間	500 秒
環境	真空
模造時間	30 分鐘

4.1.2 結果與討論

玻璃元件因降溫而收縮後將會導致表面輪廓的變化，故調整模造加工參數，將輪廓量測結果與設計值比對，進行模仁輪廓的補償修整，為取得精確的量測結果，使用精密表面輪廓儀(Talysurf PGI 2540, Taylor Hobson公司)來量測。重複玻璃模造製程、輪廓量測與模仁補償等步驟，直至元件輪廓量測結果與設計值的差異在容許誤差內。

評估模造成品品質的項目之一為填充率，其定義為模仁結構的深度與完成模造製程後玻璃元件的實際深度比值，填充率不佳，將造成模仁形狀無法完全轉寫至玻璃材料，利用精密共軛焦顯微鏡測量各模造參數下的填充率，以此探討最佳的模造參數。

由圖115(保溫時間500秒以及降溫速率為26.7 °C/min)可看出隨著模造力量愈大，填充率愈佳，在模造力量為2.75 kN時，填充率已達99 %。隨著模造溫度的提高，玻璃

材料軟化程度愈高，流動性提高，因此填充率隨之升高，圖115也顯示出在750 °C時可達到99 %的填充率，但是溫度再升高，將導致玻璃元件破裂。當模造溫度過高或過低時，皆會導致玻璃元件破裂，此外，在模造製程中，將升溫至玻璃轉化點以上，因為玻璃材料中的氣體逸出或是模造腔體為氮氣環境時，將容易產生氣泡，如圖116為玻璃元件上的裂痕及氣泡現象，要解決氣泡的產生，可將腔體環境設定為真空狀態，在升溫過程中藉由不斷抽真空來降低腔體內的氣體殘留。而經過測試，調整適當的模造溫度與所搭配的模造壓力，可有效的降低裂痕產生的現象。

因平面積體光學元件相較於一般模造光學鏡片而言，體積較大，因此在保溫時間需拉長，本實驗的保溫時間設定為500秒，若保溫時間不足，將使玻璃預形體溫度不均勻，呈現外熱內冷的現象，導致模造製程時玻璃破裂。

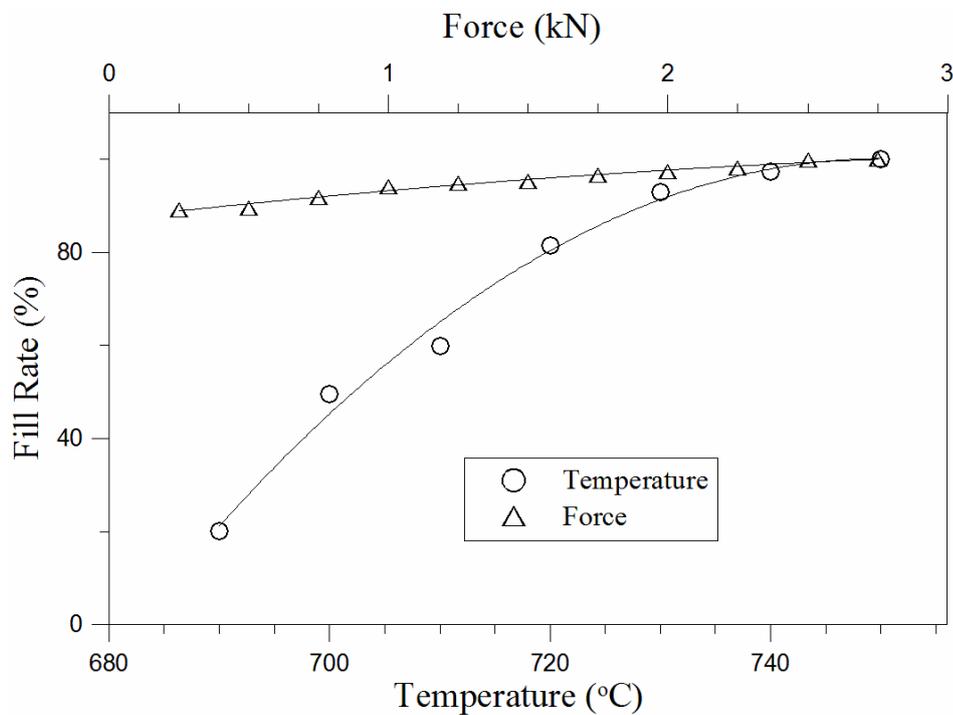


圖 115 模造溫度/力量與填充率關係



圖 116 氣泡與裂痕

圖117是平面積體光學元件的頂部輪廓圖，使用共軛焦顯微鏡取像，由圖中趨近九十度的直角及結構深度，可得知模仁的輪廓已完全轉寫至玻璃基材。圖118是使用精密三次元量床掃描拋物面輪廓，以頂部平面為參考平面，與設計值比對，輪廓誤差已在設計公差內。圖119是使用優化之後的模造參數所製作的平面積體光學元件，並利用光彈儀評估其內部應力，發現並無奇異點產生，由圖中可觀察出元件表面並無氣泡與殘留應力造成的影響。

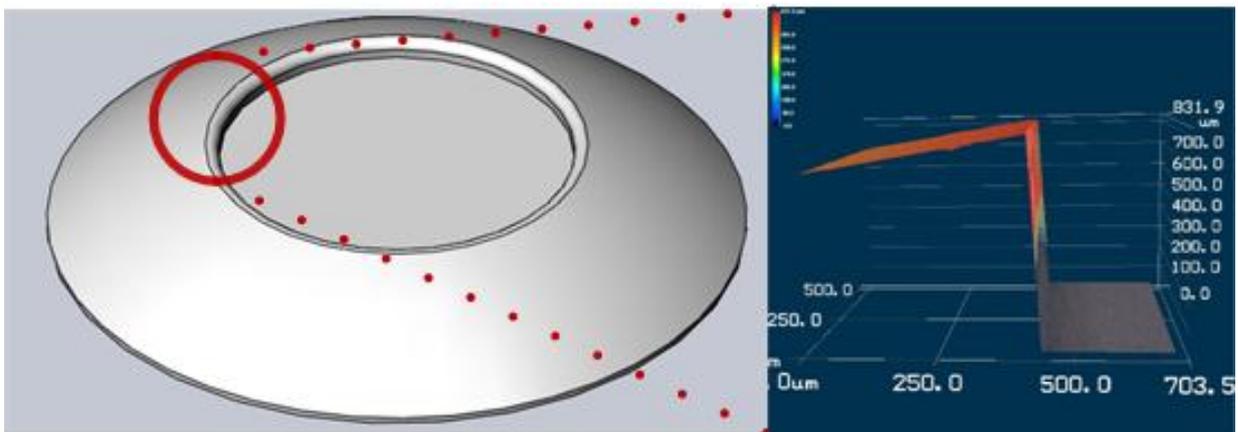


圖 117 元件頂部輪廓

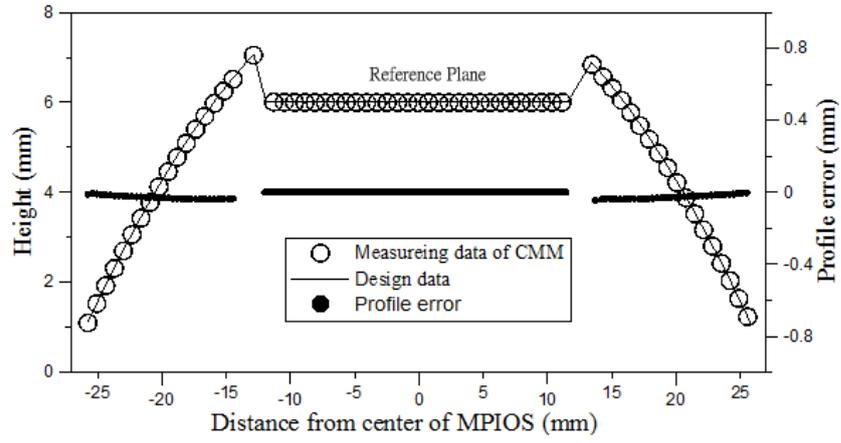


圖 118 輪廓誤差

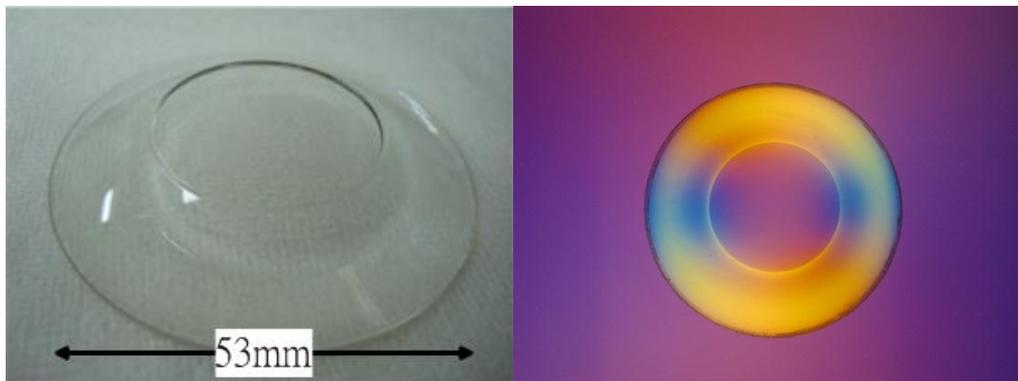


圖 119 平面積體微光學元件

4.2 非球面透鏡

在輕薄的3C產品中，所需的光學元件亦需盡量縮減尺寸，而最有效的方法即是使用非球面的鏡片取代球面鏡片群，非球面指的是除了平面、球面以外的曲面，例如橢圓面、雙曲面以及拋物面等都可稱為非球面。軸對稱非球面與球面的差異是非球面上各點的曲率都不相同。本節所探討之非球面鏡片使用在光纖耦合系統，係為一凹(R1)一凸(R2)之雙面非球面鏡片，鏡片外徑僅4.5 mm，外觀如圖120，材料使用K-VC79玻璃，降伏點 (At)為553 °C。表17為非球面鏡片規格表。

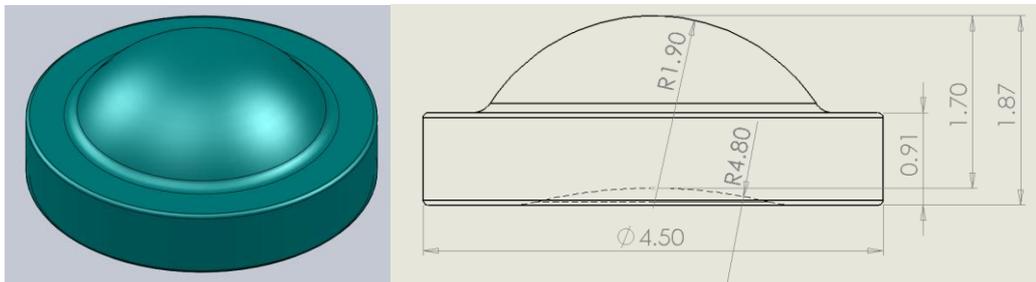


圖 120 非球面鏡片外形

表 17 非球面鏡片規格表

	數值	正公差	負公差
中心厚度	1.7 mm	0.005 mm	0.005 mm
外徑	4.5 mm	0.01 mm	0.03 mm
R1(凹)表面精度	<math>< 0.5 \mu\text{m}</math>		
R2(凸)表面精度	<math>< 0.5 \mu\text{m}</math>		

4.2.1 實驗方法與步驟

模造技術流程如第 4.1.1 節圖 110，而對於非球面鏡片的模仁製作，首先得獲得鏡片的相關非球面係數，而非球面公式可由下列式子表示：

$$z = \frac{cs^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2s^2}} + A_2s^2 + A_4s^4 + A_6s^6 + A_8s^8 \dots + A_j s^j \quad (8)$$

其中z為鏡片輪廓高度值，c是曲率，s是鏡面輪廓上任意點到光軸上的垂直高度，k是圓錐常數， A_j 是非球面係數。本節所研究的非球面鏡片，其凹面之曲率為4.8 mm，圓錐常數為5.6，而凸面之曲率為1.9 mm，圓錐常數為3.5。

利用已知之非球面設計參數，輸入超精密輪磨設備計算加工路徑，以鑽石砂輪加工碳化鎢材料，製作出凹模仁以及凸模仁。此外，利用精密定位襯套來定位凹模仁與凸模仁，使鏡片在模造製程中，上下兩面的曲面輪廓能夠符合設計公差的偏心值，而鏡片厚度則利用停止環(STOP)的厚度來控制，完成模仁的研磨拋光後，在模仁成形曲面鍍製貴金屬膜，目的是保護模仁在高溫時不與玻璃材料起反應，若起反應將導致玻璃材料沾黏在模仁上，加工完成之模仁如圖121所示，由左至右分別為停止環、定位襯套以及凸凹模仁。而組裝後之模仁如圖122，側面外觀所見之圓孔為逸氣孔，是在模造製程中，讓殘存於模仁與玻璃間之氣體能夠逸出。圖123與圖124分別是非球面凹面(R1)模仁與凸面(R2)模仁的共軛焦顯微鏡掃瞄圖形，因模仁表面皆是經過超精密鑽石輪磨加工及拋光，以及鍍製貴金屬膜層，因此在歷經雷射掃瞄輪廓過程中，會因表面精度佳以及曲面角度等關係造成部分區域雷射強度過高，而變成輪廓上的雜訊。



圖 121 非球面模仁



圖 122 模仁組裝圖

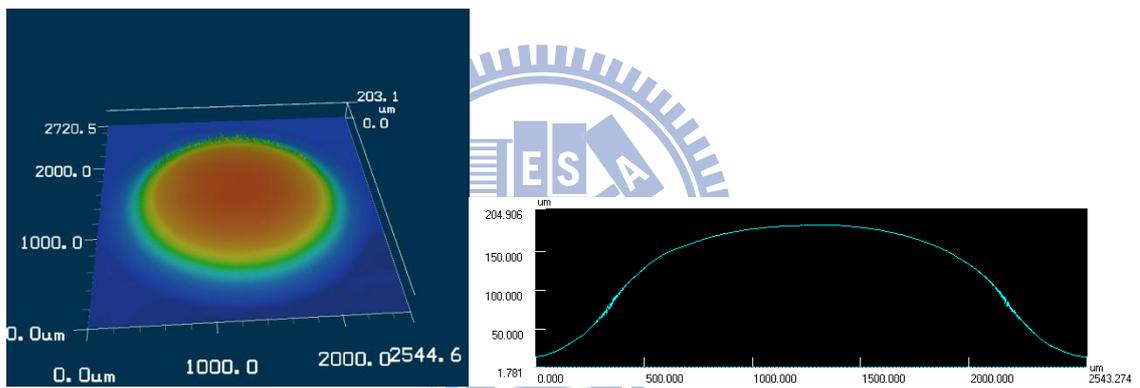


圖 123 非球面凹面(R1)模仁與其剖面輪廓

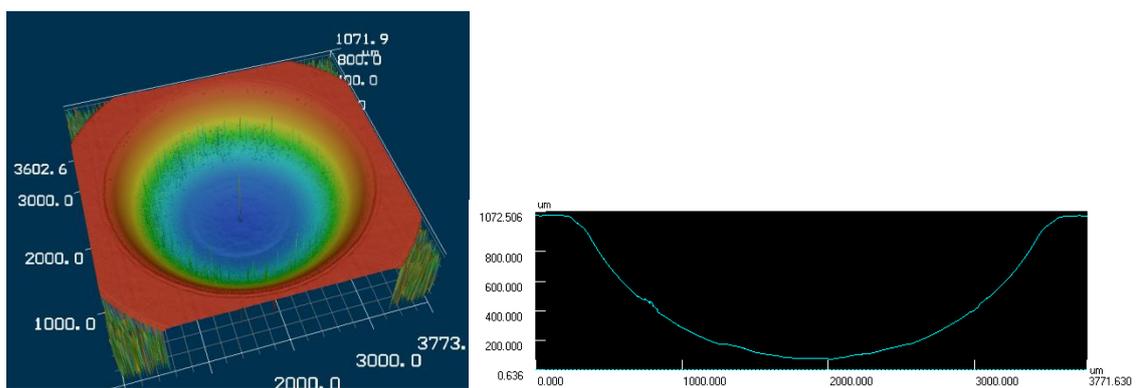


圖 124 非球面凸面(R2)模仁與其剖面輪廓

本實驗所需預形體採用圓球狀，體積經過精密的計算與加工控制，使得模造後鏡片不會有溢料或因體積不夠產生凹孔現象，圖125是加工完成之預形體，加工後之預形體需特別保護，若預形體沾染灰塵或髒污，或是將預形體置放入模仁時，徒手碰觸到預形體，將在預形體表面留下油脂，在高溫的製程中，將會導致玻璃與模仁起反應，而影響鏡片的表面精度，甚至造成模仁沾黏玻璃，而無法再次使用。因此，在模造實驗中，通常會在潔淨度較高的實驗室，例如class 10,000等級，並且實驗人員配戴手套與利用夾具來取放模仁與玻璃，以獲得高良率的玻璃鏡片。

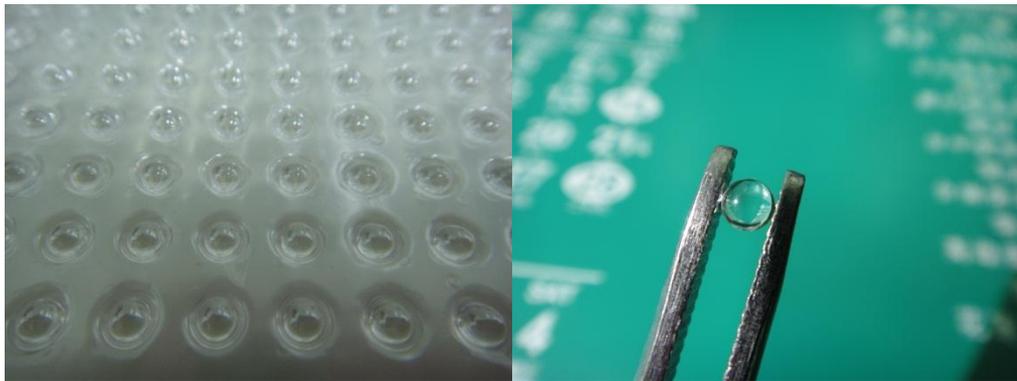


圖 125 預形體

雖然透過實驗室環境控制以及實驗人員按照標準作業流程清潔預形體與模仁，但是在模造製程中可能因參數測試或是模仁之膜層壽命的關係，玻璃材料會沾黏在模仁表面，有時候是肉眼無法明顯判斷的沾黏狀況，若不即時清潔模仁而繼續下階段模造製程時，沾黏將會更嚴重，而導致模仁無法繼續使用，因此使用高倍率光學顯微鏡或是使用共軛焦顯微鏡來觀察模仁表面狀況，如圖 126。若模仁表面沾黏，可使用壓縮氣體、酒精等方式來清潔，若嚴重沾黏，則得使用氫氟酸(HF)來腐蝕並清除沾黏玻璃。



圖 126 模仁表面檢查

在可成形符合設計規格的光學鏡片原則下，透過實驗分析獲得最低的成形溫度、最短的成形時間以及最小的成形力量，是玻璃模造技術的最佳製程。因為較低的成形溫度與較小的成形力量可延長膜層的使用壽命，而較短的成形時間可減少能源的損耗以及提高產能。因此，本節實驗依據所使用玻璃材料 K-VC79 的轉化點溫度 516°C 以及降伏點溫度 553°C ，設定初始模造溫度為 550°C ，並依據模造後玻璃鏡片的厚度、表面精度以及外形輪廓（例如邊角成形性）等特性來調整模造溫度。本論文所使用之模造設備（207 HV, Toshiba）最小驅動模造力量為 200 牛頓，因此設定模造力量為 400 牛頓，並依據上述所提及之玻璃鏡片成形特性來調整模造力量。

玻璃鏡片經歷升溫與降溫製程，因此依據不同材料以及不同的外形輪廓，冷卻時，玻璃鏡片的收縮量在鏡片曲面的各位置也不相同，因此，模仁的非球面輪廓幾乎不可能與鏡片的非球面輪廓相同，故在模造製程中，需要依據鏡片曲面各位置的收縮量，利用鑽石輪磨技術來對模仁輪廓進行補償，使得模造製程後的玻璃鏡片輪廓符合光學設計值。

4.2.2 結果與討論

4.2.2.1. 模造參數對鏡片尺寸的影響

在模造溫度分析，550 °C 時，模造力量使用 400 牛頓或 600 牛頓，鏡片成形性皆不佳，如圖 127，可明顯看出此時鏡片尚留有預形體的圓球狀輪廓，且雖然模造力量相差 200 牛頓，但外形差異不大，因此可得知此時模造溫度尚不足，因此玻璃材料軟化程度未達到適合成形的溫度，因此以 5 °C 為單位，將模造溫度往上修正，直至模造力量調整時，鏡片厚度有明顯差異。

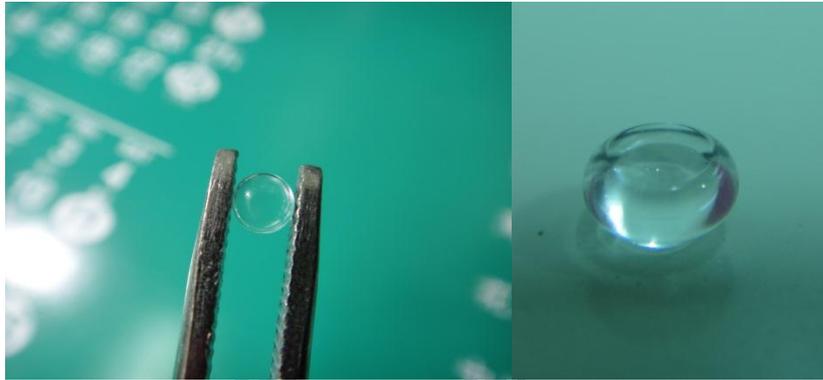


圖 127 模造溫度不足之鏡片

在溫度 565 °C 時，不同的模造力量，其厚度值有明顯差異，例如模造力量為 400 牛頓時，其厚度為 1.82 mm，而模造力量為 600 牛頓時，其厚度為 1.75 mm，但此時鏡片內部有裂痕出現，如圖 128，其原因是模造溫度尚不足，因此預形體中心與外圍存有溫度差，故有內部裂痕出現，此時可透過延長保溫時間使預形體溫度均勻，將保溫時間由 60 秒延長至 90 秒，但內部裂痕依然出現，再延長至 180 秒時，裂痕仍舊出現，因此可知模造溫度仍未達理想值，所以雖然延長保溫時間仍無法解決裂痕問題。

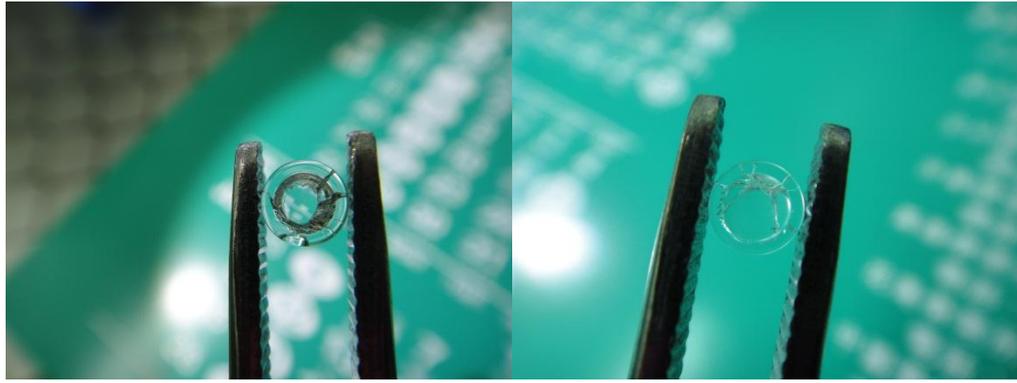


圖 128 鏡片內部裂痕

再將模造溫度以 5 °C 為單位往上修正至 585 °C 時，鏡片外觀已如同設計外觀，且已無內部裂痕產生，再利用模造溫度 590 °C 確認，所成形鏡片外形亦同 585 °C 之鏡片，且因有停止環的限制，模造溫度 585 °C 以及 590 °C 之鏡片厚度皆為 1.7 mm，已符合設計值。若再將模造溫度提高到 595 °C 以上，因溫度過高，玻璃材料易與膜層反應，產生沾黏現象，使得玻璃材料沾黏在膜層表面，如圖 129 為不同沾黏情況之模仁，圖 130 顯示沾黏後非球面鏡片表面狀況。因此可得知模造溫度在 585 °C 時已達適合模造製程的溫度值。

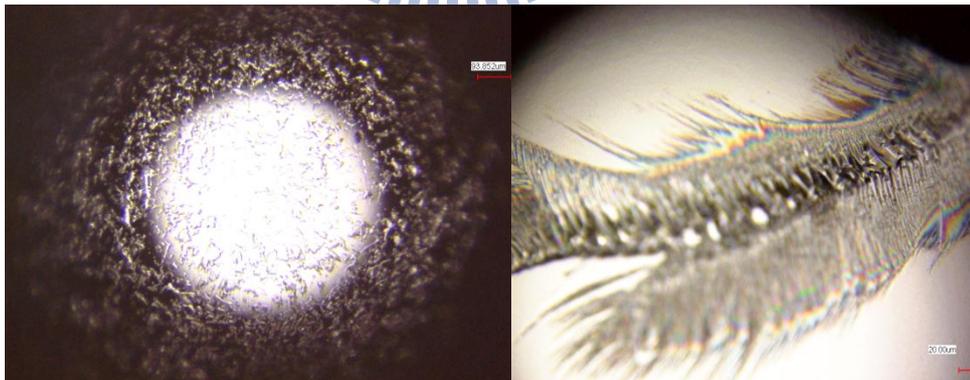


圖 129 模仁沾黏

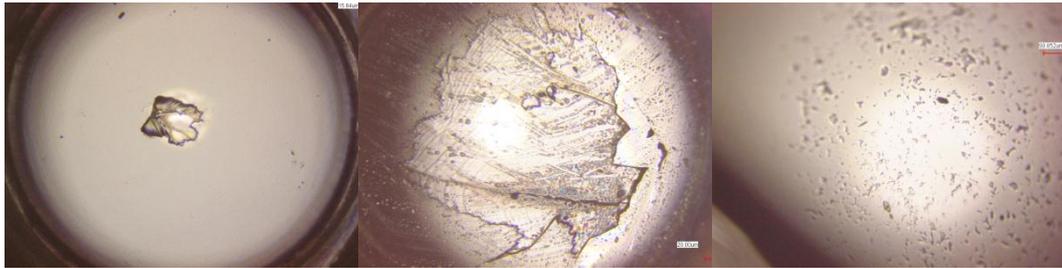


圖 130 沾黏後之玻璃鏡片表面

圖 131 是 K-VC79 玻璃材料之模造溫度及模造力量對變形量的關係(其降溫速率為 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 且保溫時間為 180 秒)，變形量以非球面透鏡的中心厚度來表示，中心厚度愈接近設計規格 $1.7\pm 0.05\text{ mm}$ ，表示玻璃預形體的變形量愈佳，因有停止環的作用，故中心厚度並不會小於設計規格下限。由圖中可看出，在溫度尚未達到適合模造的溫度時，例如 $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，需要較大的模造力量才能夠使中心厚度數值降低，甚至使用 700 牛頓的力量亦無法達到所需厚度，且在模造溫度 $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ 時，鏡片極易產生內部裂痕。在適合模造 K-VC79 玻璃材料的溫度下，如圖中的 $585\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，僅需 400 牛頓的模造壓力即可讓中心厚度達到規格需求。針對不同的鏡片外形，若使用 K-VC79 材料，可參照圖 131 的模造溫度與模造力量對中心厚度(變形量)的關係圖，再依照鏡片尺寸微調模造參數，即可獲得較佳的模造參數，大幅減少模造製程先期參數測試時間。

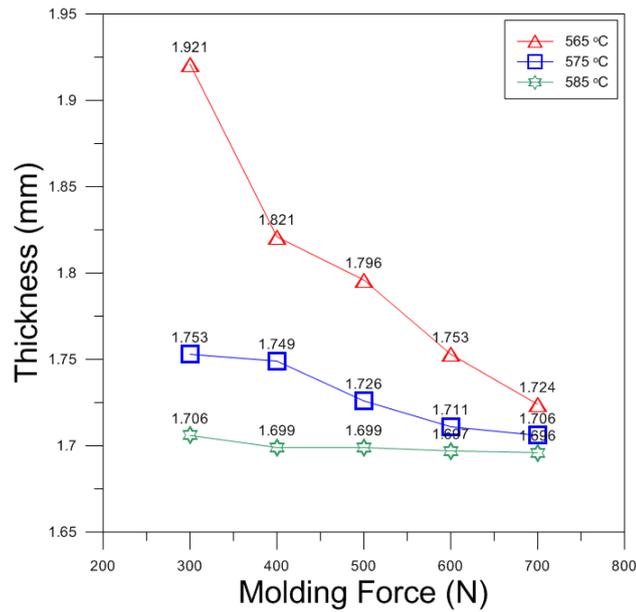


圖 131 模造溫度及模造力量與中心厚度關係圖

4.2.2.2. 模造參數對鏡片表面精度的影響

在光學系統中，除了鏡片幾何尺寸需符合設計規格外，另一個重要的評估條件即是表面精度，亦即所謂的 PV (peak to valley) 值，其定義是鏡片表面輪廓與設計值之差異，其最高波峰與最低波谷的差值，常見的是以氦氖(He-Ne)雷射之波長或公制單位來表示，例如以傳統研拋方法製作，用於成像系統之鏡片表面精度應優於 0.25λ 較佳，因氦氖雷射之波長為 632.8 nm，故 0.25λ 亦可表示為 $0.158\ \mu\text{m}$ 。而玻璃模造技術屬於量產技術，且影響變數甚多，故業界對於尺寸小的模造鏡片之表面精度僅要求小於 $0.5\ \mu\text{m}$ 即可。

當鏡片外徑與厚度之幾何尺寸符合設計值後，即可透過調整模造溫度、模造力量、保溫時間以及降溫速率來改善鏡片表面精度，使其符合鏡片規格。在模造溫度方面，在前段文章已得知溫度低於 $565\ ^\circ\text{C}$ 時，玻璃容易破裂，且溫度高於 $595\ ^\circ\text{C}$ 時會有沾黏現象，因此，在模造溫度 $570\text{-}590\ ^\circ\text{C}$ 區間，探討溫度對表面精度的影響，結果如圖 132。由圖中可看出，雖然溫度高於 $565\ ^\circ\text{C}$ 時，玻璃已不會產生破裂現象，但其表面精度相較之下偏高，隨著模造溫度再提升，玻璃軟化程度升高，流動性增加，使得玻璃預形體

更貼附模仁表面，因而表面精度也更佳。但是在 595 °C 時，因溫度太高，容易造成玻璃內的成分與膜層起反應，使得玻璃材料沾黏在膜層上。

圖 132 中亦顯示非球面凹面(R1)的表面精度較凸面(R2)的表面精度差（其模造壓力為 400 N、保溫時間為 180 s 以及降溫速率為 18.5 °C/min），導因於凹模仁及凸模仁輪廓精度的差異，在玻璃模造製程中的參數探討，只要在固定參數下，可以獲得極相近的鏡片尺寸以及表面精度即可，亦即重現性要高，而表面精度可以利用超精密鑽石輪磨技術對模仁輪廓進行補正，即可讓整體的表面精度下降，且量產玻璃模造小口徑鏡片，其表面精度僅要求小於 0.5 μm 即可。

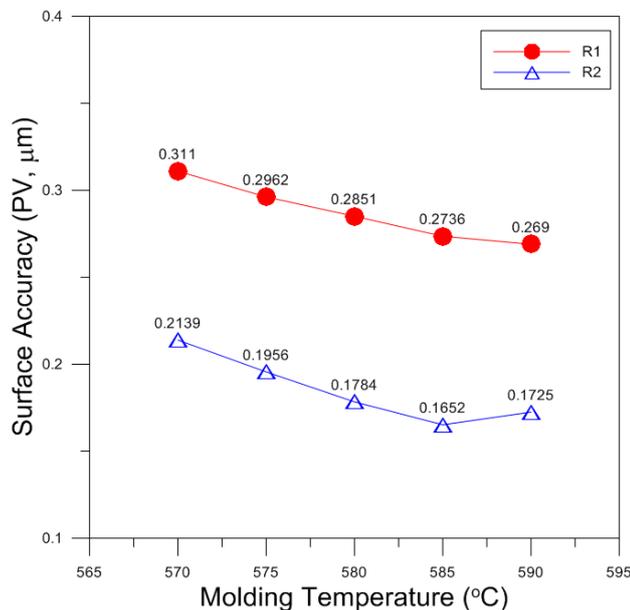


圖 132 模造溫度對表面精度的影響

針對模造力量的參數探討，選用 300、350、400、450 以及 500 牛頓，其對表面精度的影響如圖 133（其模造溫度為 590 °C、保溫時間為 180 s 以及降溫速率為 18.5 °C/min），因在鏡片幾何尺寸已達到設計規格的條件下測試模造力量的影響，而鏡片幾何尺寸係由停止環所控制(可參考圖 122 模仁組裝圖)，過大的模造力量會被停止環吸收，因此，由圖 133 可看出，模造力量對表面精度的影響不大。

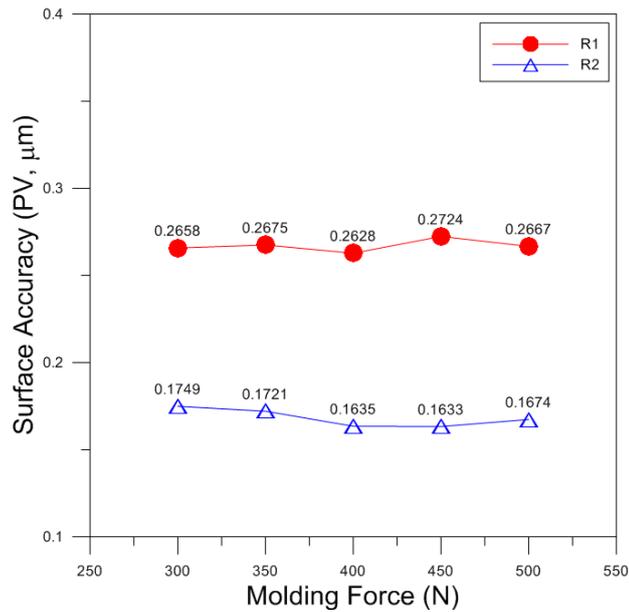


圖 133 模造力量對表面精度的影響

保溫時間選擇 60、120 以及 180 秒進行測試，利用燈管加熱碳化鎢模仁後，熱傳導進入模仁內部的玻璃預形體，使預形體均溫之後進行模造製程，隨著保溫時間增長，模仁以及預形體的溫度愈均勻，由圖 134（其模造溫度為 590 °C、模造壓力為 400 N 以及降溫速率為 18.5 °C/min）可看出，在保溫時間 60 秒時，表面精度較差，因其溫度均勻度較差的緣故，而保溫時間在 120 秒至 180 秒之間，表面形狀精度的變化趨緩，已達適合模造的均溫程度，若再拉長保溫時間，表面形狀精度可微幅降低，但會增加整體模造週期時間，因此選擇保溫時間 180 秒作為製程參數。

模造系統降溫速率設定為 15、30、45 與 60 L/min 之冷卻氮氣流量，亦即 18.5、26.7、31.8 與 37.1 °C/min 之降溫速率。其對表面精度的影響如圖 135（其模造溫度為 590 °C、模造壓力為 400 N、保溫時間為 180 s）所示。降溫速率愈快，玻璃冷卻收縮愈快，因此表面形狀精度會較差，緩慢的降溫速率，雖然可以使得玻璃鏡片輪廓較穩定的收縮，獲得較佳的表面形狀精度，但也導致整體模造週期時間拉長，例如降溫速率 37.1 °C/min 的模造週期較使用 18.5 °C/min 降溫速率的模造週期長約 11 分鐘。

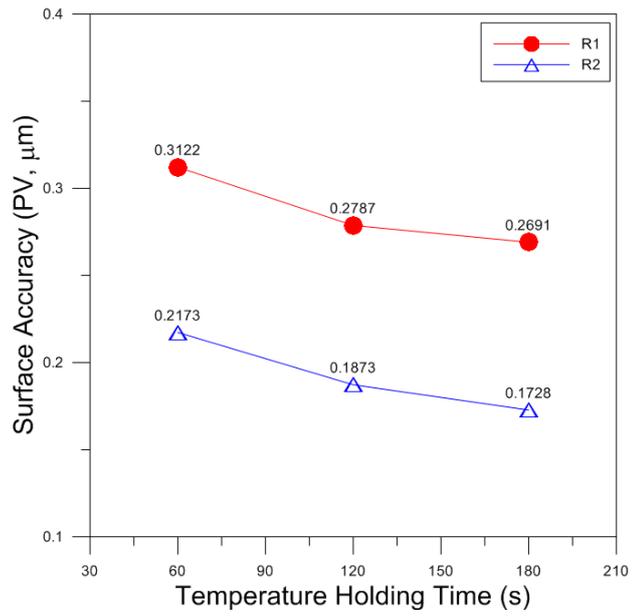


圖 134 保溫時間對表面精度的影響

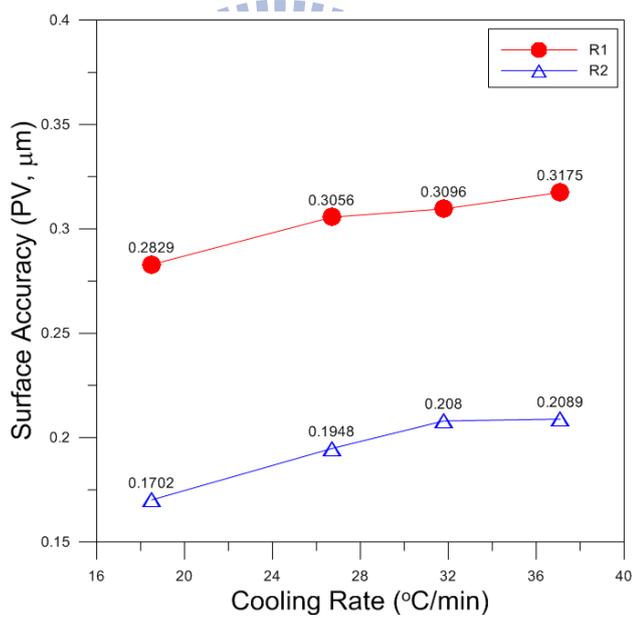


圖 135 降溫速率對表面精度的影響

綜合以上實驗分析，成形非球面鏡片之最佳參數為：

模造溫度：585 °C

模造力量：400 牛頓

保溫時間：180 秒

降溫速率：15 L/min (18.5 °C/min)

模造製程歷程如圖 136 所示，經由以上模造參數所成形之鏡片如圖 137 所示，可看出邊緣輪廓已完全成形，並無圓角產生，其鏡片外徑、厚度以及表面精度皆符合設計規格，利用自由曲面輪廓量測儀(UA3P)量測表面精度，其第一面(R1)以及第二面(R2)表面精度分別為 0.2214 μm 及 0.1463 μm ，如圖 138 與圖 139，已達到設計規格要求需小於 0.5 μm 。

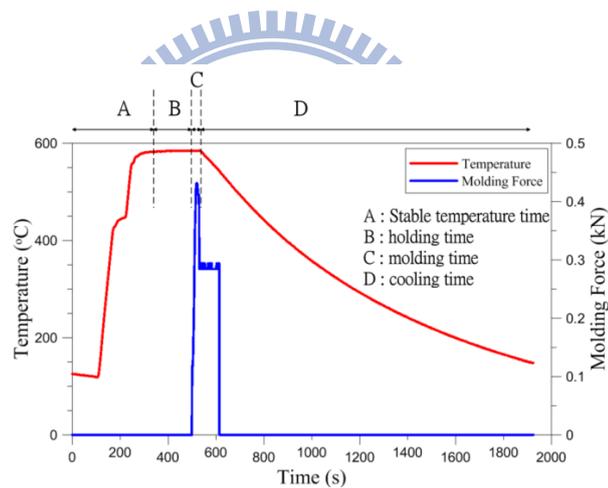


圖 136 非球面鏡片模造歷程



圖 137 非球面鏡片

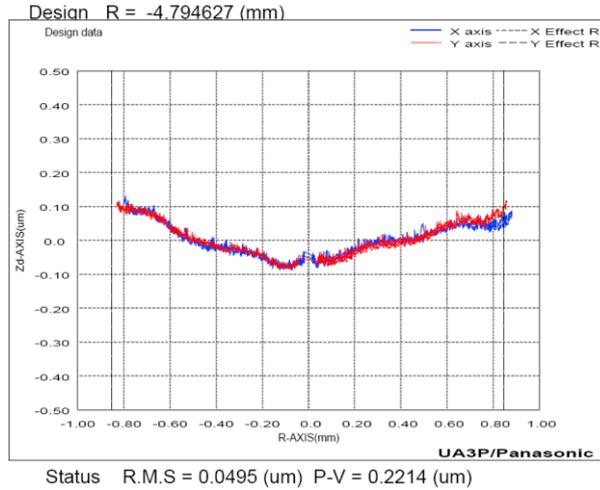


圖 138 R1 表面精度

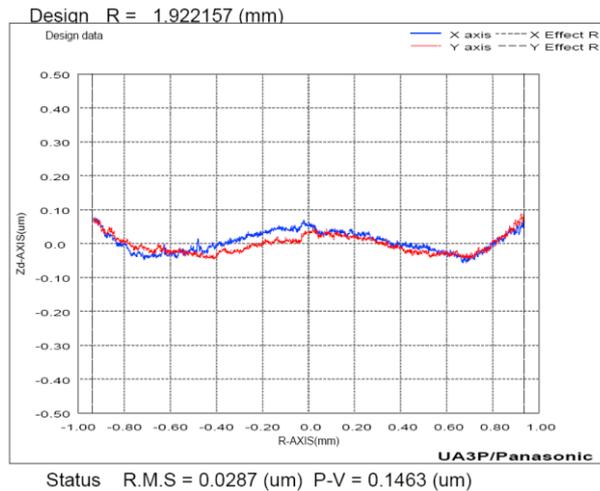


圖 139 R2 表面精度

因玻璃模造技術為量產型技術，因此製程穩定性相當重要，穩定性高等於產品良率高，因此以同樣的製程參數連續模造七組鏡片，鏡片外徑以及中心厚度皆符合規格，如圖 140 與圖 141 中的上下兩條橫線即為鏡片公差範圍，其標準差可分別控制於 $0.5 \mu\text{m}$ 及 $2.0 \mu\text{m}$ 內。而表面精度皆小於 $0.5 \lambda (0.316 \mu\text{m})$ ，量測結果如圖 142。

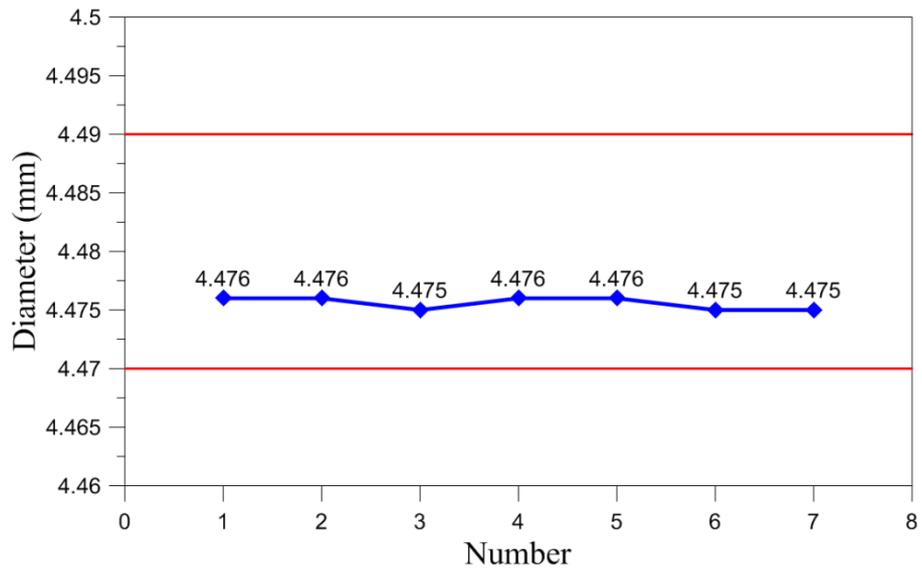


圖 140 外徑重複性

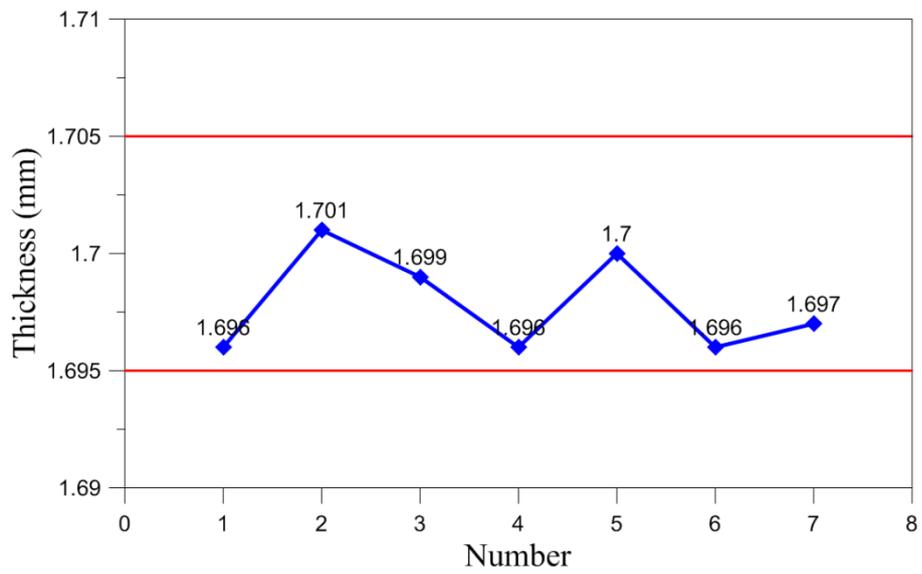


圖 141 中心厚度重複性

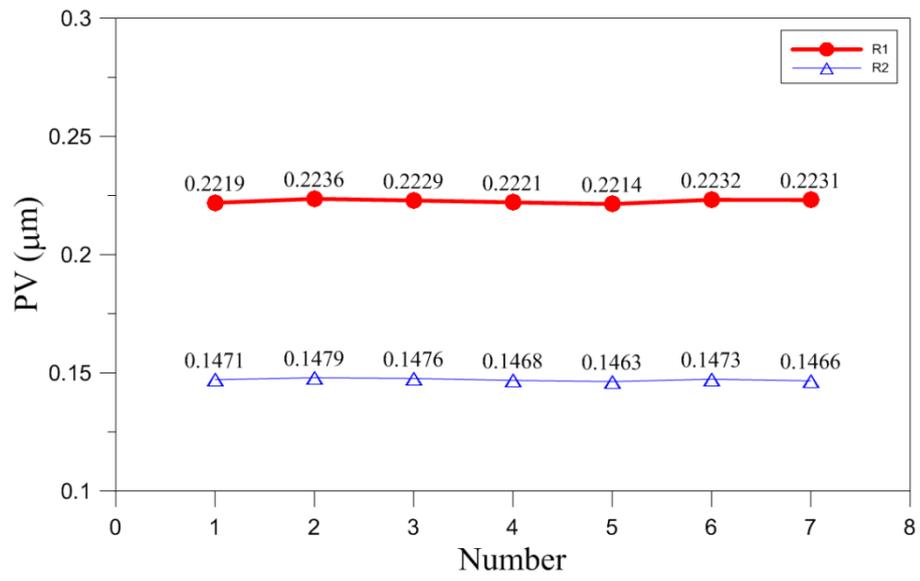
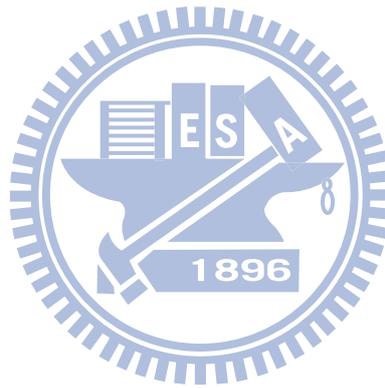


圖 142 表面精度重複性



4.3 菲涅耳透鏡

菲涅耳透鏡(Fresnel Lens)是在 1819 年由法國物理學家菲涅耳(Augustin-JeanFresnel)所設計，與傳統透鏡比較，菲涅耳透鏡具有焦距短、光通量高、重量輕、使用材料少、容易設計、可作為大型聚光裝置且具有良好的聚光效果等優點[47]，圖 143 是具有相同功能的一般透鏡與菲涅耳透鏡比較，可看出菲涅耳透鏡體積遠小於一般透鏡。

近年來因太陽能發電產業興起，而太陽能發電方法之一即為集光型太陽能電池，利用晶片上覆蓋聚光型鏡片，使太陽光聚焦在晶片上，如此可減少佔太陽能電池中成本較高的晶片面積，在這應用上，菲涅耳透鏡極適合擔任聚光型鏡片的角色，因其可大幅減少模組的體積。

但是因太陽能電池所使用的鏡片需長時間暴露在陽光下，所以需有較高的抗熱變形性，故使用玻璃材料較塑膠材料適合，然而因菲涅耳透鏡具有微結構以及精密曲面，不管是模仁或是直接加工菲涅耳透鏡，在製作上都極其困難，所以本研究以先前模造微結構以及精密曲面的經驗與技術資料，在本節實驗中進行菲涅耳透鏡的製程研究。

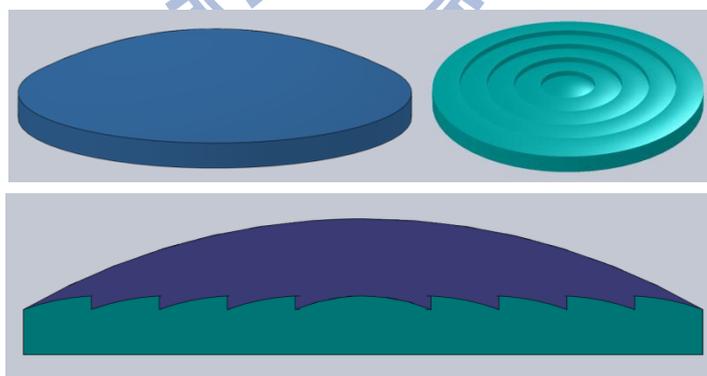


圖 143 菲涅耳透鏡[47]

4.3.1 實驗方法與步驟

玻璃模造實驗流程可參照圖 110，先利用模擬軟體建立菲涅耳透鏡的表面輪廓，因菲涅耳透鏡的輪廓，若使用超精密鑽石輪磨設備搭配一般外形的鑽石砂輪，將會有加工

上的幾何干涉問題，因此，砂輪需修整如圖 144 的外形方可加工。本研究所設計的菲涅耳透鏡是等間距結構，底面設計為平面，圖 145 是加工後的模仁，模仁材料是碳化鎢，表面鍍製貴金屬膜(Pt-Ir)，模仁外徑為 15 mm。圖 146 是利用雷射共軛焦顯微鏡掃描模仁的立體輪廓。

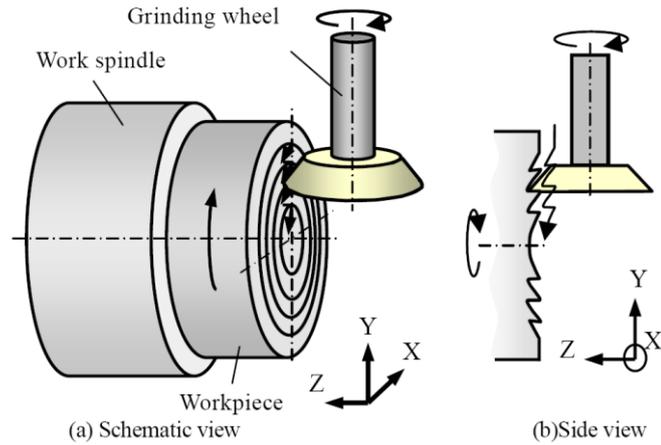


圖 144 特製鑽石砂輪外形示意圖[71]



圖 145 菲涅耳透鏡之模仁

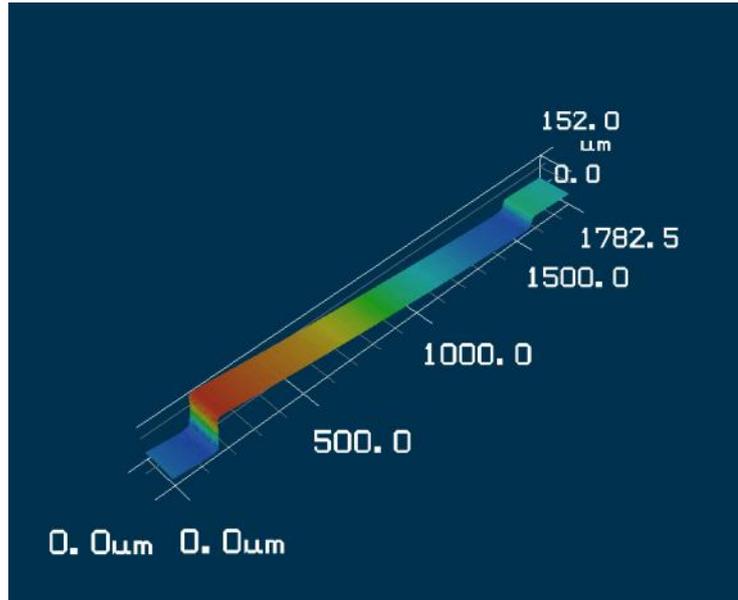


圖 146 菲涅耳透鏡模仁輪廓

本節實驗所使用的玻璃材料是 K-CSK120，其轉化點溫度 489 °C 以及降伏點溫度 525 °C。依據本論文前述章節的經驗與分析結果，因本節菲涅耳透鏡的外徑為 15 mm，遠大於上節非球面透鏡的外徑 4.5 mm，因體積較大，故設定模造實驗溫度為 535 °C，因所使用模造設備最低驅動力為 200 牛頓，為避免過大力量造成模仁及預形體受損，所以模造力量設定為 400 牛頓，保溫時間則設定為 60 秒。圖 147 是菲涅耳透鏡所使用的預形體，外形為扁平狀，雙面為曲面輪廓，重量為 1.53 ± 0.05 克。



圖 147 菲涅耳透鏡預形體

圖 148 是菲涅耳透鏡的模造製程示意圖，將預形體曲率半徑較小的一面朝向菲涅耳結構模仁，因曲率半徑較小，所以製程中，預形體中心部分會先成形，隨著模仁逐漸下壓，預形體依序由中心往外成形，最後形成菲涅耳透鏡。若預形體曲率設計過大，造成模造製程初步階段中，模仁與預形體的接觸面積過大，而非上述的依序往外成形，將會使得菲涅耳透鏡微結構極易碎裂。

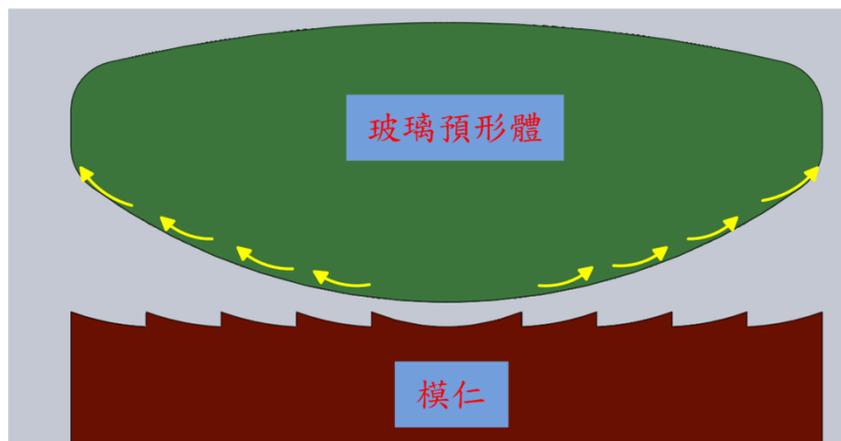


圖 148 菲涅耳透鏡模造製程示意圖

4.3.2 結果與討論

在模造實驗溫度 535 °C 時，檢視模造結果，鏡片表面幾乎沒有形成菲涅耳結構，且整體外形幾無變化，如圖 149，可推斷此時的模造溫度尚不足以讓玻璃材料軟化，因此逐步提高模造溫度並觀察模造後鏡片狀況，來分析 K-CSK120 製作菲涅耳透鏡的最佳模造溫度。

玻璃軟化程度隨著模造溫度升高而上升，因此在適合模造的溫度範圍內，每個溫度點皆有其上限的模造力量，超過模造力量的容許值，鏡片就會破裂，如圖 150，此時可選擇調高模造溫度或是降低模造力量，來避免模造力量超過容許值。若觀察到菲涅耳透鏡結構尚未完全成形，則調高模造溫度，若結構已成形，則調低模造力量，以此來降低鏡片破裂的機率。



圖 149 模造溫度不足結果

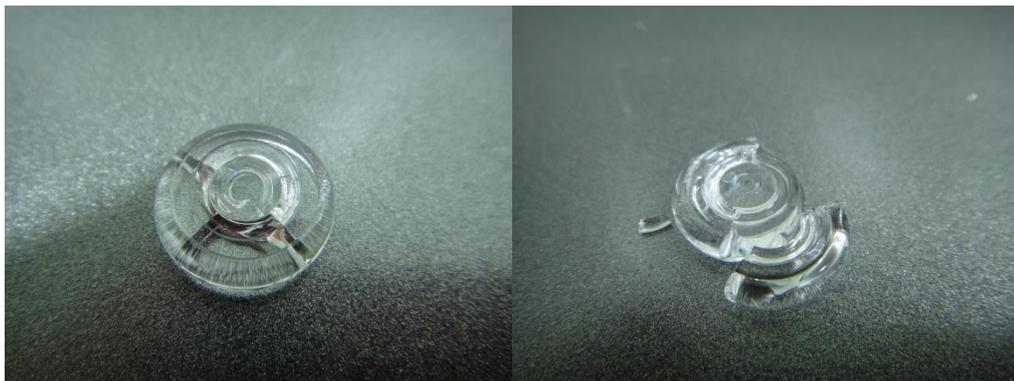


圖 150 玻璃破裂

若發生玻璃沾黏現象，多是模造溫度過高造成的結果，因溫度過高，玻璃材料中的成分與膜層起反應，造成玻璃材料沾黏在模仁上，如圖 151 所示，若屬輕微沾黏，尚可以清潔，若無法將沾黏玻璃清除，則需將模仁表面重新處理，甚至需再次經過超精密輪磨加工後再鍍膜。圖 152 是透鏡黏著在套筒上，導因於模造溫度過高且模造力量過大。

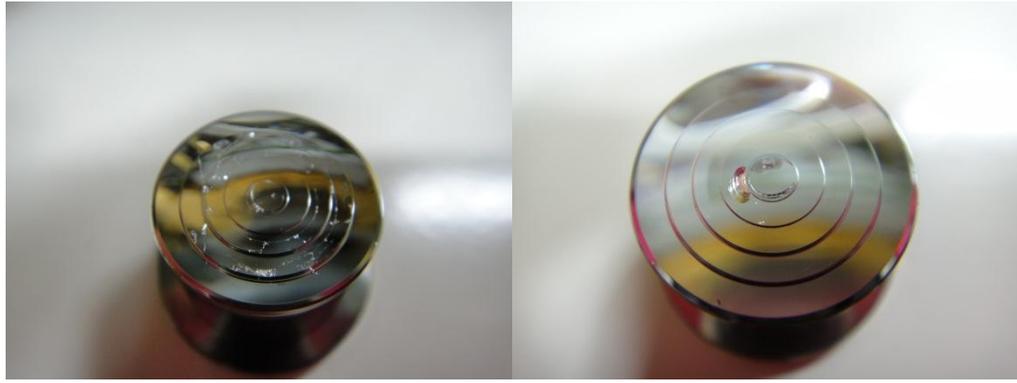


圖 151 模仁沾黏



圖 152 玻璃沾黏現象

菲涅耳透鏡不易製作的原因除了模仁結構的加工製程複雜外，因菲涅耳透鏡包含整體的曲面輪廓以及上方的微結構圖形，因此在模造製程中，需要顧及曲面的成形性，亦得留意微結構成形性。如圖 153 顯示，外形曲面輪廓大致已成形，但其上的微結構卻破裂，推測其原因為使用的降溫速率 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (30 L/min 之冷卻氮氣流量) 過快所導致，因此調整降溫速率為 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (15 L/min 之冷卻氮氣流量)，則可大幅減少微結構破裂的機率。



圖 153 微結構破裂

本論文以填充率來評估菲涅耳透鏡的成形品質，填充率是指菲涅耳透鏡溝槽深度與模仁高度的比值，因本實驗中，模仁設計是溝槽等間距的方式，亦即愈外圍溝槽深度愈深，且如圖 148 所示，菲涅耳透鏡模造製程是由中心向兩側成形，因此，靠近中心溝槽的填充率會大於外圍溝槽的填充率，故選用外側溝槽的填充率來表示成形品質。圖 154 是針對 K-CSK120 玻璃材料之模造溫度及模造力量與填充率的關係圖，其保溫時間為 180 s 以及降溫速率為 18.5 °C/min) 可看出在溫度 560 °C 時，填充率皆約為 99 %，隨著模造溫度降低，或是模造力量降低，填充率亦隨之大幅降低。

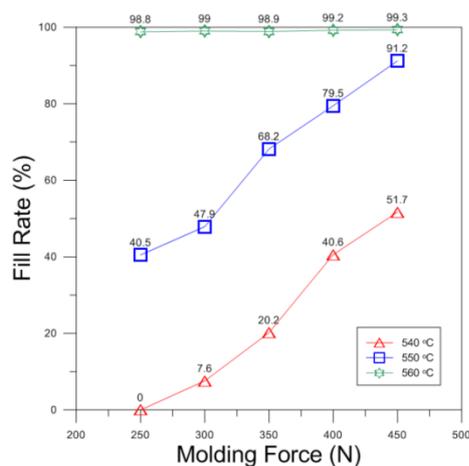


圖 154 模造溫度及模造力量與填充率關係圖

透過以上的實驗分析，獲得最佳的模造參數為：

模造溫度：560 °C

模造力量：300 牛頓

保溫時間：180 秒

降溫速率：15 L/min (18.5 °C/min)

模造製程歷程如圖 155 所示，模造製程週期為 32 分鐘。圖 156 是利用最佳參數所完成之菲涅耳玻璃透鏡，其外徑為 15 mm。圖 157 則為其雷射共軛焦顯微鏡掃瞄影像。

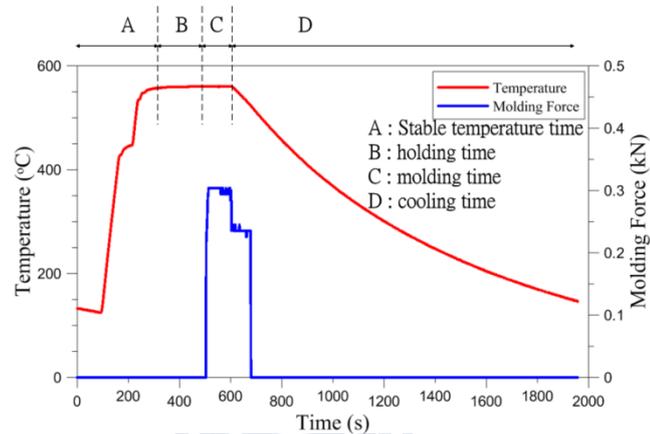


圖 155 菲涅耳透鏡模造歷程



圖 156 菲涅耳玻璃透鏡

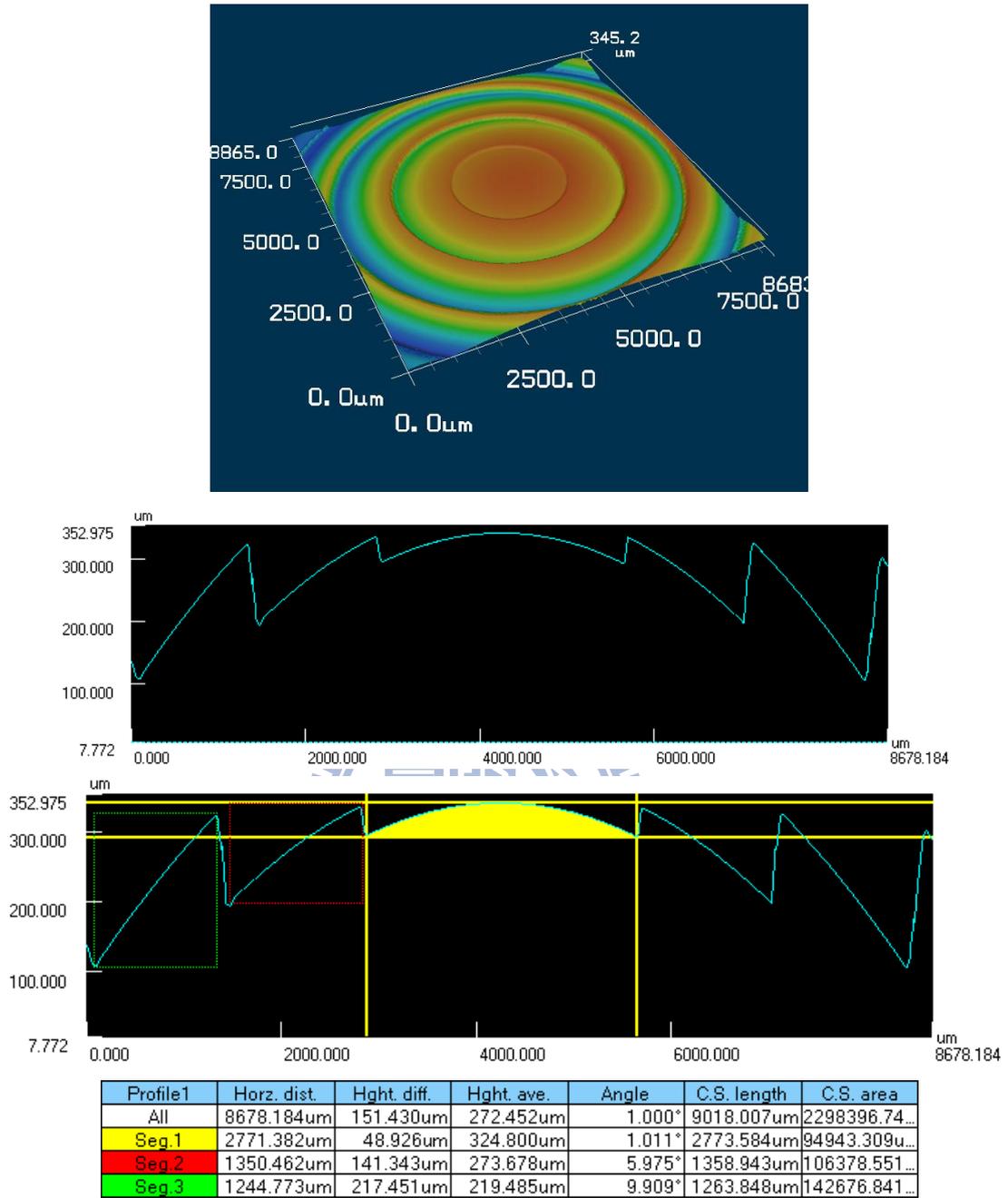


圖 157 菲涅耳透鏡雷射共軛焦顯微鏡影像

五、結論

精密玻璃模造技術適合用於量產高精度光學元件，但因其參數調校極為依賴研究人員經驗，因此本論文透過玻璃模造技術成形微結構與精密曲面的研究，包括微柱狀透鏡陣列、雙面微透鏡陣列、光學微結構陣列、平面積體光學元件以及非球面透鏡，最後並利用上述各實驗結果，歸納元件成形特性，完成具備曲面與微結構特徵的菲涅耳透鏡。

本論文透過玻璃模造相關技術在光學元件上的應用研究，針對各步驟相關技術作探討，例如模仁設計與製作、預形體設計與製作以及模造初始測試參數如何設定，尤其透過分析各模造參數與玻璃元件品質特徵的關係，建立眾多實驗圖表，且透過實驗成品，詳細分析破裂、未成形以及沾黏的成因，並提出解決方法，最後並完成微結構以及精密曲面多項光學元件，相信本論文當中所探討之各項參數與現象，對於相關領域學者有相當大的助益。

茲將本論文所得結論總結如下：

1. 精密玻璃模造技術之模仁多使用碳化鎢材料並透過超精密鑽石輪磨技術製作，然而鑽石輪磨技術針對複雜性或微結構輪廓有其加工限制，故本論文除了使用鑽石輪磨技術所加工之模仁外，亦探討其他製程的加工特性，使玻璃模造之模仁加工法不侷限在精密鑽石輪磨製程，本論文所探討之製程如：
 - (1) 透過線切割放電加工技術在導電的碳化鎢材料上加工微溝槽，以此製程來成形微柱狀透鏡陣列。
 - (2) 利用雷射加工技術來製作微結構陣列，因雷射加工金屬材料會產生再鑄層，故選擇碳化矽作為模仁材料，以避免再鑄層的產生。
 - (3) 利用電解拋光技術在結構尖角之材料移除率較高且對不銹鋼材料電解效果較佳的特性，先透過雷射加工技術在不銹鋼材料上製作六角形/矩形結構，之後利用電解拋光技術來改變微結構輪廓，完成微透鏡/微柱狀透鏡陣列模仁，且雷射加工過程所產生的再鑄層，也在電解拋光製程中被移除。

2. 隨著玻璃材料不同，模造溫度或保溫時間等參數也不相同，本文探討 N-FK5、鈉玻璃(Soda lime glass)、N-BK7、K-VC79 以及 K-CSK120 等玻璃材料的成形特性，並藉由實驗結果建立模造製程相關參數圖表，並獲得以下成果：
- (1) 在封閉式玻璃模造實驗中，得到模造成形溫度皆落於降伏點溫度 30-35 °C 區間之結論，日後使用相同材料，只需依照元件尺寸或外形輪廓微調模造參數，即可快速分析出適當的模造製程參數，大幅減少相關研究所需時間。
 - (2) 探討微結構光學元件以及精密曲面光學元件，元件外徑尺寸由 4.5 mm 至 53 mm，在大尺寸的元件成形方面，需增加保溫時間，使玻璃預形體溫度均勻，降低元件破裂的機率，且減緩降溫速率，可減少折射率的變化量。
3. 本文亦分析各模造參數對元件特性的影響，模造參數包括模造溫度、模造壓力、保溫時間、降溫速率、一段或二段的成形方式、腔體為真空或氮氣環境等，並透過微結構及精密曲面的元件成形，探討各參數對元件的幾何輪廓及破裂分析和沾黏成因進行研究，並提出相關解決方法如下：
- (1) 在模造製程中，提高模造溫度、降低模造力量或是減少降溫速率，可有效的解決元件破裂現象，而降低模造溫度可減少沾黏現象。
 - (2) 在模造環境方面，充填氮氣的狀態下，模仁以及玻璃預形體的受熱方式較多，因此溫度較高且成形性較佳，然而真空模造環境可避免元件產生氣泡，因此，可藉由增加上下模座之間距、增加保溫時間以及提高模造溫度，使玻璃元件在真空模造環境成形。
 - (3) 模造溫度為製程中最重要參數，可依照材料商所提供之材料特性表規劃初始模造溫度，若玻璃元件尺寸大於 15 mm，可增加保溫時間至 180 秒以上，使玻璃元件溫度更均勻，降低破裂現象的產生。
 - (4) 降溫速率慢可降低玻璃元件的折射率變化量，且可減少元件因急速冷卻收縮而破裂的現象，且降溫速率慢可使玻璃元件的形狀精度更佳，對小尺寸

非球面透鏡而言，使用 18.5 °C/min 之降溫速率可獲得較穩定的鏡片品質。

4. 使用開放式模造製程完成以下元件：

- (1) 利用線切割放電加工技術可加工高硬度材料，製作碳化鎢模仁，以 N-FK5 材料完成外徑 20 mm、厚度 5 mm，其上有高度 234 μm 、曲率 3.42 mm 之微柱狀透鏡陣列，並利用雷射光束驗證其經過微柱狀透鏡陣列之後，原為圓形光斑之雷射輪廓轉變為線形雷射輪廓。
- (2) 利用雷射技術非接觸加工的特性製作微結構陣列於碳化矽模仁，以鈉玻璃完成鏡片外徑 20 mm、厚度 1.2 mm，其上具有曲率半徑為 851 μm ，寬度與高度分別為 460 μm 及 52 μm ，透鏡間距為 700 μm 之雙面微透鏡陣列。
- (3) 使用雷射加工不銹鋼模仁，經電解拋光技術去除再鑄層，以鈉玻璃完成曲率為 58.1 μm ，高度為 39.3 μm 之微透鏡陣列以及曲率 79.8 μm ，高度為 37 μm 之微柱狀鏡陣列，其陣列範圍皆為 10 mm*10 mm。

5. 使用封閉式模造製程，模仁材料皆使用碳化鎢，且利用超精密鑽石輪磨技術加工，完成以下元件：

- (1) 在最佳模造溫度 750 °C 時，完成外徑 53 mm、高度 6 mm，具有拋物面結構之 N-BK7 平面積體光學元件。
- (2) 使用 K-VC79 玻璃材料，於最佳模造溫度 585 °C 時，完成外徑 4.47 mm，表面精度小於 0.5 λ (0.316 μm) 之非球面透鏡。
- (3) 使用 K-CSK120 玻璃材料，在最佳模造溫度 560 °C 時，完成填充率達 99 % 之菲涅耳透鏡，其外徑為 15 mm。

雖本論文已針對微結構以及精密曲面進行一系列的探討，但隨著科技發展，光學元件的功能、複雜性以及特殊性日益加增，因此未來尚有許多研究題目可繼續發展，例如更大口徑的微結構或精密曲面透鏡，或是探討應用於不同光穿透率波段的玻璃材料製程研究，以及特殊材料的模造加工，包括應用於紅外線之材料等，且在生醫領域，亦可透過玻璃模造技術製作生醫晶片等載具，或是在高溫模造領域對石英玻璃的成形進行探討，眾多精密玻璃模造技術可應用的題目，就留待日後逐一進行研究。

參考文獻

1. 儀科中心, 光學元件精密製造與檢測, 初版, 新竹: 儀科中心, 2007.
2. 方治偉, 玻璃模造技術於微光學陣列元件之成形研究, 國立交通大學機械所碩士論文, 2011.
3. Z. D. Popovic, R. A. Sprague, and G. A. N. Connell, "Technique for monolithic fabrication of microlens arrays", Applied Optics, Vol.27, p.1281, 1988.
4. M. C. Hutley, "Optical Techniques for the Generation of Microlens arrays", Journal of Modern Optics, Vol.37, p.253, 1990.
5. H. Yang, C. K. Chao, M. K. Wei, and C. P. Lin, "High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process", Journal of micromechanics and microengineering, Vol.14, p.1197, 2004.
6. H. H. Yang, C. P. Lin, C. K. Chao, and C. T. Pan, "Hexagonal microlens array fabricated by proximity printing via UV lithography", Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, p.356, 2003.
7. M. He, X. G. Yuan, N. Q. Ngo, W. C. Cheong, and J. Bu, "Reflow Technique for the Fabrication of an Elliptical Microlens Array in Sol-Gel Material", Applied Optics, Vol.42, No.36, p.7174, 2003.
8. C. S. Lee and C. H. Han, "A novel refractive silicon microlens array using bulk micromachining technology", Sensors and Actuators A, Vol.88, p.87, 2001.
9. W. Royall Cox, Ting Chen, and Donald J. Hayes, "Micro-Optics Fabrication by Ink-Jet Printing", Optics & Photonics News, Vol.12, p.32, 2001.
10. W. R. Cox, T. Chen, D. W. Ussery, D. J. Hayes, and R. F. Hoenigman, "Microjet printing of anamorphic microlens arrays", Proceedings of SPIE, Vol.2687, p.89, 1996.
11. S. K. Lee, K. C. Lee and S. S. Lee, "A simple method for microlens fabrication by the modified LIGA process", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.12, p.334, 2002.
12. J. Yao, J. Su, J. Du, Y. Zhang, F. Gao, Y. Guo, and Z. Cui, "Coding gray-tone mask for refractive microlens fabrication", Microelectronic Engineering, Vol.53, p.531, 2000.
13. J. Yao, Z. Cui, F. H. Gao, Y. X. Zhang, Y. K. Guo, C. L. Du, H. J. Zeng, and C. K. Qiu, "Refractive micro lens array made of dichromate gelatin with gray-tone photolithography", Microelectronic Engineering, Vol.57-58, p.729, 2001.
14. J. Yao, D. Uttamchandani, Y. X. Zhang, Y. K. Guo, and Z. Cui, "One-step lithography for

- fabrication of a hybrid microlens array using a coding grey-level mask", Proceedings of SPIE, Vol.4945, p.130, 2003.
15. E. H. Park, M. J. Kim, and Y. S. Kwon, "Microlens for Efficient Coupling Between LED and Optical Fiber", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.11, p.439, 1999.
 16. W. X. Yu, and X. C. Yuan, "Fabrication of refractive microlens in hybrid SiO₂/TiO₂ sol-gel glass by electron beam lithography", Optics Express, Vol.11, No.8, p.899, 2003.
 17. T. Shiono, K. Setsune, O. Yamazaki, and K. Wasa, "Rectangular-apertured micro-Fresnel lens arrays fabricated by electron-beam lithography", Applied Optics, Vol.26, No.3, p.587, 1987.
 18. M. Wakaki, Y. Komachi, G. Kanai, "Microlenses and microlens arrays formed on a glass plate by use of a CO₂ laser", Applied Optics, Vol.37, p.627, 1998.
 19. D. Nieto, M. Teresa Flores-Arias, G. M. O'Connor, and C. Gomez-Reino, "Laser direct-write technique for fabricating microlens arrays on soda-lime glass with a Nd:YVO₄ laser", Applied Optics, Vol.49, Issue 26, p.4979, 2010.
 20. S. Y. Wang, "A computer simulation for the fabrication of hexagonal micro lens arrays by use of the dragging process with an excimer laser", Optics Express, Vol.13, No.15, p.5600, 2005.
 21. C. N. Hu, and G. D. J. Su, "Fabrication of microlens arrays on a glass substrate by roll-to-roll process with PDMS mold", Proceeding of SPIE, Vol.7425, p.74250Z-1, 2009.
 22. 陳俊傑, 微透鏡陣列之超精密加工, 淡江大學機械與機電工程學系博士論文, 2010.
 23. US patent 3833347, "Method of Molding glass lenses", Eastman Kodak Company Sep.3, 1974.
 24. M. Takahashi, Y. Murakoshi, R. Maeda and K. Hasegawa, "Large area micro hot embossing of Pyrex glass with GC mold machined by dicing", Microsyst Technol, Vol.13, Issue 3-4, p.379, 2007.
 25. 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.
 26. R. Q. Hsu, H. B. Wang, D. L. Liang, "Hot Embossing of Parallel v-Groove Microstructures on Glass", Journal of the American Ceramic Society, Vol.92, Issue 11, p.2605, 2009.
 27. J. Yan, T. Zhou, T. Zhou, J. Masuda, T. Kuriyagawa, "Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis", Journal of Precision Engineering, Vol.33, p.150, 2009.

28. D. H. Cha, H. J. Kim, J. K. Lee, H. U. Kim, S. S. Kim & J. H. Kim, "A Study of Mold Grinding and Pressing Conditions in the Molding of Aspheric Glass Lenses for Camera Phone Module", Materials and Manufacturing Processes, Vol.23, p.683, 2008.
29. D. H. Cha, H. S. Park, Y. Hwang, J. H. Kim, and H. J. Kim, "Experimental Study of Glass Molding Process and Transcription Characteristics of Mold Surface in Molding of Aspheric Glass Lenses", OPTICAL REVIEW, Vol.18, No.2, p.241, 2011.
30. M. Saeki, T. Kuriyagawa, J. S. Lee and K. Syoji, "Machining of Aspherical Opto-Device Utilizing Parallel Grinding Method", Proceedings of the ASPE Annual Meeting, p.433, 2001.
31. A. Shah, N. A. Mufti, D. Rakwal, and E. Bamberg, "Material Removal Rate, Kerf, and Surface Roughness of Tungsten Carbide Machined with Wire Electrical Discharge Machining", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.20, p.71, 2011.
32. M. S. Trtica, B. M. Gakovi, T. M. Nenadovi and M. M. Mitrovi, "Surface modification of stainless steels by TEA CO₂ laser", Applied Surface Science, Vol.177, Issue 1-2, p.48, 2001.
33. 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」, Vol. 29, 2008.
34. C. L. Faust, "Electropolishing I: The practical side", Metal Finishing, p.21, 1982.
35. J. Hopfenfeld and R. R. Cole, "Electrochemical Machining—Prediction and Correlation of Process Variables", Journal of Engineering for Industry, p.455, 1966.
36. K. S. Raman, S. Murali, M. Ramachandra and K. S. S. Murthy, "Development of Electropolishing Techniques on Metals and Alloys", Practical Metallography, Vol.33, No. 7, p.359, 1996.
37. Retrieved June 18, 2010, from <http://www.toshiba-machine.co.jp>
38. Y. C. Tsai, C. H. Hung, and J. C. Hung, "Glass material model for the forming stage of the glass molding process", Journal of Materials Processing Technology, Vol.201, p.751, 2008.
39. T. Mori, K. Hasegawa, T. Hatano, H. Kasa, K. Kintaka, and J. Nishii, "Glass Imprinting Process for Fabrication of Sub-Wavelength Periodic Structures", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.47, p.4746, 2008.
40. A. Y. Yi and A. Jain, "Compression Molding of Aspherical Glass Lenses—A Combined Experimental and Numerical Analysis", Journal of the American Ceramic Society, Vol.88, p.579, 2005.
41. Retrieved Sep 10, 2011, from <http://www.matweb.com>

42. 凱樂士公司, 材料特性比較表, 2011.
43. DIJET 工業株式會社, 產品型錄, 2007.
44. J. Byskov-Nielsen and P. Balling, "Laser structuring of metal surfaces: Micro-mechanical interlocking", Applied Surface Science, Vol.255, p.5591, 2009.
45. Retrieved June 18, 2010, from http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_carbide
46. 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.
47. 陳竹山, 聚光型太陽能集光系統之效率分析與研究, 國立虎尾科技大學碩士論文, 2010.
48. Schott, Datasheet, <http://www.schott.com/>
49. Schott, tie-29_refractive_index_v3_jan_2007_en
50. William D., Jr., "Materials Science and Engineering an Introduction", Wiley International Edition, 2003.
51. Sumita, Datasheet, <http://www.sumita-opt.co.jp/en/optical/data303.pdf>
52. 林子中, 蔡偉崙, "FPD 玻璃基板雷射切割技術概況", 「機械工業雜誌」, Vol.311, p.43, 2009
53. Retrieved June 18, 2010, from http://en.wikipedia.org/wiki/Soda-lime_glass
54. Schott, Tie-40 optical glass for precision molding v6, 2011.
55. Ohara, Datasheet, <http://www.oharacorp.com/>
56. 林宏彥, 絕緣液中添加鋁粉對線切割放電加工之影響, 中央大學機械所碩士論文, 2004.
57. 趙崇禮, 馬廣仁, 林宏彥, 微模具製程技術發展現況, 「機械工業」, 2006.
58. "Electropolishing", Metal Finishing, 1982.
59. 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.
60. http://www.techplasma.com.tw/ch_product_list97e1.html?FkindNo=F000712&SKindNo=S001023
61. J. Hsieh, C.-J. Weng, H.-L. Yin, H.-H. Lin, H.-Y. Chou, "Realization and characterization of SU-8 micro cylindrical lenses for in-plane micro optical systems", Microsystem Technologies, p.429, 2005.
62. C. C. A. Chen, S. W. Chang, C. J. Weng, "Design and fabrication of optical homogenizer with micro structure by injection molding process", Proc. SPIE, Vol.7058, p.705807, 2008.

63. L. W. Pan, L. Lin and J. Ni, "Cylindrical Plastic Lens Array Fabricated by a Micro Intrusion Process", Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '99. Twelfth IEEE International Conference, p.217, 1999.
64. J. Hu, S. Wu, Y. Zhang, Y. Liang, and T. Dai, "Study on gradient index micro-cylinder lens with gradual focus", Proc. SPIE, Vol.7158, p.715803, 2008.
65. L. Jürgen, L. Norbert, S. Johannes, "Characterization of cylindrical micro-lenses in transmitted light and with grazing incidence interferometry in reflected light", Proceedings of SPIE, Vol.6188, p.618816.1, 2006.
66. <http://www.apinex.com>
67. C. Y. Huang, W. T. Hsiao, K. C. Huang, K. S. Chang, H. Y. Chou and C. P. Chou, "Fabrication of a double-sided micro-lens array by a glass molding technique", J. Micromech. Microeng. Vol.21, p.085020, 2011.
68. C. Y. Huang, K. C. Huang, J. C. Chen, K. S. Chang, S. F. Tseng, C. P. Chou, "Development of a Novel Rapid Manufacturing Process for Micro-Cylindrical Lens Array", Advanced Materials Research, Vol.264, p.78, 2011.
69. C. Y. Huang, J. R. Sze, K. C. Huang, C. H. Kuo, S. F. Tseng, and C. P. Chou, "The Glass-Molding Process for Planar-Integrated Micro-Optical Component", OPTICAL REVIEW, Vol.18, No.1, p.96, 2011.
70. D. Poulidakos, "Conduction Heat Transfer", Prentice Hall, 1994.
71. 山本雄士, 鈴木浩文, 森脇俊道, 沖野正, 樋口俊郎, "モリブデン製ツルアによる鋭利なエッジを有する研削ホイールの精密ツールイングとフレネル形状の研削加工の高精度化, マイクロフレネルレンズ成形型の超精密研削(第2報)", Journal of Japan Society for Precision Engineering, Vol.73(6), p.688, 2007. [in Japanese]

簡歷

<p>姓名：黃建堯</p> <p>國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員</p> <p>E-mail: msyz@itrc.narl.org.tw</p>	
<p>專長</p> <ol style="list-style-type: none">1. 玻璃模造技術2. 光學、光機元件檢測3. ISO/IEC 17025 (TAF)標準實驗室相關訓練4. ISO 9000 品質系統相關訓練5. 機構設計6. 公共安全衛生(勞工安全衛生管理技術士乙級證照)7. 微細放電加工	



國際期刊

1. Chien-Yao Huang, Wen-Tse Hsiao, Kuo-Cheng Huang, Keng-Souo Chang, Hsiao-Yu Chou, Chang-Pin Chou
Fabrication of Double-sided Micro Lens Array by Glass Molding Technique,
J. Micromech. Microeng. 21 (2011) 085020 (6pp), Impact factor : 2.276
2. Chien-Yao Huang, Chao-Hui Kuo, Wen-Tse Hsiao, Kuo-Cheng Huang, Shih-Feng Tseng, Chang-Pin Chou
Glass Biochip Fabrication by Laser Micromachining and Glass-Molding Process,
Journal of Materials Processing Technology 2011/10, Accepted, Impact factor : 1.567
3. Chien-Yao HUANG, Jyh-Rou SZE, Kuo-Cheng HUANG, Chao-Hui KUO, Shih-Feng TSENG, and Chang-Pin CHOU
The Glass-molding Process of Planar-integrated Micro-optical Component,
OPTICAL REVIEW Vol. 18, No. 1 (2011) 96–98, Impact factor : 0.55
4. Chien-Yao Huang, Kuo-Cheng Huang, Jun-Cheng Chen, Keng-Souo Chang, Shih-Feng Tseng, Chang-Pin Chou
Development of a Novel Rapid Manufacturing Process for Micro-Cylindrical Lens Array,
Advanced Materials Research Vols. 264-265 (2011) pp 78-83

國際研討會

1. Chien-Yao Huang, Kuo-Cheng Huang, Jun-Cheng Chen, Keng-Souo Chang, Shih-Feng Tseng, Chang-Pin Chou
Development of a new Rapid Manufacturing Process for Micro-Cylindrical Lens Array, Advances in Materials and Processing Technologies, AMPT2009 2009/10/27
2. Chien-Yao HUANG, Jyh-Rou SZE, Kuo-Cheng HUANG, Chao-Hui KUO, Shih-Feng TSENG, and Chang-Pin CHOU
The Glass-molding Process of Planar-integrated Micro-optical Component, 7th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, "ODF'10, 2010/4/19
3. Chien-Yao Huang, Wen-Tse Hsiao, Kuo-Cheng Huang, Keng-Souo Chang, Hsiao-Yu Chou, Chang-Pin Chou
Fabrication of Double-sided Micro Lens Array by Glass Molding Technique, International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology, 2011/3/23-25
4. Chien-Yao Huang, Chih-Wei Fang , Hsiao-Yu Chou, Wen-Tse Hsiao, Kuo-Cheng Huang, Chang-Pin Chou
Fabrication of Glass Molding Mold for Biochip by Laser Micromachining, INTERNATIONAL CONFERENCE ON LASER ABLATION, 2011/11/13-19
5. Shih-Feng Tseng, Chao-Te Lee, Kuo-Cheng Huang, Don-Yau Chiang, Chien-Yao Huang, and Chang-Pin Chou
Investigation on protective coatings of Pt-Ir and Ni-Ir binary alloys for glass-molding dies, 4th International conference on surface coatings and nanostructured materials, 2009/10/19
6. C. H. Kuo, K. C. Huang, W. H. Wu, and C. Y. Huang
A Secondary Optical Design of Six-cells LED Projection Lamp with High Uniform Illumination, 7th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, "ODF'10, 2010/4/19
7. Shih-Feng Tseng, Wen-Tse Hsiao, Kuo-Cheng Huang, Chien-Yao Huang, and Chang-Pin Chou
Investigation of profile cutting on glass plates using a pulsed UV laser system, CIRP High Performance Cutting (HPC), 2010/10/24