

國立交通大學

機械工程學系



玻璃尖端陣列結構熱壓成形之模具製程研究

Analysis of Microtip Arrays Mold for Hot

Embossing on Glass

研究生：蘇逸翔

指導教授：洪景華 教授

中華民國 一百零三年 八月

玻璃尖端陣列結構熱壓成形之模具製程研究

研究生：蘇逸翔

指導教授：洪景華

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究設計一種玻璃 Spindt 型場發射源，運用玻璃熱壓成形技術在玻璃上製作出尖端陣列結構，將此玻璃結構當作基材，在其上鍍上一層導電膜層後，則可做為場發射平面光源之陰極場發射源。

此製程中，微結構模具製作為很重要的一環，但欲製作出可用於熱壓玻璃微結構之模具需克服數項問題，包括結構尺寸小、結構個數多、精度要求高及需能承受高溫高壓等。

本研究已成功研究出此微結構模具製程，藉由鑽石精密磨削加工出凸出微結構碳化鎢陽模，再運用直接加壓成形加工的翻模方式製作出微結構不鏽鋼陰模，並證明此模具配合玻璃熱壓成形技術，可成功在玻璃上成形 Spindt 型場發射源所需之尖端陣列結構。

關鍵字：Spindt 型場發射源、玻璃熱壓成形、尖端陣列結構

Analysis of Microtip Arrays Mold for Hot Embossing on Glass

Student: Su Yi-Hsiang

Advisor: Dr. Ching-Hua Hung

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

In this research, a glass Spindt-type field emission source was designed by using the hot embossing technology to manufacture glass microtip array which was then coated with a layer of conductive film.

In this process, making the microstructure mold is very difficult and important. The challenge includes the small structure size, the huge numbers of structure, the high requirements of accuracy and the high temperature or pressure the mold has on hot embossing process.

This research has successfully developed the process of manufacturing microstructure mold. By the method of dicing, the study produce raised microstructure on WC then printing the microstructure on SUS304 mold by pressure. And it has been proved that the SUS304 mold can be used to manufacture the glass microtip array by hot embossing.

Keywords : Spindt-type field emission source, glass hot embossing, microtip array

誌謝

碩士兩年過去了，現在看著陽光普照的交大校園、看著熱鬧的 408 實驗室、看著鋼鐵人般的熱壓機台、看著我的論文初稿，讓我一一回想起我遇到的人，以及我經歷的事情。我很開心這兩年中體驗的一切，包括跟大家亂吵鬧、與戰友熬夜寫論文、苦惱塑力作業、拆裝鋼鐵熱壓機台、還有緊張刺激的 meeting、被老師砲轟到無言以對。謝謝讓我經歷這一切的你們，也謝謝曾幫助過我的所有人，有你們讓我成長茁壯、讓我人生更豐富燦爛。

特別感謝洪景華老師，不辭辛勞地教我研究的方法及態度，也讓我在報告展現及邏輯方面學到許多。您是我目前最喜歡的老師，不僅上課認真不馬虎，期望我們可以真正學到東西，而且平時或 meeting 也會機會教育，跟我們說說現在的趨勢，或是人生的態度。雖然老師您有時很嚴肅，每當將眼鏡摘下、手摸鼻樑並長嘆一氣時，都會讓我心生畏懼，但平時聊天或出遊時，卻很平易近人，常與我們開玩笑。謝謝老師您一切的教導，謝謝。另外，謝謝幫助並教導我的學長姐們、與我同甘共苦並互相勉勵的戰友們、被我使喚碎念卻忍受回我：「謝謝學長！」的學弟妹們，有你們真好。

最後謝謝我最愛的特級廚師媽媽、毅力無限爸爸、國外傻鼠姊姊、調皮搗蛋嘯，你們的支持及扶持，是我的最大原動力。

脆笛蘇 謹誌

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xiii
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.1.1 場發射平面光源介紹.....	1
1.1.2 Spindt 型場發射源製程改善.....	4
1.2 玻璃熱壓成型技術.....	5
1.3 微結構模具製作之困難.....	7
1.4 文獻回顧.....	8
1.5 研究動機與目的.....	9
1.6 研究方法.....	10
1.7 論文架構.....	10
第二章 微結構模具製程研究.....	11
2.1 間接翻模製程設計.....	11
2.1.1 各加工方式簡介.....	12

2.1.2	間接翻模流程	15
2.2	凸出微結構陽模製做	16
2.2.1	陽模材料選擇	16
2.2.2	微結構加工設計	17
2.2.3	微結構加工成果	19
2.3	微結構陰模翻模	25
2.3.1	陰模材料選擇	25
2.3.2	微結構翻模加工設計	26
2.3.3	微結構翻模加工實驗	28
2.3.4	微結構翻模加工問題解決	29
2.3.5	φ20mm 不鏽鋼微結構翻模加工實驗成果	33
2.3.6	φ60mm 不鏽鋼微結構翻模加工實驗成果	34
2.4	微結構模具製程成果與討論	37
第三章	模具玻璃熱壓成形實驗	38
3.1	微結構模具鍍膜	38
3.2	模具玻璃熱壓成形實驗	41
3.2.1	實驗設備	41
3.2.2	玻璃材料選擇	43
3.2.3	實驗參數設定	44

3.2.4	實驗成果.....	45
3.3	模具玻璃熱壓成形實驗成果與討論.....	47
第四章 結論與未來展望.....		48
4.1	結論.....	48
4.2	未來展望.....	50
4.2.1	微結構模具製程.....	50
4.2.2	玻璃熱壓成形.....	51
參考文獻.....		52
附錄 A	玻璃微結構場發射可行性實驗.....	55
附錄 B	模具及玻璃量測結果.....	64



圖目錄

圖 1.1 場發射平面光源[1]	2
圖 1.2 電子場發射理論[3]	2
圖 1.3 場發射顯示器原理[5]	3
圖 1.4 Spindt 型場發射源[5]	3
圖 1.5 奈米碳管[8]	4
圖 1.6 玻璃尖端陣列結構	5
圖 1.7 Spindt 型玻璃基材場發射源	5
圖 1.8 玻璃熱壓成形技術示意圖[10]	6
圖 1.9 熱壓成形技術溫度—時間關係圖[10]	7
圖 2.1 線切割加工[22]	12
圖 2.2 鑽石精密磨削加工之刀具尖端[19]	13
圖 2.3 精密磨削加工 V 型溝槽[19]	13
圖 2.4 放電加工原理[23]	14
圖 2.5 精密電鑄[24]	14
圖 2.6 直接加壓加工	15
圖 2.7 間接翻模流程圖	16
圖 2.8 鑽石精密磨削加工-第一道次	17
圖 2.9 線切割加工-第一道次	18

圖 2.10 鑽石精密磨削加工-第二道次	18
圖 2.11 微結構加工-第二道次	18
圖 2.12 (a)光學顯微鏡 (b) 3D 雷射共軛焦顯微鏡	19
圖 2.13 掃描式電子顯微鏡(SEM)	19
圖 2.14 線切割加工微結構上視圖	20
圖 2.15 線切割加工微結構 3D 圖	20
圖 2.16 線切割加工微結構側視圖-三角形方向	21
圖 2.17 線切割加工微結構側視圖-梯形方向	21
圖 2.18 碳化鎢圓柱上表面微結構	22
圖 2.19 碳化鎢圓柱微結構量測選取位置示意圖	22
圖 2.20 鑽石精密磨削加工微結構上視圖	23
圖 2.21 鑽石精密磨削加工微結構 SEM 圖	23
圖 2.22 鑽石精密磨削加工微結構 3D 圖	23
圖 2.23 鑽石精密磨削加工微結構側視圖	23
圖 2.24 鑽石精密磨削加工瑕疵微結構上視圖	24
圖 2.25 鑽石精密磨削加工瑕疵微結構 SEM 圖	24
圖 2.26 鑽石精密磨削加工瑕疵微結構 3D 圖	24
圖 2.27 鑽石精密磨削加工瑕疵微結構側視圖	24
圖 2.28 直接加壓成形加工示意圖	26

圖 2.29 宏達儀器精密位移控制機台	27
圖 2.30 不鏽鋼 304 圓柱	28
圖 2.31 微結構翻模實驗.....	28
圖 2.32 不鏽鋼 304 彎月形微結構陣列	29
圖 2.33 彎月形微結構陣列單一結構	29
圖 2.34 直接加壓成形加工配合橡膠墊片	30
圖 2.35 直接加壓成形加工配合橡膠墊片結果	30
圖 2.36 不鏽鋼 304 陰模上的蝦疵微結構凹槽	31
圖 2.37 不鏽鋼微結構凹槽量測寬度選取位置示意圖.....	31
圖 2.38 400-2700kgf 翻模力量及微結構凹槽寬度關係圖.....	32
圖 2.39 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼翻模成果.....	33
圖 2.40 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼翻模成果-微結構上視圖.....	33
圖 2.41 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼翻模成果-微結構 SEM 圖.....	34
圖 2.42 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼翻模成果-微結構側視圖.....	34
圖 2.43 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼直接加壓成形加工.....	35
圖 2.44 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼直接加壓成形加工成果.....	35
圖 2.45 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼彎曲.....	36
圖 3.1 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼 DLC 鍍膜模具.....	39
圖 3.2 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼微 DLC 鍍膜模具結構側視圖(a)鍍膜前(b)鍍膜後 ..	39

圖 3.3	ϕ 60mm 不鏽鋼 DLC 鍍膜模具.....	40
圖 3.4	ϕ 60mm 不鏽鋼微 DLC 鍍膜模具結構側視圖(a)鍍膜前(b)鍍膜後 .	40
圖 3.5	加熱爐[10]	41
圖 3.6	加熱爐示意圖[10]	42
圖 3.7	超音波輔助玻璃熱壓設備[10]	42
圖 3.8	L-BAL42 玻璃材料.....	44
圖 3.9	玻璃微結構量測選取位置示意圖	45
圖 3.10	玻璃熱壓成形微結構陣列.....	46
圖 3.11	玻璃熱壓成形微結構-上視圖.....	46
圖 3.12	玻璃熱壓成形微結構-側視圖	47
圖 A.1	初步可行性研究流程圖	55
圖 A.2	玻璃熱壓沾黏性實驗成果	57
圖 A.3	維氏硬度計	59
圖 A.4	模具鑽石頭加壓加工	60
圖 A.5	玻璃場發射可行性研究熱壓成果	62
圖 A.6	玻璃場發射可行性研究熱壓成果-側視圖	63
圖 B.1	量取頂端距離示意圖	64
圖 B.2	碳化鎢陽模中間結構	65
圖 B.3	碳化鎢陽模右邊結構	66

圖 B. 4 碳化鎢陽模上邊結構	67
圖 B. 5 碳化鎢陽模下邊結構	68
圖 B. 6 ϕ 20mm 不鏽鋼微結構凹槽量測示意圖	69
圖 B. 7 ϕ 20mm 不鏽鋼中間結構	70
圖 B. 8 ϕ 20mm 不鏽鋼右邊結構	71
圖 B. 9 ϕ 20mm 不鏽鋼上邊結構	72
圖 B. 10 ϕ 20mm 不鏽鋼下邊結構	73
圖 B. 11 ϕ 20mm 不鏽鋼鍍 DLC 中間結構	74
圖 B. 12 ϕ 20mm 不鏽鋼鍍 DLC 右邊結構	75
圖 B. 13 ϕ 20mm 不鏽鋼鍍 DLC 上邊結構	75
圖 B. 14 ϕ 20mm 不鏽鋼鍍 DLC 下邊結構	76
圖 B. 15 ϕ 60mm 不鏽鋼中間結構	77
圖 B. 16 ϕ 60mm 不鏽鋼右邊結構	77
圖 B. 17 ϕ 60mm 不鏽鋼上邊結構	78
圖 B. 18 ϕ 60mm 不鏽鋼下邊結構	78
圖 B. 19 ϕ 60mm 不鏽鋼鍍 DLC 中間結構	79
圖 B. 20 ϕ 60mm 不鏽鋼鍍 DLC 右邊結構	80
圖 B. 21 ϕ 60mm 不鏽鋼鍍 DLC 上邊結構	80
圖 B. 22 ϕ 60mm 不鏽鋼鍍 DLC 下邊結構	81

圖 B. 23 L-BAL42 玻璃中間結構..... 82

圖 B. 24 L-BAL42 玻璃右邊結構..... 82

圖 B. 25 L-BAL42 玻璃結構..... 83

圖 B. 26 L-BAL42 玻璃下邊結構..... 83



表目錄

表 2.1 碳化鎢材料性質	17
表 2.2 不鏽鋼 304 材料性質	25
表 2.3 宏達儀器精密位移控制機台規格	27
表 2.4 400-2700kgf 各翻模力量的微結構凹槽寬度	32
表 2.5 $\phi 20\text{mm}$ 與 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼直接加壓成形加工成果上視圖	35
表 2.6 $\phi 20\text{mm}$ 與 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼直接加壓成形加工成果比較	36
表 3.1 超音波輔助玻璃熱壓設備規格[10]	43
表 3.2 L-BAL42 玻璃材料性質	44
表 3.3 玻璃熱壓成形實驗參數	45
表 3.4 玻璃熱壓成形微結構深度及寬度	47
表 A.1 不鏽鋼 304 材料性質	56
表 A.2 模具雷射加工成果	59
表 A.3 Soda-lime 玻璃材料性質	61
表 A.4 玻璃場發射可行性熱壓實驗參數	62
表 B.1 碳化鎢陽模各部位尖銳程度	64
表 B.2 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼微結構各部位深度及寬度	69
表 B.3 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 微結構各部位深度及寬度	74
表 B.4 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼微結構各部位深度及寬度	76

表 B.5 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼微結構各部位深度及寬度..... 79

表 B.6 L-BAL42 玻璃微結構各部位深度及寬度..... 81



第一章 緒論

1.1 前言

在現今高度發展的社會中，照明已是人類的基本需求，隨著時代的演進，不同種類的照明光源不斷研發，較常使用的如白熾燈、日光燈、LED 等。然而，隨著全球暖化日益嚴重、環保意識的抬頭，白熾燈因不環保、效能低而各國開始禁用；日光燈造成的汞汙染問題逐漸受到重視而開始減少使用；LED 雖然環保卻有成本高及耐熱過低的問題。因此，尋找環保且低成本之照明光源已成為全球當務之急。

1.1.1 場發射平面光源介紹

場發射平面光源(圖 1.1)是一種環保的燈源，運用電子場發射理論來發光，具有高演色性、亮度範圍廣、方便調光、快速啟動等優點。電子場發射理論最早是 1928 年由 Fowler 與 Nordheim 共同提出[2]，其原理如圖 1.2 所示，在兩導體間施加高電壓，使電子在陰極表面與真空區的位能降低，並讓位能障壁厚度(Δx)減小，則原本需越過位障高度(ΔE)的電子便可直接穿隧障壁進入真空中，大量自陰極表面發射出來，此即場發射的基本機制。

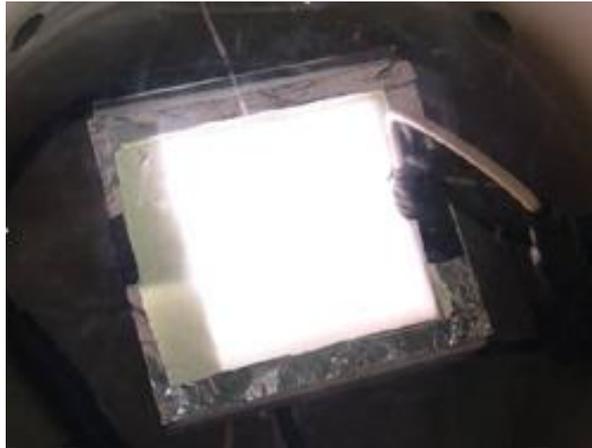


圖 1.1 場發射平面光源[1]

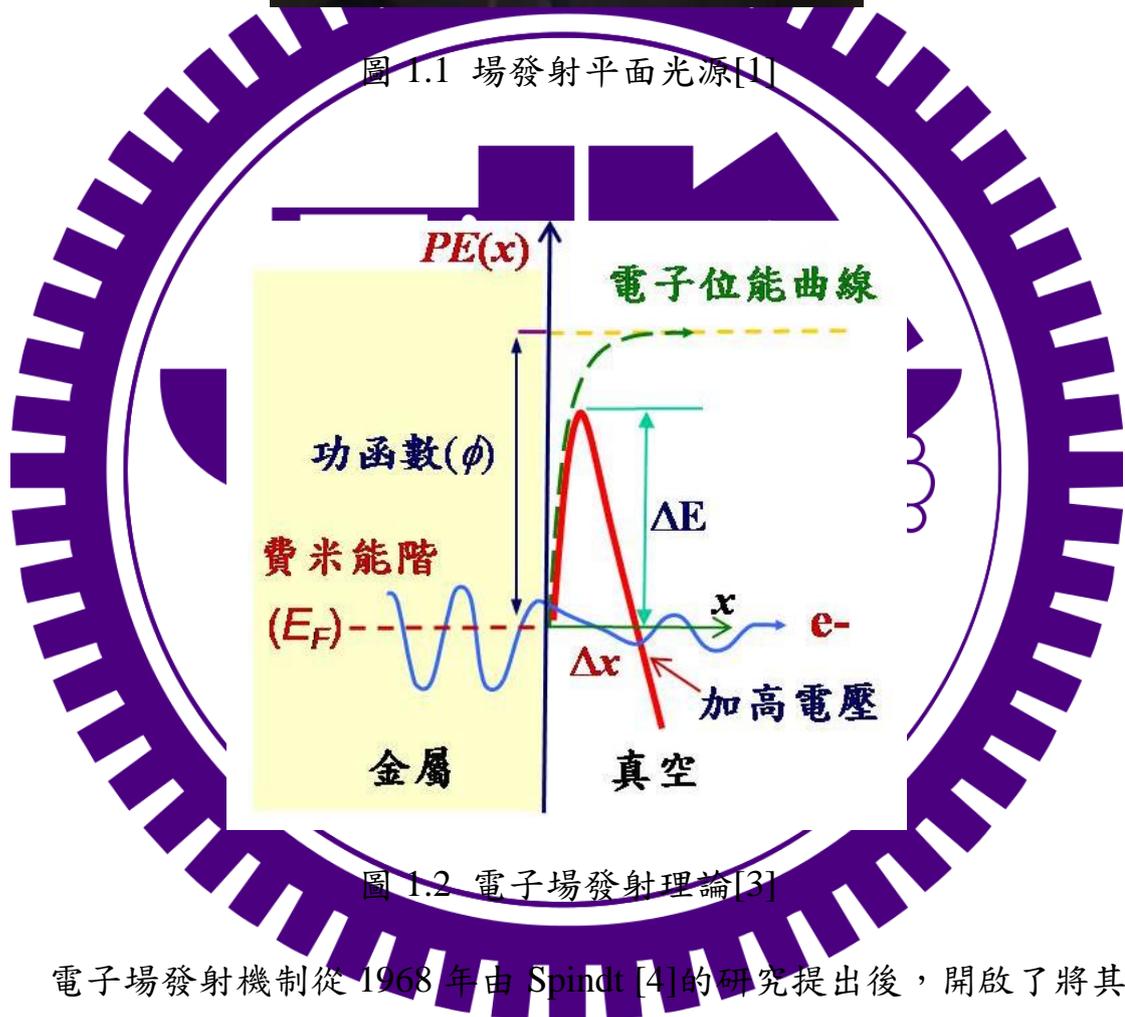


圖 1.2 電子場發射理論[3]

電子場發射機制從 1968 年由 Spindt [4] 的研究提出後，開啟了將其運用於場發射顯示器（FED，Field Emission Display）的技術開法。其原理是運用電子場發射機制使電子由陰極表面發射端射出，再透過外加電場的吸引，使電子加速轟擊螢光幕而發光，如圖 1.3 所示。

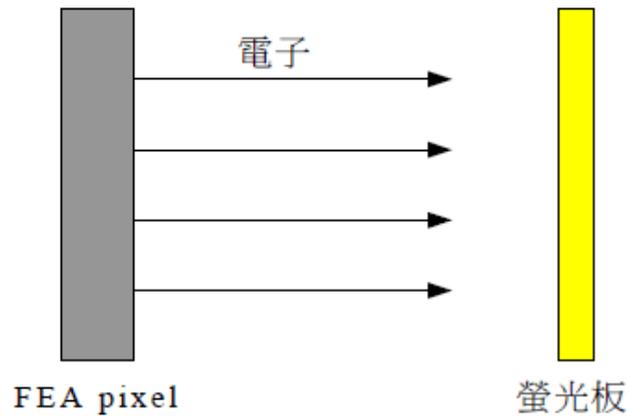


圖 1.3 場發射顯示器原理[5]

場發射顯示器的發射源是極其重要的關鍵技術，最早是由 Spindt [6] 在 1976 年所提出的尖錐形陣列結構發射源，如圖 1.4 所示，發射源可用金屬材料如鉬(Mo)、鎢(W)、鎳(Ni)，或是半導體材料如矽(Si)等，因外加電場會高度集中在尖錐頂端，導致此 Spindt 型場發射源有極佳的電子場發射效能。在 Spindt 型場發射源的製造方面，結構大小會受到微影技術而有所限制，且成膜技術、微影蝕刻技術、微細加工技術等複雜且高成本製程影響其研究，使得場發射電極一直沒有太大的進展。



圖 1.4 Spindt 型場發射源[5]

1991 年 Iijima [7]發現奈米碳管(Carbon Nanotubes)後，因其優異的場發射特性，吸引了許多研究學者相繼投入場發射領域裡。奈米碳管為石墨

捲積成圓柱狀的奈米結構體，直徑從一到數奈米，長度則有數十奈米，如圖 1.5 所示。奈米碳管的特殊結構及特性如高長寬比、尖端曲率半徑小、質量輕、具有相當低的電子親和力等，使其擁有很好的場發射特性。然而在奈米碳管的製作上，很難控制使其排列整齊，且會有密度分佈不均勻等問題，導致其擁有場發射效應不穩定的缺點，雖然有許多學者針對此缺點做研究，但至今仍無較好的改善方式。至此場發射技術遇到了瓶頸，要如何發展出低成本且穩定的場發射源已成為目前主要問題。

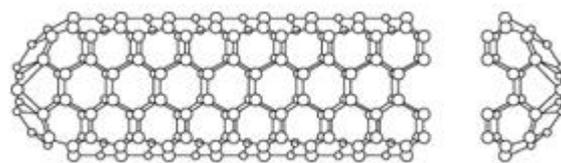


圖 1.5 奈米碳管[8]

1.1.2 Spindt 型場發射源製程改善

回過頭來看，1976 年提出的 Spindt 型場發射源仍然是一個具潛力的場發射電極，但如之前所述，需經過成膜技術、微影蝕刻技術、微細加工技術等複雜且高成本製程，如能改善製程將其簡化並降低成本，則必定能再度掀起場發射研究的高峰。

本研究設計了一個 Spindt 型場發射源製程改善方式，運用玻璃熱壓成形技術在玻璃上製作出尖端陣列結構，如圖 1.6 所示，將此玻璃結構當作基材，在其上鍍上一層金屬膜層後，則可做為場發射平面光源之陰極場發射

源，如圖 1.7 所示。此方式不僅簡化了 Spindt 型場發射源複雜的製程，並能有效降低其製造成本。而針對此玻璃陰極場發射源結構，本研究室已做了初步可行性研究，證明其具有電子場發射效應，如附錄 A 所示。

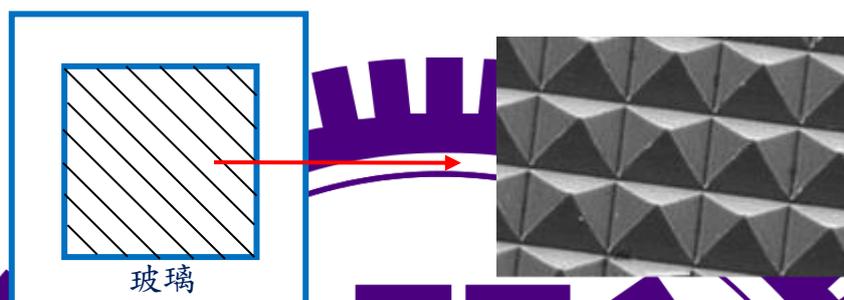


圖 1.6 玻璃尖端陣列結構

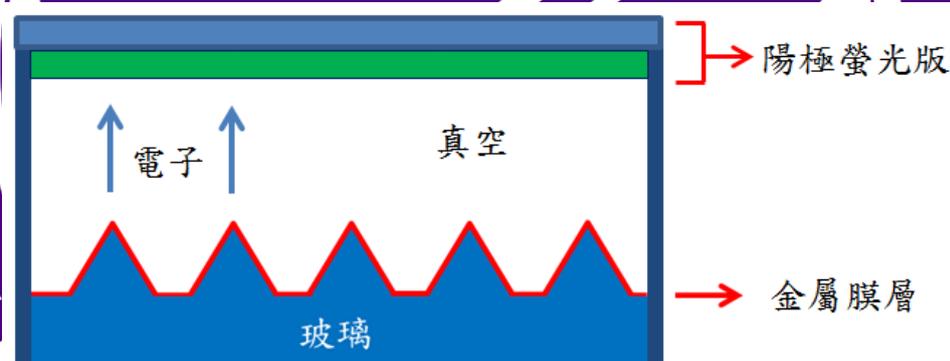


圖 1.7 Spindt 型玻璃基材場發射源

其中，玻璃熱壓成型技術為此改善製程的關鍵，能夠成形出越尖銳的陣列結構，則其場發射效率也越好。

1.2 玻璃熱壓成型技術

玻璃熱壓成型技術首見於 1974 年 Eastman Kodak 的美國專利

US3833347 [9]，將玻璃試片升溫軟化後，利用精密外型之模具加壓於玻璃上，使玻璃複製模具之外型後，再降溫取得玻璃成品，如 Tsai[10]研究中之圖 1.8 及圖 1.9 所示。此技術具有材料流動距離短、成形精度高、設備簡單等特性，任何一種製程所製作出來的模仁，包括球面透鏡、非球面透鏡、微結構陣列等元件，皆能經由熱壓成形技術來達到批量複製的目的，因此被認為是玻璃微結構光學元件製造中用以降低成本，提高產量之關鍵技術。

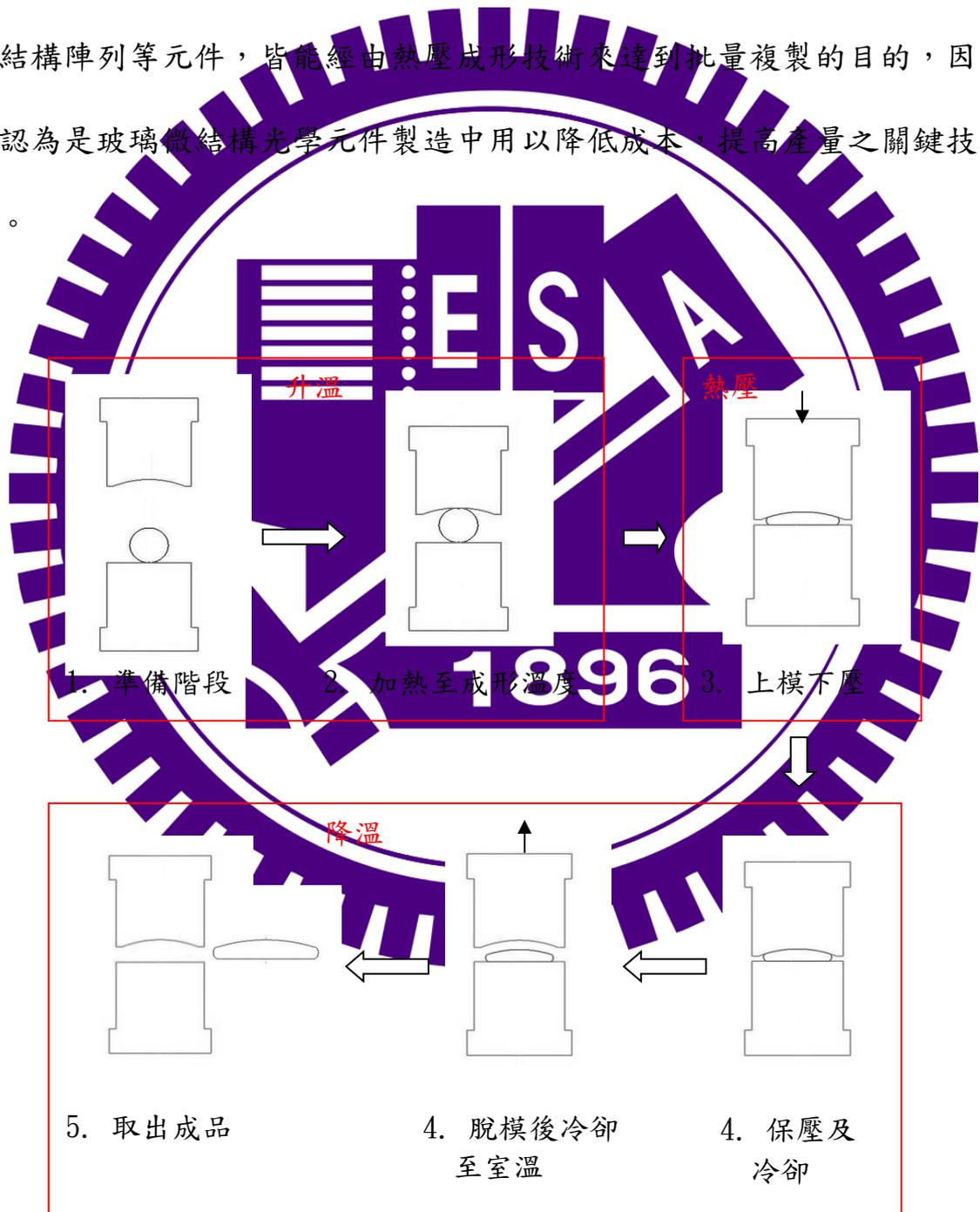


圖 1.8 玻璃熱壓成形技術示意圖[10]

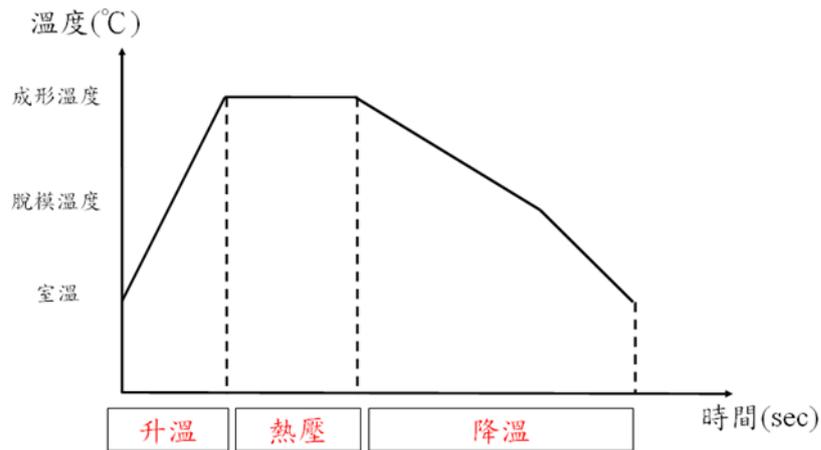


圖 1.9 熱壓成形技術溫度—時間關係圖[10]

雖然有許多研究已證實玻璃熱壓成型技術能有效轉印非球面透鏡、繞射光學元件等[11][12][13]，但欲將此技術運用於製作本研究之玻璃微結構，最先面臨的主要問題即為微結構模具製作方式。

1.3 微結構模具製作之困難

微結構模具製作為玻璃熱壓成形中很重要的一環，且玻璃成品的成本大部分來至於此，欲熱壓成形出本研究設計之玻璃尖錐型微結構陣列，需在有限的成本以內製作出可用於玻璃熱壓成形之微結構模具。而製作此微結構模具有以下幾點困難：

1. 模具上的微結構凹槽其尺寸大小約數十微米，且要求精度高。
2. 模具上的微結構凹槽其個數多。
3. 模具上的微結構凹槽其尖端部分需足夠尖銳。

4. 模具需能夠承受高溫高壓的熱壓環境。

本研究針對微結構模具製作搜尋相關文獻，找出可能可加工出用於本研究玻璃熱壓成形之微結構模具的方法。

1.4 文獻回顧

在搜尋相關文獻過後，發現欲製作出本研究設計之微結構模具的方式主要可分為直接加工及間接翻模兩種。

直接加工：

運用聚焦離子束加工法、準分子雷射加工法、飛秒雷射加工法等方式直接在模仁上加工出微結構凹槽。Högström[14]等人運用不同能量大小的聚焦離子束在碳化矽(SiC)材料上加工出不同孔徑大小的孔洞，並成功加工出21x21個微孔洞陣列，其單一孔徑約 $6\mu\text{m}$ ；Youn[15][16]等人利用聚焦離子束、飛秒雷射、準分子雷射在玻璃炭(Glassy Carbon)材料上加工出各種微結構，並進行玻璃熱壓轉印研究；Yasui[17]等人運用聚焦離子束在鎳鎢合金(Ni-W)上加工出寬約 $0.4\mu\text{m}$ 的溝槽，並進行玻璃熱壓轉印實驗；Yang[18]等人運用RIE(Reactive Ion Etching)在矽基板上蝕刻出微結構，並成功經由熱壓實驗轉印微結構於玻璃上。

間接翻模：

先運用線切割加工、鑽石磨削等方式加工出含有凸出微結構的陽模，再運用放電加工或電鑄方式翻鑄出含有微結構凹槽的陰模。 Youn[15][16]等人運用鑽石磨削加工(Dicing)，在玻璃炭材料上加工出單一結構尺寸約 $300\mu\text{m}$ 的凸出金字塔型微結構陣列；Yan[19]等人運用微切削加工，在鍍鎳磷的表面上加工出單一結構尺寸約 $10\mu\text{m}$ 的凸出金字塔型微結構陣列；Pan[20]等人用鎳鈷合金(Ni-Co)材料翻鑄出單一結構尺寸約 $300\mu\text{m}$ 的六角形微結構陣列模仁；王[21]用電鑄鎳鈷合金的方式翻鑄出間距約 $250\mu\text{m}$ 、深度約 $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 的菲涅耳(Fresnel)結構，並進行玻璃微結構熱壓實驗。

1.5 研究動機與目的

綜觀上述，Spindt 型場發射平面照明燈具有環保、發光效率高等優點，但其陰極微結構製程複雜且成本過高，而運用玻璃熱壓成形技術能有效幫助其未來發展。

在玻璃熱壓成形技術中，微結構模具製作為很重要的一環，但欲製作出可用於熱壓本研究設計的玻璃微結構之模具有諸多困難，包括結構尺寸小、結構個數多、精度要求高及需能承受高溫高壓等。

本研究目的即在搜尋可加工出用於玻璃熱壓成形之尖端凹槽微結構陣列模具的方法，以製作出單一結構為寬 $30\mu\text{m}$ 、深 $20\mu\text{m}$ 、個數約數千個

之尖端凹槽微結構陣列模具，並整合出此模具的製程。

1.6 研究方法

本研究步驟主要分為以下兩個階段：

- (1) 依據文獻回顧，尋找出可能可行的微結構模具製程方式，並實際製作出可進行玻璃熱壓成形實驗之模具。
- (2) 將製作好的微結構模具進行玻璃熱壓成形實驗，以證明此模具之成形可用性。

1.7 論文架構

本論文共分為五章：第一章先敘述前言，導出本研究的動機與目標及研究方法；第二章介紹微結構模具的製程設計及製做研究；第三章敘述將製做完成之微結構模具進行玻璃熱壓實驗；第四章則為整個研究之結論及未來展望。

第二章 微結構模具製程研究

如前言所述，欲製作出可用於熱壓玻璃微結構之模具需克服數項問題，包括結構尺寸小、結構個數多、精度要求高及需能承受高溫高壓等。而由文獻回顧中可發現欲製作出本研究設計之微結構模具的方式主要可分為直接加工及間接翻模兩種。如運用雷射加工、準分子雷射加工或鑽石頭加壓等單一結構直接加工方式，要加工出數萬個微結構不僅耗時且成本過高。而運用蝕刻加工的方式雖然可以在矽基板上直接加工出多個尖端凹槽微結構陣列，但將此矽模具用於玻璃熱壓成形，會因在高溫高壓的環境下而破裂損壞。因此，間接翻模是較為可行的製程方式。

本研究針對間接翻模製程做了流程設計，包括凸出微結構陽模製做及微結構凹槽陰模翻模製做兩個部分，接著依照流程設計加工出所需的尖端凹槽微結構陣列模具。

2.1 間接翻模製程設計

間接翻模包含了凸出微結構陽模製做及微結構凹槽陰模翻模製做兩個部分，在參考文獻中，凸出微結構陽模可用線切割加工及鑽石精密磨削加工兩種製作方式；而微結構凹槽陰模可用放電加工、NiCo 合金電鑄及直接加壓加工三種翻模方式。以下簡單介紹各加工方式：

2.1.1 各加工方式簡介

線切割加工：

線切割加工英文全名為 Wire Electrical Discharge Machining，簡稱 WEDM。利用具導電性之銅電極線做為工具電極，在電極與工件(需可導電)兩者之間施加電壓，引發電弧放電效應而達到局部熔化、蒸發的加工效果，再配合線切割加工機台的加工平台移動，可以加工出所需的直線或曲線路徑，如圖 2.1 所示。

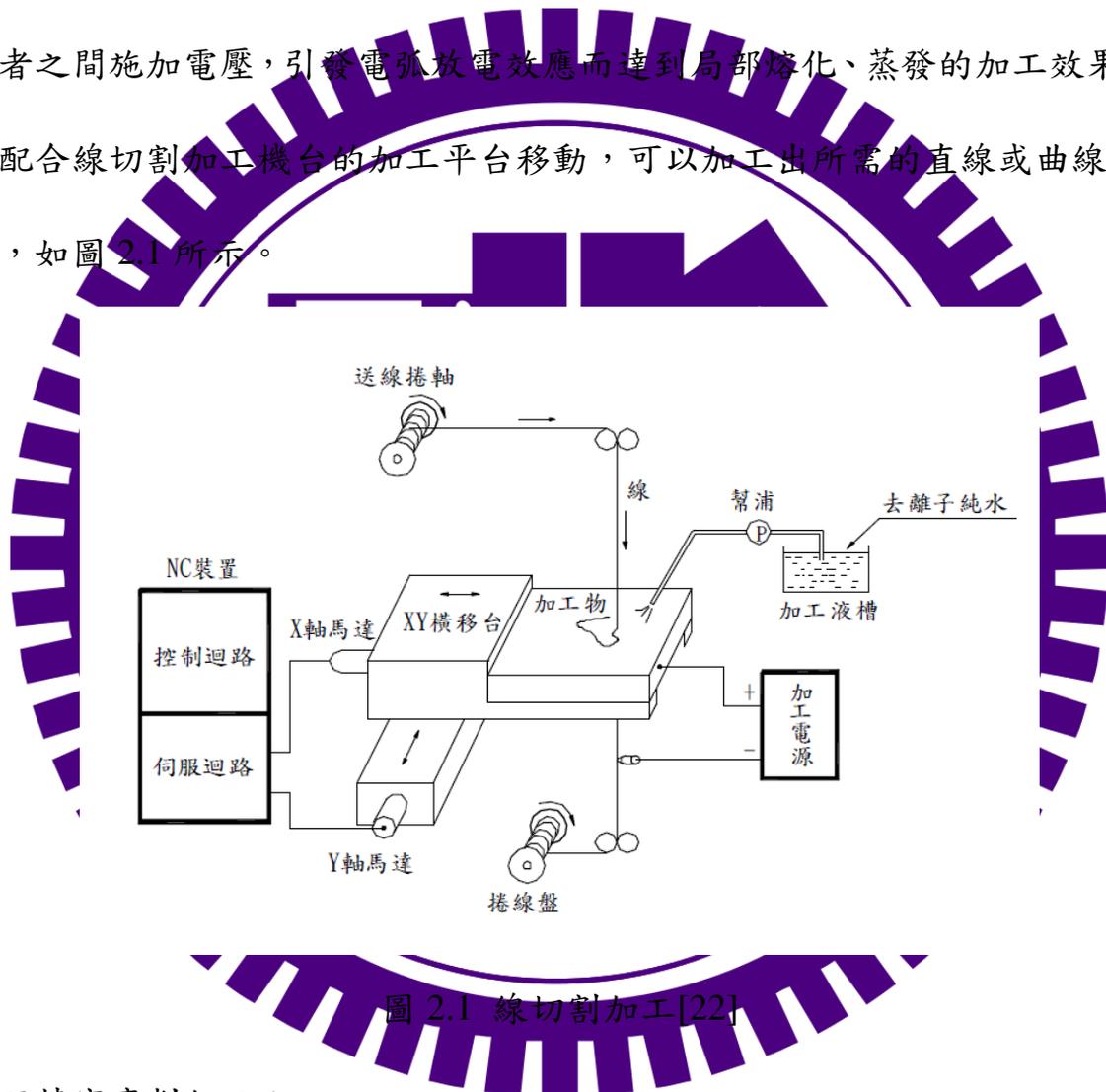


圖 2.1 線切割加工[22]

鑽石精密磨削加工：

鑽石精密磨削加工是利用鑽石刀具或尖刀型鑽石砂輪片之尖端(圖 2.2)對工件做機械加工，並配合加工平台精密位移控制，可做精密磨削加工，例如圖 2.3 所示之 V 型溝槽。

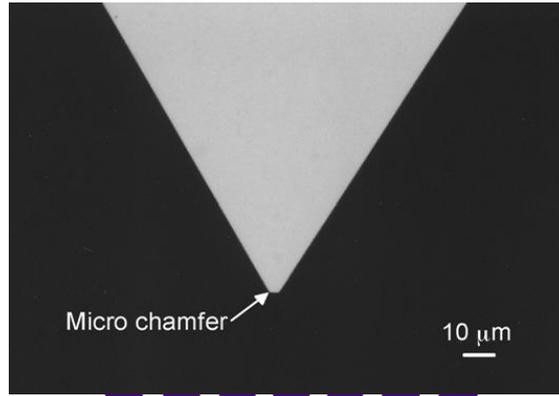


圖 2.2 鑽石精密磨削加工之刀具尖端[19]

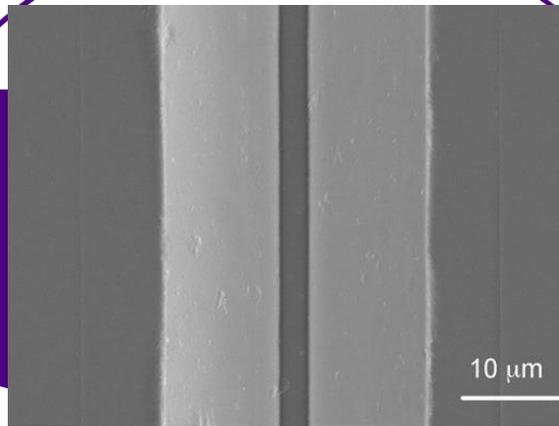


圖 2.3 精密磨削加工 V 型溝槽[19]

放電加工：

放電加工的加工原理與線切割加工相同，在電極與工件(需可導電)兩者之間施加電壓，引發電弧放電效應而達到局部熔化、蒸發的加工效果，如圖 2.4 所示。如電極表面有結構，則可用放電加工在工件上翻印出其結構。

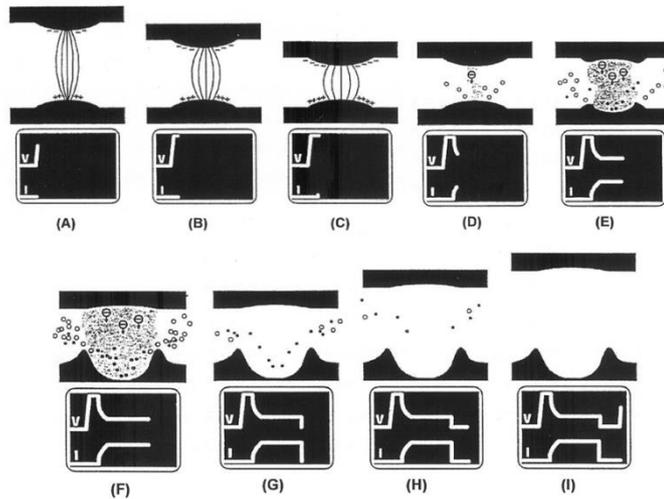


圖 2.4 放電加工原理[23]

NiCo 合金電鑄：

電鑄應用的電化學原理是一種電沉積的過程，藉由外界提供的電能，使含有金屬離子及其他添加物的混合溶液，在陰極及陽極表面進行電化學的氧化還原反應，把想要產生的金屬沉積在工件上，如圖 2.5 所示。運用此技術將 NiCo 合金電鑄於工件上，而後脫模則可取得 NiCo 合金模具，且可完全複製工件上之結構。

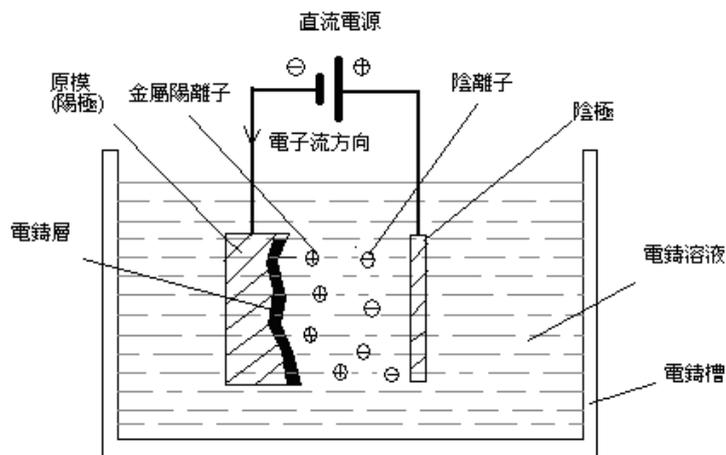


圖 2.5 精密電鑄[24]

直接加壓成形加工：

將含有微結構之模具表面與工件接觸，並施加壓力給予模具與工件，使模具上之微結構翻印在工件上，如圖 2.6 所示。因此加工方式為兩材料相壓，故微結構模具之材料硬度需大於工件材料硬度。



圖 2.6 直接加壓加工

2.1.2 間接翻模流程

在凸出微結構陽模製做方面，線切割加工及鑽石精密磨削加工兩種方式皆有可能加工出本研究所需之陽模。但在微結構凹槽陰模翻模方面，放電加工是運用電弧放電效應而達到局部熔化、蒸發的加工效果，不僅難以翻模出足夠尖銳的微結構凹槽，且加工後陽模上之尖端微結構也會因電弧放電效應而遭到破壞，故不適合本研究設計加工；而 NiCo 合金電鑄雖然可以完全複製陽模上之微結構，但所翻鑄出的微結構凹槽陰模不僅厚度很薄，且能承受溫度僅約 430°C ，在玻璃熱壓成形的高溫高壓環境下容易損壞，故亦不適合本研究設計加工。

根據以上敘述，本研究最終訂定了以下間接翻模流程：先運用線切割加工或鑽石精密磨削加工兩種方式加工出凸出微結構陽模，再配合直接加壓成形加工的方式翻模出微結構凹槽陰模，流程如圖 2.7 所示。

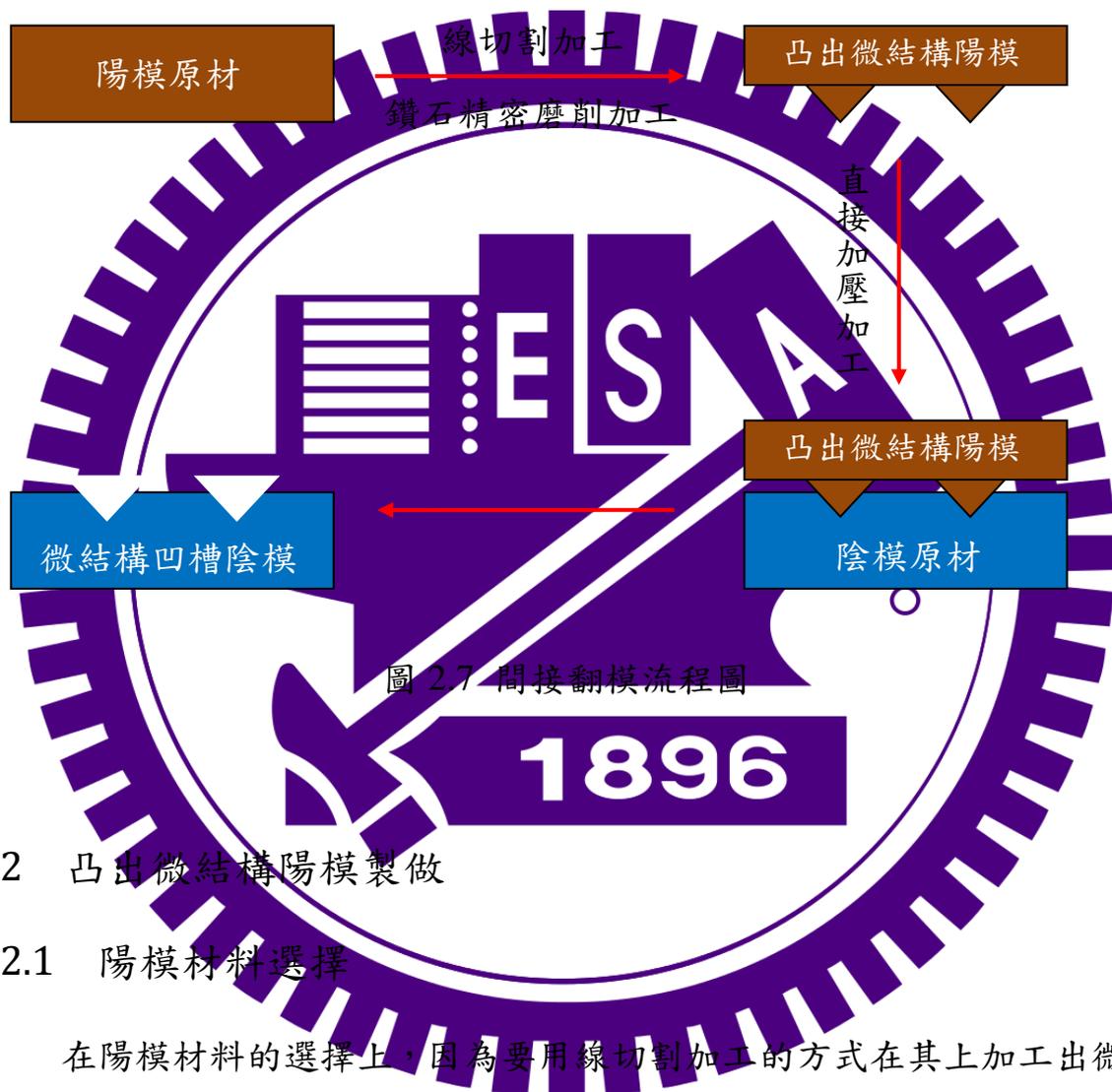


圖 2.7 間接翻模流程圖

2.2 凸出微結構陽模製做

2.2.1 陽模材料選擇

在陽模材料的選擇上，因為要用線切割加工的方式在其上加工出微結構，故必須為導電性材料；另一方面，加工出的微結構陽模要用直接加壓加工的方式翻模出微結構陰模，故必須要有足夠的硬度。依上述兩點，本研究選用碳化鎢(WC)作為陽模材料，其材料性質如表 2.1 所示。

表 2.1 碳化鎢材料性質

碳化鎢(WC)	
楊氏係數(GPa)	669
抗拉強度(MPa)	344
抗壓強度(MPa)	2683
硬度(HRA)	90
密度(g/cm ³)	15.7

2.2.2 微結構加工設計

微結構加工分為兩道次，運用線切割加工或鑽石精密磨削加工在陽模原材上先加工出凸出三角柱微結構，如圖 2.8、圖 2.9 所示，接著將加工面旋轉 90° 後，以相同加工路徑再次加工，則可得到凸出尖端微結構陣列陽模，如圖 2.10、圖 2.11 所示。

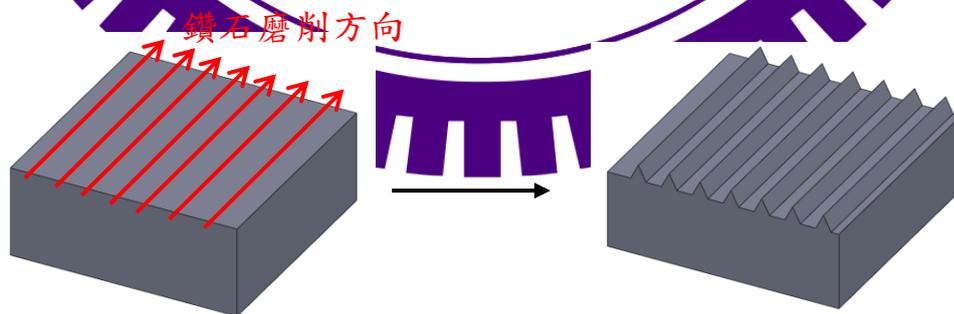


圖 2.8 鑽石精密磨削加工-第一道次

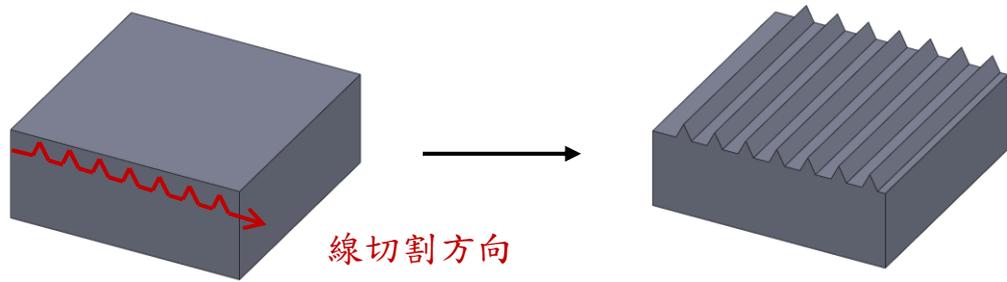


圖 2.9 線切割加工-第一道次

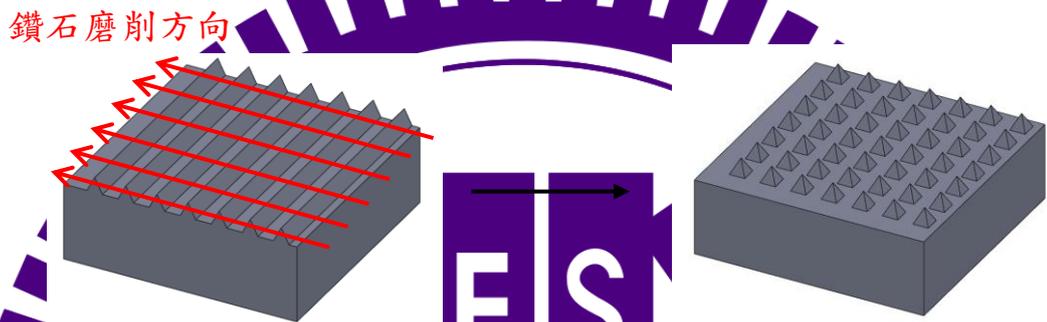


圖 2.10 鑽石精密磨削加工-第二道次

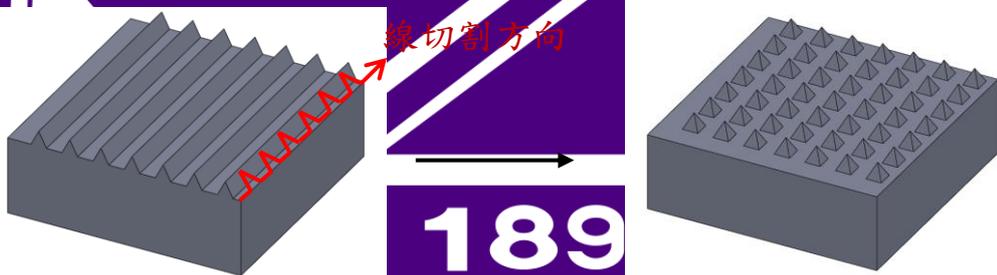


圖 2.11 微結構加工-第二道次

本研究運用之線切割加工其線徑為 $\phi 20\mu\text{m}$ ，期望能在陽模原材上加工出高 $40\mu\text{m}$ 、寬 $60\mu\text{m}$ 、pitch $100\mu\text{m}$ 之凸出微結構；而鑽石精密磨削加工是運用尖刀型鑽石砂輪刀具，其刀鼻半徑為 $25\mu\text{m}$ 、鑽石磨角為 15° 、誤差為 $2\mu\text{m}$ ，期望能陽模原材上加工出高 $40\mu\text{m}$ 、寬 $60\mu\text{m}$ 、pitch $150\mu\text{m}$ 之凸出微結構。因各自加工規格的限制以及其極限，設定上述的期望加工結構尺寸。

2.2.3 微結構加工成果

微結構加工成果的量測運用光學顯微鏡(圖 2.12a)、基恩斯(KEYENCE)的 3D 雷射共軛焦顯微鏡(圖 2.12b)或掃描式電子顯微鏡(SEM)(圖 2.13)。加工後成果如下：

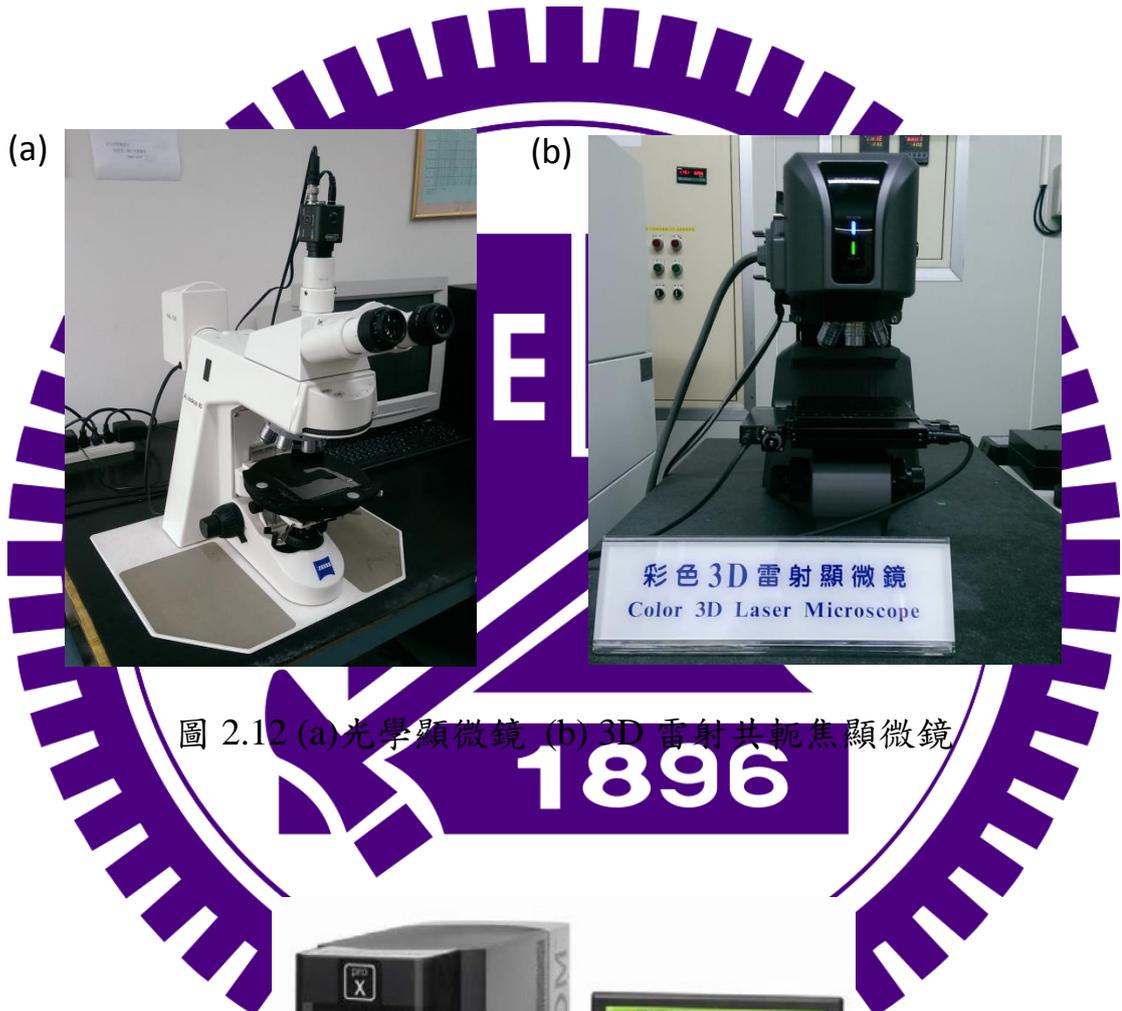


圖 2.12 (a)光學顯微鏡 (b) 3D 雷射共軛焦顯微鏡



圖 2.13 掃描式電子顯微鏡(SEM)

線切割加工：

本研究委託金屬工業研究發展中心加工，而加工好的微結構表面上視圖(圖 2.14)雖然看似加工成功，但由量測之 3D 圖(圖 2.15)可發現兩方向加工情況不同，一個方向為凸出三角形的結構，如圖 2.16 所示，而另一方向卻是凸出梯形的結構，如圖 2.17 所示。

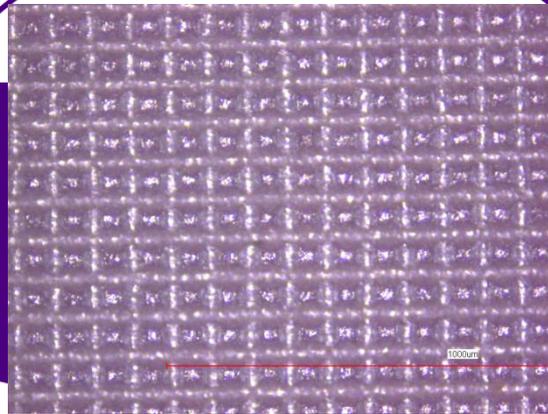


圖 2.14 線切割加工微結構上視圖

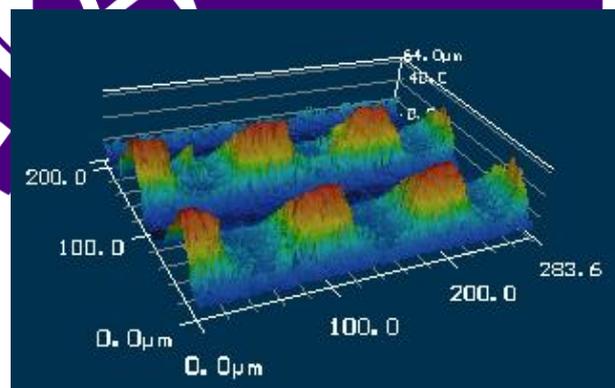


圖 2.15 線切割加工微結構 3D 圖

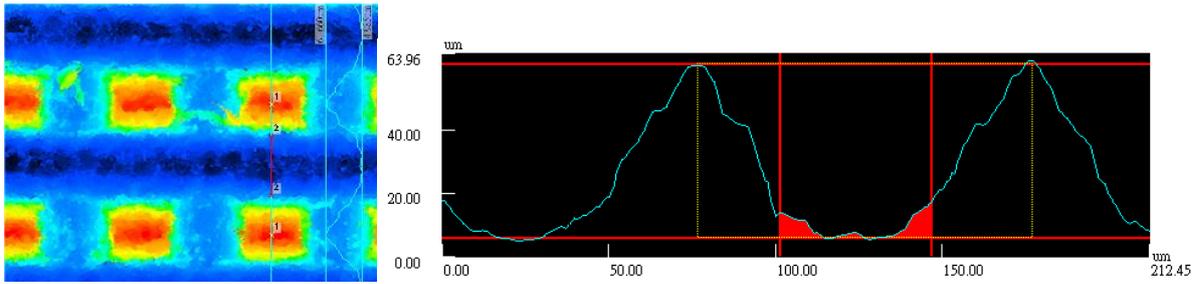


圖 2.16 線切割加工微結構側視圖-三角形方向

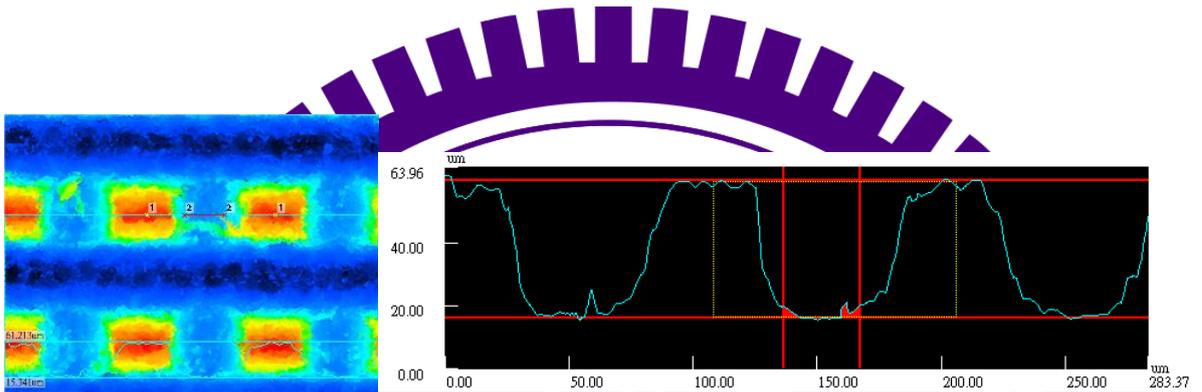


圖 2.17 線切割加工微結構側視圖-梯形方向

此結果是因為線切割加工在第一道次成功加工出三角柱微結構，但在第二道次加工時因加工面已有微結構，造成第二道次加工基準面與第一道次不相同，以至於兩方向加工路徑不同，無法加工出所要求的結構。

鑽石精密磨削加工：

本研究委託祥旺機械工業股份有限公司加工，成功在 $\phi 15\text{mm}$ 、高 15mm 的碳化鎢圓柱上表面加工出整面微結構，如圖 2.18 所示。因微結構數量眾多，故本研究在量測時將碳化鎢圓柱設定一固定方位後，在整個微結構範圍的左側、右側、上側、下側及中間各選取一固定位置之微結構，以當作整體微結構加工成果之參考，如圖 2.19 所示。



圖 2.18 碳化鎢圓柱上表面微結構



圖 2.19 碳化鎢圓柱微結構量測選取位置示意圖

量測所選取之微結構後，可發現右側、上側、下側及中間的微結構尺寸大小及 pitch 皆有達到所需之加工要求，且微結構尖端部分也足夠尖銳，如圖 2.20、圖 2.21、圖 2.22、圖 2.23 所示的中間結構(其餘位置量測參閱附錄 B)。而左側微結構略有瑕疵，其微結構長度及寬度不同，且微結構尖端部分也不夠尖銳，如圖 2.24、圖 2.25、圖 2.26、圖 2.27 所示。

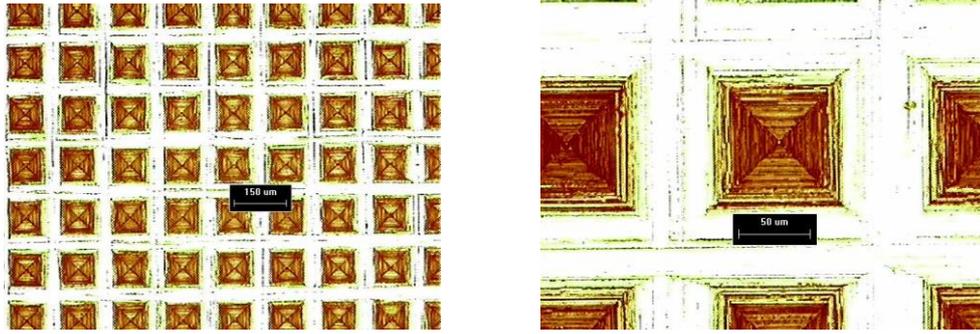


圖 2.20 鑽石精密磨削加工微結構上視圖



圖 2.21 鑽石精密磨削加工微結構 SEM 圖

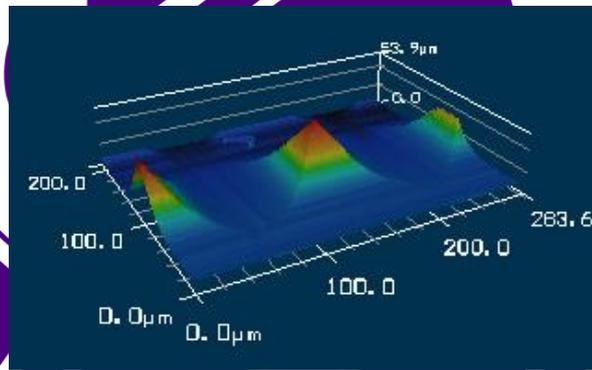


圖 2.22 鑽石精密磨削加工微結構 3D 圖

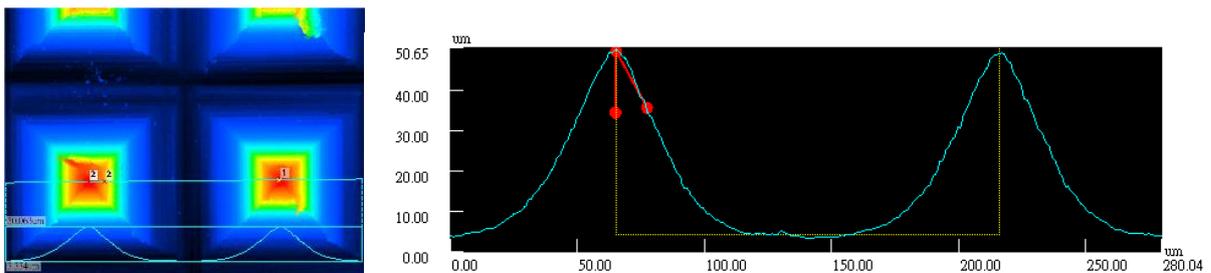


圖 2.23 鑽石精密磨削加工微結構側視圖

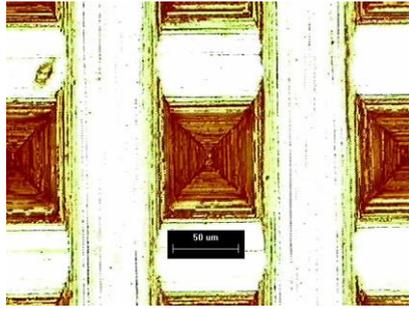


圖 2.24 鑽石精密磨削加工瑕疵微結構上視圖



圖 2.25 鑽石精密磨削加工瑕疵微結構 SEM 圖

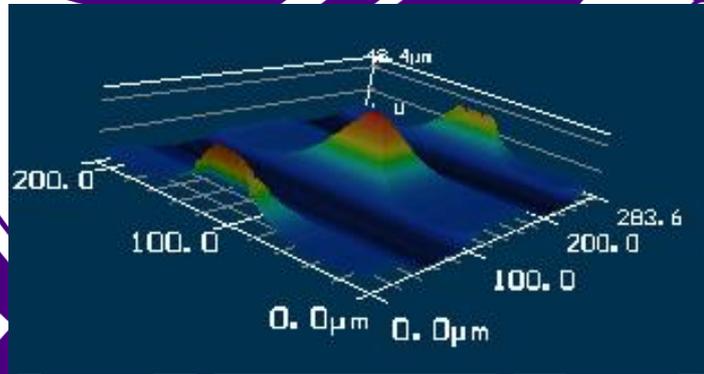


圖 2.26 鑽石精密磨削加工瑕疵微結構 3D 圖

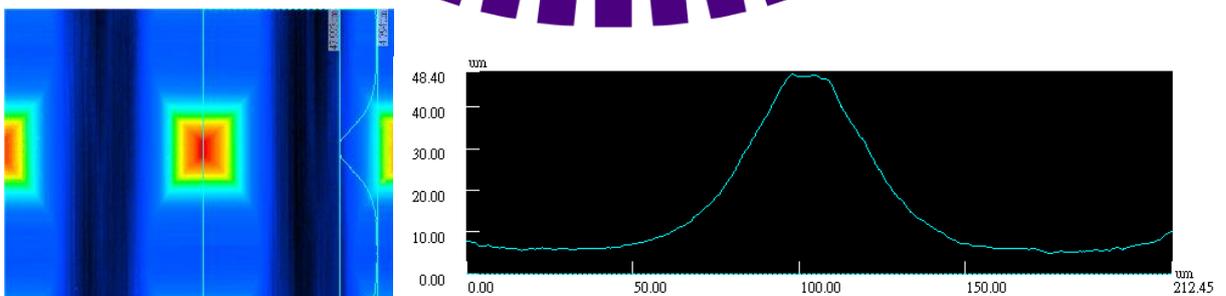


圖 2.27 鑽石精密磨削加工瑕疵微結構側視圖

雖然有一小部分微結構有瑕疵，但運用鑽石精密磨削加工來加工本研
究所需之微結構陽模是可行的方式。碳化鎢微結構陽模完成後，接著將此
陽模運用直接加壓成形加工的方式翻模出微結構凹槽陰模。

2.3 微結構陰模翻模

2.3.1 陰模材料選擇

在陰膜材料選擇上，因為要運用直接加壓加工的方式將陽模上的微結
構轉印於陰模原材上，故其材料硬度需小於碳化鎢之硬度；另一方面，加
工出的微結構凹槽陰模將進行玻璃熱壓成形實驗，故其材料需能夠耐熱衝
擊且在高溫($\sim 568^{\circ}\text{C}$)中仍具有高強度。依上述兩點，本研究選用不鏽鋼 304
作為陰模材料，其材料性質如表 2.2 所示。

表 2.2 不鏽鋼 304 材料性質

不鏽鋼 304	
楊氏係數(GPa)	193
降伏強度(MPa)	215
抗拉強度(MPa)	505
硬度(HV)	129
密度(g/cm^3)	8.00
熱膨脹係數($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	18.7 (0~649 $^{\circ}\text{C}$)

2.3.2 微結構翻模加工設計

將製作完成之凸出微結構陽模放置於陰模原材上，運用精密位移控制機台搭配荷重量測，對陽模與陰模進行直接加壓成形加工，如圖 2.28 所示。控制機台的位移速率，以 $10\mu\text{m/s}$ 固定速率對陽模及陰模持續加壓，到達所需的加壓荷重後停止，完成微結構翻模。期望能運用此方式在陰模原材上翻印出寬 $30\mu\text{m}$ 、深 $20\mu\text{m}$ 、pitch $150\mu\text{m}$ 之凹槽微結構。而在加工時陽模及陰模的方位固定上，將陽模有瑕疵微結構的左側部分與陰模左側訂為同一方向，以便後續量測與比對。



圖 2.28 直接加壓成形加工示意圖

在陰模原材尺寸方面，為了配合後續玻璃熱壓成形實驗所使用之熱壓機台，其尺寸最終需為 $\phi 60\text{mm}$ ，但在本研究初期先運用 $\phi 20\text{mm}$ 之不鏽鋼做測試，一方面找出最佳的直接加壓成形加工方式，另一方面找出欲加工出所需尺寸之微結構凹槽陣列所需的力量。最終再運用此方式及力量在 $\phi 20\text{mm}$ 之不鏽鋼上加工出微結構凹槽陣列。

本研究直接加壓翻模加工所使用之機台為宏達儀器的精密位移控制機台(圖 2.29)，規格如表 2.3 所示。



圖 2.29 宏達儀器精密位移控制機台

表 2.3 宏達儀器精密位移控制機台規格

Displacement accuracy	10 μm
Maximum load	50 kN
Load accuracy	± 0.5 N

2.3.3 微結構翻模加工實驗

本研究用鑽石精密磨削加工出的碳化鎢陽模(圖 2.17)直接加壓加工於 $\phi 20\text{mm}$ 、高 7mm 的不鏽鋼 304 圓柱(圖 2.30)，如圖 2.31 所示，加工的位置速率為 $10\mu\text{m/s}$ 、翻模力量為 400kgf。



圖 2.31 微結構翻模實驗

翻模實驗完成後，可發現不鏽鋼304陰模原材上有彎月形微結構陣列，如圖 2.32、2.33 所示。由此實驗可知，雖然直接加壓加工是一個可行的翻模方式，可成功轉印陽模上之微結構，但此方式仍有問題需要解決：一方面微結構陣列呈現彎月形是因為平行度不夠，造成力量分佈不均勻，導致只有部分微結構成功轉印；另一方面，要將整面微結構轉印至陰模原材上，並達到所需的尺寸大小，400kgf 翻模力量是不夠的。

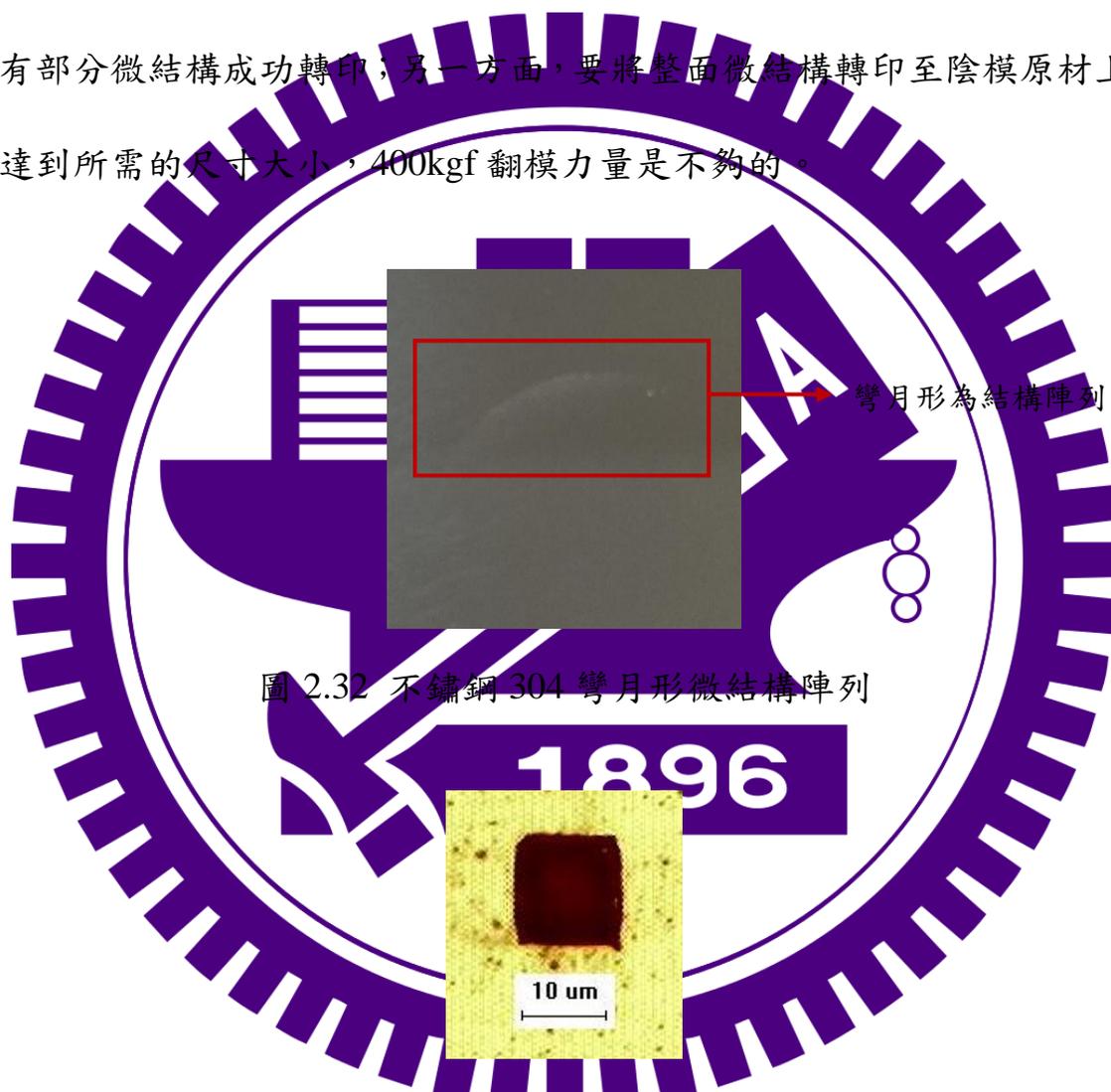


圖 2.32 不鏽鋼 304 彎月形微結構陣列

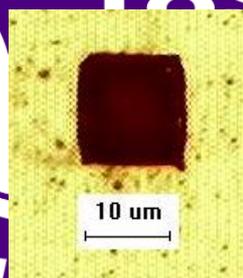


圖 2.33 彎月形微結構陣列單一結構

2.3.4 微結構翻模加工問題解決

由上述可知，直接加壓翻模加工仍有平行度不夠以及翻模所需力量未知兩個問題，本研究接著對此兩問題做解決。

平行度不夠問題：

直接加壓翻模加工時，要將精密位移機台、機台平板、陽模及陰模皆達到足夠的平行度頗有難度，故本研究針對平行度不夠所造成的問題：力量分佈不均來解決。

在直接加壓翻模加工時，配合兩橡膠墊片及一不鏽鋼墊片，使翻模力量透過橡膠墊片傳遞於陽模及陰模，如圖 2.34 所示。此方式可有效將翻模力量均勻分佈，解決平行度不夠所造成力量分佈不均的問題，如圖 2.35 所示。

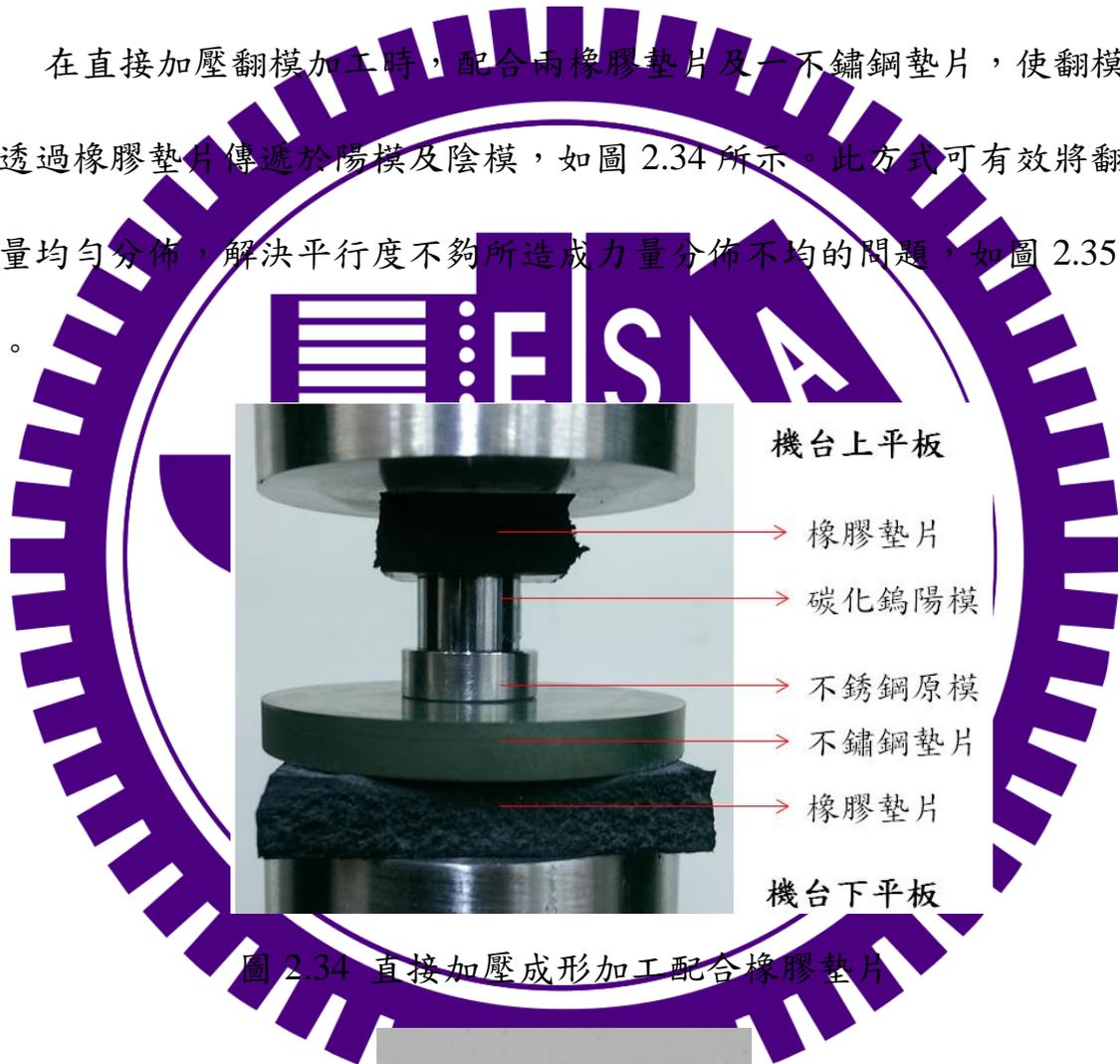


圖 2.34 直接加壓成形加工配合橡膠墊片



圖 2.35 直接加壓成形加工配合橡膠墊片結果

所需力量問題：

為了要知道欲翻出所需尺寸之微結構凹槽陣列所需的力量，本研究運用不同翻模力量，分別在不鏽鋼 304 陰模原材上翻壓出不同尺寸大小的微結構凹槽，並量取各微結構凹槽之寬度，期望繪出翻模力量-微結構凹槽寬度關係圖後，估計出所需之翻模力量。

量測微結構凹槽寬度的部分，因為在直接加壓成形加工時，將陽模有瑕疵微結構的左側部分與陰模左側訂為同一方向，故陰模左側部分翻壓出之微結構凹槽也將瑕疵轉印出來，微結構呈現長度及寬度不相同的情況，如圖 2.36 所示。因此，本研究在量測時不將左側瑕疵微結構凹槽寬度納入參考，而其餘在上側、下側、右側以及中間各選取一固定位置的微結構凹槽量測其寬度做為參考，如圖 2.37 所示。

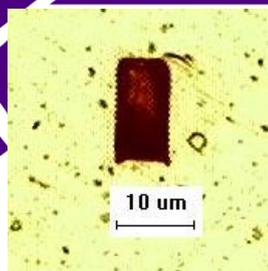


圖 2.36 不鏽鋼 304 陰模上的瑕疵微結構凹槽

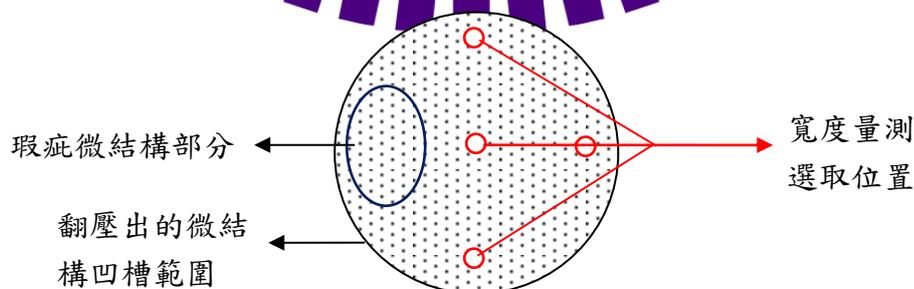


圖 2.37 不鏽鋼微結構凹槽量測寬度選取位置示意圖

經由多次翻模實驗，共運用了400kgf、500kgf、600kgf、700kgf、1200kgf、1900kgf、2400kgf、2700kgf的翻模力，其各成果如表 2.4 及圖 2.38 所示，最終尋找出所需的翻模力量為 2700kgf。

表 2.4 400-2700kgf 各翻模力量的微結構凹槽寬度

結構寬 施加力	中(um)	右(um)	上(um)	下(um)	平均(um)
400(kgf)	12.5	10.7	12.5	11.8	11.9
500(kgf)	14.6	11.4	13.9	12.5	13.1
600(kgf)	14.3	15.0	14.3	14.3	14.5
700(kgf)	17.1	14.6	15.7	14.6	15.5
1200(kgf)	20.0	20.4	21.1	20.7	20.5
1900(kgf)	23.6	25.7	25.4	25.7	25.1
2400(kgf)	27.8	29.3	25.7	31.8	28.7
2700(kgf)	28.2	29.3	29.3	32.5	29.8

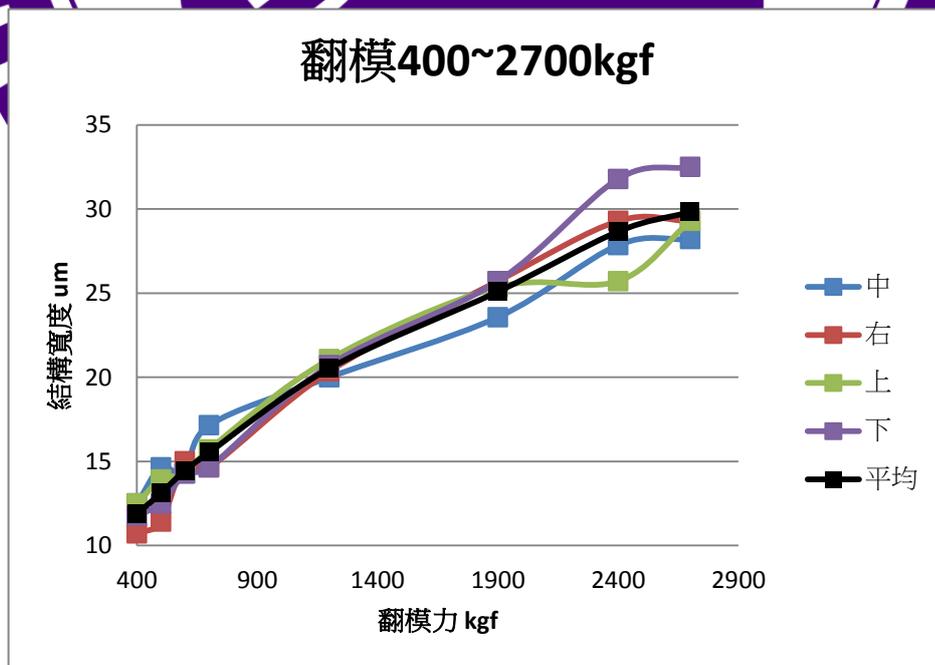


圖 2.38 400-2700kgf 翻模力量及微結構凹槽寬度關係圖

2.3.5 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼微結構翻模加工實驗成果

本研究依據實驗推估，運用 2700kgf 翻模力量，並配合橡膠墊片解決平行度不夠問題，成功在 $\phi 20\text{mm}$ 、高 7mm 不鏽鋼 304 陰模原材上翻壓出平均寬度為 $30\mu\text{m}$ 的微結構凹槽。成果如圖 2.39、圖 2.40、圖 2.41、圖 2.42 所示的中間結構(其餘位置量測參閱附錄 B)。



圖 2.39 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼翻模成果

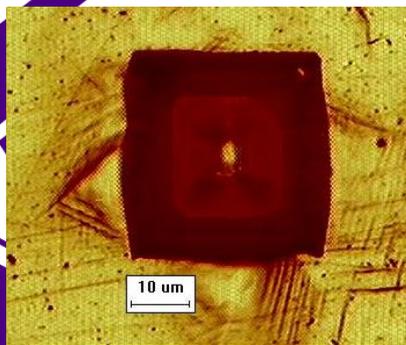


圖 2.40 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼翻模成果-微結構上視圖

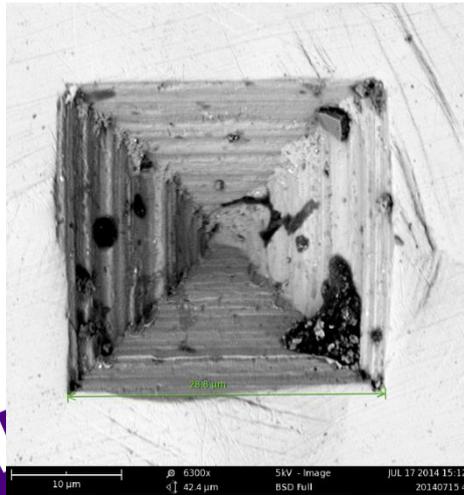


圖 2.41 ϕ 20mm 不鏽鋼翻模成果-微結構 SEM 圖

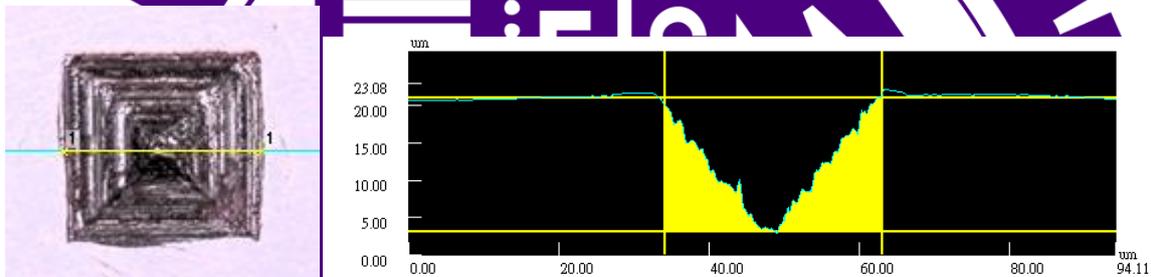


圖 2.42 ϕ 20mm 不鏽鋼翻模成果-微結構側視圖

2.3.6 ϕ 60mm 不鏽鋼微結構翻模加工實驗成果

運用 ϕ 20mm 不鏽鋼測試出直接加壓成形加工所需的數量及最佳加工方式後，為了配合後續玻璃熱壓成形實驗所使用之熱壓機台，運用同樣加工方式及數量在 ϕ 60mm 不鏽鋼上加工出微結構凹槽，如圖 2.43 所示，成果如圖 2.44 所示，各部位結構詳細量測成果參閱附錄 B。量測加工結果後發現相較於 ϕ 20mm 不鏽鋼加工成果， ϕ 60mm 不鏽鋼加工成果其中間結構較小，而其餘三側結構較大，如表 2.5 及表 2.6 所示。

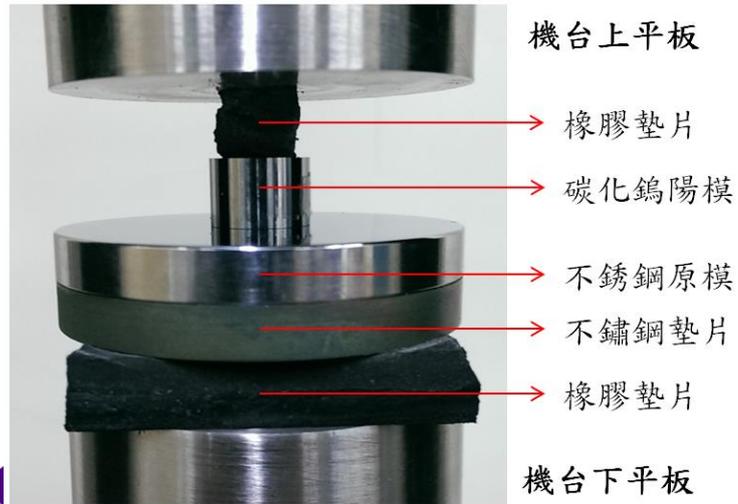


圖 2.43 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼直接加壓成形加工

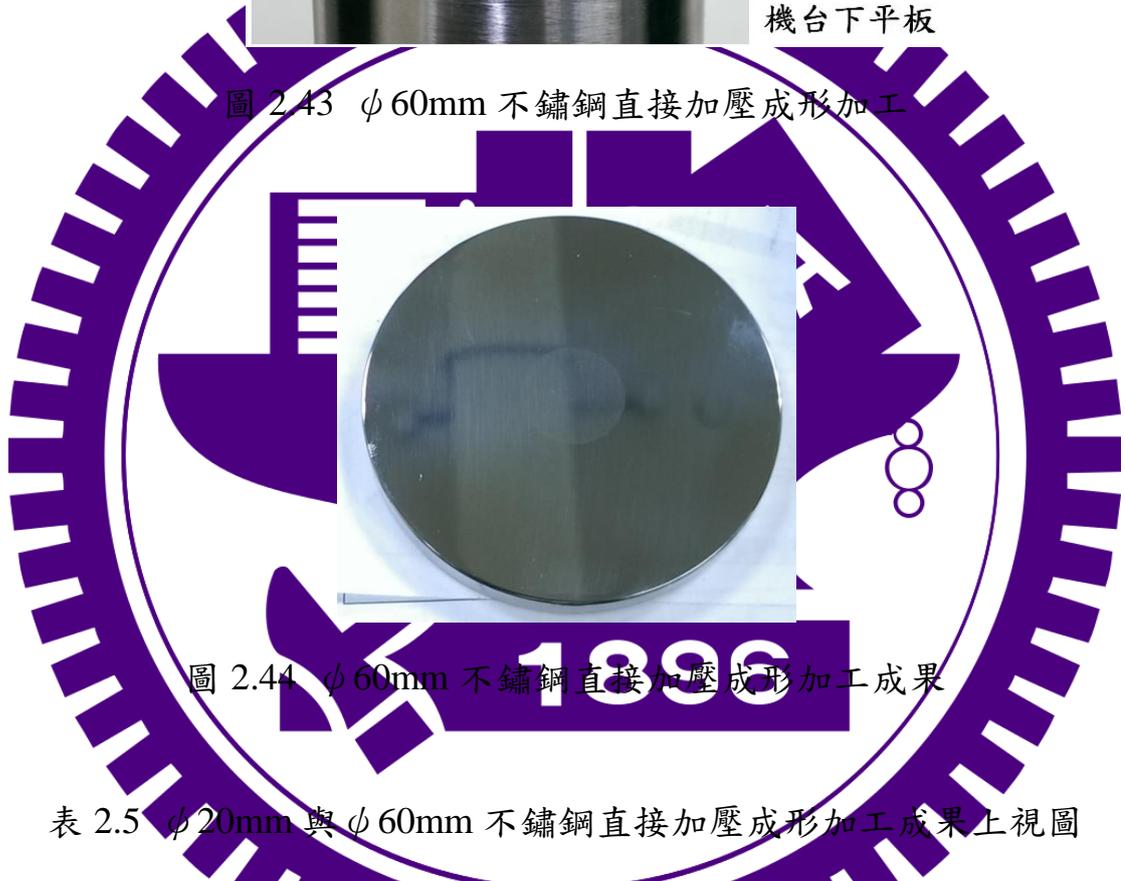


圖 2.44 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼直接加壓成形加工成果

表 2.5 $\phi 20\text{mm}$ 與 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼直接加壓成形加工成果上視圖

	中間	右邊	上邊	下邊
$\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼				
$\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼				

表 2.6 $\phi 20\text{mm}$ 與 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼直接加壓成形加工成果比較

		中(um)	右(um)	上(um)	下(um)
$\Phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼	結構寬度	22.29	40.88	38.08	38.97
	結構深度	13.30	23.70	20.92	23.27
$\Phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼	結構寬度	28.91	29.29	29.16	30.31
	結構深度	17.76	16.36	15.82	18.10

此結果是因為碳化鎢陽模為 $\phi 15\text{mm}$ 圓柱，與 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼尺寸大小差異大，使得在進行直接加壓成形加工時力量集中在中間，造成 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼彎曲，如圖 2.45 所示，進而造成加工出的中間結構減小，而外側結構增大。

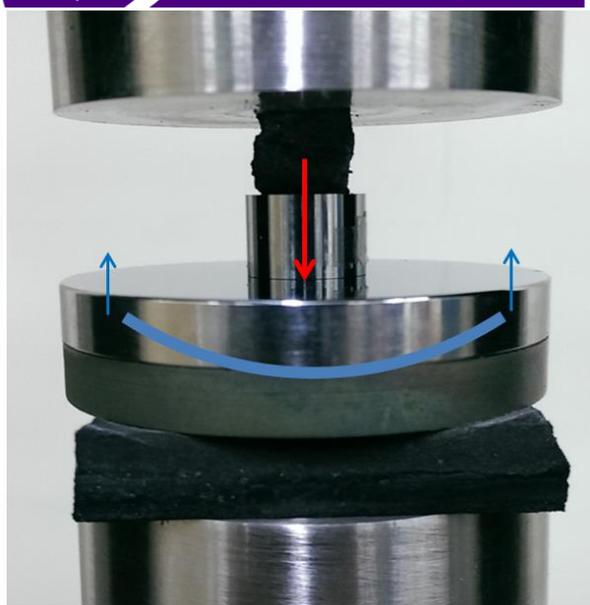


圖 2.45 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼彎曲

2.4 微結構模具製程成果與討論

本研究已成功研究出微結構模具製程，先運用鑽石精密磨削加工在 ϕ 15mm、高 15mm 的碳化鎢原材上加工出凸出微結構陽模，其單一結構尺寸為寬 $60\mu\text{m}$ 、高 $40\mu\text{m}$ 、pitch $150\mu\text{m}$ 。接著再運用直接加壓加工的翻模方式，將碳化鎢陽模上的微結構轉印在 ϕ 20mm、高 7mm 的不鏽鋼 304 原材上，製作出微結構凹槽陰模，其單一結構尺寸為寬約 $30\mu\text{m}$ 、高約 $20\mu\text{m}$ 、pitch $150\mu\text{m}$ 。而後為了配合後續玻璃熱壓成形實驗所使用之熱壓機台，運用同樣加工方式及力量在 ϕ 60mm 不鏽鋼上加工出微結構凹槽，但發現因為 ϕ 15mm 碳化鎢陽模及 ϕ 60mm 不鏽鋼尺寸大小差異大，造成 ϕ 60mm 不鏽鋼彎曲，進而造成加工出的中間結構減小，而外側結構增大。

欲解決 ϕ 60mm 不鏽鋼彎曲問題，可能有以下三個方式：

1. 增加 ϕ 60mm 不鏽鋼之厚度。
2. 製作夾治具以固定 ϕ 60mm 不鏽鋼。
3. 增大碳化鎢陽模的大小，以減小陽模及陰模之尺寸差異。

雖然目前仍有 ϕ 60mm 不鏽鋼彎曲問題，但一方面此問題只影響內外微結構凹槽大小，不影響微結構凹槽尖端形狀；另一方面未來如增大碳化鎢大小，使得陽模及陰模尺寸差異縮小，則此問題也減小，故本研究運用此模具製程方式製作出的 ϕ 60mm 不鏽鋼微結構凹槽陰模，接著進行後續的模具玻璃熱壓實驗。

第三章 模具玻璃熱壓成形實驗

在上一章節中，本研究已尋找出微結構模具製程，並成功製做出不鏽鋼微結構凹槽模具。為了測試此模具可用於玻璃熱壓成形實驗，本章節將製做完成之微結構模具鍍上抗沾黏鍍膜層後，進行模具玻璃熱壓成形實驗。

3.1 微結構模具鍍膜

玻璃在進行高溫熱壓時，容易與模具發生沾黏，進而造成模具損傷，因此需要在模具上鍍上抗沾黏膜層，以保護模具。目前用於玻璃熱壓成形的鍍膜材料大部分為貴金屬 Pt-Ir[25]或類鑽石碳(DLC)等。本研究委託佳凌科技股份有限公司，在不鏽鋼模具上鍍上 DLC 膜層，先將 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼微結構凹槽模具給予做鍍膜參數測試，測試完成後再將 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼微結構凹槽模具給予鍍膜，完成最終用於玻璃熱壓成形實驗之模具。

此 DLC 膜層厚度約為 700nm，對原直接加壓成形加工出之微結構凹槽影響不大，將鍍膜完成之 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼 DLC 鍍膜模具(圖 3.1)與其鍍膜前的微結構凹槽相比較，也可看出此鍍膜對微結構凹槽影響不大，如圖 3.2 所示的中間結構(其餘位置量測參閱附錄 B)。



圖 3.1 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼 DLC 鍍膜模具

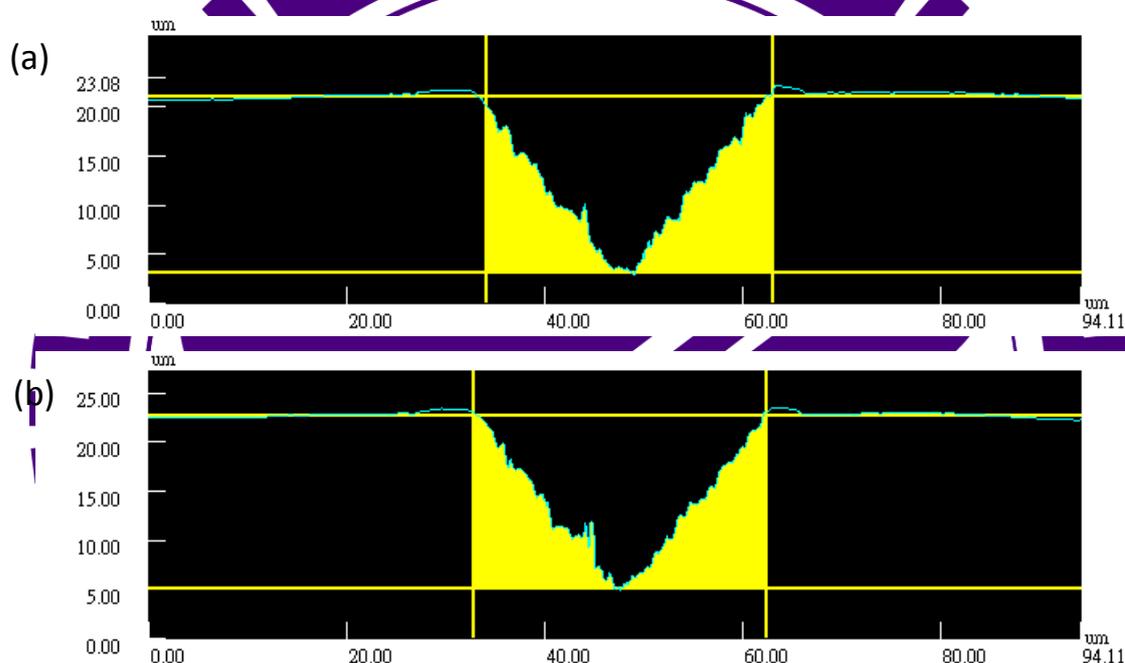


圖 3.2 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼微 DLC 鍍膜模具結構側視圖(a)鍍膜前(b)鍍膜後

確認此鍍膜參數後，將 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼微結構凹槽模具給予鍍膜，但由於佳凌公司鍍膜機台之限制，無法將 $\phi 60\text{mm}$ 整面鍍上 DLC 膜層，但仍可將所有微結構凹槽都鍍上 DLC 膜層，如圖 3.3 所示。將其鍍膜後之結構凹槽量測後，仍可看出此鍍膜對微結構凹槽影響不大。如圖 3.4 所示的下邊結構(其餘位置量測參閱附錄 B)。



圖 3.3 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼 DLC 鍍膜模具

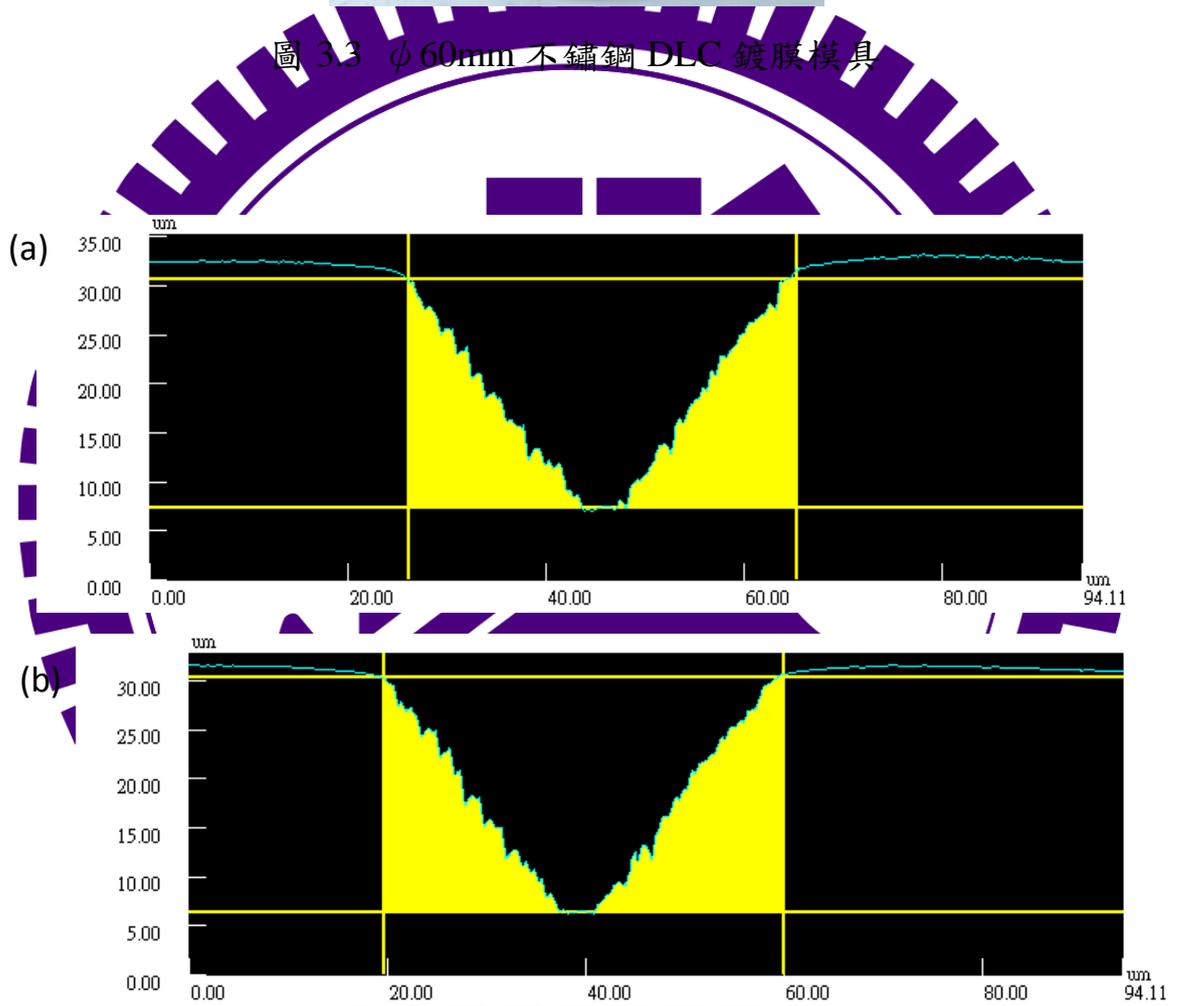


圖 3.4 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼微 DLC 鍍膜模具結構側視圖(a)鍍膜前(b)鍍膜後

3.2 模具玻璃熱壓成形實驗

3.2.1 實驗設備

本研究使用的玻璃熱壓設備是由研究室學長 Hung [26]、Tsai[10]、鄭 [27]所研發設計及改良，其中包含了加熱爐(圖 3.5、3.6)、溫度控制系統、冷卻系統、真空與氣體環境系統及壓縮控制系統，實體如圖 3.7 所示，詳細規格如表 3.1 所示。溫度控制系統及冷卻系統可高效率的控制熱壓成形時玻璃及上下模具的溫度；真空與氣體環境系統可使熱壓成形的環境處於真空或氮氣之中，以防止模具氧化；壓縮控制系統可精準控制熱壓成形時的位移、壓力、速率等參數。

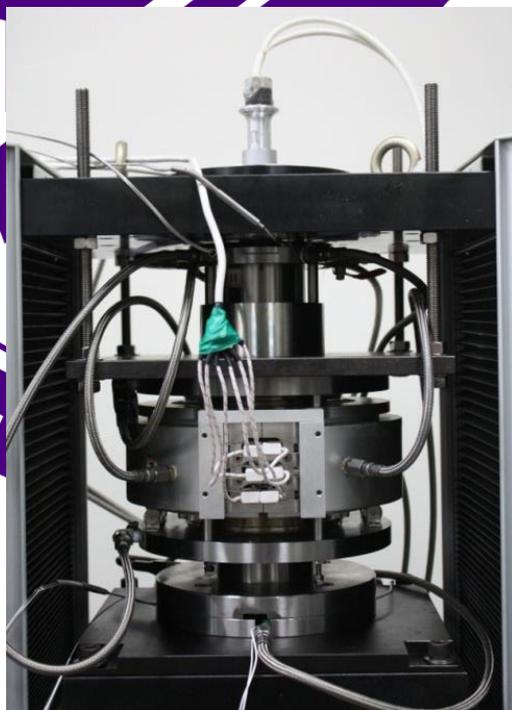


圖 3.5 加熱爐[10]

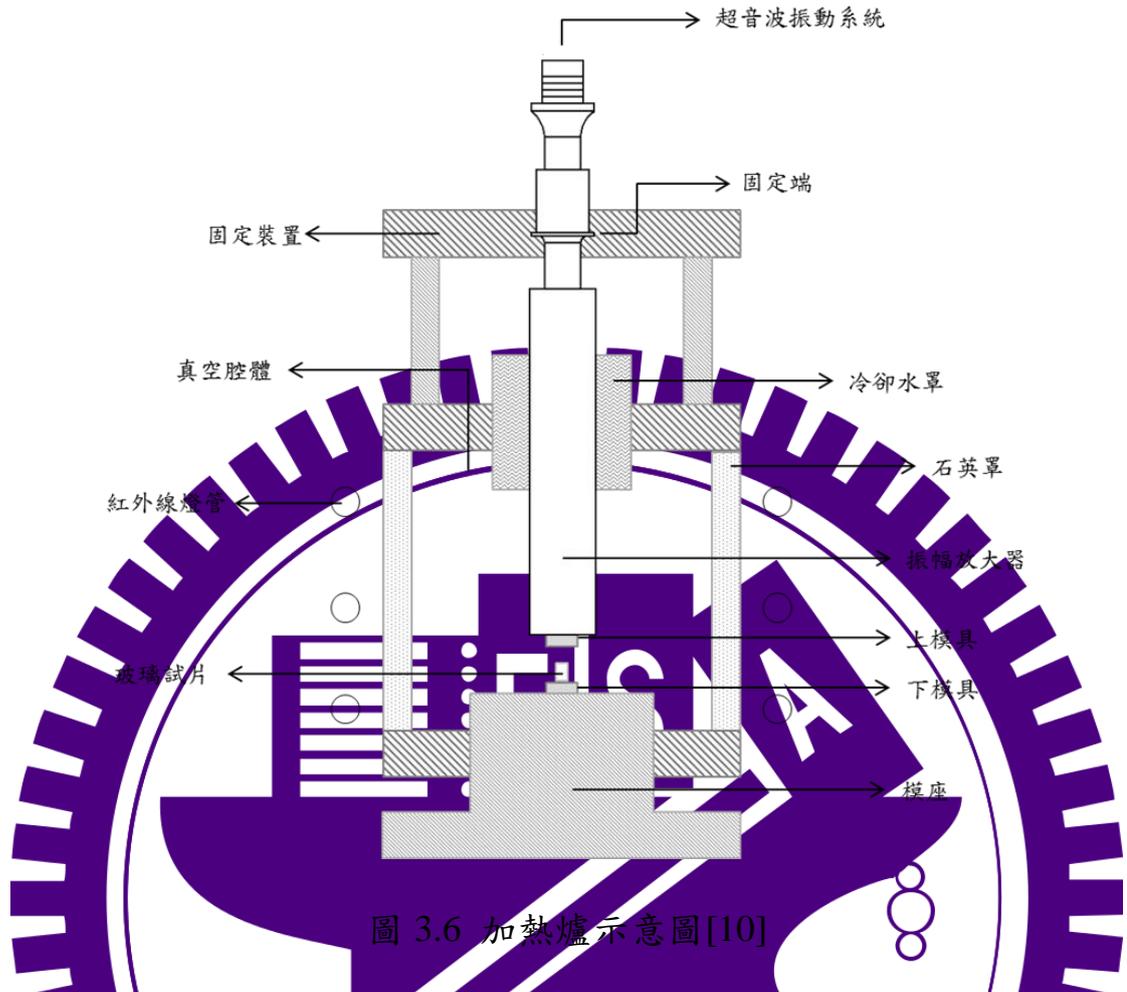


圖 3.6 加熱爐示意圖[10]

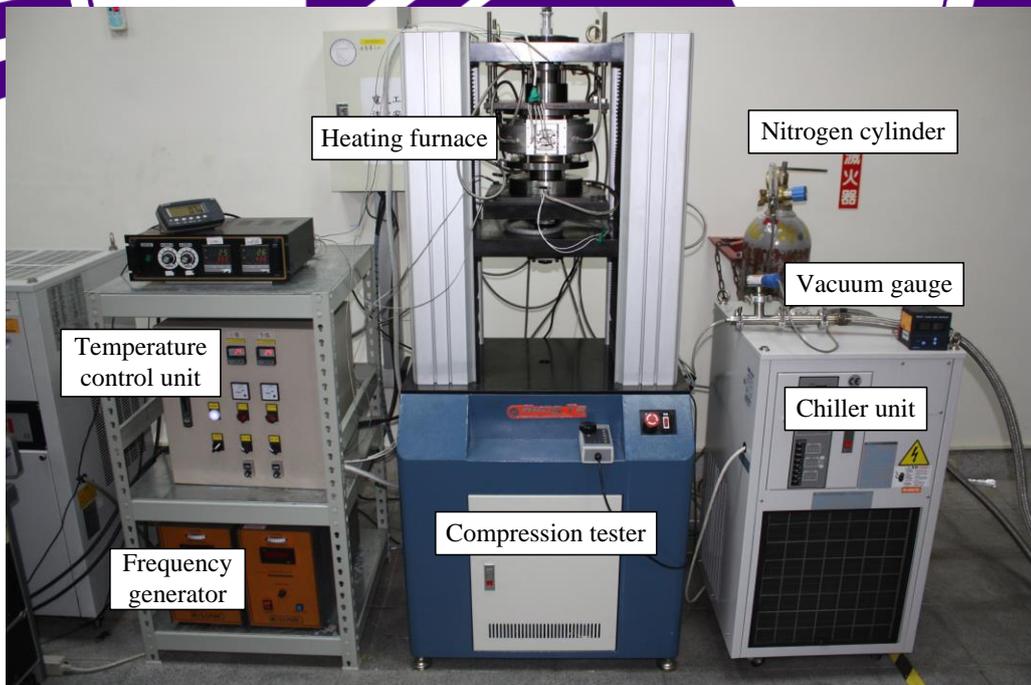


圖 3.7 超音波輔助玻璃熱壓設備[10]

表 3.1 超音波輔助玻璃熱壓設備規格[10]

熱壓設備規格	
Ultrasonic frequency()	35k Hz
Ultrasonic power	900 W
Amplitude on booster in 25°	3 μ m
Maximum temperature	700°C
Temperature accuracy	$\pm 1^\circ\text{C}$
Emboss speed	0.05 – 200 mm/min
Displacement accuracy	5 μ m
Maximum load	10 kN
Load accuracy	± 0.5 N
Degree of vacuum	5 torr
Maximum molding area	ϕ 85 mm

3.2.2 玻璃材料選擇

不同的玻璃材料有不同的硬度、T_g 點、熱膨脹係數、折射率等特性，本研究選用 ϕ 19mm 之 L-BAL42 (T_g=506°C) 作為玻璃材料，試片如圖 3.8 所示，其材料性質如表 3.2 所示。此玻璃材料上表面非平面，在進行玻璃熱壓實驗時會造成成形不均的情況，並非最合適的玻璃材料，但在本研究室目前有的玻璃材料中已為最合適。

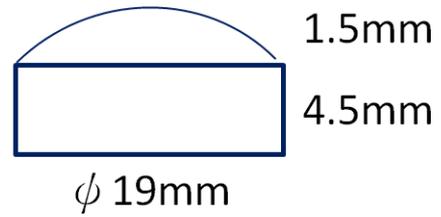


圖 3.8 L-BAL42 玻璃材料

表 3.2 L-BAL42 玻璃材料性質

L-BAL42 Glass	
轉化點 T_g ($^{\circ}\text{C}$)	506
降伏點 A_t ($^{\circ}\text{C}$)	538
線膨脹係數($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8.8
熱傳導率($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	1.028
楊氏係數(GPa)	89.1

3.2.3 實驗參數設定

熱壓參數方面參考 Tsai [10] 的研究，並根據本研究室的熱壓經驗，設定熱壓相關參數如表 3.3 所示，其中，真空度 3.6 torr 為本研究熱壓設備之真空極限。在熱壓時為了讓環境中含氧量減少，將熱壓腔體內先充滿氮氣，再將其抽至真空，並重複相同步驟兩次以達到目的。而在熱壓成形時模具

及玻璃的方位固定上，將模具有瑕疵微結構的左側部分與玻璃左側訂為同一方向，以便後續量測與比對。

表 3.3 玻璃熱壓成形實驗參數

玻璃熱壓成形實驗參數	
熱壓溫度(°C)	568
脫模溫度(°C)	510
熱壓位移(mm)	2.0
熱壓速度(mm/min)	1.5
熱壓真空度(torr)	3.6

3.2.4 實驗成果

熱壓成形實驗後的玻璃量測，因在熱壓成形時將模具有瑕疵微結構的左側部分與玻璃左側訂為同一方向，故不將玻璃左側納入實驗成果參考，而其餘在上側、下側、右側以及中間各選取一固定位置的玻璃微結構做為參考，如圖 3.9 所示。

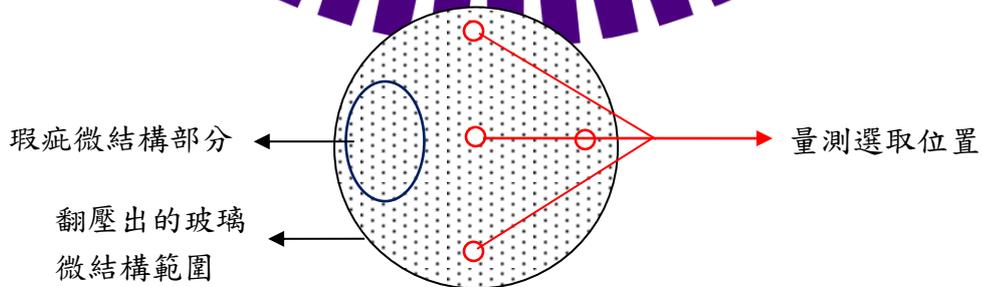


圖 3.9 玻璃微結構量測選取位置示意圖

熱壓實驗成果如圖 3.10 所示，成功在 L-BAL42 玻璃上熱壓成形出微結構陣列，但玻璃並未完全填充進模具凹槽之中，無法成形出玻璃尖端結構，如圖 3.11、圖 3.12 所示的中間結構(其餘位置量測參閱附錄 B)，其結構深度及寬度與模具比較則如表 3.4 所示。

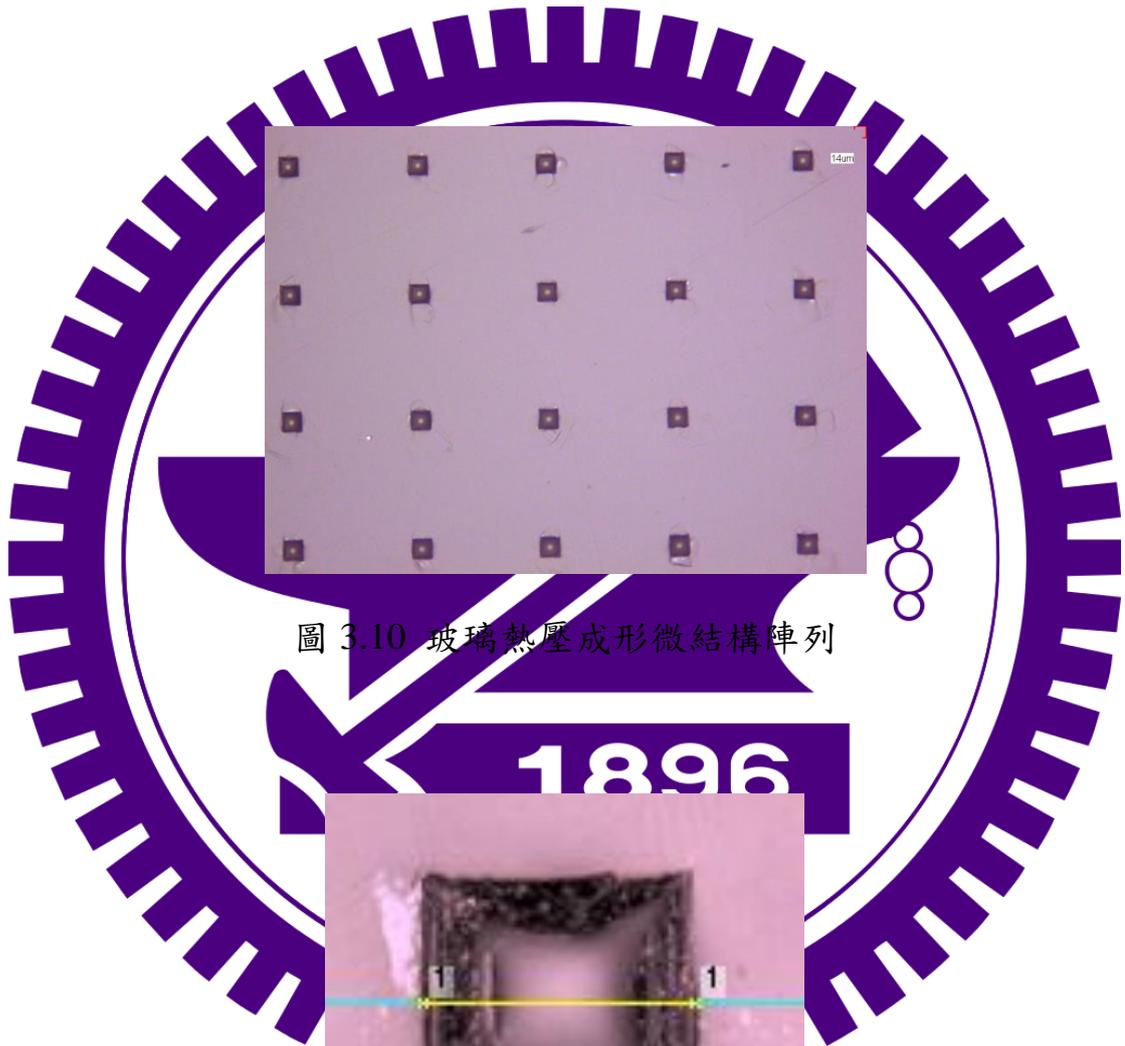


圖 3.10 玻璃熱壓成形微結構陣列

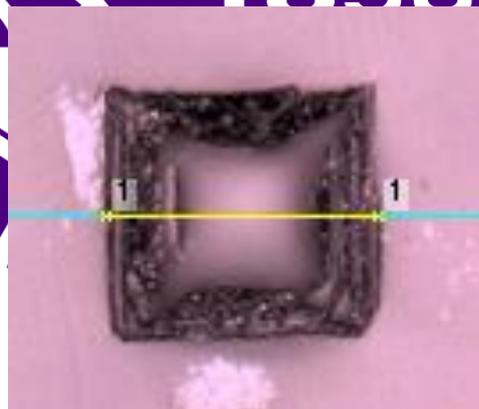


圖 3.11 玻璃熱壓成形微結構-上視圖

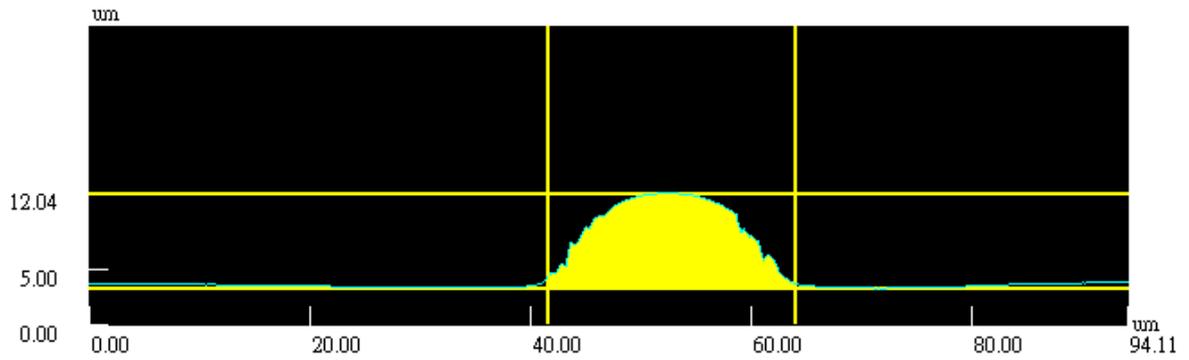


圖 3.12 玻璃熱壓成形微結構-側視圖

表 3.4 玻璃熱壓成形微結構深度及寬度

	中(um)	右(um)	上(um)	下(um)
結構寬度	22.4	38.6	37.7	40.6
結構高度	8.6	8.5	7.8	9.9

3.3 模具玻璃熱壓成形實驗成果與討論

本研究將加工出的不鏽鋼凹槽模具成功鍍上 DLC 抗沾粘膜層，並確認此膜層對微結構凹槽影響不大後，成功在 L-BAL42 玻璃上熱壓成形出微結構陣列。雖然玻璃並未完全填充進模具凹槽之中，無法成形出玻璃尖端結構，但經實驗過後已證明此模具可運用於玻璃熱壓成形。

第四章 結論與未來展望

本研究設計一種玻璃 Spindt 型場發射源，運用玻璃熱壓成形技術在玻璃上製作出尖端陣列結構，將此玻璃結構當作基材，在其上鍍上一層導電膜層後，則可做為場發射平面光源之陰極場發射源。

此製程中，微結構模具製作為很重要的一環，但欲製作出可用於熱壓玻璃微結構之模具需克服數項問題，包括結構尺寸小、結構個數多、精度要求高及需能承受高溫高壓等。因此，本研究針對微結構模具製程方式做研究，以加工出尖端凹槽微結構陣列模具，並整合出模具的初步製程。

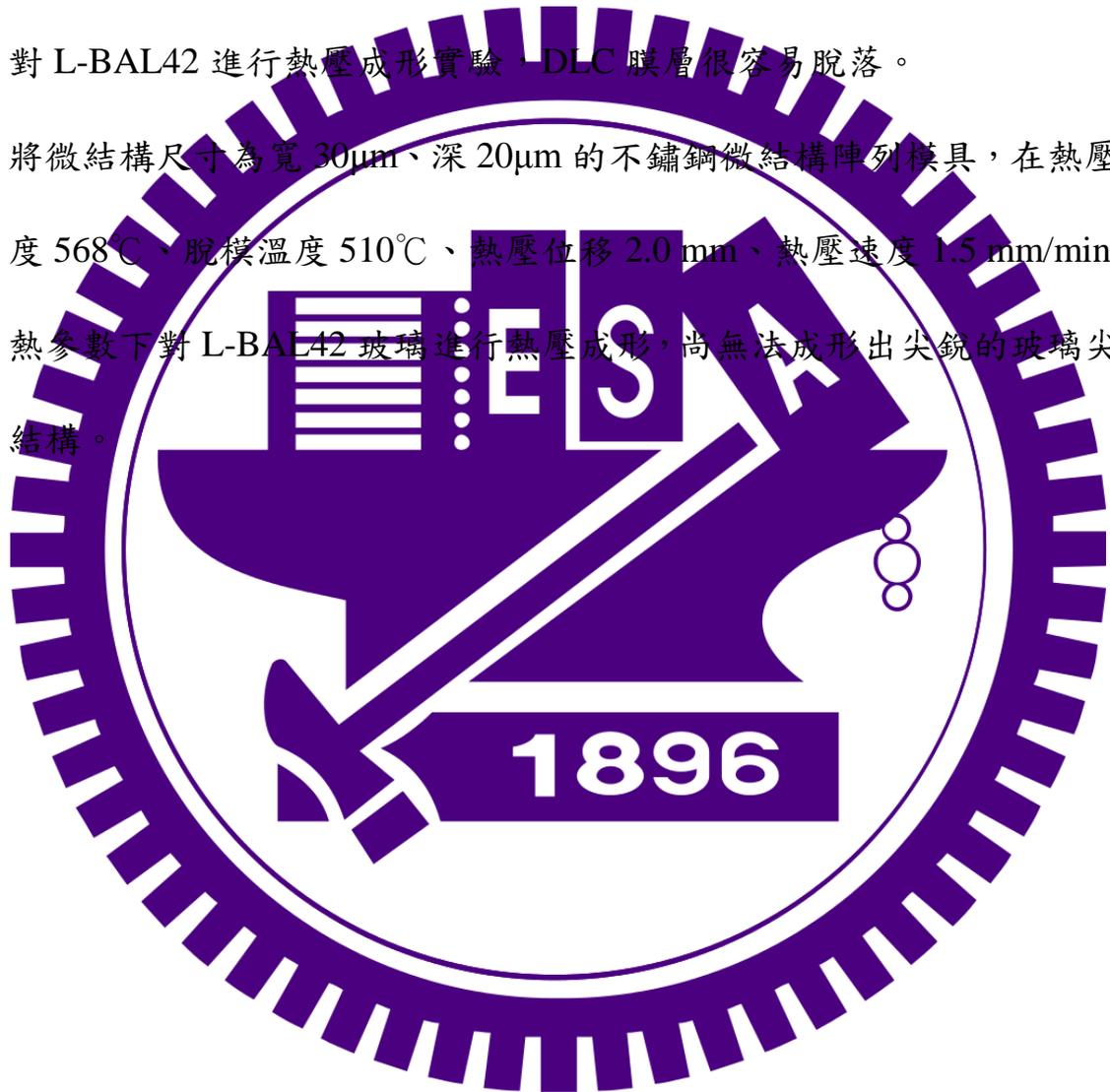
4.1 結論

本研究經由翻模方式的設計，並嘗試各種加工方式，到後續的模具玻璃熱壓成形實驗，可得到以下的結論：

1. 運用兩道次的鑽石精密磨削加工，在碳化鎢原材上加工出尺寸高 $40\mu\text{m}$ 、寬 $60\mu\text{m}$ 的凸出尖端微結構是可行的方式。
2. 在直接加壓成形加工中，搭配橡膠墊片以及不鏽鋼墊片，可有效解決平行度問題，使翻模的力量均勻分布。
3. 運用直接加壓成形的加工方式，將 $\phi 15\text{mm}$ 碳化鎢陽模上的微結構轉印在 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼原材上是可行的，且轉印的效果良好。
4. 將 $\phi 15\text{mm}$ 碳化鎢陽模運用直接加壓成形的加工方式，對 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽

鋼原材進行翻印，會造成不鏽鋼發生彎曲的情況，使得中間與外側結構尺寸有差異，但仍可轉印出陽模上的微結構形狀。

5. 將 DLC 鍍在加工完成的不鏽鋼微結構陰模上，對原本加工出的微結構形狀及尺寸影響不大，但是在真空度約 3.6 torr、溫度 568°C 的熱壓環境下對 L-BAL42 進行熱壓成形實驗，DLC 膜層很容易脫落。
6. 將微結構尺寸為寬 30 μm 、深 20 μm 的不鏽鋼微結構陣列模具，在熱壓溫度 568°C、脫模溫度 510°C、熱壓位移 2.0 mm、熱壓速度 1.5 mm/min 的熱參數下對 L-BAL42 玻璃進行熱壓成形，尚無法成形出尖銳的玻璃尖端結構。



4.2 未來展望

雖然目前已成功研究出此微結構模具製程，但仍有以下幾點可在後續研究中改進，以下分為微結構模具製程及玻璃熱壓成形兩部分：

4.2.1 微結構模具製程

1. 本研究運用鑽石精密磨削加工出凸出微結構碳化鎢陽模，雖然其尖端足夠尖銳但仍有增進空間，且其表面粗糙度的優劣會影響後續成形之玻璃，如能將微結構陽模運用電解拋光(Electrolytic Polishing)來改進表面粗糙度，則後續將會有更好的成果。
2. 在微結構陽模加工方面，本研究試著運用線切割加工出尖端微結構陣列，但因為兩加工道次的基準面不同而失敗。如能解決基準面不同的問題，線切割加工仍然是一個可能可行的加工方式。
3. 本研究製作出的碳化鎢陽模為 $\phi 15\text{mm}$ ，使得最終熱壓成形出的玻璃其微結構範圍也為 $\phi 15\text{mm}$ ，如未來能朝向更大的尺寸製作，相信應用範圍會有更寬廣的發展。
4. 本研究運用直接加壓成形加工的翻模方式製作出微結構凹槽不鏽鋼陰模，雖然能夠很好的轉印碳化鎢陽模上的微結構，但因模具放置時是用肉眼將其對中心，使得轉印出的各方位寬度不一、穩定度不高。如在未來能製作夾治具將其夾持置中，則翻模的效果及穩定度會大幅提升。
5. 為了針對後續大尺寸的玻璃，本研究最終運用 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼來進行熱

壓實驗，但因為碳化鎢陽模及不鏽鋼陰模尺寸大小的差異，造成 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼上中間與外側的微結構凹槽大小有異。而未來增大碳化鎢陽模尺寸大小，則此問題將不復存在。

4.2.2 玻璃熱壓成形

1. 本研究所使用的抗沾黏鍍膜層為 DLC，但此膜層在真空度約 3.6 torr、溫度 568°C 的熱壓環境下容易損毀，如未來能尋找到更適合之鍍膜層，對模具壽命有很大的幫助。
2. 本研究初步對 L-BAL42 玻璃進行熱壓成形，但其 T_g 點高 (506°C)，目前使用的 DLC 鍍膜層無法承受，且其表面並非平面。如未來能運用 T_g 點較低的玻璃如 K-PSK100，且其表面為平面，則對熱壓成形方面會有很大的幫助。
3. 本研究雖然成功在 L-BAL42 玻璃上熱壓成形出微結構陣列，但玻璃並未完全填充進模具凹槽之中，無法成形出玻璃尖端結構。如未來能在熱壓過程中施加超音波輔助，或設計成閉模的方式來進行熱壓成形，則可有效增加玻璃的微結構填充性。
4. 目前玻璃成品並未成形出尖銳的陣列結構，在未來如能找出合適的熱壓成形條件，成功成形出尖銳的陣列結構，則可針對玻璃成品的場發射效果做量測，並將其最佳化。

參考文獻

- [1] <http://webarchive.ncl.edu.tw/archive/disk22/94/71/93/87/24/201104123036/20110526/web/itri.org.tw/chi/gel/p4764a.html?RootNodeId=070&NavRootNodeId=0735&NodeId=073521&ArticleNBR=1169>
- [2] R. H. Fowler, L. Nordheim, “Electron Emission in Intense Electric Fields”, Mathematical and Physical A, Vol. 119, pp.173-181, 1928.
- [3] <http://web.it.nctu.edu.tw/~FMPANLAB/fed1.htm>
- [4] C. A. Spindt, “A thin film field emission cathode”, Journal of Applied Physics, Vol. 39, pp. 3504-3505, 1968.
- [5] https://www.pida.org.tw/optolink/optolink_pdf/91053908.pdf
- [6] C. A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey, W. R. Westerberg, “Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones”, Journal of Applied Physics, Vol. 47, pp. 5248-5263, 1976.
- [7] S. Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon”, Nature, Vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [8] <http://pic.ping.tw/nanomarktw/1318877402-1913518158.jpg>
- [9] M. Ample, G. Blair, C. Maier, “Method for molding glass lenses”, US Patent, No: US3833347, 1974.
- [10] Y.P. Tsai, J.C. Hung, L.C. Yin, C. Hung, “Ultrasonic vibration-assisted optical glass hot embossing process”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 60, pp. 1207 -1213, 2012.
- [11] M. Hecke, “Hot embossing – The molding technique for plastic microstructures”, Microsystem Technologies, Vol. 4, pp. 122–124, 1998.
- [12] A.Y. Yi, A. Jain, “Compression molding of aspherical glass lenses-a combined experimental and numerical analysis”, Journal of the American

Ceramic Society, Vol. 88, pp. 579-586, 2005.

- [13] A.Y. Yi, Y. Chen, F. Klocke, G. Pongs, A. Demmer, D. Grewell, A. Benatar, “A high volume precision compression molding process of glass diffractive optics by use of a micromachined fused silica wafer mold and low T_g optical glass”, J. Micromech. Microeng., Vol. 16, pp. 2000-2005, 2006.
- [14] H. Högström, S. Valizadeh, C. G. Ribbing, “Optical excitation of surface phonon polaritons in silicon carbide by a hole array fabricated by a focused ion beam”, Optical Materials, Vol. 30, pp. 328-333, 2007.
- [15] S.W. Youn, M. Takahashi, H. Goto, R. Maeda, “Fabrication of micro-mold for glass embossing using focused ion beam, femto-second laser, excimer laser and dicing techniques”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 326-330, 2007.
- [16] S.W. Youn, M. Takahashi, H. Goto, and R. Maeda, “Microstructuring of glassy carbon mold for glass embossing – Comparison of focused ion beam, nano/femtosecond-pulsed laser and mechanical machining”, Microelectronic Engineering, Vol. 83, pp. 2482-2492, 2006.
- [17] M. Yasui, M. Takahashi, S. Kaneko, T. Tsuchid, Y. Hirabayashi, K. Sugimoto, J. Uegaki, and R. Maeda, “Micro Press Molding of Borosilicate Glass Using Plated Ni-W Molds”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, pp. 6378-6381, 2007.
- [18] C. Yang, L. Lei, and Y.Y. Allen, “Fabrication of precision 3D microstructures by use of a combination of ultraprecision diamond turning and reactive ion etching process”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 17, pp. 883-890, 2007.
- [19] J. Yan, T. Oowada, T. Zhou, Tsunemoto Kuriyagawa, “Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass

components”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 4802-4808, 2009.

[20]C.T. Pan, T.T. Wu, M.F. Chen, Y.C. Chang, C.J. Lee, J.C. Huang, “Hot embossing of micro-lens array on bulk metallic glass”, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 141, pp. 422-431, 2008.

[21]王麒翔，「以鎳鈷合金電鑄模仁進行光學玻璃微結構熱壓成形研究」，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，2009年。

[22]<http://ask.51pla.com/dianhuohuaxian-6382.htm>

[23]<http://www.vertpedia.com/showwiki.asp?keywords=%B7%C5%B5%E7%BC%D3%B9%A4>

[24]<http://www.han-tech.com.tw/support.html>

[25]C.L. Chao, C.B. Huo, W.C. Chou, Y.R. Lin, K.J. Ma, H.H. Chien, “Study on the design of precious metal based protective films for glass moulding process”, Surface and Coatings Technology, Vol. 231, pp. 567-572, 2013.

[26]J.C. Hung, Y.P. Tsai, C. Hung, “Development of a new apparatus for ultrasonic vibration-assisted glass hot embossing process”, Precision Engineering, Vol. 37, pp. 222-227, 2013.

[27]鄭書麟，「新式超音波輔助光學玻璃熱壓機台之研發」，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2011年。

附錄 A 玻璃微結構場發射可行性實驗

要加工出微結構個數約數萬個之模具有諸多困難，故本研究室在初期先做了玻璃場發射可行性研究，製作出單一結構尺寸較小、個數較少的尖端凹槽微結構陣列模具，並進行初步玻璃微結構熱壓實驗，成功熱壓出玻璃微結構後做場發射測試。

A.1 玻璃場發射可行性研究流程

玻璃場發射可行性研究將分成兩個階段進行，第一階段針對微結構模具製做、玻璃材料選擇做個別研究；第二階段將第一階段所得的微結構模具及玻璃進行初步玻璃微結構熱壓實驗。流程如圖 A.1 所示。

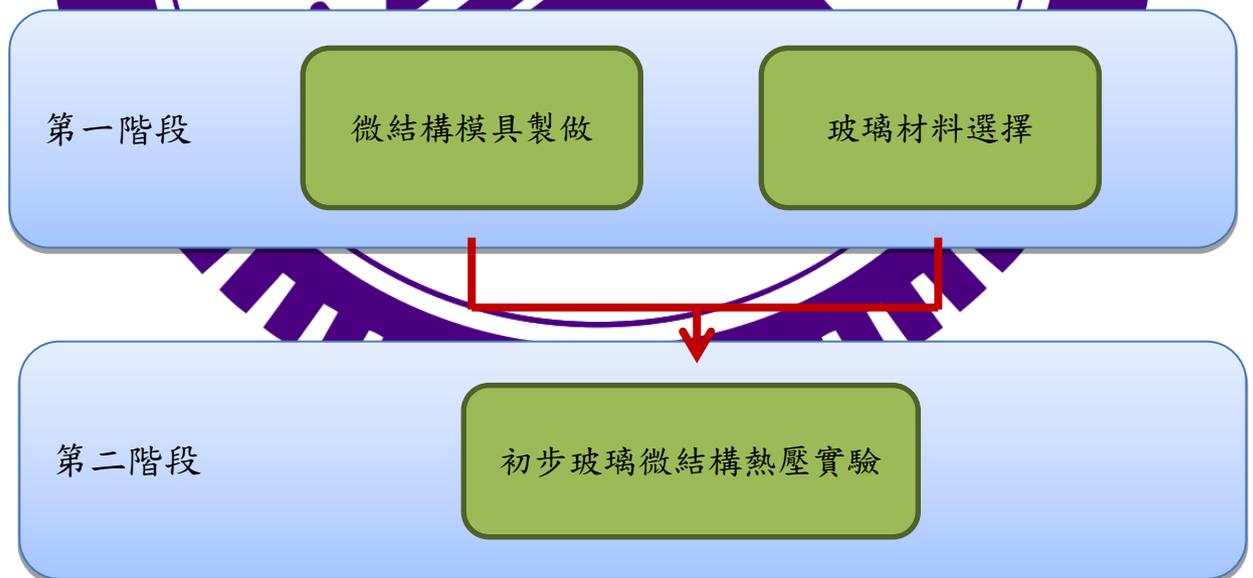


圖 A.1 初步可行性研究流程圖

A.2 微結構模具製做

用於玻璃場發射可行性研究的微結構模具，其製做分為模仁材料選擇、模具鍍膜以及微結構加工三個部分，以下將分別介紹。

A.2.1 模仁材料選擇

本研究選用不鏽鋼 304 作為模仁材料，其材料性質如表 A.1 所示。

表 A.1 不鏽鋼 304 材料性質

不鏽鋼 304	
楊氏係數(GPa)	193
降伏強度(MPa)	215
抗拉強度(MPa)	505
硬度(HV)	129
密度(g/cm ³)	8.00
熱膨脹係數(10 ⁻⁶ /K)	18.7 (0~649 °C)

A.2.2 模具鍍膜

本研究在玻璃場發射可行性研究中，針對 ZrB₂ (真空濺鍍)、TiCrBN (真空濺鍍)、Cr (電鍍)、BN (噴漆) 四種材料進行玻璃熱壓沾黏性實驗，找出較經濟且合適的抗沾黏鍍膜材料。

在四塊直徑 60mm、高 7mm 的不鏽鋼 304 模具基材上，分別鍍上四種材料，並對 soda-lime 玻璃進行熱壓實驗。實驗的熱壓溫度為 650°C、熱壓位移為 0.2mm、熱壓速度為 0.5mm/min，成果如圖 A.2 所示。

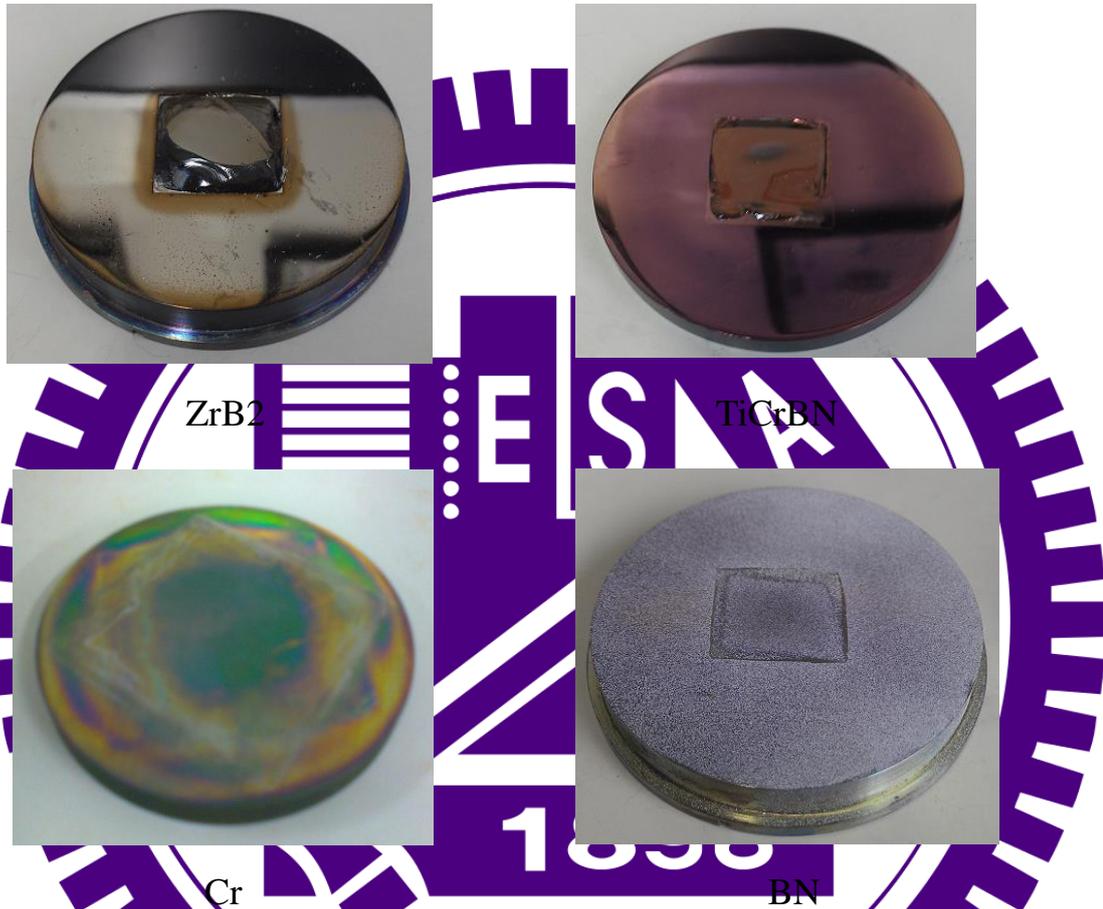


圖 A.2 玻璃熱壓沾黏性實驗成果

由成果可以看出 ZrB₂ 沾黏較嚴重，而 BN 沾黏情況最輕，但因為 BN 不能在模具上成形一個較為光滑的表面，會影響玻璃微結構的成形而不適用，Cr 是較可被接受的抗沾黏性材料，故選擇 Cr 做為鍍膜材料。

A.2.3 微結構加工

運用雷射加工及鑽石頭加壓加工兩種方式，在電鍍 Cr 模具上加工出微結構陣列凹槽。加工後的量測運用光學顯微鏡或基恩斯(KEYENCE)的 3D 雷射掃描顯微鏡。

雷射加工：

利用波長 355nm、脈衝寬度 30ps 之 UV 脈衝式雷射，試著在電鍍 Cr 模具上加工出微結構陣列凹槽。為了測試在不同雷射功率下的加工成果，運用雷射頻率 30kHz、雷射功率 0.3W、0.6W、0.9W 及 1.2W，在電鍍 Cr 模具上分別加工出孔徑約 50 μ m 之孔洞；而為了測試在不同雷射頻率下的加工成果，運用雷射功率 1.2W、雷射頻率 30kHz、50kHz、70kHz、90kHz，在電鍍 Cr 模具上分別加工出孔徑約 50 μ m 之孔洞。其量測成果剖面圖如表 A.2 所示。

鑽石頭加壓加工：

利用維氏硬度計(圖 A.3)上的鑽石頭施予 200g 負荷給模具，試著在 Cr 模層上壓出金字塔型凹槽，其成果如圖 A.4 所示。



圖 A.3 維氏硬度計

表 A.2 模具雷射加工成果

加工參數	成果剖面圖
頻率： 30kHz 功率： 0.3W	
頻率： 30kHz 功率： 1.2W	
頻率： 90kHz 功率： 1.2W	

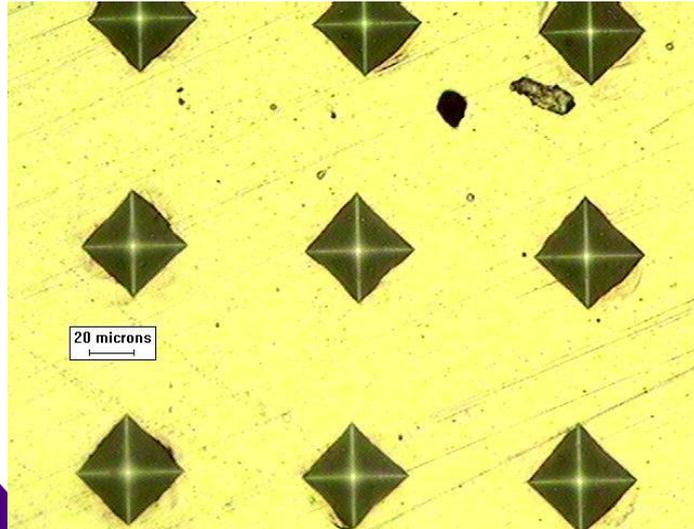


圖 A.4 模具鑽石頭加壓加工

由成果可以看出雷射加工出的微結構為凸出的情況，且無論如何改變加工參數，仍然會造成凸出的結構。其原因可能為雷射加工後在模具冷卻的其間形成了再鑄層，不只填滿了原加工出來的微結構凹槽，並形成了凸出的結構。故雷射加工不適合在電鍍 Cr 的模具上加工出尖端微結構凹槽。

而運用鑽石頭加壓加工的方式，可成功在電鍍 Cr 模具上加工出 5x5 個對角線長約 $39.1\mu\text{m}$ 、相對面夾角 136° 之金字塔形尖端微結構凹槽。

A.3 玻璃材料選擇

不同的玻璃材料有不同的硬度、Tg 點、熱膨脹係數、折射率等特性，本研究選用 Soda-lime (Tg=564°C) 作為玻璃材料，其材料性質如表 A.3 所示，考量因素有玻璃 Tg 點、實驗設備的升溫限制以及玻璃材料取得之難易等。

表 A.3 Soda-lime 玻璃材料性質

Soda-lime Glass	
轉化點 T_g ($^{\circ}\text{C}$)	564
熱膨脹係數($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	9.5 (100~300 $^{\circ}\text{C}$)
密度(g/cm^3)	2.53 (20 $^{\circ}\text{C}$)
楊氏係數(GPa)	74 (20 $^{\circ}\text{C}$)

A.4 初步玻璃微結構熱壓實驗

A.4.1 實驗設備

使用的玻璃熱壓設備同樣是由研究室學長 Hung [19]、Tsai[20]所研發設計及改良，詳細如前 3.2.1 所示。

A.4.2 實驗參數設定

熱壓實驗用的 soda-lime 玻璃尺寸為 20 x 20mm x 2.8mm，熱壓參數方面參考 Tsai [20]的研究，設定熱壓溫度為 650 $^{\circ}\text{C}$ 、脫模溫度為 600 $^{\circ}\text{C}$ 、熱壓位移為 0.2mm、熱壓速度為 0.5mm/min。初步實驗參數如表 A.4 所示。

表 A.4 玻璃場發射可行性熱壓實驗參數

玻璃場發射可行性熱壓實驗參數	
玻璃尺寸(mm)	20 x 20x2.8
熱壓溫度(°C)	650
脫模溫度(°C)	600
熱壓位移(mm)	0.2
熱壓速度(mm/min)	0.5

A.4.3 實驗成果與討論

熱壓實驗成果如圖 A.5 及 A.6 所示，成功在尺寸為 20x20mm 之 soda-lime 玻璃上熱壓出 5x5 個金字塔型尖端微結構，單一微結構尺寸為對角線長約 40 μ m、相對面夾角為 136°。將此玻璃結構給予合作之廠商，在玻璃上鍍上 ITO 導電膜層後經測試證明此結構具電子場發射效應，可確認將本研究設計之玻璃微結構用於場發射平面照明是可行的。

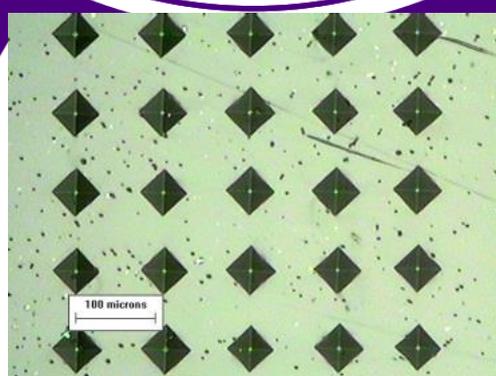
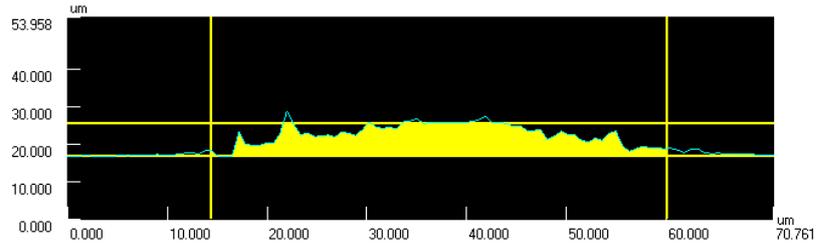
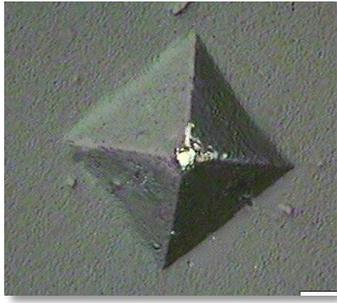


圖 A.5 玻璃場發射可行性研究熱壓成果



Profile1	Horz. dist.	Hght. diff.	Hght. ave.	Angle	C.S. length	C.S. area	R	Comment
All	70.761um	0.359um	20.956um	0.291°	120.628um	1497.258u...		
Seg.1	45.578um	8.497um	22.837um	10.561°	92.465um	263.945um ²		

圖 A.6 玻璃場發射可行性研究熱壓成果-側視圖



附錄 B 模具及玻璃量測結果

B.1 碳化鎢陽模

針對碳化鎢陽模其微結構尖端部分，本研究將加工出的真實結構與預期結構(高 40 μm 、寬 60 μm)做比對，量取其頂端距離(H')作為尖銳程度之依據，如圖 B.1 所示。各部位尖銳程度之依據 H' 整理如表 B.1 所示。詳細量測如圖 B.2、圖 B.3、圖 B.4、圖 B.5 所示。

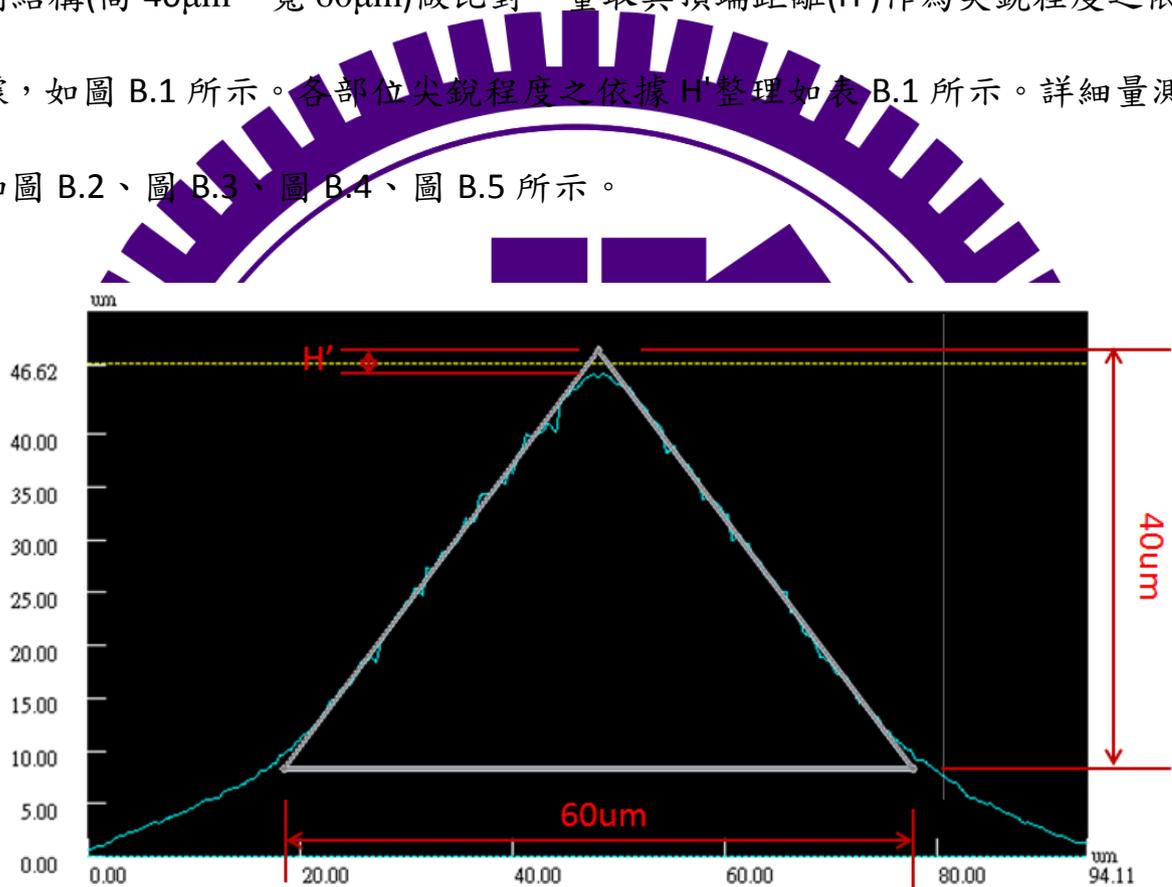


圖 B.1 量取頂端距離示意圖

表 B.1 碳化鎢陽模各部位尖銳程度

	中間(μm)	右邊(μm)	上邊(μm)	下邊(μm)
尖銳程度 H'	2.61	3.04	2.17	3.91

1. 中間部分

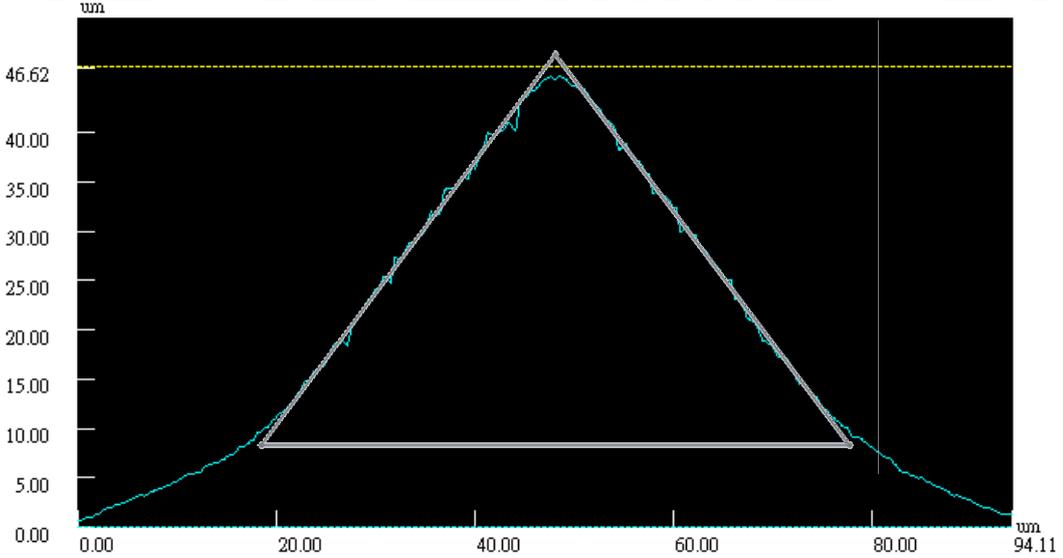
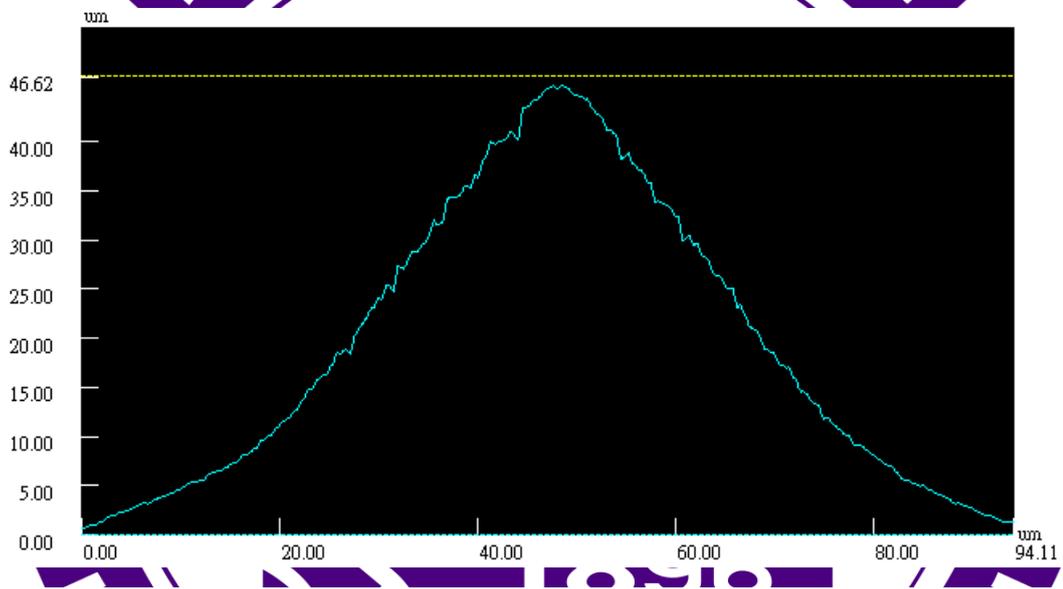
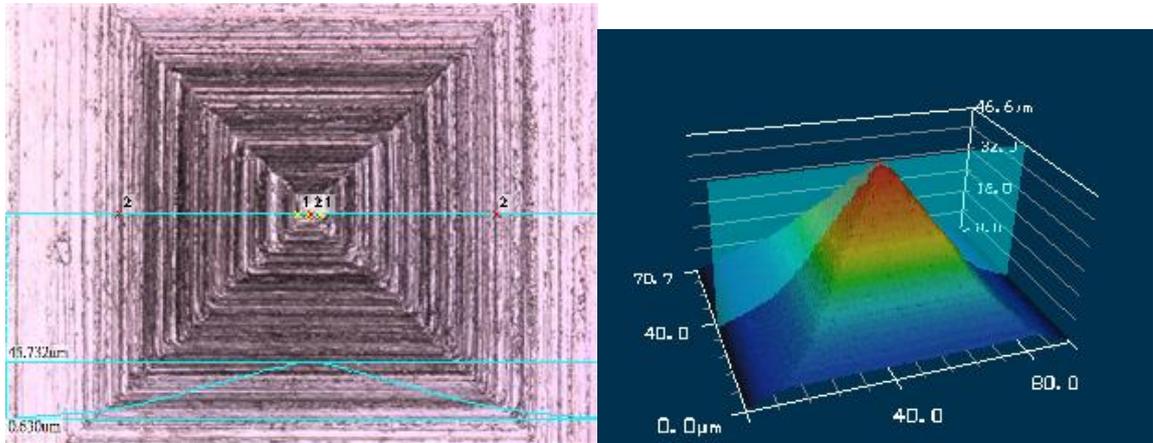


圖 B.2 碳化鎢陽模中間結構

2. 右邊部分

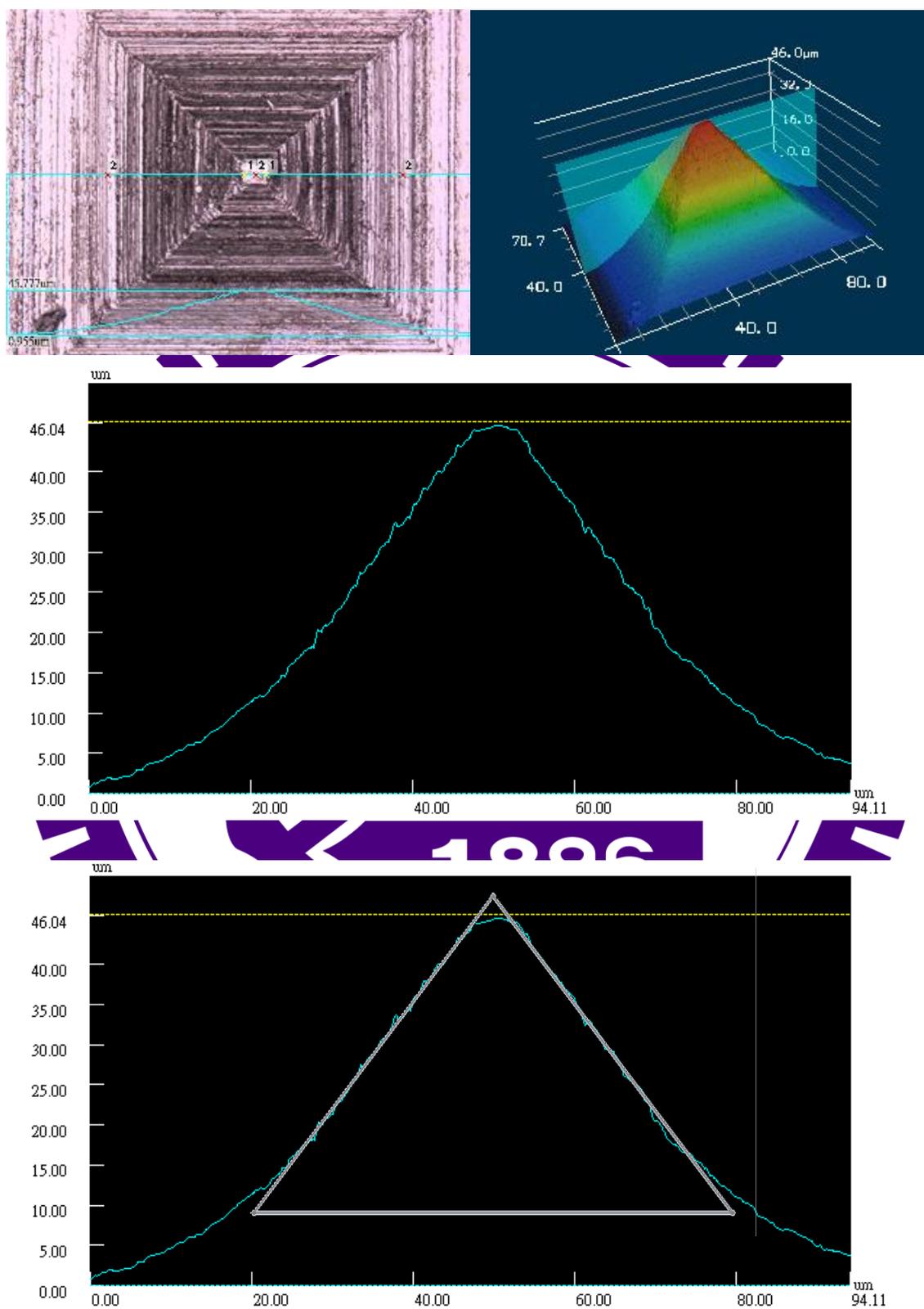


圖 B.3 碳化鎢陽模右邊結構

3. 上邊部分

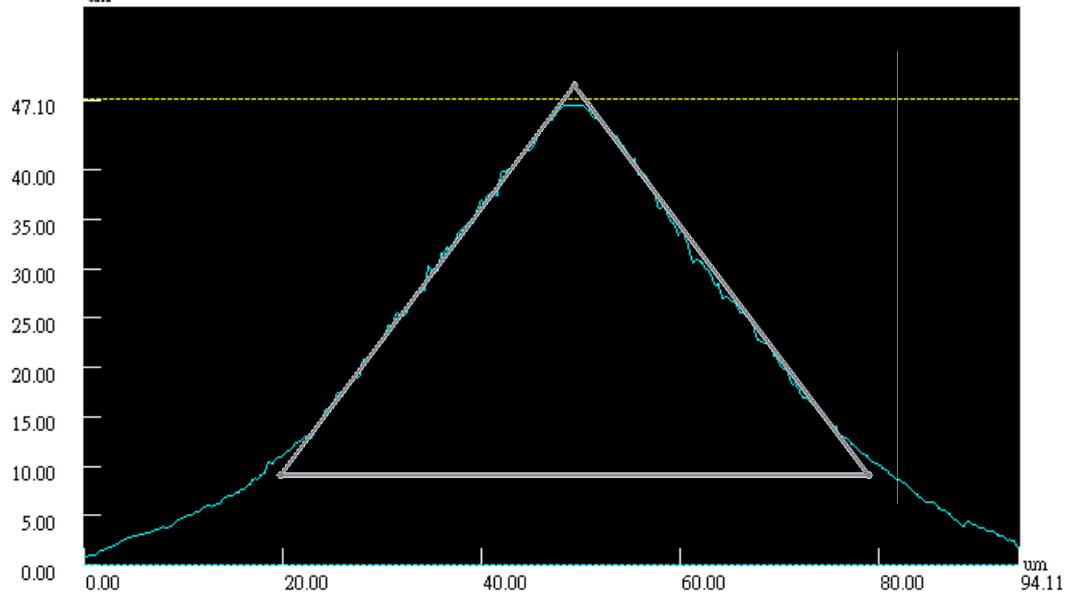
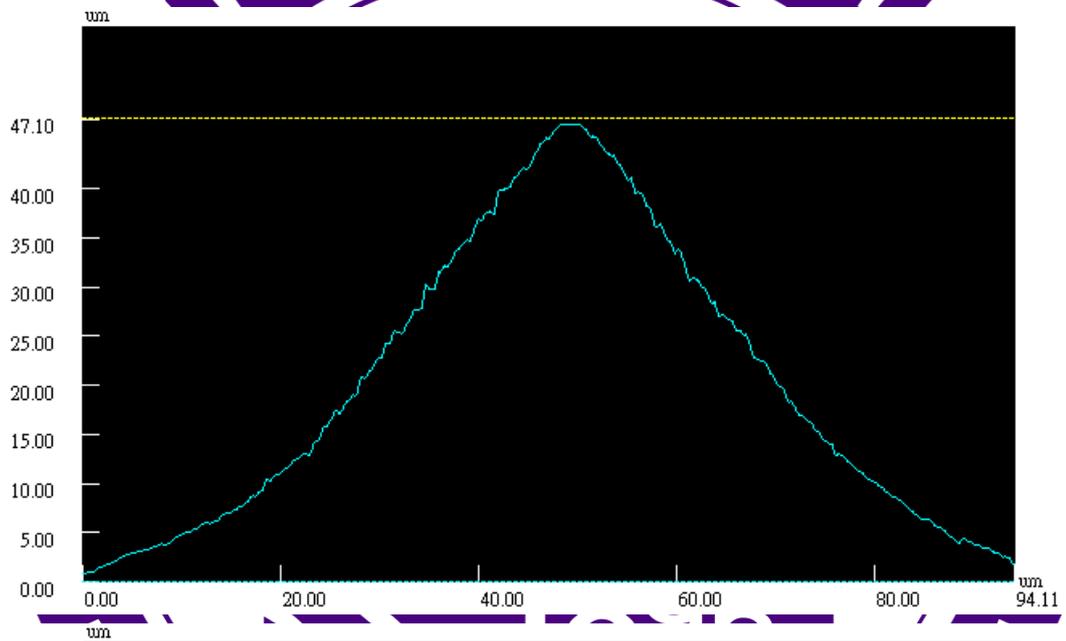
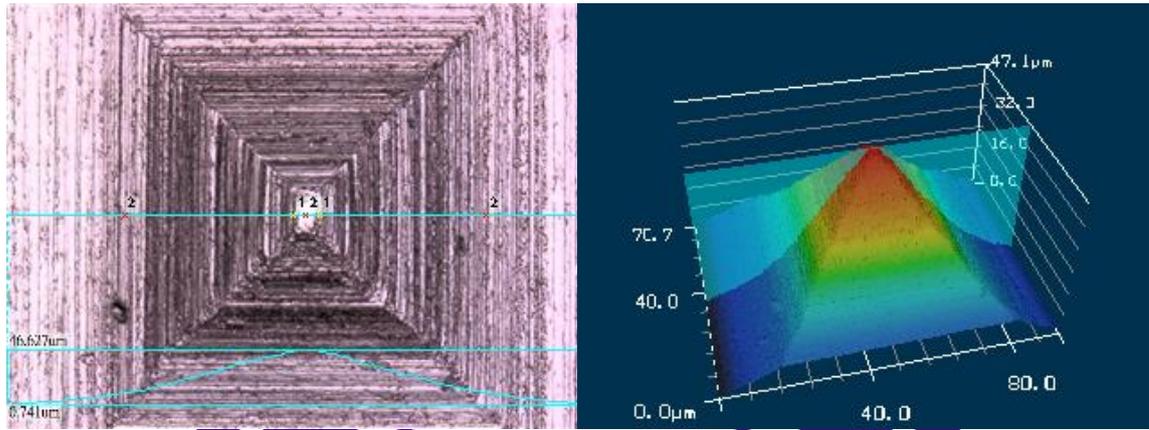


圖 B.4 碳化鎢陽模上邊結構

4. 下邊部分

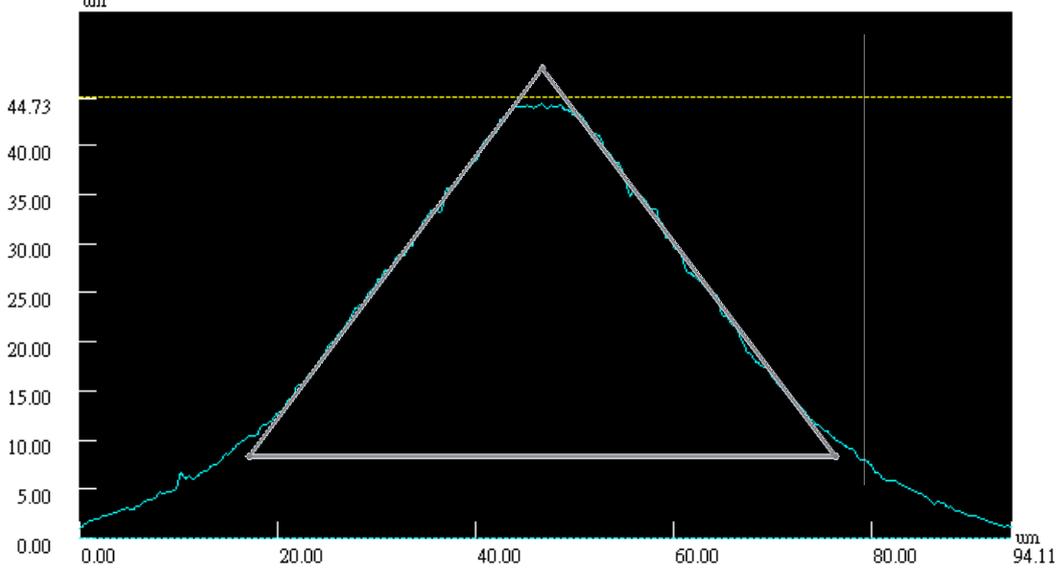
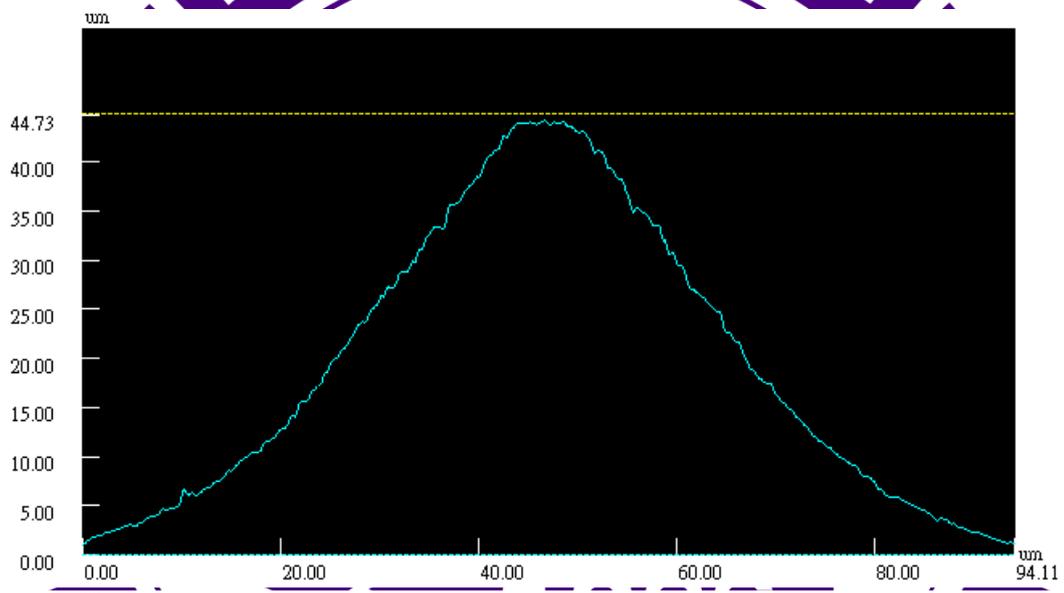
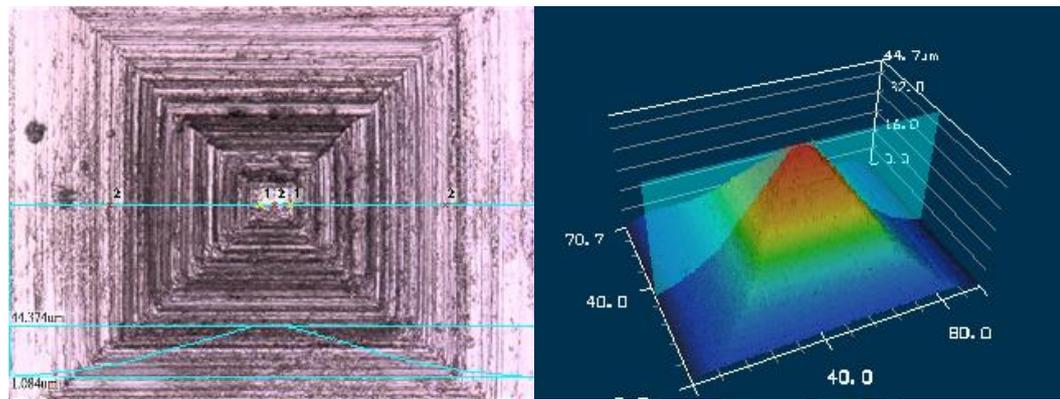
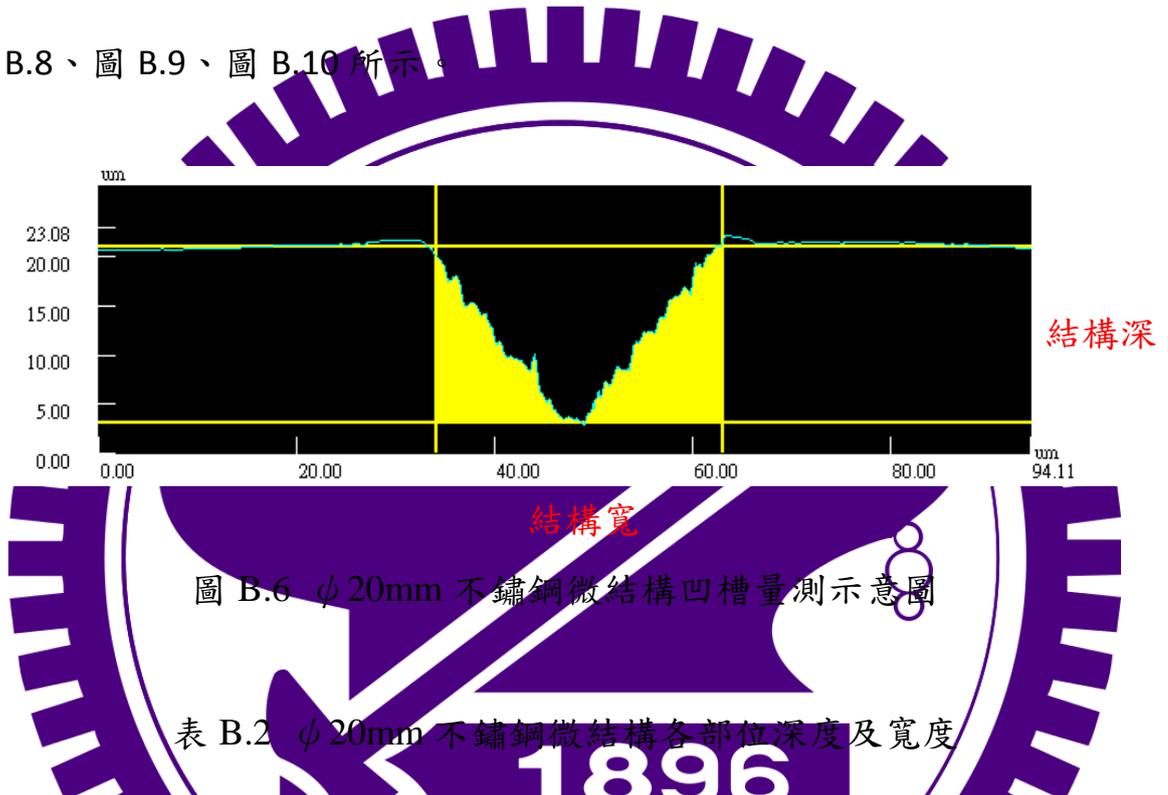


圖 B.5 碳化鎢陽模下邊結構

B.2 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼

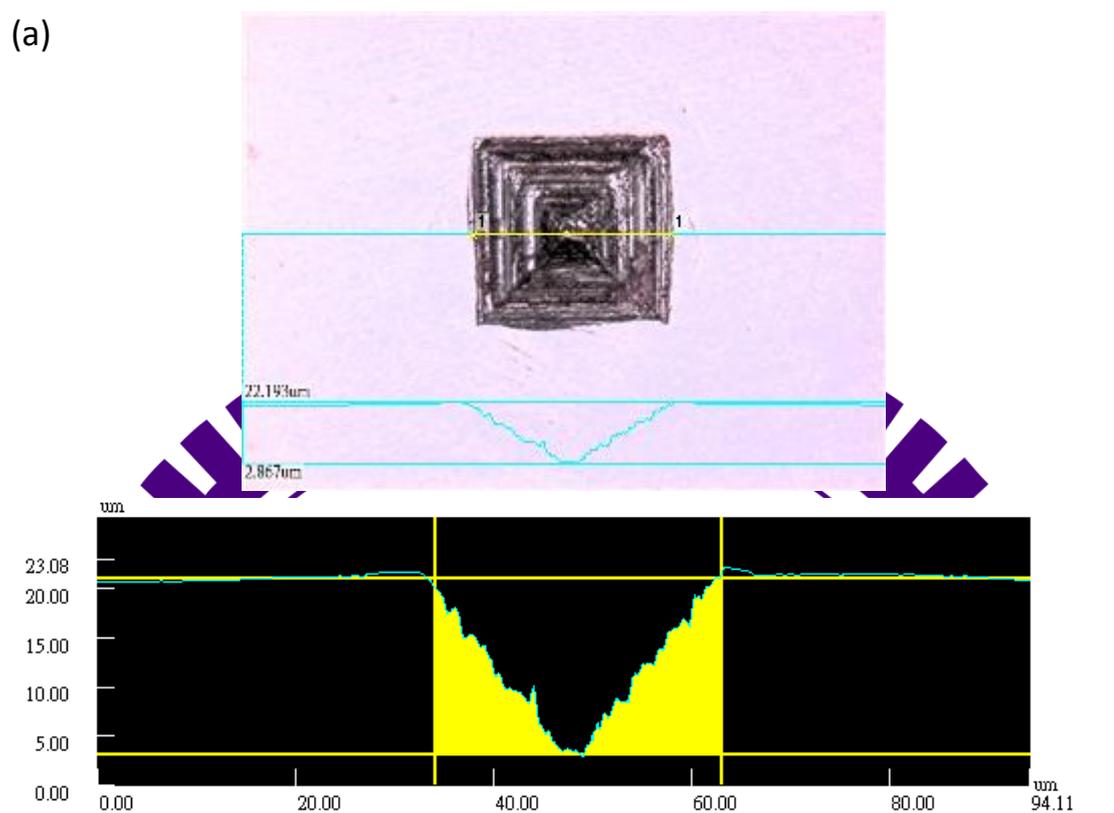
為了確認將碳化鎢陽模翻印至不鏽鋼具有重複性，故用相同參數 (2700kg 力) 做了兩組(a 模及 b 模)，並量測其寬度、深度及輪廓以做比對，如圖 B.6 所示。各部位寬度及深度整理如表 B.2 所示，詳細量測如圖 B.7、圖 B.8、圖 B.9、圖 B.10 所示。



		中 (um)	右 (um)	上 (um)	下 (um)
$\Phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼(a)	結構寬度	28.91	29.29	29.16	30.31
	結構深度	17.76	16.36	15.82	18.10
$\Phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼(b)	結構寬度	27.64	29.67	30.56	30.18
	結構深度	16.88	15.34	16.73	17.36

1. 中間部分

(a)



(b)

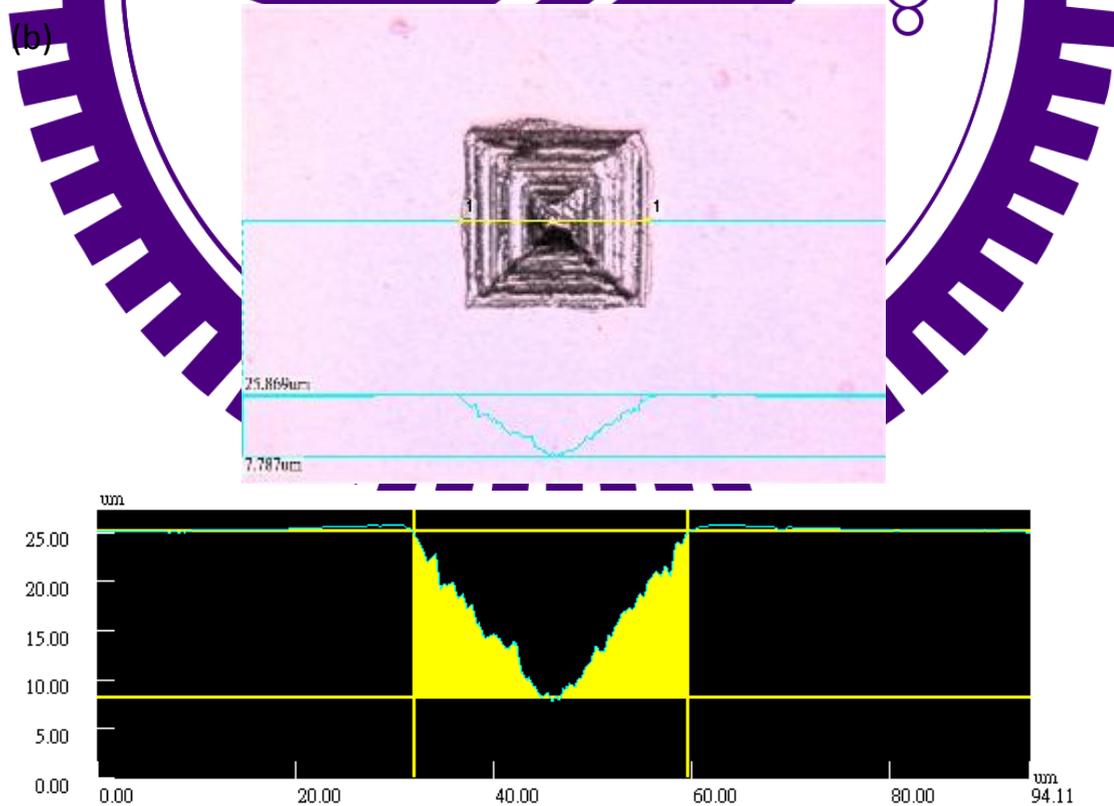
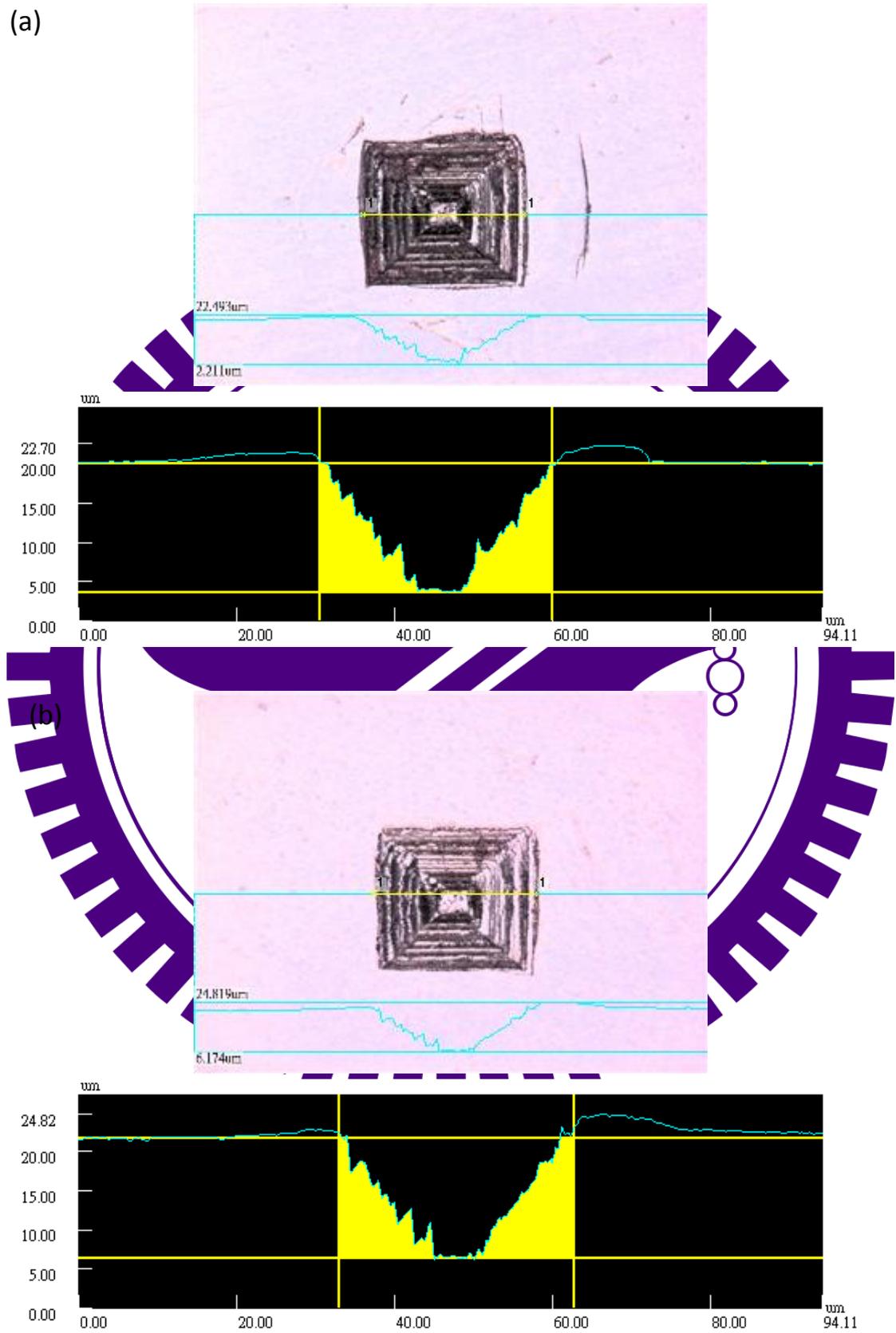


圖 B.7 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼中間結構

2. 右邊部分

(a)



(b)

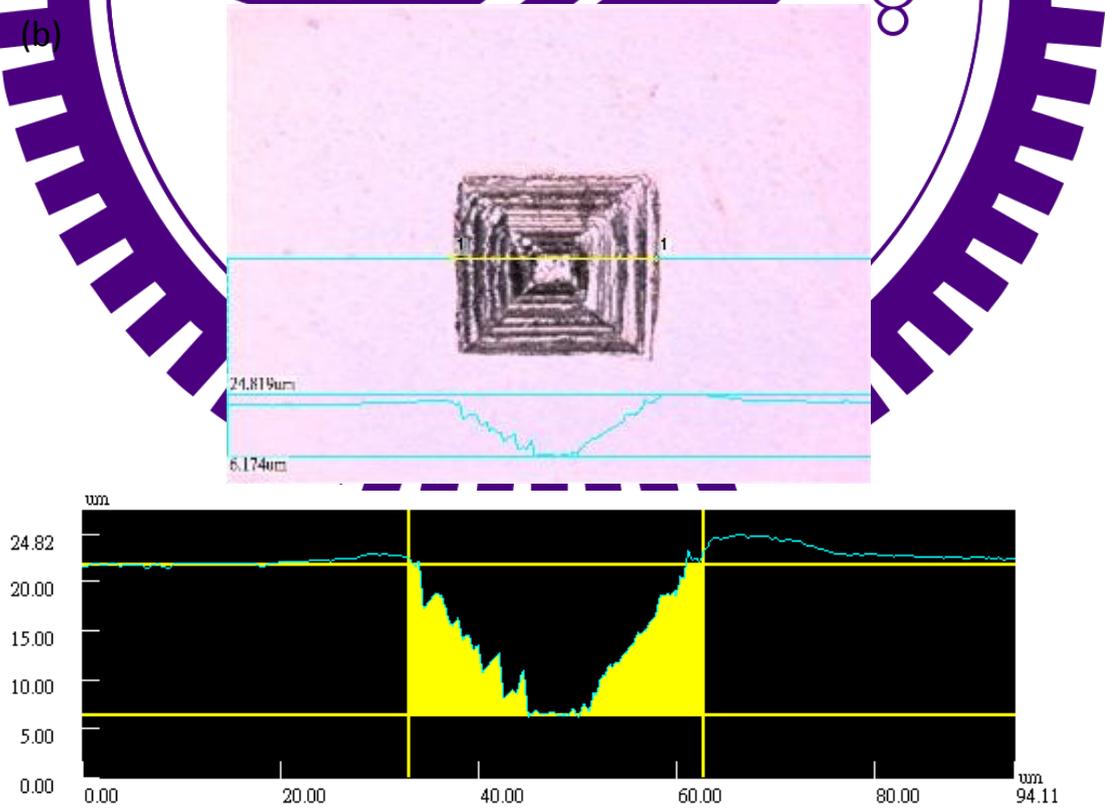


圖 B.8 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼右邊結構

3. 上邊部分

(a)

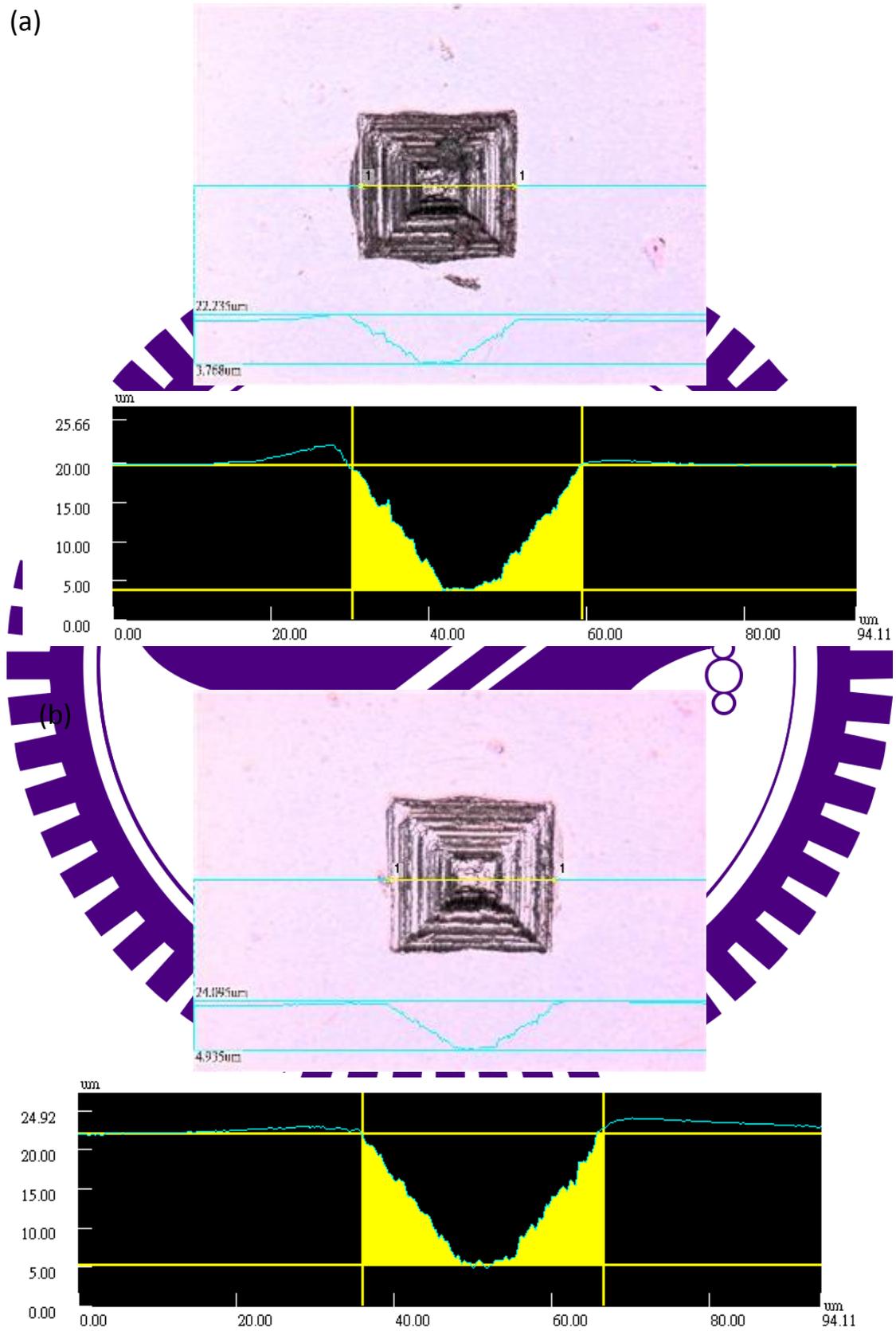
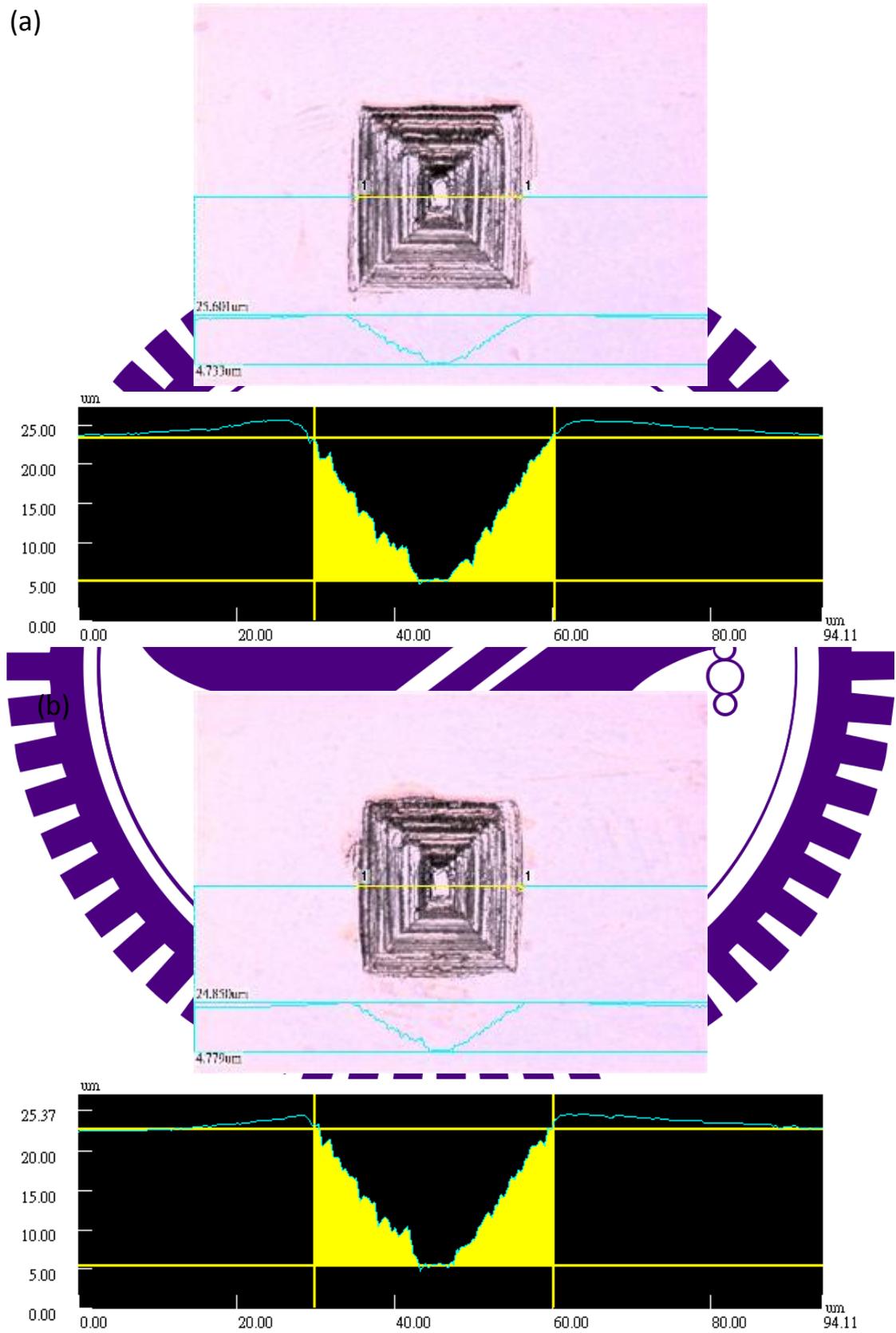


圖 B.9 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼上邊結構

4. 下邊部分

(a)



(b)

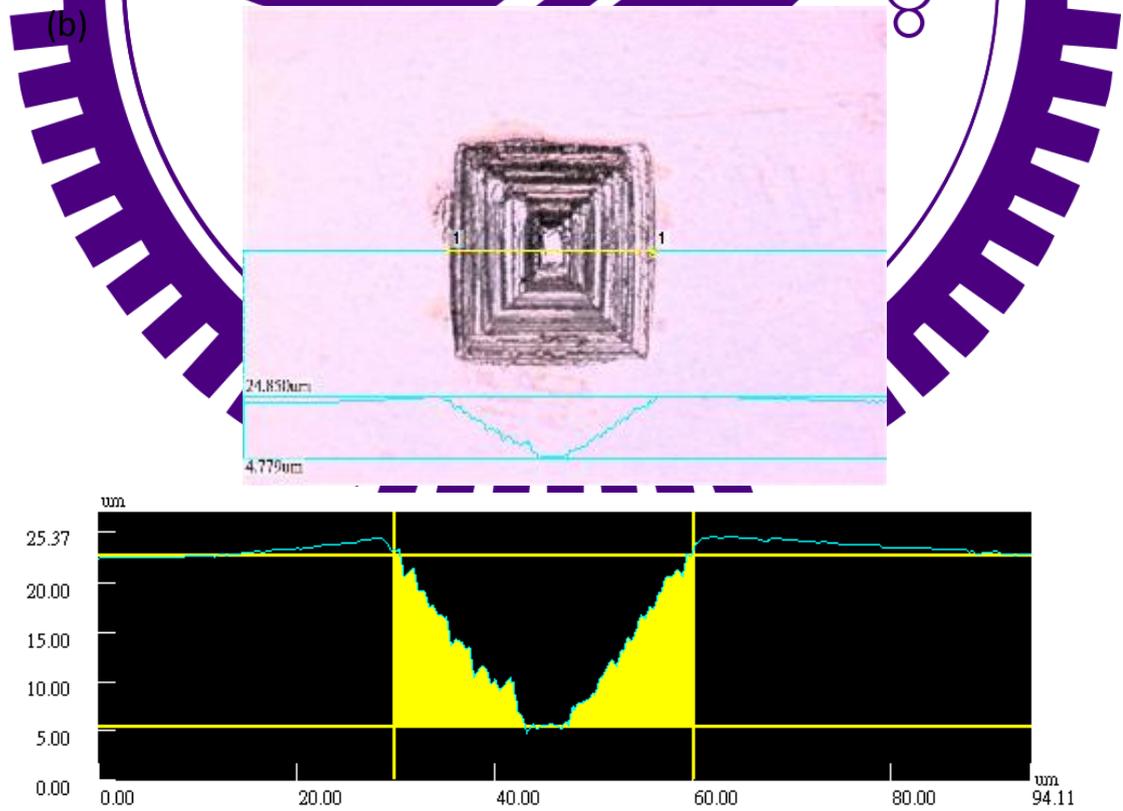


圖 B.10 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼下邊結構

B.3 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC

將 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼 a 模鍍完 DLC 後，同樣量測其寬度及深度，各部位寬度及深度整理如表 B.3 所示，詳細量測如圖 B.11、圖 B.12、圖 B.13、圖 B.14 所示。

表 B.3 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 微結構各部位深度及寬度

	中(um)	右(um)	上(um)	下(um)
結構寬度	29.4	30.4	29.2	31.8
結構深度	17.4	16.0	15.4	18.9

1. 中間部分

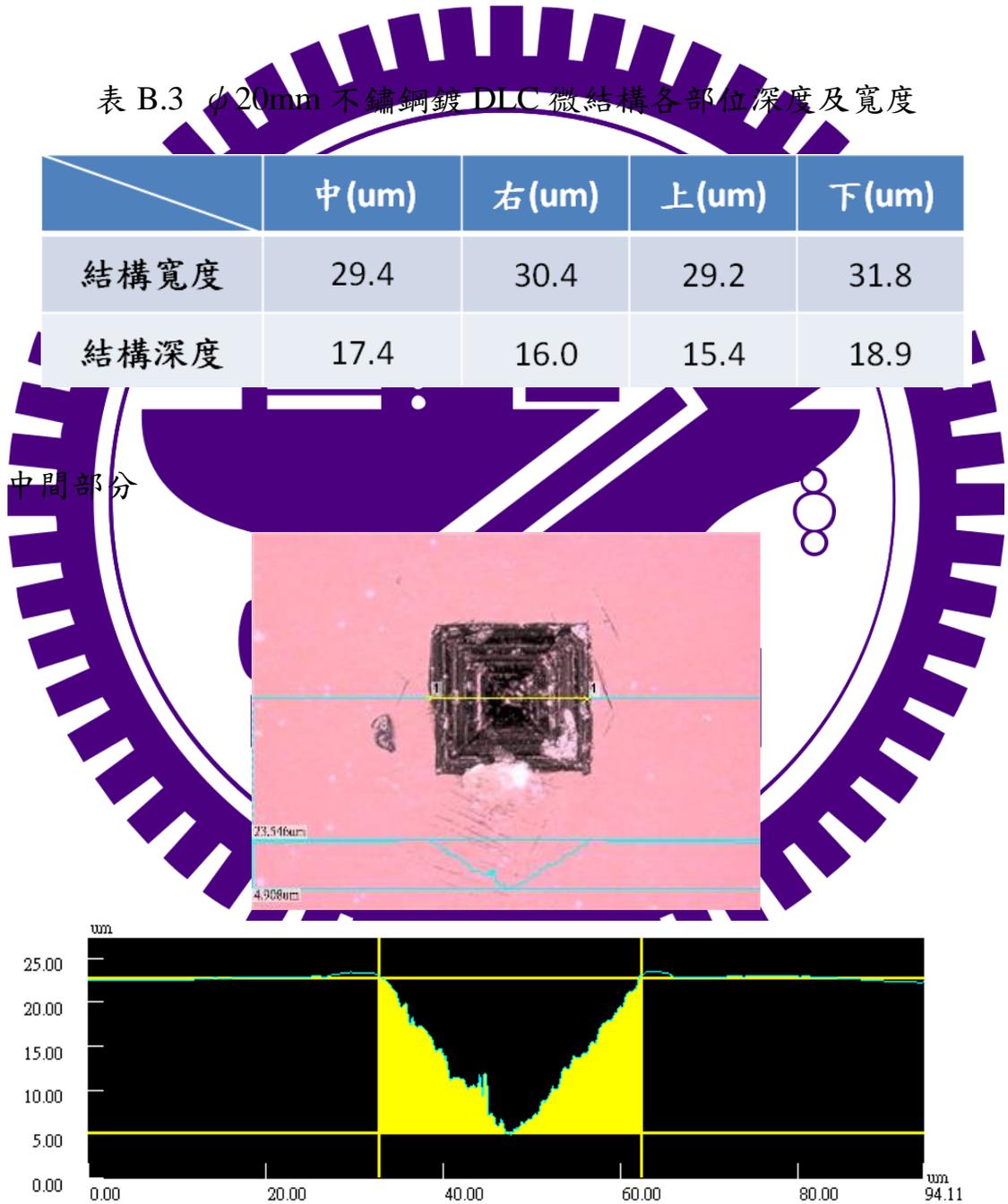


圖 B.11 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 中間結構

2. 右邊部分

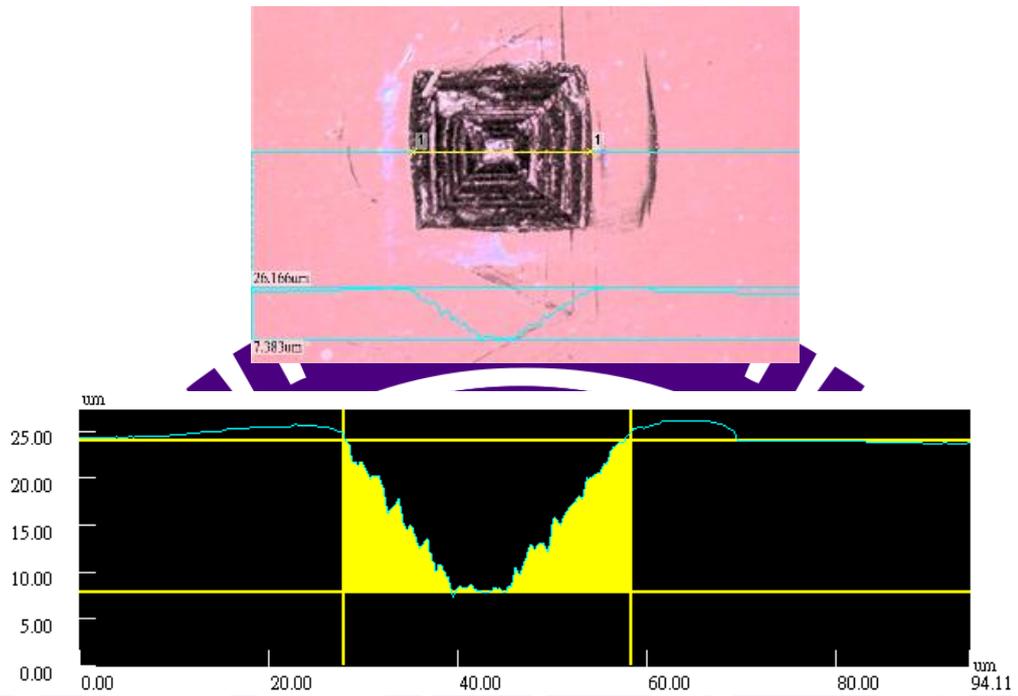


圖 B.12 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 右邊結構

3. 上邊部分

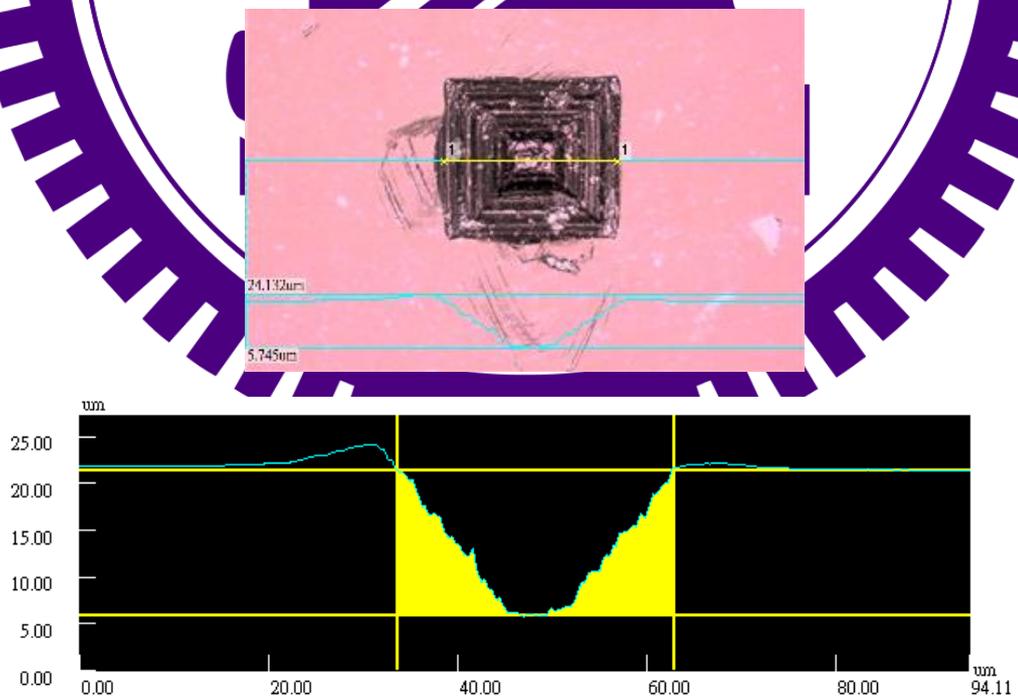


圖 B.13 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 上邊結構

4. 下邊部分

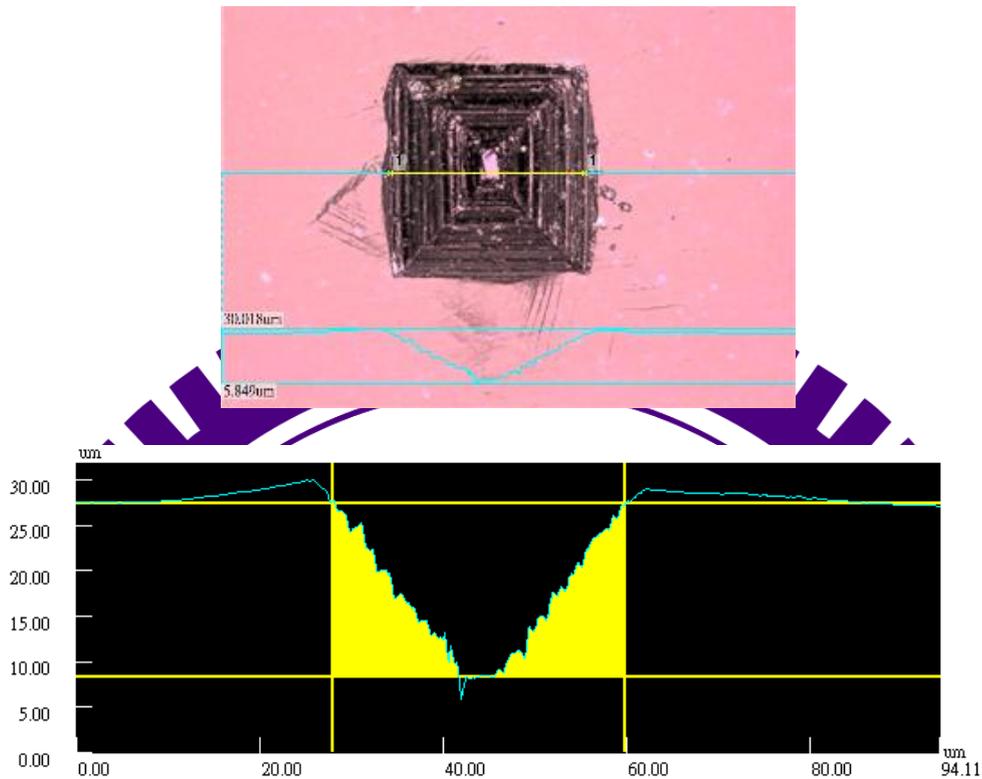


圖 B.14 $\phi 20\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 下邊結構

B.4 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼

用 2700kg 力對 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼進行直接加壓成形加工，並量測其寬度、深度及輪廓以做比對。各部位寬度及深度整理如表 B.4 所示，詳細量測如圖 B.15、圖 B.16、圖 B.17、圖 B.18 所示。

表 B.4 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼微結構各部位深度及寬度

	中 (um)	右 (um)	上 (um)	下 (um)
結構寬度	22.3	40.9	38.1	39.0
結構深度	13.3	23.7	20.9	23.3

1. 中間部分

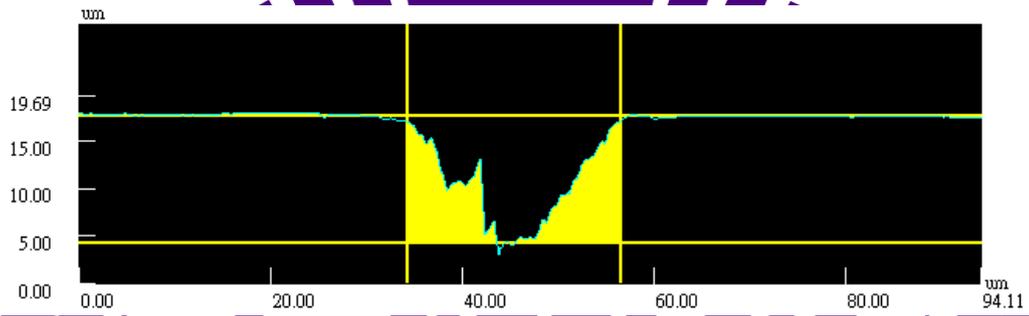
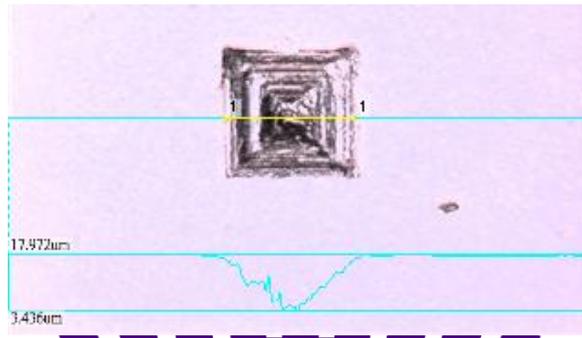


圖 B.15 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼中間結構

2. 右邊部分

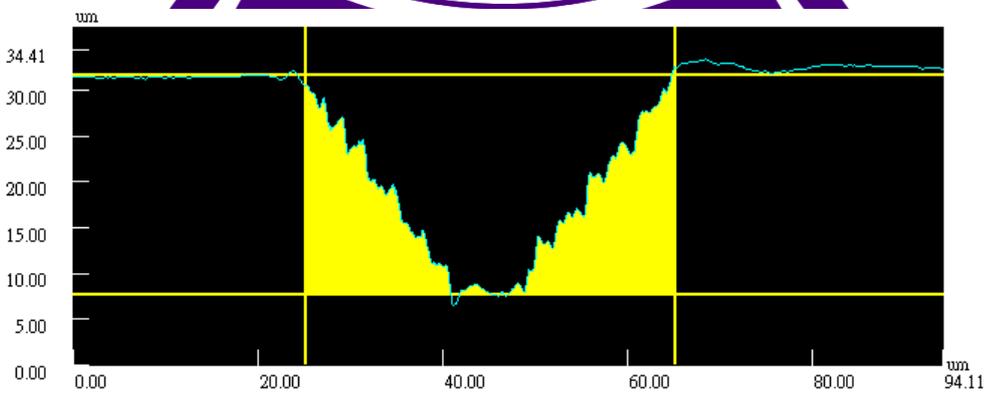
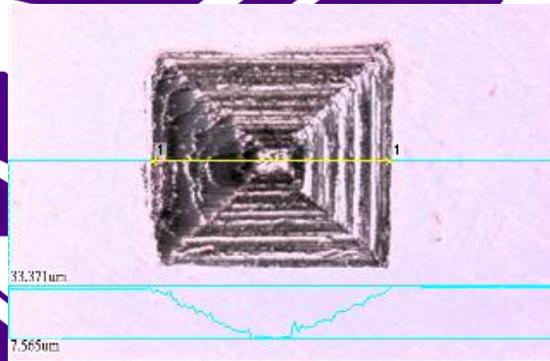


圖 B.16 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼右邊結構

3. 上邊部分

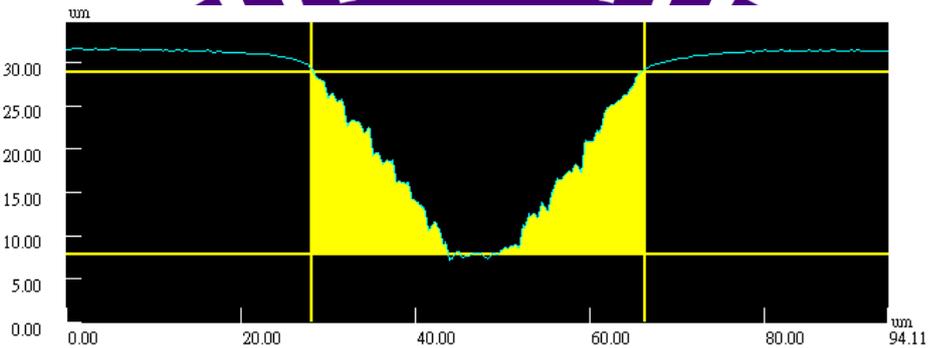
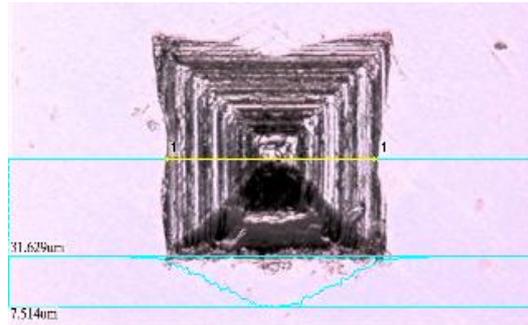


圖 B.17 ϕ 60mm 不鏽鋼上邊結構

4. 下邊部分

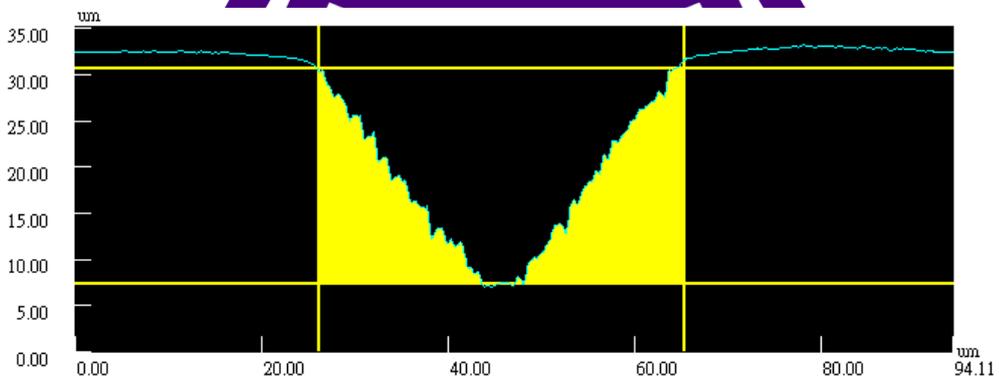


圖 B.18 ϕ 60mm 不鏽鋼下邊結構

B.5 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC

將 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼鍍完 DLC 後，同樣量測其寬度及深度，各部位寬度及深度整理如表 B.5 所示，詳細量測如圖 B.19、圖 B.20、圖 B.21、圖 B.22 所示。

表 B.5 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼微結構各部位深度及寬度

	中(um)	右(um)	上(um)	下(um)
結構寬度	22.4	41.4	40.2	40.1
結構深度	12.8	23.9	21.8	23.8

1. 中間部分

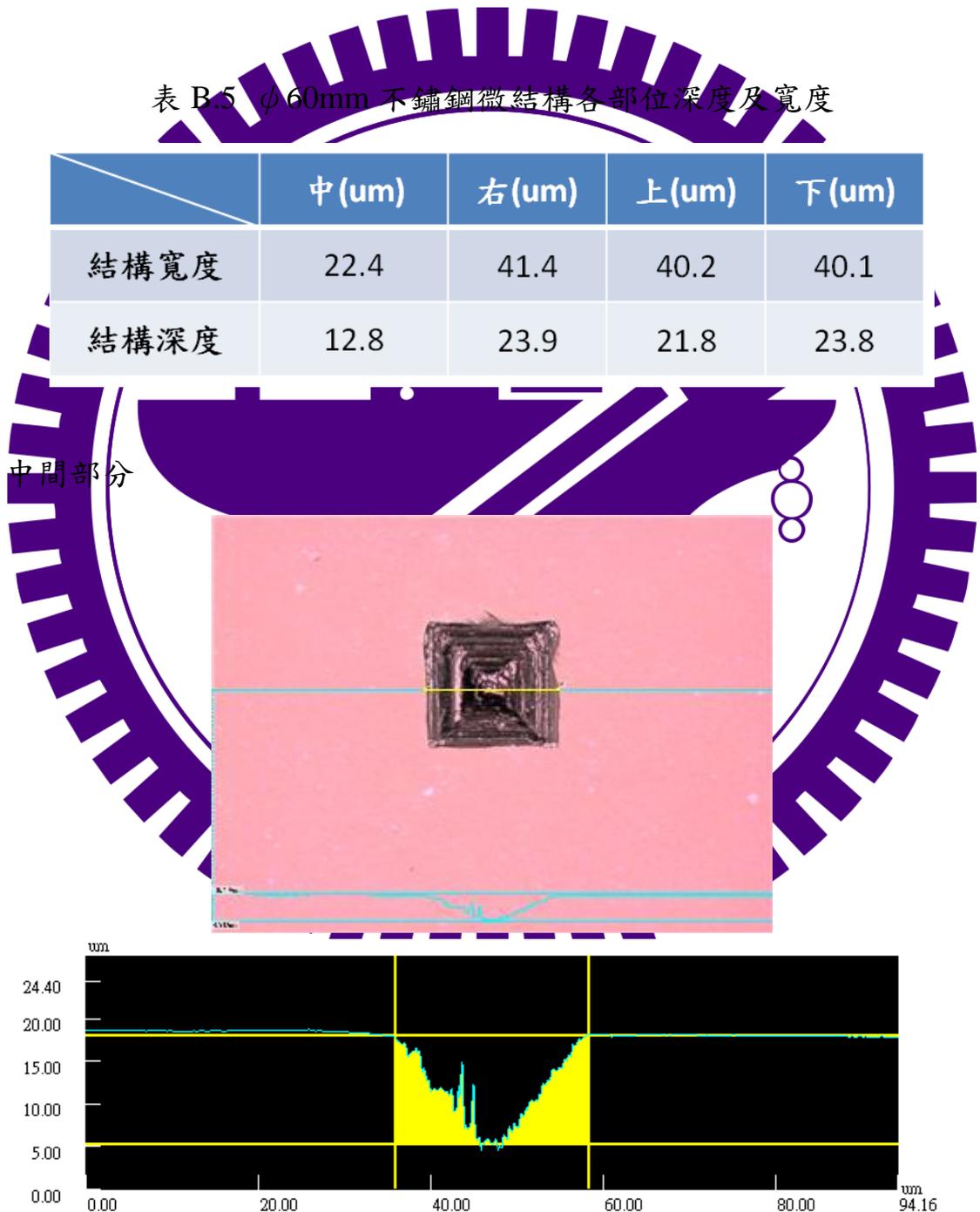
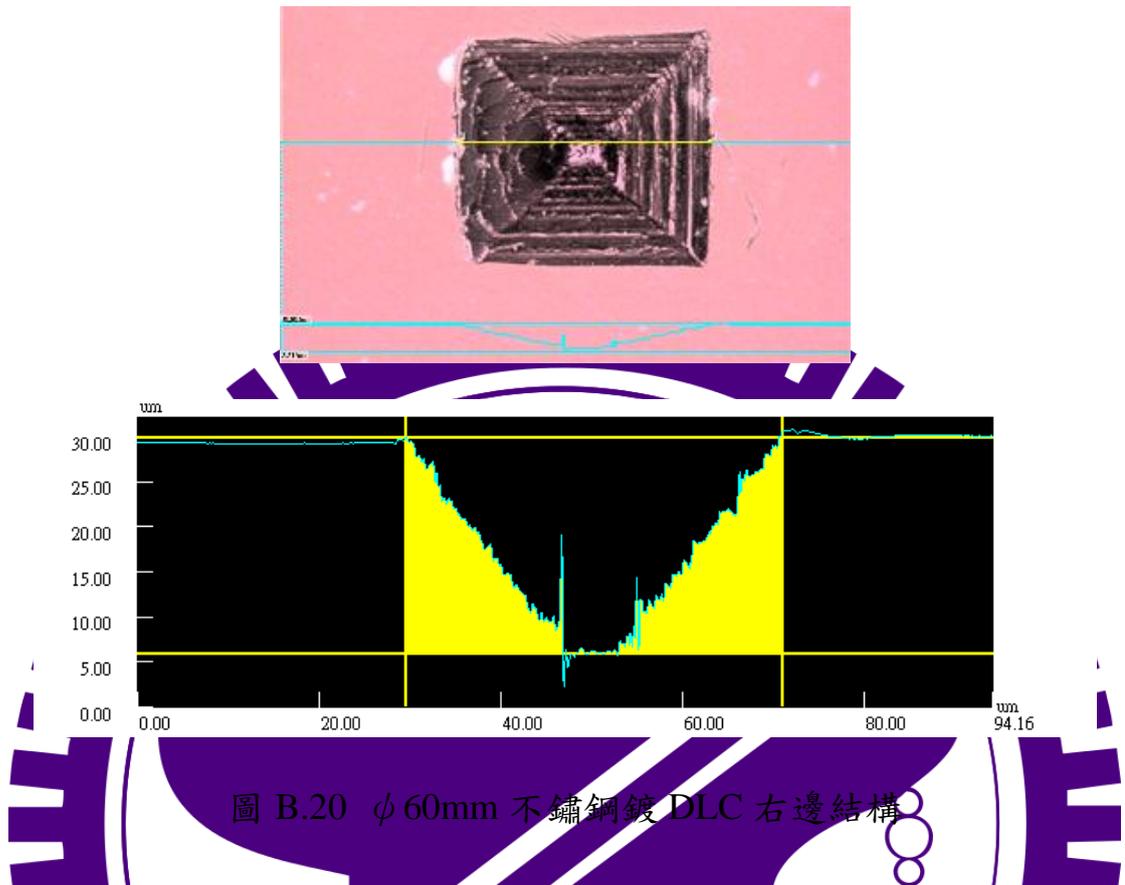
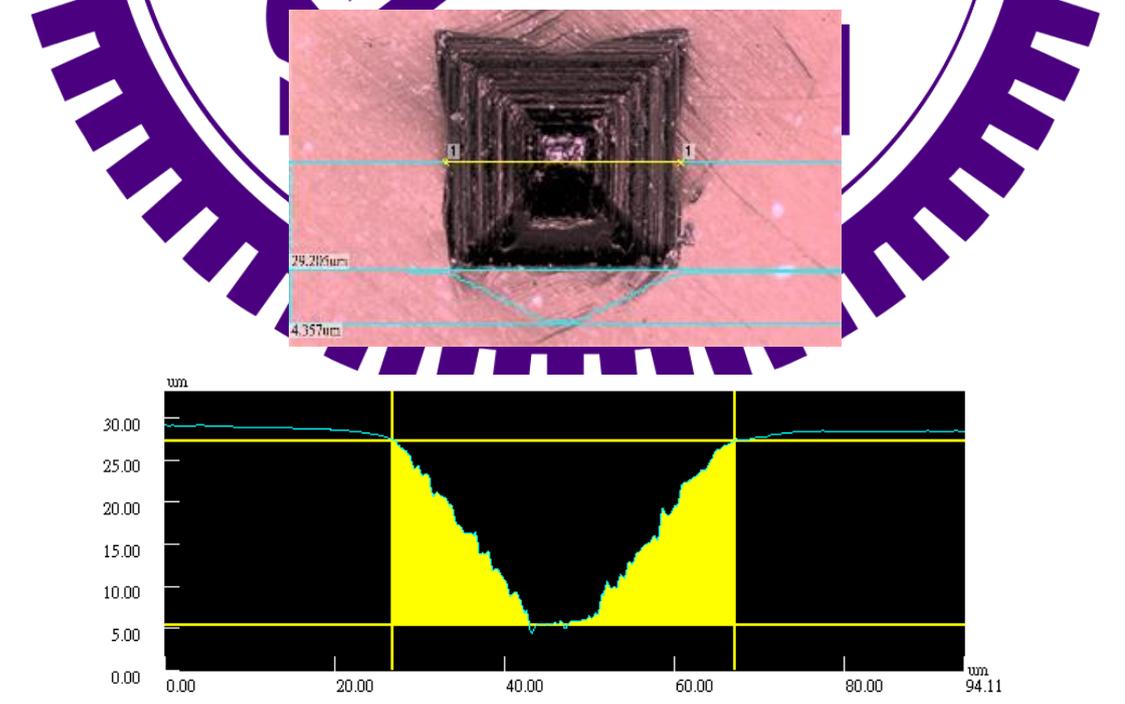


圖 B.19 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 中間結構

2. 右邊部分



3. 上邊部分



4. 下邊部分

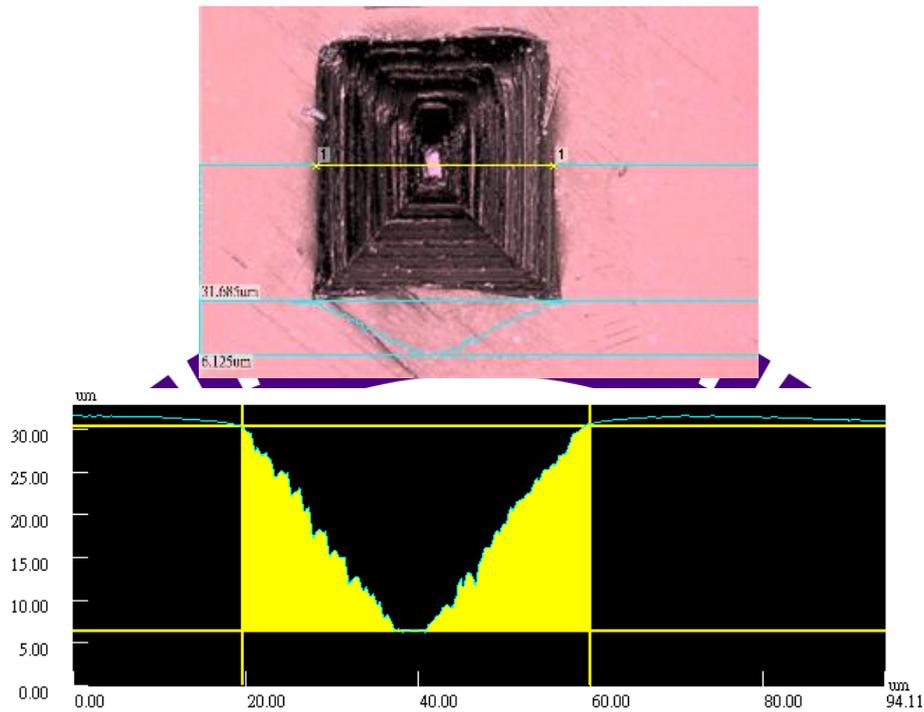


圖 B.22 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 下邊結構

B.6 L-BAL42 玻璃

將 $\phi 60\text{mm}$ 不鏽鋼鍍 DLC 模具對 L-BAL42 玻璃進行熱壓成形實驗，量測其寬度及高度，各部位寬度及高度整理如表 B.6 所示，詳細量測如圖 B.23、圖 B.24、圖 B.25、圖 B.26 所示。

表 B.6 L-BAL42 玻璃微結構各部位深度及寬度

	中(um)	右(um)	上(um)	下(um)
結構寬度	22.4	38.6	37.7	40.6
結構高度	8.6	8.5	7.8	9.9

1. 中間部分

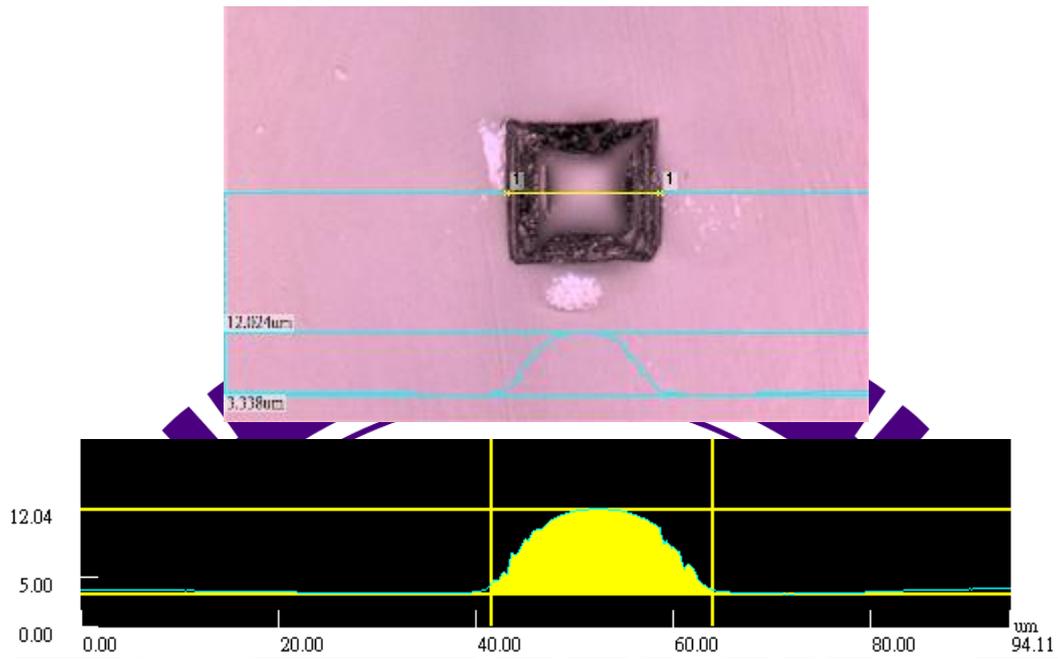


圖 B.23 L-BAL42 玻璃中間結構

2. 右邊部分

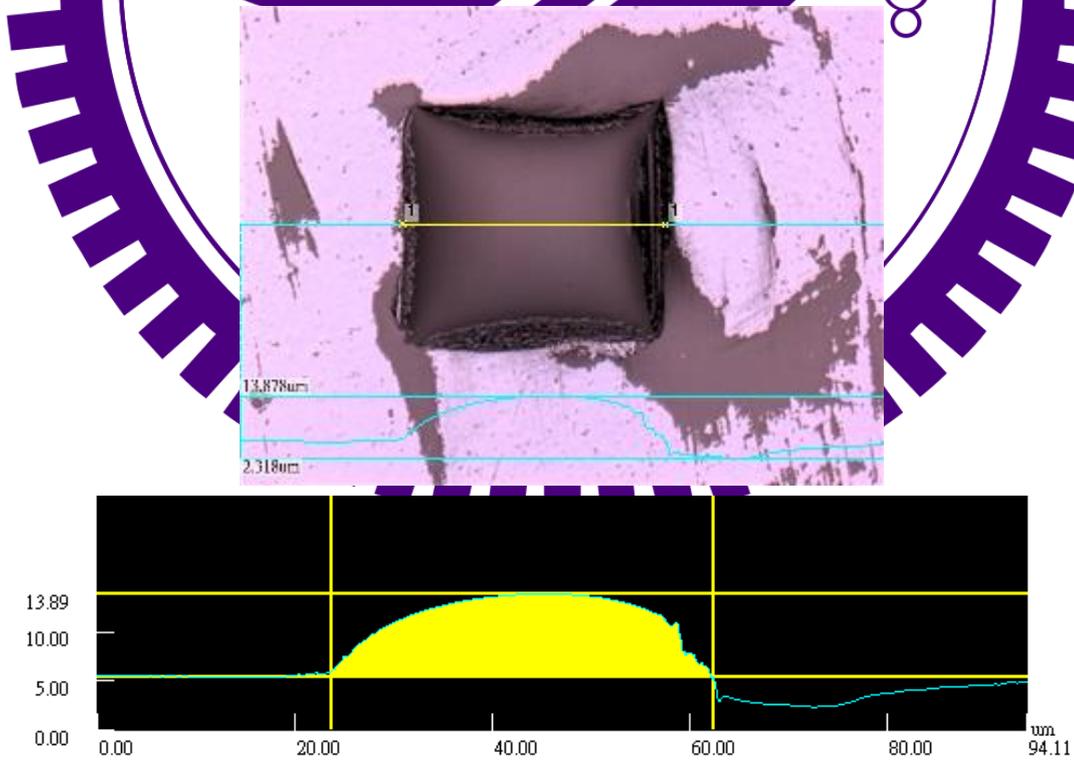


圖 B.24 L-BAL42 玻璃右邊結構

3. 上邊部分

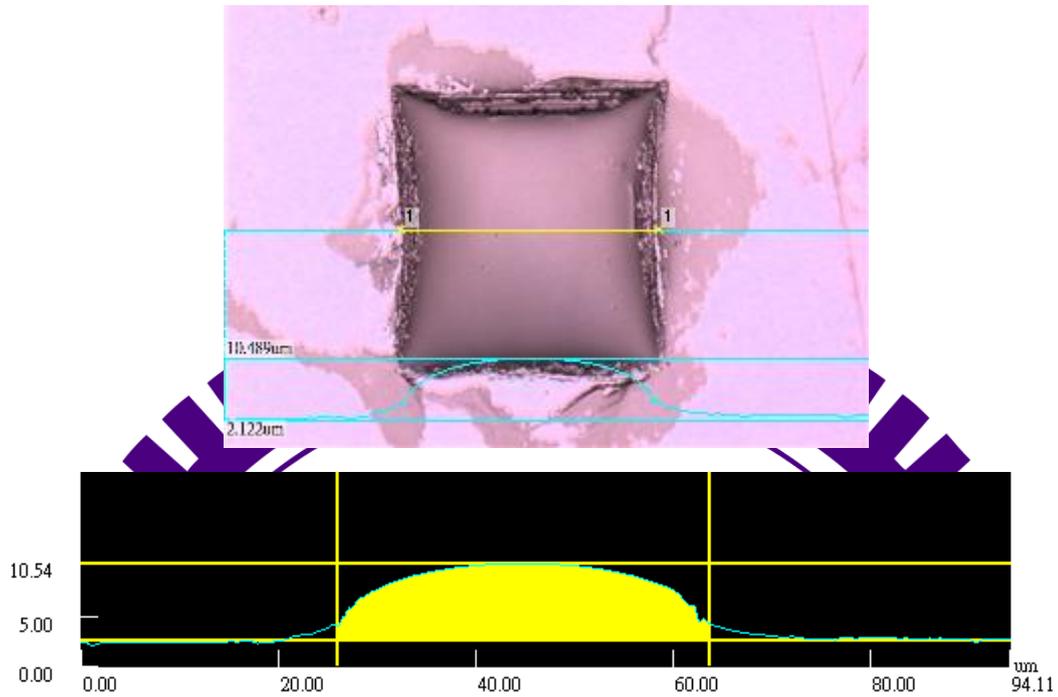


圖 B.25 L-BAL42 玻璃結構

4. 下邊部分

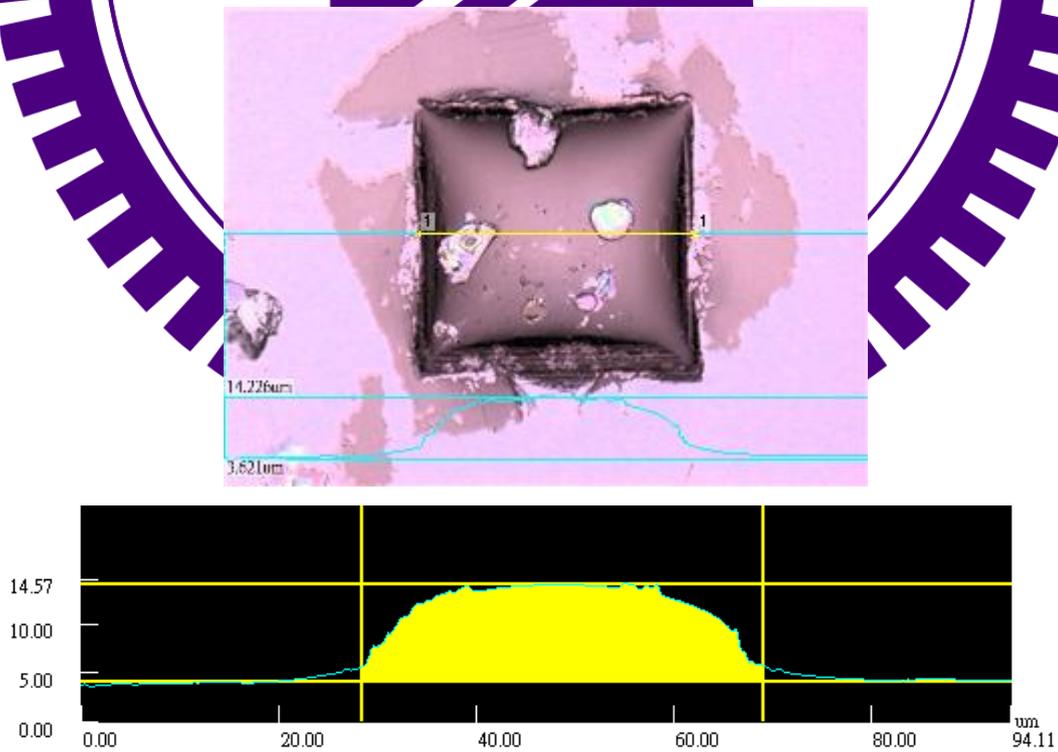


圖 B.26 L-BAL42 玻璃下邊結構