

國立交通大學

機械工程學系 碩士論文

應用具有局部快速加熱能力的模仁
的微米成形技術的開發

Development of Polymer Micro-Hot-Embossing Process
Using a Novel Mold Insert with Rapid Heating-Function

指導教授：陳仁浩 教授

研究生：蔡沛原

中華民國九十五年六月

應用具有局部快速加熱能力的模仁的微米成形技術的開發
Development of Polymer Micro-Hot-Embossing Process Using a Novel
Mold Insert with Rapid Heating-Function

研 究 生：蔡沛原

Student: Pei-Yuan Tsai

指 導 教 授：陳仁浩

Advisor: Ren-Haw Chen

國立交通大學



Submitted to Institute of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Mechanical Engineering
June 2006
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

中文摘要

應用具有局部快速加熱能力的模仁 的微米成形技術的開發

研究生：蔡沛原

指導教授：陳仁浩 教授

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

近年來，高分子材料的微成形技術變的越來越重要。相較於其他的成形技術，熱壓成形具有材料流動率低、流動距離短的性質，適合用來成形微結構和光學元件。然而，由於材料和模仁彼此熱膨脹係數的差異，當加工到冷卻保壓階段，材料的收縮會對模仁產生挾持的力量，導致成形品微結構有脫模破壞問題產生，限制了熱壓技術在大面積化和高深寬比結構成形上的應用。為此，本研究進一步改良本實驗室所開發的可局部快速加熱的微模仁，期望能使上述微熱壓的瓶頸得以突破。我們嘗試以 P type 矽晶圓作為模仁，並佈植磷離子於晶片表面上，當施加電力於佈植的通道上，可使模仁本身具有加熱的功能，以適時控制成形材料的溫度分佈，藉此降低材料在成形過程中的收縮應力。

實驗結果顯示，熱壓成形在成形深寬比三以上的微結構，脫模皆會產生微結構斷裂、傾倒或模仁毀損等不同程度的破壞。在冷卻保壓階段，施加適當的功率在模仁表面可以有效的降低模仁和材料間的熱收縮應力，解決脫模破壞的問題，對材料收縮不均勻的缺陷亦有相當程度的改善。

英文摘要

Development of Polymer Micro-Hot-Embossing Process Using a Novel Mold Insert with Rapid Heating-Function

Student: Pei-Yuan Tsai

Advisor: Ren-Haw Chen

Institute of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

abstract

Polymer micromolding technique are becoming increasingly important in recent years. Compared with other molding technique, hot embossing is favorable for molding microstructures and optical devices because of its low flow rate and low material flow character. However, due to the differences of thermal expansion coefficient between polymer and mold insert, shrinking of polymer in the cooling stage may lead the mold cavities to press the microstructure from both sides. This force will cause the demolding destruction of microstructures and limit the application of molding larger surface areas and higher aspect ratio microstructures on hot embossing technique. Therefore, this study improve the mold insert with rapid heating-function which our laboratory develop and use it to surmount the limit on micro-hot-embossing. We try to use P type silicon wafer as mold insert and implant phosphorous ion into the surface of silicon wafer to make mold insert have heating function. With the heating function, we can decrease the thermal stress of polymer in molding process.

Experiment results demonstrate that the microstructure will produce these defects with creak, slant, damage in the mold insert at demolding

when the microstructure by hot embossing has filled with up to 3 times of aspect ratio. Applying appropriate heating power to the surface of mold insert can decrease the thermal stress effectively in the cooling stage to solve the problem of demolding and can improve non-uniform shrinkage of polymer.



致謝

本研究論文承蒙陳仁浩老師的指導和教誨，方能順利完成，使本人在兩年的研究生涯上獲得不少的知識和心靈上的成長，相信對我爾後的人生能有很大的助益。也感謝在實驗室中的每一位成員，劉安誠、盧明初學長，江忠晉、許旭昌同學，吳振家、盧春貴學弟還有李悅慈學妹，在各方面的幫忙，陪我度過兩年的實驗室生活。另外感謝伴我成長路上的所有好友，與我一起分享所有的喜怒哀樂，有他們的陪伴讓我的生活更為多采多姿。最後感謝家人和女友小倩在背後默默的支持和付出，使我在求學路上能無後顧之憂，專心於課業之上。有他們的關懷和鼓勵，是我失意沮喪時永不退縮的原動力。

最後謹以這篇論文獻給所有在求學路上一路支持和陪伴我的所有人，沒有他們就沒有我今天的成就。

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
致 謝.....	IV
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
第一章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究動機與目的.....	8
1.4 研究方法.....	9
第二章 可局部加熱的模仁的製作.....	10
2.1 可局部加熱的模仁的功能與目的.....	10
2.2 可局部加熱模仁的製作程序.....	10
2.2.1 晶圓清洗.....	10
2.2.2 氧化.....	11
2.2.3 化學氣相沉積.....	12
2.2.4 黃光微影.....	13
2.2.5 蝕刻.....	17

2.2.6 摻雜.....	18
2.2.7 退火.....	19
2.3 模仁加熱性能測試.....	20
2.3.1 離子佈植對模仁加熱性能的影響.....	20
2.3.2 加熱線路長對模仁加熱性能的影響.....	20
2.3.3 加熱線路寬對模仁加熱性能的影響.....	21
第三章熱壓成形實驗.....	37
3.1 實驗設備與裝置.....	37
3.1.1 熱壓機.....	37
3.1.2 可局部加熱的模仁.....	38
3.1.3 直流電源供應器.....	38
3.1.4 熱壓材料.....	38
3.1.4 場發射掃描式電子顯微鏡.....	39
3.1.5 CCD 顯微鏡.....	39
3.2 實驗流程與實驗設置.....	39
3.2.2 熱壓方式及流程.....	39
3.2.3 成形微結構量測.....	40
3.3 實驗方法與實驗參數.....	40
3.3.1 熱壓溫度.....	40

3.3.2 預壓壓力、熱壓壓力與保壓壓力	41
3.3.3 模仁加熱功率與時間.....	42
第四章 實驗結果與討論	52
4.1 熱壓時模仁加熱功率與模仁表面溫度變化關係	52
4.1.1 未施加功率時模仁表面的溫度變化	52
4.1.2 施加功率時模仁表面的溫度變化	52
4.2 脫模破壞.....	53
4.2.1 影響脫模難易度因素.....	53
4.2.2 一般熱壓成形時所產生的脫模破壞	54
4.3 模仁施加功率對脫模破壞的改善	54
4.4 模仁施加功率對收縮率的影響	55
第五章結論與未來展望	71
參考文獻.....	73

表目錄

表 2-1 製作模仁所用實驗設備.....	22
表 2-2 標準 RCA 晶圓清洗步驟.....	23
表 2-3 黃光微影製程步驟.....	24
表 2-4 可局部加熱模仁的製作流程.....	25
表 2-5 測試晶片加熱性能的各项加熱線路條件.....	26
表 3-1 PMMA 的材料特性.....	43
表 3-2 模仁施加功率與秒數設定.....	43
表 4-1 成形操作窗實驗參數設定.....	56
表 4-2 收縮率實驗參數設定.....	56



圖目錄

圖 2-1 第一道光罩-電極區.....	27
圖 2-2 第二道光罩-結構區.....	27
圖 2-3 第三道光罩-加熱線路區.....	27
圖 2-4 KOH 側向蝕刻問題.....	28
圖 2-5 (110) 晶圓在 A-A 截面蝕刻示意圖.....	28
圖 2-6 光阻塗佈不均勻-呈現放射狀顏色.....	29
圖 2-7 模仁溫度量測裝置.....	29
圖 2-8 不同佈植條件所得摻雜晶片的通電溫度上升特性 (線寬 200 μm 、線長 60mm)	30
圖 2-9 不同佈植條件所得摻雜晶片的通電溫度上升特性 (線寬 400 μm 、線長 60mm)	30
圖 2-10 不同佈植條件所得摻雜晶片的通電溫度上升特性 (線寬 200 μm 、線長 100mm)	31
圖 2-11 不同佈植條件所得摻雜晶片的通電溫度上升特性 (線寬 400 μm 、線長 100mm)	31
圖 2-12 摻雜所得不同矽基導線的線長下，模仁的通電升溫特性 (60keV、3E15 cm^{-2})	32
圖 2-13 摻雜所得不同矽基導線的線長下，模仁的通電升溫特性 (60keV、5E15 cm^{-2}).....	32
圖 2-14 摻雜所得不同矽基導線的線長下，模仁的通電升溫特性 (80keV、3E15 cm^{-2}).....	33
圖 2-15 摻雜所得不同矽基導線的線長下，模仁的通電升溫特性 (80keV、5E15 cm^{-2}).....	33
圖 2-16 不同的矽基導線線寬下，模仁的加熱升溫特性 (60keV、3E15 cm^{-2}).....	34
圖 2-17 不同的矽基導線線寬下，模仁的加熱升溫特性 (60keV、5E15 cm^{-2}).....	34

圖 2-18 不同的矽基導線線寬下，模仁的加熱升溫特性（80keV、 $3E15cm^{-2}$ ）	35
圖 2-19 不同的矽基導線線寬下，模仁的加熱升溫特性（80keV、 $5E15cm^{-2}$ ）	35
圖 3-1 熱壓機硬體配置圖	44
圖 3-2 熱壓機本體	44
圖 3-3 可局部加熱的模仁	45
圖 3-4 直流電源供應器	45
圖 3-5 場發射掃描式電子顯微鏡	46
圖 3-6 CCD 顯微鏡與螺旋測微儀	46
圖 3-7 成形操作窗	47
圖 3-8 熱壓流程	48
圖 3-9 熱壓製程之溫度與壓力設定曲線圖	49
圖 3-10 實驗用深寬比 3 模仁	50
圖 3-11 未完整充填的成形結構	50
圖 3-12 未完整充填的成形結構	50
圖 3-13 深寬比 5 的成形結構	50
圖 3-14 深寬比 5 的成形結構	50
圖 3-15 熱收縮應力消除示意圖	51
圖 4-1 模仁表面溫度量測實驗架設	56
圖 4-2 熱壓流程時模仁表面的溫度變化	57
圖 4-3 施加不同功率時模仁表面的溫度變化	57
圖 4-4 KOH 蝕刻結構（深寬比 3）	58
圖 4-5 KOH 蝕刻結構（深寬比 5）	58
圖 4-6 KOH+IPA 蝕刻結構（深寬比 1）	58
圖 4-7 KOH+IPA 蝕刻結構（深寬比 3）	58
圖 4-8 KOH+IPA 蝕刻結構（深寬比 3）	58
圖 4-9 KOH+IPA 蝕刻結構（深寬比 4）	58
圖 4-10 KOH 和 EDP 對同一個晶格面所產生的不同蝕刻結果	60

圖 4-11 脫模破壞-材料殘留在模仁內部.....	61
圖 4-12 脫模破壞-材料殘留在模仁內部.....	61
圖 4-13 脫模破壞-材料殘留在模仁內部.....	61
圖 4-14 脫模破壞-成形結構產生撕裂.....	61
圖 4-15 脫模破壞-成形結構產生撕裂.....	61
圖 4-16 脫模破壞-成形結構斷裂.....	62
圖 4-17 脫模破壞-成形結構斷裂.....	62
圖 4-18 脫模破壞-模仁結構斷裂在成形材料之間.....	62
圖 4-19 脫模破壞-模仁結構斷裂在成形材料之間.....	62
圖 4-20 脫模破壞-成形結構傾倒.....	62
圖 4-21 脫模破壞-成形結構傾倒.....	62
圖 4-22 成形操作窗-深寬比三.....	63
圖 4-23 成形操作窗-深寬比四.....	63
圖 4-24 A2 區域成形結構.....	64
圖 4-25 C1 區域成形結構.....	64
圖 4-26 C4 區域成形結構.....	64
圖 4-27 成形結構尺寸.....	64
圖 4-28 E6 區域成形結構.....	64
圖 4-29 A2 區域成形結構.....	65
圖 4-30 D1 區域成形結構.....	65
圖 4-31 密集區結構尺寸.....	65
圖 4-32 B7 區域成形結構.....	65
圖 4-33 E7 區域成形結構.....	65
圖 4-34 B2 區域成形結構.....	66
圖 4-35 密集區結構尺寸.....	66
圖 4-36 B2 區域成形結構.....	66
圖 4-37 B7 區域成形結構.....	66
圖 4-38 E7 區域成形結構.....	66
圖 4-39 微結構傾倒融化.....	67

圖 4-40 微結構傾倒融化.....	67
圖 4-41 材料表面變形.....	67
圖 4-42 收縮率量測方式.....	68
圖 4-43 3MPa 保壓壓力下收縮率曲線.....	69
圖 4-44 3MPa 保壓壓力下收縮量曲線.....	69
圖 4-45 5MPa 保壓壓力下收縮率曲線.....	70
圖 4-46 5MPa 保壓壓力下收縮量曲線.....	70



第一章 序論

1.1 研究背景

自 1960 年代電子產業開始起步以來，半導體工業開始蓬勃發展，半導體科技的進步將人類的生活帶入了一個新的里程碑。今日，電子產品和元件隨處可見，已經變成現代人生活中不可或缺的一部份。

微機電系統(micro-electro-mechanical-system, 簡稱 MEMS)在歐洲又稱微系統科技(micro system technology, 簡稱 MST), 此技術在 1960 年代開始有概念提出, 並在 1990 年代開始迅速發展, 各國紛紛投入金錢和人力來發展此一技術。MEMS 這名稱也顯示此一技術的特質, 原本用於微電子產業的半導體製程技術, 改良後用來製作微米(百萬分之一公尺), 甚至更細微尺度的機械結構, 並整合光學、電子、電機、機械、通訊、材料、物理、化學及醫學等多種知識技術, 為一個跨領域的整合性科技。微機電的應用非常的廣: 主要有微感測器、微致動器、光學元件、生物微機電系統等等。在微機電的領域中要微小化機械件的方式有很多種, 以製造技術而言可以分為三類: (1) 體型微加工(bulk micromachining); (2) 面型微加工(surface micromachining); (3) 微光刻電鑄模造技術(LIGA)、微放電加工(micro electrostatic discharge machining, μ -EDM)與準分子雷射(excimer laser)等方法[1]。

在這幾個技術中, 微光刻電鑄模造技術(lithographie galvanoformung abformung, LIGA), 可以製造出高深寬比且高精度的微細元件。最早期是 IBM 嘗試利用微影及電鑄來製造高深寬比的結構, 在 1982 年完整的 X 光 LIGA 技術在德國的卡斯魯核能研究(Karlsruhe Nuclear Research Center)所提出。此製程擁有可製造高深寬比(high aspect ratio)結構、適用多種材質、大量生產、低表面粗糙度和側壁垂直性佳等許多優點, 使得此製程被提出之後即被廣泛討論。此製程由 X 光微影(lithography)、電鑄(electroforming)、微成形(micromolding)三項步驟所構成[2]。

X 光微影可以說是 LIGA 製程中最重要的一個步驟, 利用磁場中加

速的電子產生波長極短的同步輻射 X 光，由於波長很短，能量密度很高，所以可以做出極小線寬和平行度很高的結構出來。一般最常利用 PMMA (polymethyl methacrylate) 做為 X 光的光阻材料，主要是因為曝光的解析度高($\sim 0.2\mu\text{m}$)，且曝光完光阻的表面品質優異，能充分反應出 X 光微影的特性，因此非常適合製作光柵等高精密度的微結構。雖然如此，PMMA 在製程上仍有幾項缺點。(1)感光度低：以台灣的同步輻射光源為例，若要曝光 $500\mu\text{m}$ 厚的 PMMA 光阻，約需六小時以上的時間，對珍貴的同步輻射 X 光光源來說並不符合使用效益。(2)抗應力腐蝕 (stress corrosion) 性質不佳：PMMA 光阻在曝光的過程中可能會因為熱或釋氣的發生而累積內應力，使 PAAM 光阻在隨後的顯影過程中產生嚴重的腐蝕現象。由於有以上的兩種缺點，研究 LIGA 的技術人員便一直尋找能夠代替 PMMA 的光阻材料。除此之外，X 光有波長短能量高的特性，因此 X 光光罩材料的選擇和製作都非常的困難和昂貴。由此可知，LIGA 製程最大的缺點就是光源取得不易和製程造價昂貴，使其應用性和適用性大大降低。

在 X 光微影製程之後，可利用其所產生的 PMMA 微結構來當作電鑄的基材，一般而言都是使用鍍來當作電鑄的材料，控制微結構電鑄的品質是此製程最關鍵的地方。電鑄製程對於微細結構及表面特徵的轉印性極佳，電鑄出來的微結構則作為下一步微成形所需的模仁。

微成形是泛指利用模仁 (mold insert) 來進行對微結構的轉印或複製的動作，此技術是 LIGA 降低成本和大量生產的關鍵。目前的微成形技術一般可區分為熱壓成形 (hot embossing) 和射出成形 (injection molding)，其他如輥壓 (rolling) 以及光聚合法 (photopolymerization) 等則較少人用 [1]。

成形技術乍看之下雖然只是利用模具對材料進行轉印的動作，但在成形過程中材料受機械加工的熱與力的影響會產生膨脹、收縮等材料特性，導致在熱壓的過程中產生成形品脫模夾持、應力集中、成形精度不良等問題。因此在成形領域內仍有許多未解決的問題和瓶頸，需要深入的探討和研究，讓成形的技術更趨於成熟和完備。

本研究就是探討微成形中熱壓成形這個技術領域裡面的問題和解決方法，和其他成形方法比較，熱壓成形有材料流動率低(low flow rate)、流動距離短(low material flow)的特性，特別適合用來成形微細結構和光學元件，且熱壓成形設備較具彈性，不同方法所製造出來的模仁都可以用來做熱壓成形並達到提高產量和降低成本的目的。

1.2 文獻回顧

在微成形技術方面，1999年H. becker等人首先提出以矽為基材，直接製作熱壓成形的模仁，並指出和傳統的電鍍鎳模仁相比直接以矽基材來當模仁有以下的優點：(1)以矽為基材的模仁磨耗度低、硬度高，使模仁的壽命明顯增加；(2)由於半導體工業的發展矽基材的加工技術發展非常成熟，使得矽模仁製造容易且成本低；(3)矽表面光滑的特性使脫模較為容易。並以微流道為例子，以蝕刻方式製作出寬 $0.8\mu\text{m}$ 、高 $5\mu\text{m}$ 深寬比大約為5的矽模仁，並以熱壓的方式以及PMMA為材料，製作出微結構[3]。H. becker在以PMMA和PC來做為熱壓成形的材料研究中，指出以高分子為熱壓成形的材料有以下的優點：(1)高分子材料寬廣的物理特性和化學特性可以充分運用在熱壓上面；(2)適合微製造技術做較複雜的幾何結構；(3)適合轉印複製的製程。並說明熱壓成形製程為在一真空環境中，加熱材料使其溫度在玻璃轉移溫度 (glass transition temperature, T_g) 以上，再利用模仁壓印材料，將模仁上的微結構圖案轉移到材料上的一種微成形技術，並指出熱壓成形有材料流動率低、流動距離短等特性[4]。L. Weber等人提出微成形是最有可能大量生產且最有用的技術來製作精密微小元件，並指出以微成形技術製作的製品可能會產生充填不完全、收縮、翹曲與表面粗糙等缺陷[5]。

在奈米壓印(nanoimprint)的技術中，J. Taniguchi 等人以人工鑽石為基材利用電子束顯影 (electron beam, EB) 和反應離子蝕刻 (reactive ion etch, RIE) 的方式來製作壓印模仁，藉由鑽石高硬度的特性不僅可以壓印一般的高分子材料，還可以在室溫、130MPa 的條件下直接壓印鋁或銅等金屬材料，此種壓印技術可以應用在矽的超大型積體電路製程

(ultra large scale integration, ULSI) 的接線技術上[6]。J. Tao 等人則研究在可以在室溫下進行奈米壓印技術的材料。在室溫下進行壓印製程的好處是壓印模仁和材料不會因熱膨脹係數的不同而產生壓印尺寸的誤差。而(hydrogen silsequioxane, HSQ)是一種適合室溫微奈米壓印的材料，但在壓印結束後，利用乾式蝕刻移除多餘的 HSQ 卻會破壞原本的成形結構，導致成形賦形性不佳，因此 J. Tao 使用 PMMA 和 HSQ 兩種高分子材料來做奈米壓印，首先在矽基材上塗佈 PMMA 再塗佈 HSQ，接著使用製作好的矽模仁只對 HSQ 做壓印的動作，再以 HSQ 為遮罩對 PMMA 進行乾式蝕刻，由於蝕刻氣體的關係 PMMA 會有底切的現象，最後在沈積一層 PdAu，當移除 PMMA 後就可以獲得留下的金屬微結構[7]。M. Bender 等人使用一種以 UV 光為基礎的奈米壓印技術，利用透明的石英作為模仁材料，當壓印 PMMA 光阻材料的同時，再利用 UV 光照射光阻使其硬化，最後在做脫模的動作。相較於一般的熱壓技術，UV 光的壓印技術可以在常溫低壓的條件下進行壓印的製程，且製程快速。文獻中利用此製程壓印出面積 $1.2 \times 1.2 \text{mm}^2$ ，直徑為 80nm 的點陣圖圖形[8]。P. B. Grabcic 等人則是以 UV 光壓印技術為基礎，製作適合此種 UV 光壓印的模仁。模仁製程分為以下幾個步驟。

1. 將矽基材和透明石英以陽極接合法接合在一起。
2. 以低壓化學氣相沉積方法，沉積一層氮化矽在矽基材上面。
3. 黃光微影的將預先設計好的圖案轉移到光阻上。
4. 利用電漿蝕刻蝕刻氮化矽和矽基材，以光阻為遮罩將光阻上的圖形轉印到氮化矽和矽基材上面。
5. 利用氧化的製程將裸露出來的矽基材氧化成二氧化矽。
6. 去除氮化矽和矽，一個在石英板上的二氧化矽微模仁即完成。

利用透明石英當做模仁基板最大的好處就是可以利用 UV 曝光的壓印技術，在常溫低壓的環境下即可完成壓印動作，P. B. Grabcic 指出當矽的側邊氧化技術成熟時利用此方法可以製作線寬 100nm 左右的模仁[9]。

M. D. Austiny 等人則是利用 UV 光壓印的技術配合非等向性蝕刻在 4 吋晶圓上成功壓印出 5nm 線寬間隔 14nm 的 PMMA 高分子結構[10]。Y. Y.

Zhang 等人以矽為底材製作出柵狀的微結構模仁。首先使用掃描探針氧化法(scanning probe oxidation, SPO), 施加一個偏壓在掃描探針顯微鏡(scanning probe microscopy, SPM)的探針上面, 當探針在晶片表面上移動時可以在表面形成一層二氧化矽, 所生成的二氧化矽品質和探針施加的電壓、探針和試片的表面還有探針的材料特性有關。接下來以二氧化矽作為蝕刻遮罩並用 KOH+IPA 溶液蝕刻出所需的微結構, 一個奈米級的微模仁製作至此完成[11]。

在大面積壓印成形的研究方面, C. Perret 等人研究八吋晶圓的奈米壓印方式, 首先模仁的製作以電漿蝕刻的方式在晶圓上蝕刻出深 400nm、線寬介於 250nm 到 450 μ m 的圖形尺寸, 其次以 NEB22 和 mr-I8000 兩種高分子光阻作為顯影的材料塗佈在另一片八吋晶圓上面, 最後再利用壓印的方式顯影在八吋晶圓上的光阻。文中討論到這種顯影方式會有兩種形式的缺陷會產生, 第一種容易產生在沒有圖形的區域中, 會產生類似花的圖案缺陷, 第二種是容易產生在方形的陣列區域中, 會產生類似流道的缺陷。研究發現在真空的狀態下並且控制光阻的溶劑含量可以有效的避免這兩種缺陷的產生[12]。

在熱壓製程的改善方法和影響熱壓的實驗因素的研究上, K. Seunarine 等人改善傳統熱壓成形利用加熱板加熱模仁和材料的方式, 利用鹵素光源透過石英窗的方式照射模仁上藉此加熱模仁, 此種加熱方式可以有效的降低熱壓製程所需的時間, 特別適合生產醫用的晶片, 在同樣的時間下傳統的熱板加熱方式可以生產 2~3 塊試片, 而光學加熱的方式可以達到 16~20 塊的生產速度[13]。H. D. Rowland 研究在熱壓成形時高分子材料充填模穴的行為, 並比較不同的成形寬度、幾何形狀、熱壓時間、熱壓溫度對高分子材料黏滯性的影響, 不同的實驗條件都會影響材料充填模穴的現象。在充填 10 μ m 寬的 2 μ m 高的模穴時, 較薄的熱壓材料會產生兩個高峰的充填現象, 而施加較大的熱壓壓力也會有同樣的效果; 較厚的熱壓材料在充填時則會產生單峰的充填現象, 較低的熱壓壓力也會有同樣的效果。在成形微米等級的模穴時, 由於局部應力和剪切力大於材料表面張力的關係, 材料會產生雙峰的模穴

充填現象[14]。N. Roos 等人研究真空環境對熱壓製程的影響，此文獻比較熱壓製程在真空中和在在大氣壓力下的環境中進行熱壓其熱壓結果的差異，熱壓的面積為直徑 10cm，轉印的圖形大小為 400nm 到 100 μ m。實驗結果發現在真空的熱壓條件下可以有效的改善大面積的熱壓均勻性，且低分子量的高分子材料成形對於均勻性誤差的影響較大，也就是真空條件可以有效改善低分子量高分子在熱壓時所可能產生的圖案缺陷。分析實驗結果顯示，過熱的壓縮空氣殘留在模仁和熱壓材料之間是導致熱壓結果缺陷產生的主要原因之一，而太高的熱壓溫度也會導致材料熱裂解，在真空的條件下則可以有效的解決上述兩項問題[15]。

在熱壓成形的應用方面，Y. Zhao 等人以熱壓成形的方法來製作靜電梳製動器，熱壓時的壓力為 3500N、溫度 130 $^{\circ}$ C 成形出來的最小圖形尺寸為 5 μ m、深寬比達 12[16]。X. C. Shan 等人以 Polycarbonate (PC) 為材料，利用熱壓成形製作微反射鏡等光學開關。首先利用感應耦合電漿 (inductive coupled plasma, ICP) 蝕刻對矽晶圓蝕刻出所需要的圖形，以矽晶圓為基材電鑄生成熱壓成形所需的模仁，最後以鎳模仁熱壓 PC 生成 500 μ m (width) x 100 μ m (thickness) x 200 μ m (height) 的陣列微反射鏡。X. C. Shan 指出在做光學元件熱壓時有兩個很嚴重的問題必須克服，第一、熱壓時高分子材料不易填滿模仁中的微小結構孔穴，第二、脫模時，微結構必須保持完整無脫模破壞。為了克服脫模破壞，要先將模仁浸泡在利用甲苯稀釋的 chlorinated fluoroalkyl-methylsiloxane (CF) 溶液中，再烘烤模仁 110 $^{\circ}$ C、20 分鐘，使模仁表面形成一層薄膜，這層薄膜可以有效的降低脫模破壞的問題。為了使熱壓時高分子材料能夠填滿模仁中的結構，X. C. Shan 採用增加熱壓時的壓力和溫度，發現在 170 $^{\circ}$ C、1.75 kg/mm² 和 200 $^{\circ}$ C、1.15kg/mm² 壓力下有最佳的成形條件 [17]。C. G. Choi 等人利用高分子材料熱壓成形的的方式製作光學波導 (waveguides) 的元件，以矽為基材製作模仁，並採用感應耦合電漿蝕刻的方式製作高 7 μ m、寬 7 μ m、長 15.8mm 的柵狀結構，而為了降低模仁表面的粗糙度，先用熱氧化法在模仁表面成長二氧化矽，再用 HF 蝕刻此層氧化層，藉此降低模仁表面的缺陷和粗糙度[18]。

在 LIGA 的電鑄製程研究當中，Y. Guo 等人則是利用鐵氟龍 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 粉末顆粒混合鎳的複合材料來當作電鑄材料，以此方式製造的模仁和傳統的電鑄鎳模仁比較，此種複合材料可以改變模仁的表面特性，有以有效的降低高分子材料脫模所產生的缺陷 [19]。O. V. Makarova 等人則是改變電鑄用的基材，在 LIGA 的電鑄製程中一般都是使用金屬塗佈的矽晶圓作為電鑄基材，但此種基材對光阻的附著性不佳，必須另外塗佈一層黏著層以增加對光阻的附著力，但此黏著層的塗佈增加了製程的困難度且也不易去除，因此 O. V. Makarova 利用另一種多孔性的石墨做為電鑄的基材，不僅有良好的導電性 對光阻亦有較佳的附著性，而在電鑄結束後在利用研磨的方式將石墨基材磨除，此方法可用於製造金屬微模仁，或者金屬微結構[20]。

C. Zhang 等人則是研究直接對 PMMA 加工的方法，使用深反應離子蝕刻 (deep reactive ion etching, DRIE)，直接對 PMMA 做蝕刻的動作，並討論 O_2 和 O_2/CHF_3 蝕刻氣體參數與 PMMA 蝕刻率的關係，以及其他製程參數對 PMMA 蝕刻的影響。發現當蝕刻功率增加時蝕刻率也會增加，但表面粗糙度也隨之增加，當功率大於 50W 時 PMMA 會產生彎曲的現象。 O_2/CHF_3 的混合氣體中 CHF_3 會形成鈍化層可以有效的減少側壁底切 (undercut) 的情形，但同時也會降低蝕刻速率。以最佳的蝕刻條件，功率 30W、氣體壓力 3.9Pa 的 O_2/CHF_3 混合氣體可以蝕刻出深寬比 10 的 PMMA 微結構[21]。

K. Kim 等人提出以 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 為材料的成形方法。PDMS 本身具有彈性、透明和低玻璃轉移溫度 ($T_g = -125^\circ C$) 等特性。利用標準的 LIGA 製程製作出厚 300 μm 深寬比 15:1 的鎳模仁，使用旋轉塗佈法來塗佈 PDMS 在模仁上並控制其厚度，最後在放進真空烤箱中烘烤並脫模成形，此種方法優點在於模仁幾乎無損耗且成形快速[22]。

在濕式蝕刻的研究方面，K. Sato 等人指出單晶矽不同的晶格面會影響 KOH 蝕刻的表面粗糙度，其中 (100) 的晶格面有最光滑的蝕刻面，而 (320) 和 (210) 的晶格面最為粗糙，而 (110) 的晶格面表面粗糙度和 KOH 濃度與蝕刻溫度有很大的影響，在 26wt.%~43wt.% 與 $80^\circ C \sim 90^\circ C$ 的條件下

能有較好的表面粗糙度[23]。

I. Zubel 等人研究添加異丙醇(isopropyl alcohol, IPA) 溶液對 KOH 和 TMAH 蝕刻液之間蝕刻速率的影響。以 P type (100)晶片為蝕刻基材，觀察添加 IPA 之後和原本蝕刻溶液蝕刻特性的差異，發現添加 IPA 溶液以後 KOH 和 TMAH 都會降低原本蝕刻速率，但蝕刻出來的表面粗糙度卻會比較細緻。主要原因是添加 IPA 以後會影響溶液中氫氧離子的濃度，而溶液中氫氧離子的濃度正是影響蝕刻速率的關鍵[24][25]。

國內的研究中，賴文童以底邊長 50 μm 的金字塔型微結構模仁來進行熱壓成形實驗，實驗結果得知壓印壓力、材料物性、材料厚度對微結構收縮率分佈影響最大[26]。林威宇利用動態壓力控制來探討微結構熱壓的影響，並討論溫度、壓力與微結構收縮率的關係[27]。黃重凱使用 P 型(100)之矽晶片為基材當作模仁，在晶片上摻雜磷做出導電區，並引用熱電阻的概念當對導電區施加電壓電流，模仁本身就發熱，利用此特點在熱壓成形的過程中，模具降溫到開模的階段時模仁本身能夠保持一定的溫度。由實驗結果得知，熱壓時的溫度和壓力對模仁本身導電區的阻植會有影響，同時在脫模過程中模仁保持適當的溫度能夠有效的改善轉印性[28]。蘇濬賢以微機電系統技術製作一矽基的可自行加熱模仁，並探討模仁在熱壓成形時的加熱時機，利用此種方式來改善熱壓成形時結構的成形賦形性和尺寸精度[29]。

1.3 研究動機與目的

MEMS 領域中，功能性元件的發展，以及更細的高深寬比微結構的製造和量產一直是眾所追求的目標，而微成形技術的開發則是 MEMS 不能大量生產和實用化的一個關鍵。無論是哪一種成形技術，在加工時皆須將材料加熱到玻璃轉移溫度以上，再利用模仁進行轉印的動作，當冷卻脫模時，因材料收縮的特性會產生結構精度不良、脫模破壞等問題。為了克服這些困難，我們企圖能夠發展出一個本身具有加熱功能的模仁，並能夠充分掌握模仁的加熱特性和施加功率之間的關係。在冷卻脫模的階段時，使模仁能夠自行發熱以消除因收縮產生的熱應力，並避免

脫模破壞的問題。因此本研究嘗試利用矽晶片來當模仁，並引入電阻施加功率發熱的概念，在晶片上加工使模仁本身能夠具有局部加熱的功能，再利用施加的電壓和電流來控制模仁的溫度，以 PMMA 做為熱壓材料，以無脫模破壞、大面積成形、結構密集化、成形賦形性為研究目標，探討在熱壓成形的時候，模仁局部加熱性能的應用以及熱壓時的各個參數的設定和最佳化。

1.4 研究方法

本研究的推進是採用設計、實作以及實驗分析的方法為主，並以同學許旭昌的數值模擬分析結果，做為選擇實驗條件暨實驗結果檢討的參考。實驗最主要可以分為三個部份。第一部份為熱壓模仁的製作，首先使用半導體加工技術，以 P 型(110)的矽晶片為基材，經過微影、蝕刻等步驟在晶片蝕刻出成形用的結構區，再用離子佈植的方式摻雜磷在晶片上，藉由摻雜的方式改變晶片的電阻並形成一個加熱的線路。因為電阻的關係，當在這個線路施加電壓以後模仁本身即會自行發熱，並可利用施加電壓的大小和摻雜的劑量來控制晶片發熱的功率。第二部份為熱壓成形的實驗，以第一部分所做出的加熱型模仁為成形模具，並以 PMMA 為熱壓材料，探討如何利用模仁局部加熱的功能解決在冷卻脫模時所產生的脫模破壞等問題。除此之外，模仁本身的溫度控制、局部加熱的時機、局部加熱的時間長短，都是本實驗的重點。第三部份則為統整之前實驗結果所得的數據，找尋各個製程參數對製程的影響性。以一組中心製程參數，並變更單一製程參數，討論其對成形性以及脫模特性的影響，藉此製作出成形操作窗。當操作窗的面積很大時代表成形成容易，當操作窗面積很小時，代表成形條件嚴苛，成形不易。

第二章 可局部加熱的模仁的製作

2.1 可局部加熱的模仁的功能與目的

本研究以矽晶片當做模仁，利用半導體加工的技術製作出具有阻植且能導電的線路區，當在線路區通以電壓和電流時依照阻值的不同，模仁本身即可產生不同程度加熱的效果。製作此模仁最主要的目的就是希望在冷卻脫模的階段時能夠控制模仁局部加熱的溫度和時機，藉由模仁本身加熱來消除因模仁和材料不同的收縮率而產生的熱應力和脫模破壞等問題。

2.2 可局部加熱模仁的製作程序

本研究所使用的晶片為四吋 P 型(110)的矽晶片，製作模仁所需使用的儀器設備如表 2-1 所示，模仁製作流程和步驟則如表 2-4 所示。以下各節則對製作的方法、流程做細部的說明。



2.2.1 晶圓清洗

在半導體加工製程中對晶片本身的潔淨度要求非常的高，濕式清洗則是現今最常用來清潔晶圓的方式，目的是去除晶圓表面的污染物提升後續沉積或成長薄膜的品質，改善製程良率。美國無線電公司(Radio Corporation of America, RCA)的克恩(Kern)和歐布迪南(Puotiuen)首先發展出一套 RCA clean 出來，到現在已經成為標準的清洗晶圓流程。詳細清洗流程請見表 2-2。以下則對各個步驟做解說， $H_2SO_4+H_2O_2$ 溶液， H_2SO_4 和 H_2O_2 都是強氧化劑，可以使有機物中的碳和氫起反應生成 CO_2 和 H_2O ，故此步驟的目的在除去有機物質。 $HF+H_2O$ 溶液，主要是清除在上一步清洗過程中所產生的化學氧化層(chemical oxide)，因為 HF 會在水中解離出 H^+ 和 F^- ，其中 SiO_2 中的 Si 會和 F 離子形成 SiF_4 以去除晶片表面的 SiO_2 。因為 SiO_2 為親水性而 Si 為斥水性，所以我們可以用晶圓表面是否有沾水來判斷 SiO_2 是否有清除乾淨。 $NH_4OH+H_2O_2+H_2O$ 溶液，此步驟即為 SC1(standard cleaning 1)，主要的目的是去除附著在

晶片上面的微小粒子，首先利用 H_2O_2 在晶圓表面形成氧化層，同時 NH_4OH 又可以溶解氧化層，因為微粒是以凡得瓦力吸附在晶圓表面， $SC1$ 的氧化加蝕刻的作用，會拉開微粒和晶圓表面的距離並降低凡得瓦力的作用，最後微粒會因為吸附力不足，脫離晶圓表面而被溶液帶走。 $HCl+H_2O$ 此步驟為 $SC2$ ，主要的目的是去除鹼金屬離子， HCl 會在水中解離出 H^+ 和 Cl^- ，而 Cl^- 會和鹼金屬離子 (Na^+, Li^+, K^+) 形成金屬氯化物，金屬氯化物可以溶解於水而被溶液帶走。

2.2.2 氧化

氧化是重要的加熱製程之一，通常都是在高溫爐管中進行，它是一種添加的製程，也就是把氧氣加到矽晶圓上而在晶圓的表面形成二氧化矽，反應式可以寫成：



二氧化矽是一種密緻的物質而且能覆蓋整個矽表面，如果要繼續矽的氧化過程氧分子就必須擴散通過二氧化矽才能繼續和底下的矽原子產生化學反應，而一個正在成長增厚的二氧化矽層會使氧氣的擴散受到阻礙而變慢。因此，我們採用高溫的方式加快氧分子的移動速度並驅使它們擴散通過原有的氧化層，而且高溫成長的二氧化矽薄膜品質也較低溫成長的二氧化矽品質較好，氧化成長的速率也和氧的來源有關。使用 O_2 之乾氧(dry oxidation)過程的氧化速率就比使用 H_2O 的溼氧化(wet oxidation)過程來的低。這是由於氧分子 O_2 的擴散速率低於 H_2O 在高溫下所分解出的氫氧化物 HO 的擴散速度。雖然溼氧化法的薄膜成長速率較乾氧化法來的快，但是二氧化矽的品質卻相對的較差，因此本實驗利用乾氧化法來成長二氧化矽。

二氧化矽在半導體製程上的應用非常的多，下面就列舉出最常見的應用出來[30]:

(1)擴散遮蔽層(diffusion mask):在擴散法中常使用的摻雜物原子如硼和磷在二氧化矽中的擴散速率遠低於在單晶矽中的速率。因此藉著在遮蔽氧化層上蝕刻出窗口，就可以在指定的區域以摻雜擴散的方式來進

行。

- (2)遮蔽氧化層(screen oxide):在離子佈植時常利用遮蔽氧化層隔離濺鍍的光阻以避免矽受到汙染。
- (3)襯墊氧化層:當必須在矽的表面上沉積氮化矽時都必須先成長一層二氧化矽做為應力緩衝用,因為直接沉積氮化矽層會產生高張力會導致矽晶圓產生裂縫甚至破裂。
- (4)場區及局部氧化層(blanket field oxide):熱成長的二氧化矽在過去最重要的應用之一就是形成絕緣區,使晶片上相鄰的電晶體能夠電性絕緣,場區和局部氧化層就是隔離相鄰元件並防止它們互相干擾的兩種技術。
- (5)犧牲氧化層(sacrificial oxide):一般在閘極氧化製程之前都會先成長一層犧牲層氧化層以移除表面上的損傷和缺陷。該氧化層的生成和移除程序有助於產生一個零缺陷的矽基片表面以生成高品質的氧化層。
- (6)蝕刻阻擋層:在微機電的領域中常常利用二氧化矽來當做蝕刻製程的遮罩,定義出蝕刻的區域出來。

2.2.3 化學氣相沉積

化學氣相沉積(chemical vapor deposition, CVD)是一種利用氣態的化學材料在晶圓表面產生化學反應的製程,它會在晶圓表面沉積一種固態的薄膜層產物。CVD 反應通常分為五個主要的步驟(1)反應氣體擴散通過介面邊界層,藉著氣流與晶片表面間的濃度差以擴散的方式到達晶片的表面。(2)反應物到達晶片表面,失去部分動能而被晶片表面吸附近而沉積於晶片表面。(3)反應物在晶片表面獲得能量提供化學反應。在沉積過程中反應生成物會在晶片表面移動,最後沉積完成。(4)當沉積反應發生後,未反應之反應物及部分生成物會從晶片表面獲得能量而脫離晶片表面。(5)部分生成物與未反應物回到氣流裡並離開 CVD 系統[31]。CVD 製程現在已被廣泛的用來做各種薄膜的沉積,像是磊晶矽沉積、多晶矽沉積、介電質薄膜沉積以及金屬薄膜沉積。而 CVD 系統大致可以分為 APCVD、PECVD、LPCVD 三大類。

常壓化學氣相沉積(atmospheric pressure chemical vapor deposition, APCVD), 常壓指在海平面攝氏 0 度時為 760torrs, APCVD 的沉積速度極快, 晶圓在再一個充滿化學氣體的製程區內由傳送帶輸送並加熱反應。APCVD 製程是由溫度、製程氣體流量率、傳送帶速度等因素所控制。製程大部分用來沉積二氧化矽和氮化矽。

電漿增強型化學氣相沉積(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)。它的操作壓力在 1 到 10 torrs 之間。因為從電漿產生的自由基(radicals)會急速地增加化學反應速率, 所以 PECVD 可以在相對的低溫下達到較高的反應速率, 這對某些需要低溫的沉積製程來說 PECVD 是一個最好的選擇。PECVD 的另一個優點是薄膜沉積的應力可以由射頻(RF)的功率來控制, 而對沉積的速率卻不會有多大的影響。PECVD 廣泛的被應用在氧化物與氮化物薄膜沉積上。

低壓化學氣相沉積(low pressure chemical vapor deposition, LPCVD)。它是在 0.1 到 1torrs 的壓力下操作, 因此需要一個真空系統來控制反應器內的壓力, 由於 LPCVD 的沉積製程主要是由晶圓的溫度所控制而和氣體的流量較無關, 因此晶圓可以在非常小的間距下垂直裝載, 產量自然比較高。現今 LPCVD 製程已經被用來沉積氧化物氮化物以及多晶矽上。

雖然 LPCVD 和 PECVD 都可以成長氮化矽, 不過 PECVD 所沉積的氮化矽組成較不單純, 沉積效果也不是很理想, 考慮到後續乾式蝕刻製程能使用機台的情況下本研究利用 LPCVD 來沉積氮化矽。

2.2.4 黃光微影

黃光微影技術是將光罩上設計好的圖形轉印到晶圓表面上光阻的一種製程, 靠著光學成像原理, 光線經過光罩、透鏡而成像在晶圓表面上的光阻。光阻是一種高分子感光性材料, 和一般的底片不同的是它只對紫外線感光而對可見光不感光。一般來說光阻可分為兩種: 正光阻和負光阻。正光阻主要成分是酚醛(novolac)樹脂, 再曝光前是交連狀(cross-linked)的聚合體(polymer), 在曝光後曝光區內的光阻會產生光溶

解化作用(photosolubilization)使交連被破壞，產生軟化的效果進而被顯影劑溶解，未曝光的部份則被保留在晶圓上。而負光阻正好相反，曝光的部份會因化學反應而變成交連狀，顯影後變硬保留在晶圓上，未曝光的部份則會被顯影劑溶解去除。雖然負光阻較正光阻便宜，但因為光學解析度較差，因此線寬在次微米以下的製程中都已經不再使用負光阻。

光阻的基本成分有四種:聚合體、感光劑、溶劑、添加劑。聚合體(polymer):是附著在晶片上面的有機材料，因為可以耐得住蝕刻和離子佈植製程，所以可以當做圖案轉移時的遮蔽層。聚合體是由有機複合物構成的，常用的正光阻聚合體是酚甲醛(phenol-formaldehyde)或酚醛樹脂，最普遍的負光阻聚合體則是聚異戊二烯(polyisoprene)橡膠。感光劑(sensitizer):感光性很強的有機化合物能夠控制並調整曝光過程中的光化學反應。正光阻的感光劑在曝光過程能夠分解並破壞交連結構，使曝光後過剩的光阻能夠容易溶解在液態的顯影劑中。負光阻的感光劑則是一種含有 N_3 團的有機分子，在曝光後會釋放出 N_2 氣體而有助於橡膠分子交連。溶劑(solvent):溶解聚合體和感光劑的一種液體，使聚合體和感光劑懸浮在液態的光阻中。溶劑可以稀釋光阻以便利用旋轉塗佈的方式在晶片上形成一層薄膜，再旋轉塗佈的過程之前光阻中約有 75%的成分是溶劑。添加劑(additives):可控制並調整光阻在曝光時的光化學反應，以達到最佳的微影解析度。對正光阻和負光阻而言，染料就是一種常用的添加劑。

正光阻的製程流程簡圖如下:去水烘烤/HMDS->光阻塗佈->軟烤->對準/曝光->顯影->顯微鏡觀察曝光圖形->硬烤，詳細步驟和實驗參數請參考表 2-3。

去水烘烤/HMDS 塗佈:一般在塗佈光阻之前都會先在晶片上做烘烤的動作去除晶片上多餘的水氣，接著再利用氣相塗佈的方式塗佈一層六甲基雙氧矽甲烷(Hexamethyldisilazane, HMDS)，塗佈 HMDS 最大的好處就是可以改善有機物光阻和基材之間的附著力，使親水性表面的晶片能夠很均勻的塗佈上光阻，並在曝光顯影的過程後增加光阻和晶圓的附著性。

光阻塗佈:將晶圓放置在帶有真空吸盤的轉軸上，利用真空吸力固定住晶圓，再將液態光阻滴在晶片上並調整旋轉的轉速和時間，利用旋轉時所造成的離心力將晶圓均勻的塗佈在晶圓上面並控制其厚度。塗佈時旋轉速度、光阻黏滯度及光阻量都會影響到塗佈的光阻厚度。通常旋轉的速度分為兩段式，第一段轉速較慢，目的是將光阻均勻的塗佈在晶片上面;第二段轉速較快，目的是控制光阻的厚度。

軟烘烤(soft bake):通常晶圓在塗佈光阻後會再放進烤箱或烤盤中加熱以驅除光阻中大部分的溶劑，並將光阻從液態轉成固態，同時增加晶片上的附著性。軟烤之後光阻會含有大約 5%到 20%的殘餘溶劑，厚度也會收縮到 10%到 20%。軟烤的溫度要取決於光阻的類型和製程的不同而改變，假設軟烤不足，會使光阻溶劑含量太多使期在晶片上的附著力下降，溶劑含量太多也會使曝光不靈敏，影響到圖案的解析度。若過度烘烤(overbake)也會使光阻過早的聚合作用而引起曝光不靈敏。

對準/曝光:曝光是整個微影製程中最關鍵的步驟，這個製程決定的是否能將光罩上的圖形成功的轉印到光阻上面。曝光的原理和照相很類似，不過是利用光罩當遮罩，用紫外光當作光源來曝光光阻，當光源到達光阻時使光阻上之感光物質產生高分子聚合或分解，而達到圖形轉移的目的。曝光的方式以光源和晶片的距離可以分為投影式、接觸式和鄰接式曝光三種。接觸式(contact)和鄰接式(proximity)的曝光方法。這兩種方法是最早發展出來的曝光方式，在接觸式的方法中光罩和晶圓是直接接觸，紫外光從光罩上透明的區域中穿透並曝光底下的光阻，接觸式可以達到非常好的解析度，接近光罩上面的解析度，然而光罩和晶圓有不同的曲率，只有少數幾點能夠真正的接觸，因此接觸式的方法最高解析度大約是在次微米左右。接觸式的方法有一個很嚴重的缺點，那就是光阻上的殘留物會遺留在光罩上面，使光罩的壽命大大的減少。為了解決此種缺點，我們採用另一種鄰接式的曝光方法，將光罩放在距離晶圓大約 10 到 20 微米的地方，因為沒有直接接觸，光罩的壽命增加了許多，但因此大大減低了解析度，鄰接式的曝光方法最高的解析度大約是 2 微米。為了改善曝光的解析度和光罩污染的問題，投影式(projection)的

曝光系統就被發展出來。投影式系統操作就像一座投影機依樣，光罩就像透明的投影片，而投影就以 1:1 的比例重新聚焦在晶圓的表面上。此種技術後來經過改良以後演變成重複且步進(step and repeat)的方式，此種方式使用的光罩會比原來的圖形尺寸還要大，再利用投影的方式將光罩上的圖案依比例縮小到晶圓上面。這種方式主要有兩個優點：第一、因為光罩上的圖案較大，所以轉移縮小的圖案解析度會比傳統的 1 比 1 較好。第二、光罩上微粒的汙染影響會變小，因為這些微粒的影像會經過縮小以後才曝光到光阻上，使轉移圖案的正確性更理想。基於以上的優點先進的半導體製程都採用此種曝光方式，但這種曝光方式也有他的缺點，因為曝光的影像會縮小，所以一片晶圓必須重複好幾次的曝光過程才能完成。

顯影：經過曝光後的光阻接下來就要進行顯影(development)的步驟，將曝光後的晶片浸泡在顯影液裡面，藉由中和反應去除曝光後的光阻。為了避免未被曝光的光阻也被顯影劑中和，顯影的時間、顯影劑的濃度和溫度都必須被精確的掌握。

硬烘烤(hard bake)：在顯影之後晶圓會再經過一個硬烘烤的製程，硬烘烤會去除光阻裡面的殘餘溶劑增加光阻的強度，增強對後續蝕刻或離子佈植的抵抗能力。硬烘烤的時間和溫度同軟烤一樣都要小心的控制，硬烤不足會降低光阻抵抗蝕刻能力，硬烤過度則會造成很差的解析度。

由於模仁製程的關係，在做黃光微影之前會先在晶片上做 KOH 的蝕刻加工，因此在做光阻塗佈時晶片上已有凹槽，凹槽會造成光阻塗佈的不均勻，如圖 2-6，光阻會產生放射狀的塗佈，由顏色的差異可以明顯看出來，在經由實驗發現放射狀的地方是光阻比較薄的部份，若以厚膜光阻來解決塗佈不均勻的問題，發現在塗佈的時候光阻會產生氣泡且厚膜光阻的解析度較差，對於細線寬的曝光較為困難，所以仍然採用 FH6400L 薄膜光阻，因此在後續乾式蝕刻的製程中必須注意到光阻厚度的問題。

2.2.5 蝕刻

蝕刻是一種移除晶圓表面材料以達到使用者設計需求的製程，根據蝕刻的方式又可以分為乾式蝕刻(dry etching)和濕式蝕刻(wet etching)兩種。

(1) 濕式蝕刻

濕式蝕刻製程是利用化學溶液來溶解晶片上需要移除的特定材料，藉此達到電路和元件的要求，它的優點是製程單純且產量速度快。濕式蝕刻化學反應的生成物是氣體、液體或可以溶解於蝕刻劑的固體。而蝕刻速率主要取決於溫度和蝕刻液的濃度。由於增加溫度能加快化學反應，並提高蝕刻劑和蝕刻副產品的擴散速率，因此蝕刻速率會增加，增加蝕刻劑濃度也會提高蝕刻速率。濕式蝕刻通常具有非常好的蝕刻選擇性，而蝕刻速率的均勻性則取決於蝕刻溶劑的溫度和濃度的均勻性。濕式蝕刻製程的蝕刻終點一般是由時間和操作員的目測來決定。然而，當元件尺寸越做越小時，由於化學反應沒有方向性，所以濕式蝕刻是等向性(isotropic)的，會有側向蝕刻的情形，而產生底切現象，導致圖形尺寸失真。若當圖案尺寸小到一定的程度以後，此種蝕刻方法會產生很大的缺陷。因此，目前半導體廠都採用乾式蝕刻來做為一般的蝕刻方法，除非有特殊用途才會採用濕式蝕刻。

(2) 乾式蝕刻

乾式蝕刻可以區分為物理性蝕刻與化學性蝕刻。物理性蝕刻是利用輝光放電將氣體解離成帶正電的離子，再利用偏壓將離子加速，濺擊在被蝕刻物表面使被蝕刻物質的原子擊出。此方式可以擁有非常好的方向性，並可以獲得接近垂直的蝕刻輪廓。但是由於離子是全面均勻地濺擊在晶片上，光阻和欲蝕刻材料兩者同時被蝕刻，因而造成蝕刻選擇率偏低。而被擊出的物質也並非完全是揮發性物質，容易再沉積在晶片表面。化學性的蝕刻或稱電漿(plasma)蝕刻，是利用電漿將蝕刻氣體解離產生帶電離子和易反應的自由基，這些自由基會和薄膜表面原子反應形成具有揮發性的反應物，被真空設備抽離後移除。而反應式離子蝕刻，是一種介於物理和化學蝕刻的一種乾蝕刻技術，除了利用自由基和薄膜

反應外並利用高能量的離子對薄膜表面轟擊，去除再沉積的反應物或聚合物，達成非等向性的蝕刻。

本實驗中利用 KOH 來蝕刻(110)晶片以定義出結構區和接線用的電極區，蝕刻時利用氮化矽當作蝕刻遮罩，以黃光和乾式蝕刻的方式來定義氮化矽層上面的圖形。因為晶格結構和晶格面的關係，KOH 對(110)晶片的蝕刻是屬於非等向性的蝕刻，如圖 2-5，當蝕刻的長條形結構平行於晶片大平邊的時候，蝕刻結果會如圖所示，因單晶矽的(111)面通常為蝕刻速率最緩慢的面，所以會造成此種蝕刻結果。在電極區(線寬 200 μm)的 KOH 蝕刻中 KOH 的側向蝕刻可以忽略不計，但在結構區的蝕刻中因為結構線寬只有 2 μm 且結構與結構之間的距離只有 6 μm ，此時我們發現 KOH 的側向蝕刻就會嚴重影響結構區的精度，因此在做高深寬比的結構時光罩的設計必須考慮到 KOH 的蝕刻問題。如圖，因側向蝕刻的緣故，原本 2 μm 的的線寬增加到約 5 μm 左右。除了 KOH 以外，本實驗還利用 KOH+IPA 蝕刻配方來蝕刻結構區，發現利用 KOH+IPA 蝕刻配方所蝕刻出來的結構會比 KOH 來的光滑且平整，蝕刻速率如圖

2.2.6 摻雜

半導體(semiconductor)簡單的說就是一種導電能力介於導體(conductor)和絕緣體(insulator)的一種材料，不過半導體的導電能力除了和本身材料特性有關以外，還可以加入其他物質的方式來改變半導體的導電性，因此我們稱對半導體加入少量特定雜質的動作稱為摻雜(doping)，而稱所加入的雜質為摻質(dopant)。現今主要的摻雜方式可以分為傳統擴散法(diffusion)和較先進的離子植入法(ion implantation)。

擴散法:早期的半導體產業多利用擴散法的方式來摻雜晶片但現今已被離子植入法所取代只有一些比較特殊的製程才會使用擴散法。擴散是一種物理現象，是因為分子受到熱運動的驅動而使物質由濃度高的地方移向濃度低的地方。一般來說，工業上擴散法的順序是先做預積(predeposition)，然後再做驅入(drive-in)。首先在高溫的晶片上沉積一層摻雜物氧化層，接著以熱氧化製程來消耗掉殘餘的摻雜物氣體，並在晶

圓上成長一層二氧化矽層來覆蓋摻雜物，避免再擴散的時候摻雜物向外擴散。接著在氧氣環境下將高溫爐的溫度升至攝氏 1200 度，以提供足夠的熱能讓摻雜物能快速的擴散到矽基片內。由於擴散是一種等向的過程，對於摻雜物的濃度和分佈沒有辦法做很有效的控制，因此才會漸漸的被離子植入法所取代。

離子植入法:離子植入法是先將摻質離子化，然後藉由加速器的加速，將摻質直接打入矽晶片裡面，晶片裡面的摻雜物濃度可以藉由離子束電流的大小來控制，而摻雜物的分佈可以藉由離子加速所獲得的量來調整。也因此，離子佈植製程提供了比擴散製程更好的摻雜控制。離子佈植的應用除了摻雜以外還可以用來做預先非晶(preamorphous)佈植和深埋層(buried Layer)佈植，這部份比較偏離本論文的主題故不多加討論。關於離子佈植和晶片的加熱性能關係則在 2-3 節來討論。

2.2.7 退火

退火(annealing)是一種加熱過程，在這個過程中將晶圓加熱達到我們所要的物理或化學變化。通常在離子佈植完以後會再做一個熱退火的動作，因為高能量的離子在打入晶片時因碰撞的關係會造成數千個晶格離子偏離位，導致晶格的損傷，因此我們藉由熱退火的步驟來修復損壞的晶格並活化摻雜物，因為當摻雜物原子要在原本單晶矽的晶格位置時，才能有效提供電子或電洞作為傳導電流的主要載體。在 1990 年代之前，高溫爐常用來做為佈植後的退火處理，在退火時通常是在充滿氮氣的情下進行，在攝氏 850 到 1000°C 左右的高溫範圍進行 30 分鐘。但利用高溫爐管退火必須考慮到在退火過程中摻雜物擴散的問題。因為高溫爐管退火必須花上相當長的時間，此時就會引起過多的摻雜物擴散，這在幾何形狀比較小的電晶體元件上是沒有辦法接受的，因此現今先進的半導體工廠多是採用快速加熱退火(RTA)製程來進行佈植後退火處理。RTA 系統通常能在大約 10 秒的時間將晶圓由室溫加熱到 1100°C，並能有效的控制晶圓溫度的均溫性，修補離子佈植所造成的晶格損壞且只造成極少量的摻物雜擴散。

本研究是採用高溫爐管的退火方式，以攝氏 950°C 退火 30 分鐘，因晶片本身已經有利用 KOH 加工出凹槽，所以利用 RTA 快速加熱退火時，過於劇烈變化的溫度導致晶片產生破裂的情形，因此不採用此種退火方式，而使用傳統的爐管退火。

2.3 模仁加熱性能測試

為了要確實掌握模仁的加熱特性和離子佈植條件之間的關係，我們比較不同的佈植能量、佈植劑量、加熱線路寬、加熱線路長和模仁加熱性能之間的關係，各個條件的設定如表 2-5。從室溫開始加熱 100 秒、定電流 0.4 A、施加平均功率約為 11~13W 之間，量測晶片表面的升溫狀況。量測儀器和架設方式如圖 2-7，利用電源供應器提供晶片功率，使用矽膠軟墊覆蓋在晶片上，防止晶片熱量散失在空氣中，再以治具固定熱電偶量測晶片表面的溫度。雖然此量測方式沒有辦法很準確地測得實際熱壓時晶片的表面溫度，但可以比較出不同線寬、線長和佈植劑量的晶片其加熱性能之間的差異。

2.3.1 離子佈植對模仁加熱性能的影響

在討論佈植條件對加熱性的影響時，以線寬 200 μm 線長 60mm、線寬 200 μm 線長 100mm、線寬 400 μm 線長 60mm、線寬 200 μm 線長 100mm，這四組晶片來做實驗，實驗結果如圖 2-8、2-9、2-10、2-11。實驗發現當佈植為比較高的 5E15 cm^{-2} 劑量時，模仁大致上都能夠達到比較高的溫度。觀察加熱線路寬 200 μm 、線長 60mm 這組實驗，同樣佈植能量，佈植劑量高升溫性能較好；同樣佈植劑量，佈植能量高升溫性能好。而觀察在比較高的線長條件下，發現不同的佈植條件對加熱性能的影響的差異性並不明顯。

2.3.2 加熱線路長對模仁加熱性能的影響

固定 200 μm 的線寬，同樣佈植條件下，觀察加熱線路長對晶片加熱性能的影響。由圖 2-12、2-13、2-14、2-15，我們發現在 60keV、3E15

cm^{-2} 的佈植條件下，線長對加熱性的並沒有顯著的影響，然而在高劑量高能量的佈植條件下，尤其以 80keV 、 $5\text{E}15 \text{cm}^{-2}$ 的條件下 60mm 的短線長加熱效果明顯優較長的 80mm 和 100mm 。實驗結果發現，在比較低的佈植劑量時線長對加熱效果沒有顯著的影響，而在比較高的佈植劑量下較短的加熱線路可達到較好的升溫效果。

2.3.3 加熱線路線寬對模仁加熱性能的影響

固定 60mm 的線長，同一個佈植條件下，觀察不同加熱線路線寬對加熱性能的影響，如圖 2-16、2-17、2-18、2-19。實驗結果發現，線寬在低佈植劑量和能量的條件下，加熱的性能並沒有比較明顯的規律可尋，而在 80keV 、 $5\text{E}15 \text{cm}^{-2}$ 的佈植條件下，可以發現越窄的線寬可以達到較好的升溫效果， $200\mu\text{m}$ 的線寬升溫速度明顯優於 $400\mu\text{m}$ 和 $600\mu\text{m}$ 的線寬。

在熱壓成形的冷卻保壓階段中，模仁所產生的熱量部份會被模具和熱壓材料所帶走，因此比在室溫中必須提供更大的功率來維持所要的溫度，尤其模仁面積越大時所散失的熱量越多，因此我們必須選擇有較好發熱性能的模仁。綜合以上幾點，我們取佈植條件為能量 80keV 劑量 $5\text{E}15\text{cm}^{-2}$ ，加熱線路線長 60mm 和線寬為 $200\mu\text{m}$ 的這組條件，其加熱效果最好，做為模仁加熱線路的設計。

表 2-1 製作模仁所用實驗設備

設備名稱、型號	所屬單位
無塵室操作工作台(wet bench)	交通大學 奈米中心
高溫氧化擴散爐管(oxidation and diffusion furnaces system)	
低壓化學氣相沉積系統(low pressure chemical vapor deposition , LPCVD)	
真空烤箱(vacuum bake , YES-5)	
光阻塗佈機(spinmer coater)	
光罩對準曝光機(mask aligner , KARL SUSS MJB-3)	
薄膜測厚儀(surface profile , DEKTAK II A)	
光學顯微鏡(optical microscope , OLYMPUS BH2-MJLT)	
加熱板(hot plate)	
複晶矽活性離子蝕刻系統(polysilicon reactive ion etching , SAMCO RIE-10N)	
場發射掃描式電子顯微鏡(Emission Schottky Scanning Electron Microscope , HITACHI S-4000)	國家奈米 實驗室

表 2-2 標準 RCA 晶圓清洗步驟

清洗步驟	清洗溫度與時間	目的
去離子水 (DI water)	室溫、5min	清洗晶圓
H ₂ SO ₄ +H ₂ O ₂ (3:1)	85°C、10min	分解、氧化有機物
去離子水 (DI water)	室溫、5min	去除殘留化學藥品
HF+H ₂ O(1:100)	室溫、10sec	去除上一步化學反應所生成的 chemical oxide
去離子水 (DI water)	室溫、5min	去除殘留化學藥品
NH ₄ OH+H ₂ O ₂ +H ₂ O(1:4:20)	80°C、10min	去除微小粒子(SC1)
去離子水 (DI water)	室溫、5min	去除殘留化學藥品
HCl+ H ₂ O ₂ +H ₂ O(1:1:6)	80°C、10min	去除鹼金族離子(SC2)
去離子水 (DI water)	室溫、5min	去除殘留化學藥品
HF+H ₂ O(1:100)	室溫、10sec	去除上一步化學反應所生成的 chemical oxide
去離子水 (DI water)	室溫、5min	去除殘留化學藥品

表 2-3 黃光微影製程步驟（使用薄膜正光阻 FH-6400L）

微影製程步驟	時間	溫度	備註
預烤(pre-bake)	30min	150°C	去除晶片上水氣
塗佈 HMDS			增加光阻和晶片的附著性。
光阻塗佈	5min	室溫	10sec 1000rpm 20sec 4000rpm
軟烘烤(soft bake)	90sec	90°C	去除光阻溶劑
曝光(exposure)	45s	室溫	定義光阻圖形
顯影(development)	目測	室溫	使用 FHD5 正光阻顯影劑
定影(rinse)	1min	室溫	以清水清洗顯影劑
光學顯微鏡檢查圖形		室溫	檢查曝光後光阻的圖形
硬烘烤(hard bake)	3min	120°C	增加光阻抵抗蝕刻的能力

表 2-4 可局部加熱模仁的製作流程

流程與步驟	使用設備及方法	目的
晶圓清洗	濕式工作平台	清潔晶圓
氧化層成長	高溫爐管	利用乾氧化法成長二氧化矽，成長的二氧化矽做為氮化矽的襯墊層
氮化矽層沉積	LPCVD 爐管	以氮化矽層作為蝕刻遮罩
黃光微影(第一道光罩)	光罩對準曝光機 光阻塗佈機、真空 烤箱、加熱板	利用第一道光罩定義出模仁電極區圖形
乾式蝕刻	複晶矽活性離子蝕刻系統	將光阻上圖案轉印到氮化矽和二氧化矽上
去光阻	濕式工作平台	以丙酮溶液去除
濕式蝕刻	濕式工作平台	以氮化矽為遮罩，並利用 KOH 溶液在 Si 晶片上蝕刻出電極區
黃光微影(第二道光罩)	光罩對準曝光機 光阻塗佈機、真空 烤箱、加熱板	利用第二道光罩定義出模仁結構區圖形
乾式蝕刻	複晶矽活性離子蝕刻系統	將光阻上圖案轉印到氮化矽和二氧化矽上
去光阻	濕式工作平台	以丙酮溶液去除
濕式蝕刻	濕式工作平台	以氮化矽為遮罩，並利用 KOH 溶液在 Si 晶片上蝕刻出電極區

黃光微影(第三道光罩)	光罩對準曝光機 光阻塗佈機、真空 烤箱、加熱板	利用第三道光罩定義出模仁 加熱線路區圖形
乾式蝕刻	複晶矽活性離子蝕刻 系統	將光阻上圖案轉印到氮化矽 和二氧化矽上
去光阻	濕式工作平台	以丙酮溶液去除
離子佈植	中電流離子佈植機	在加熱線路區佈植磷，改變 線路區的電阻做為模仁的加 熱器。
退火	高溫爐管	活化摻雜物並修復被離子佈 植所損壞的晶格。
氧化層和氮化 矽層去除	複晶矽活性離子蝕刻 系統	去除晶圓上的氮化矽和二氧 化矽，完成晶圓的製作
晶圓切割		將製作好的晶圓切割成所要 的尺寸

表 2-5 測試晶片加熱性能的各项加熱線路條件

佈植能量(KeV)及劑量(cm^{-2})	60-3E15，60-5E15， 80-3E15，80-5E15		
加熱線路線長(mm)	60	80	100
加熱線路線寬(μm)	200	300	400

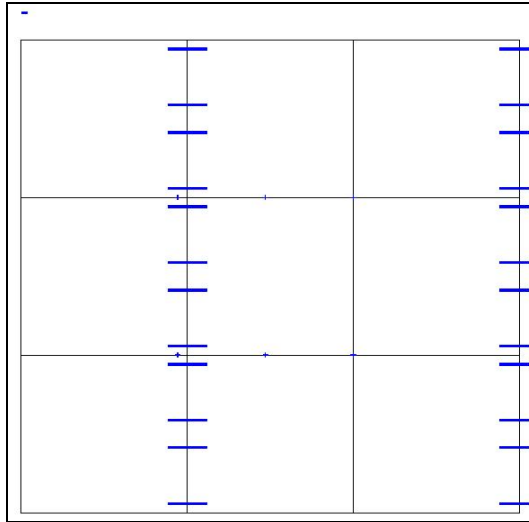


圖 2-1 第一道光罩-電極區

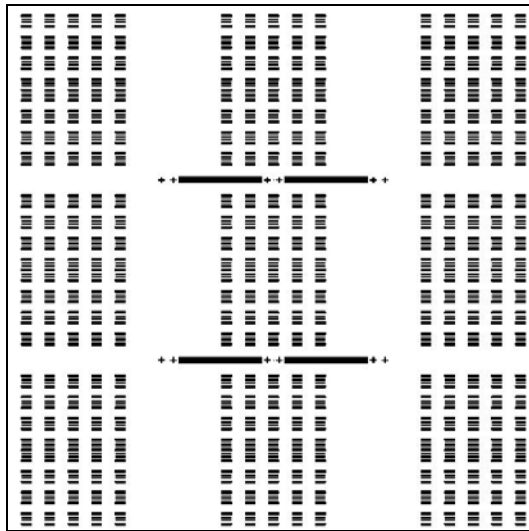


圖 2-2 第二道光罩-結構區

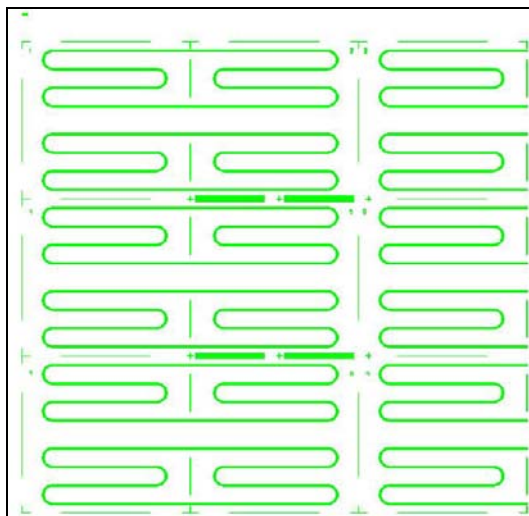


圖 2-3 第三道光罩-加熱線路區

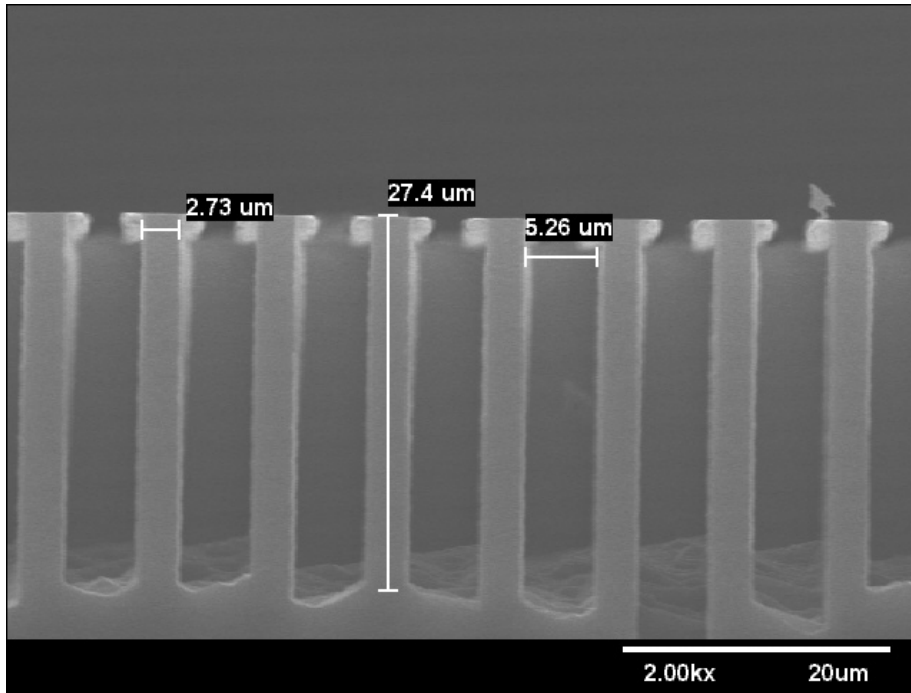


圖 2-4 KOH 側向蝕刻問題

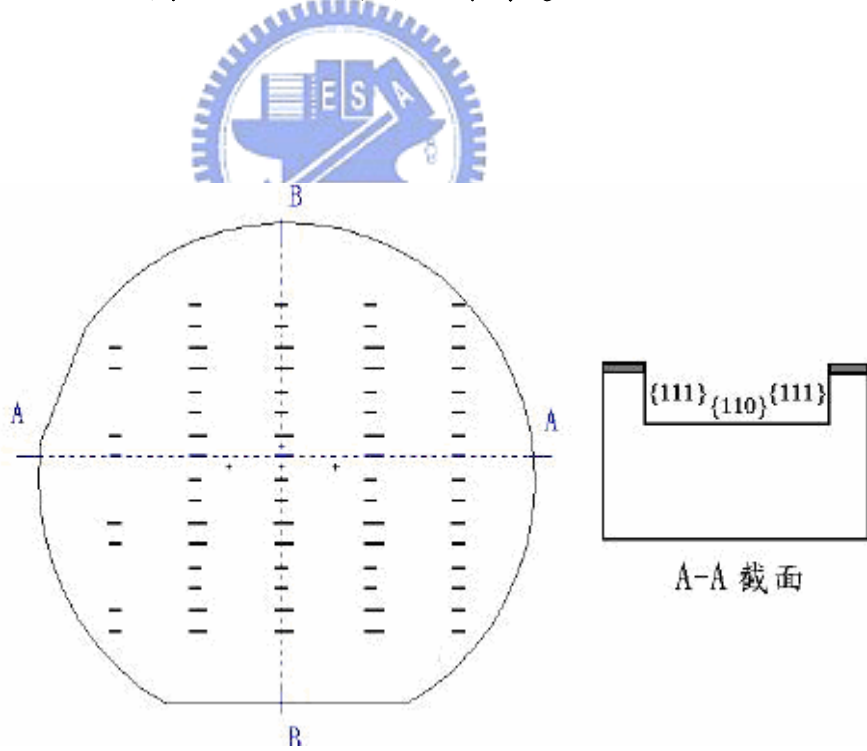


圖 2-5 (110)晶圓 在 A-A 截面蝕刻示意圖[2]

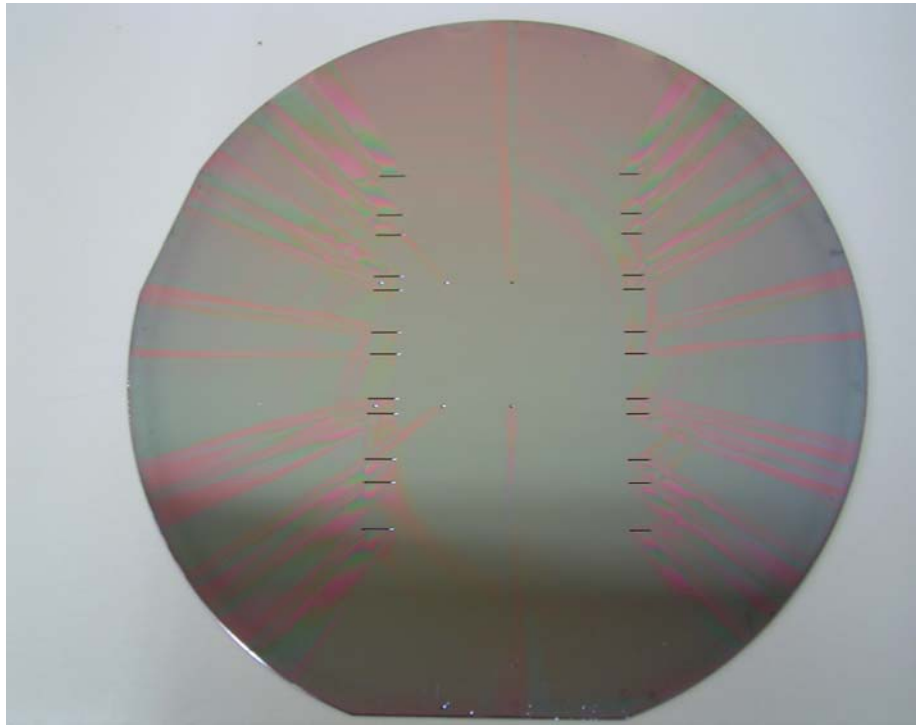


圖 2-6 光阻塗佈不均勻-呈現放射狀顏色



圖 2-7 模仁溫度量測裝置

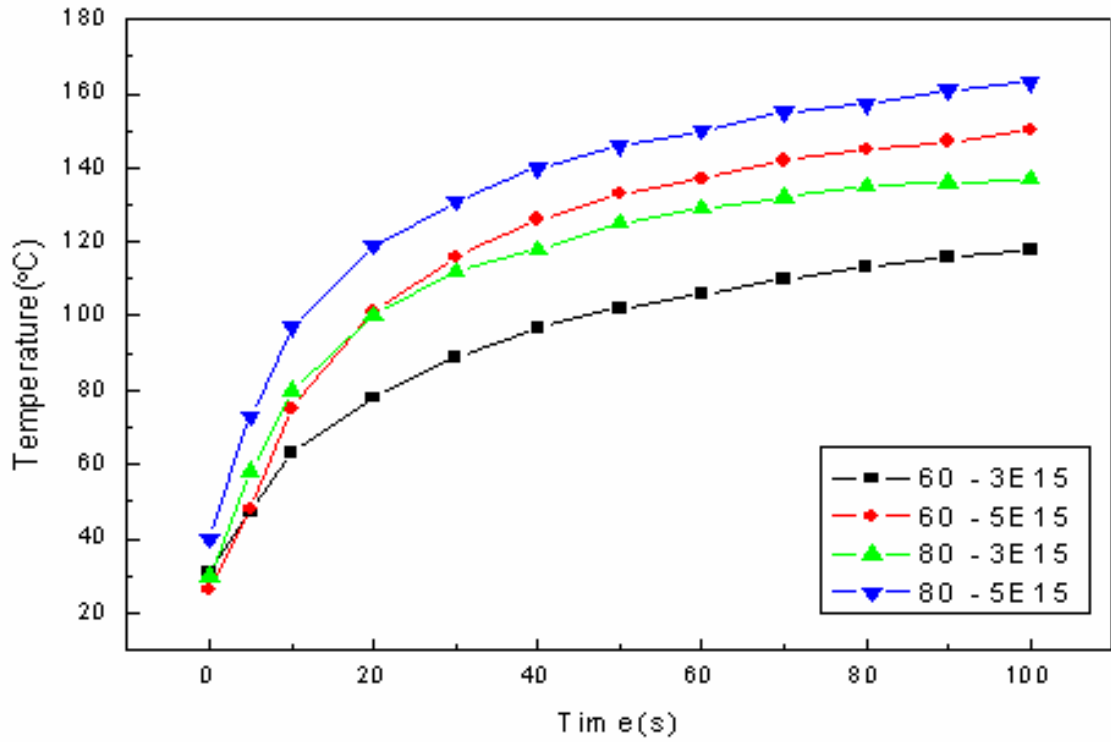


圖 2-8 不同佈植條件所得摻雜晶片的通電溫度上升特性
(線寬 200µm、線長 60mm)

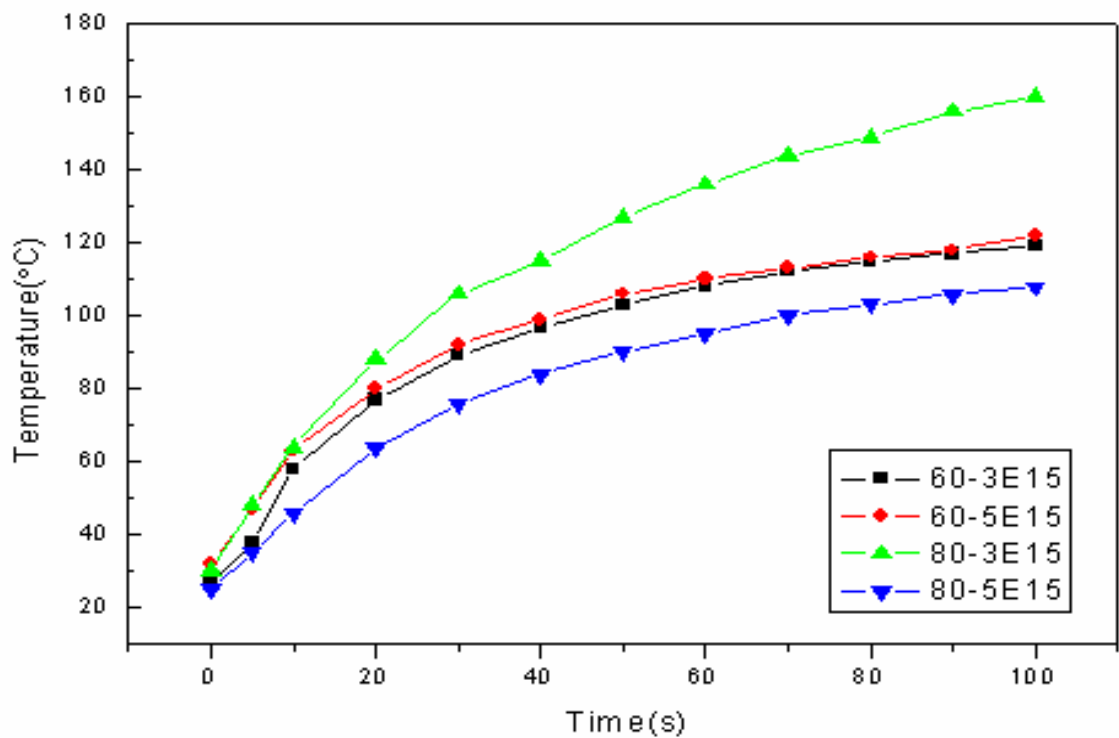


圖 2-9 不同佈植條件所得摻雜晶片的通電溫度上升特性
(線寬 400µm、線長 60mm)

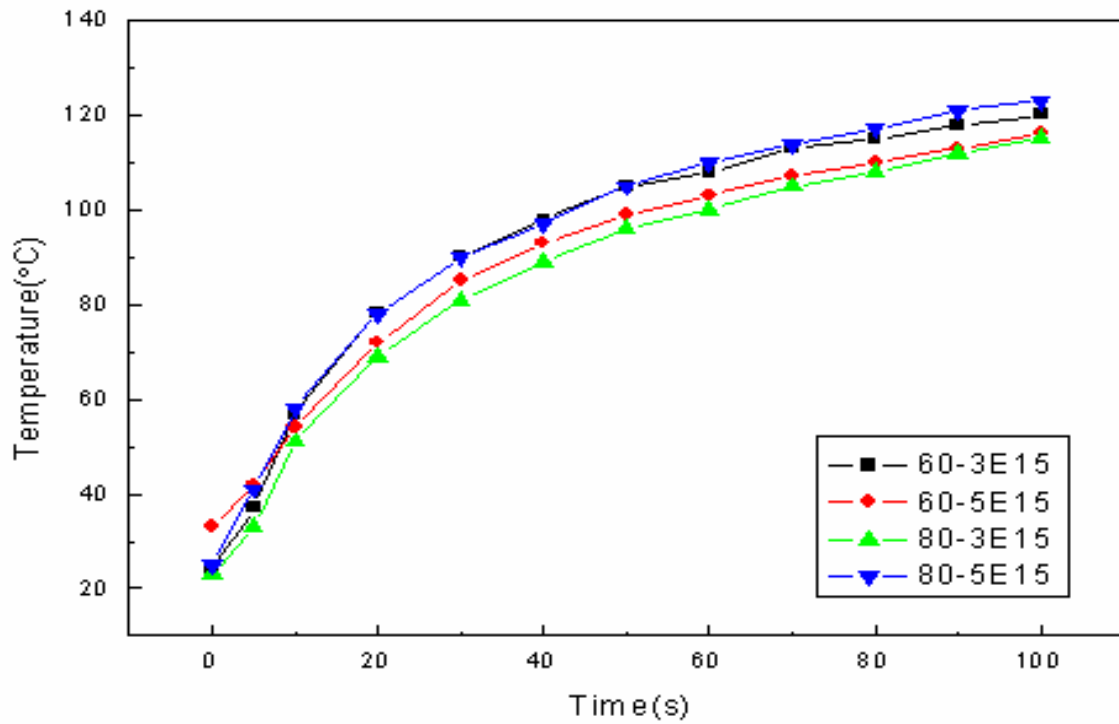


圖 2-10 不同佈植條件所得摻雜晶片的通電溫度上升特性
(線寬 200μm、線長 100mm)

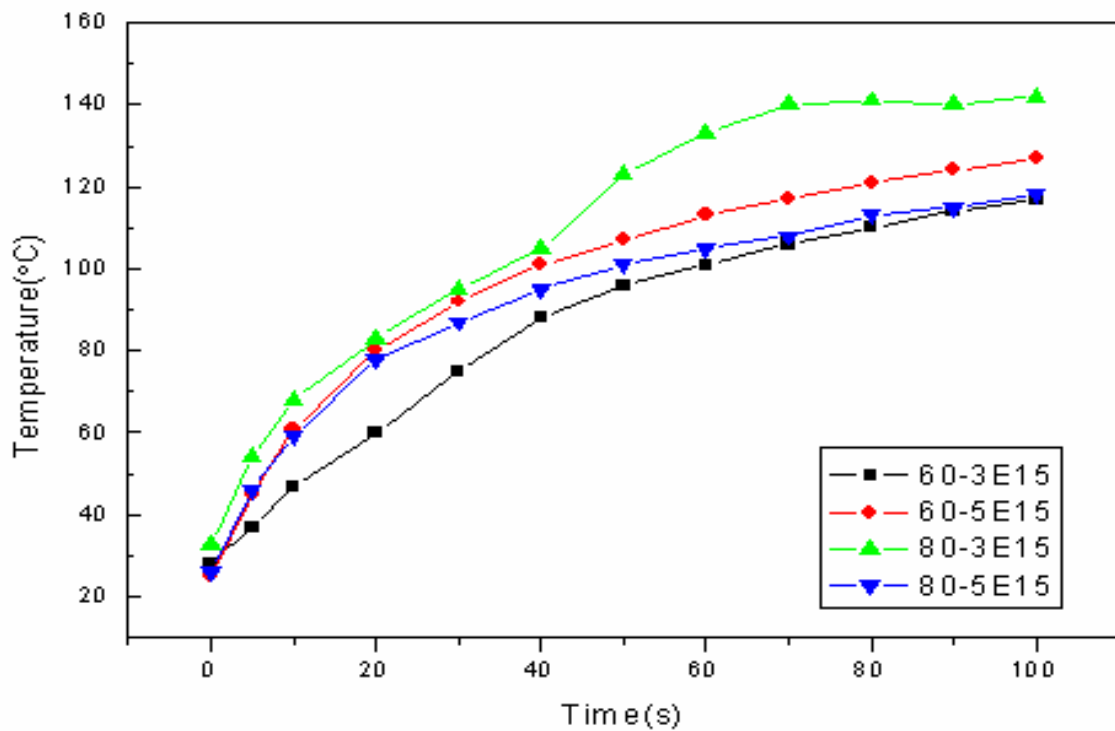


圖 2-11 不同佈植條件所得摻雜晶片的通電溫度上升特性
(線寬 400μm、線長 100mm)

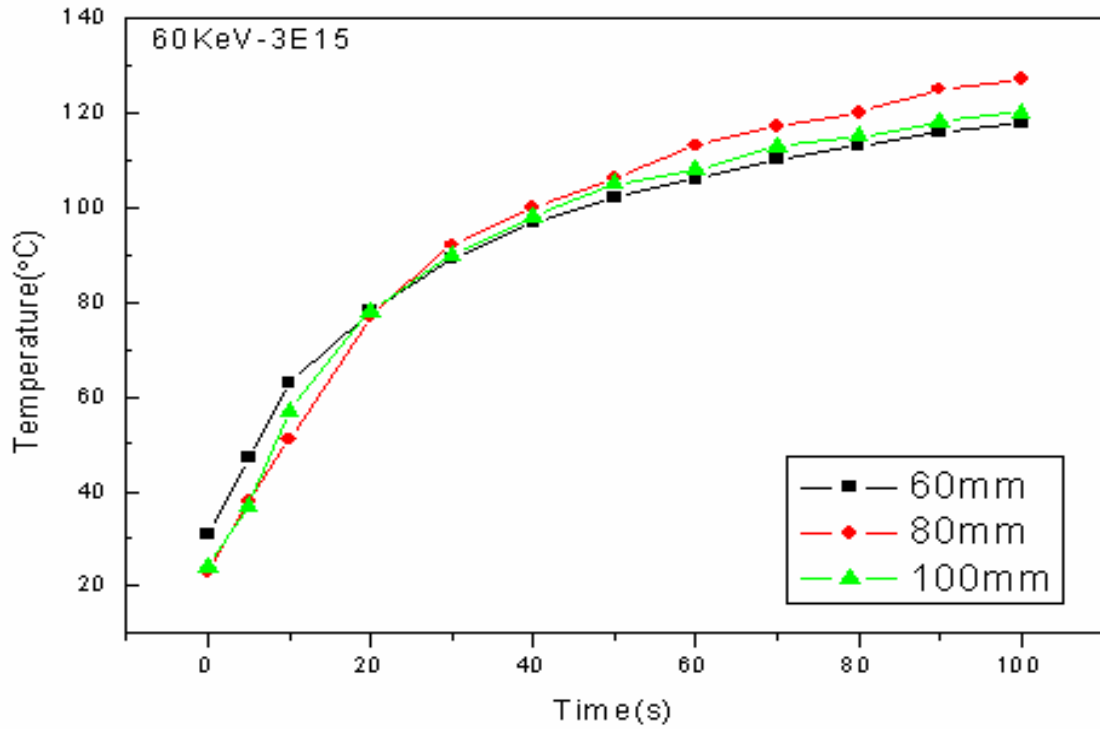


圖 2-12 摻雜所得不同矽基導線的線長條件下，模仁的通電升溫特性線長對加熱性能影響 (60keV、3E15cm⁻²)

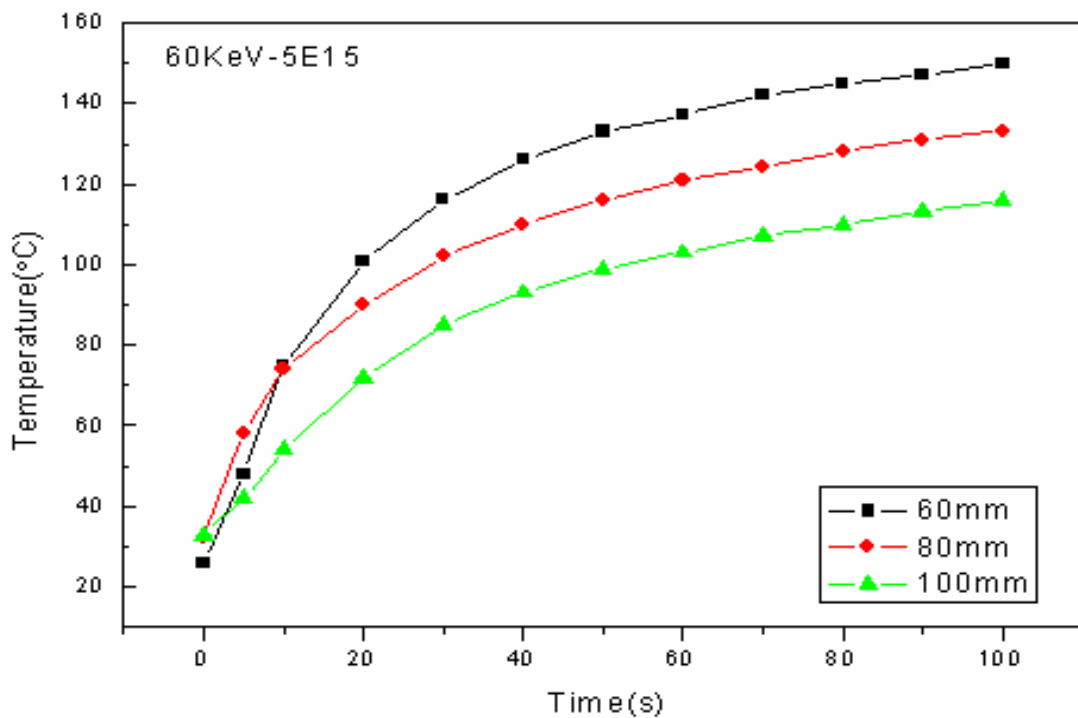


圖 2-13 摻雜所得不同矽基導線的線長條件下，模仁的通電升溫特性線長對加熱性能影響 (60keV、5E15cm⁻²)

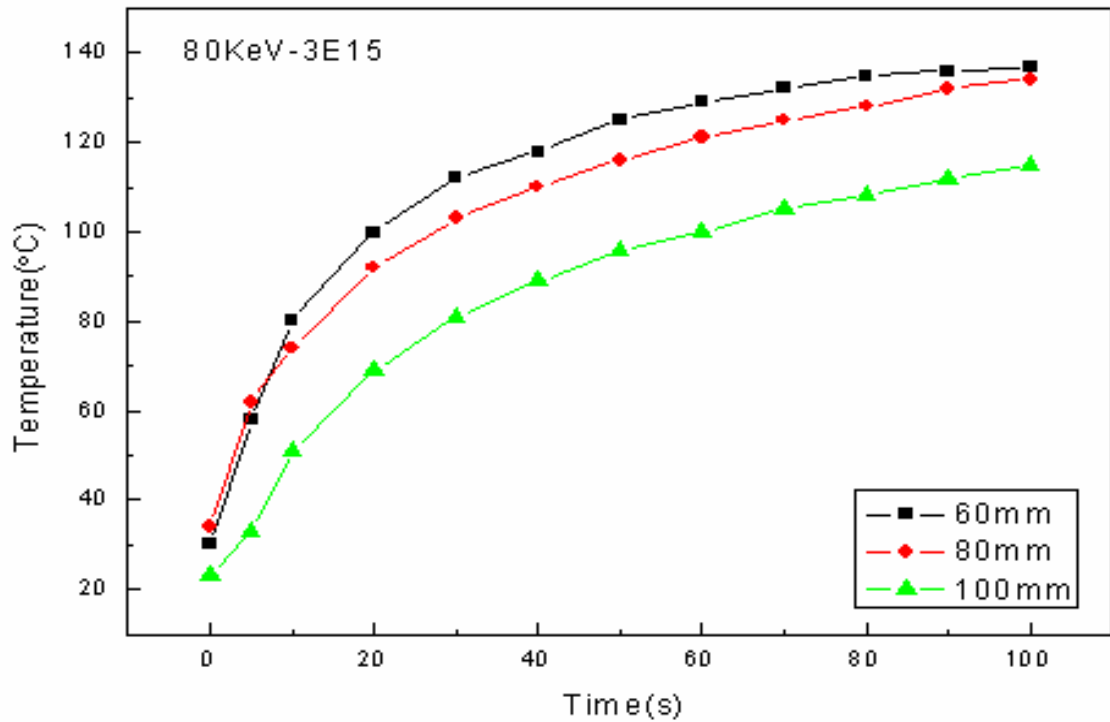


圖 2-14 摻雜所得不同矽基導線的線長條件下，模仁的通電升溫特性線長對加熱性能影響 (80keV、 $3E15cm^{-2}$)

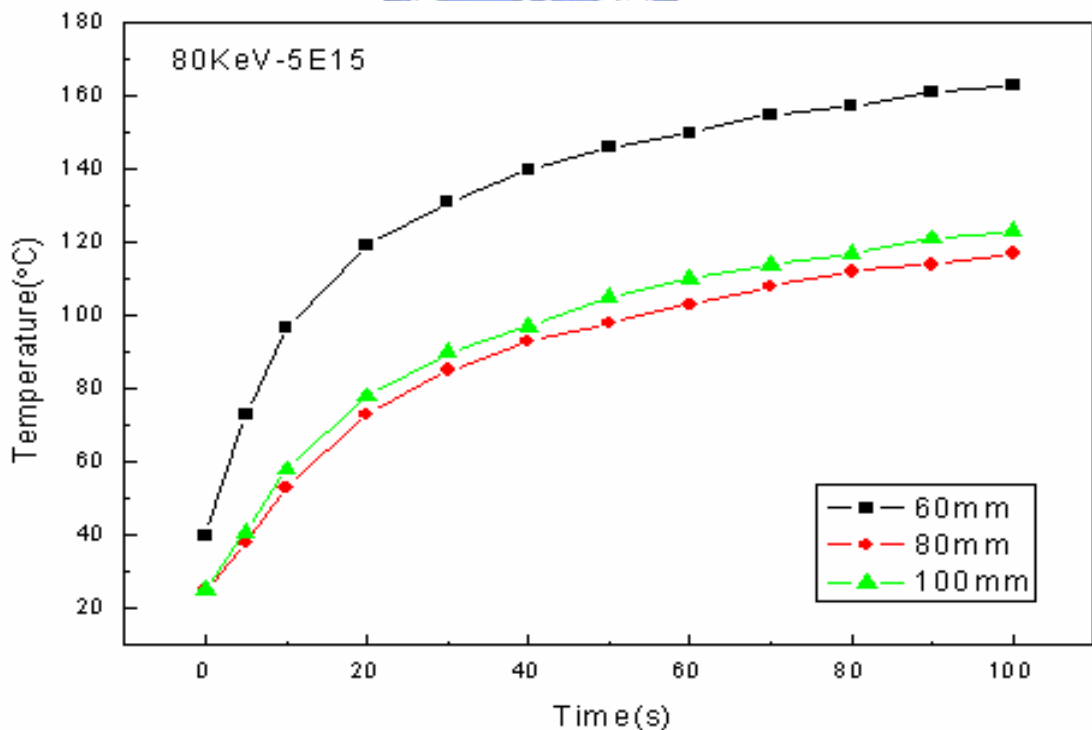


圖 2-15 摻雜所得不同矽基導線的線長條件下，模仁的通電升溫特性線長對加熱性能影響 (80keV、 $5E15cm^{-2}$)

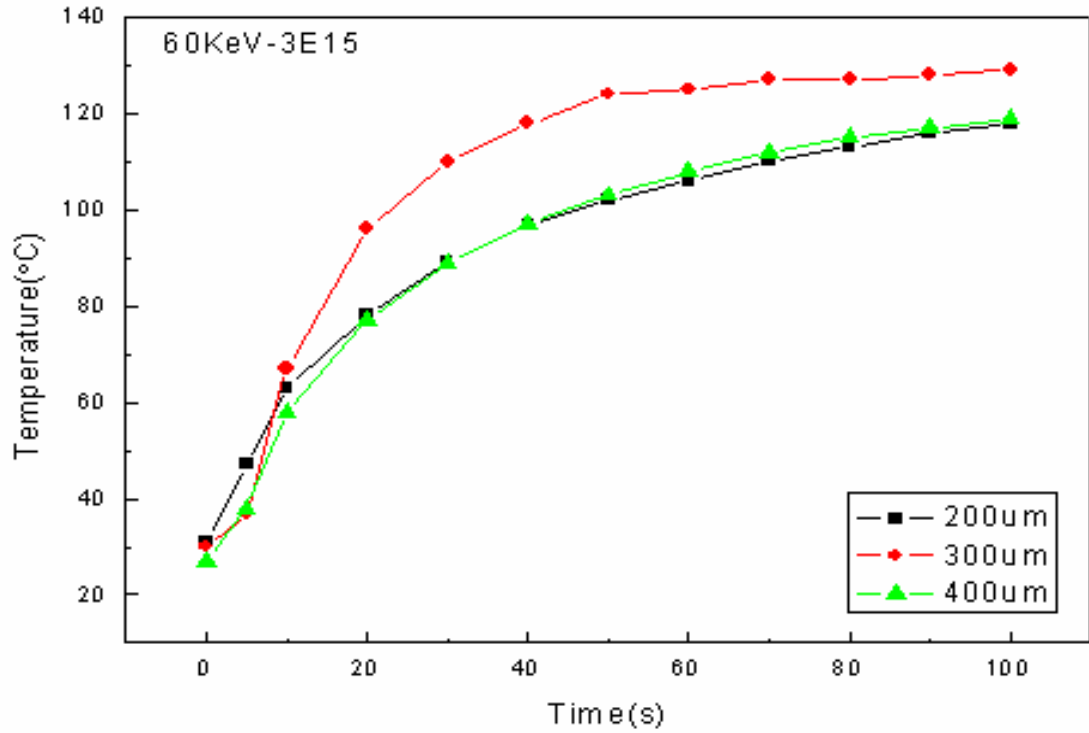


圖 2-16 不同的矽基導線線寬下，模仁的加熱升溫特性
(60keV、3E15cm⁻²)

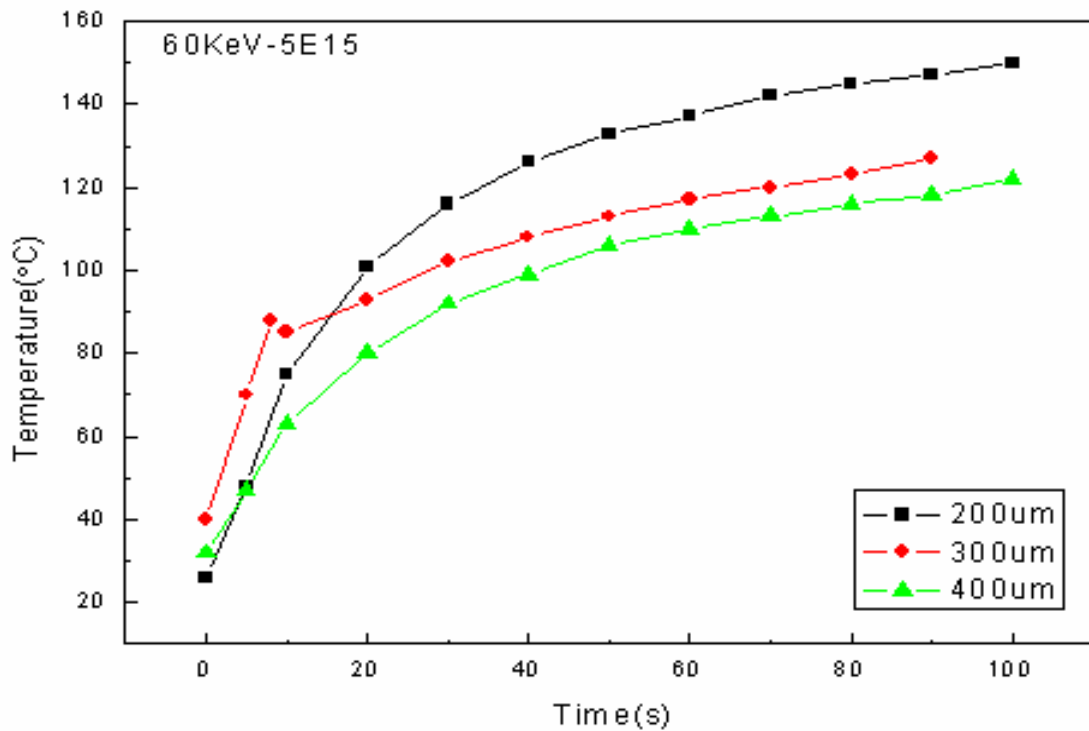


圖 2-17 不同的矽基導線線寬下，模仁的加熱升溫特性
(60keV、5E15cm⁻²)

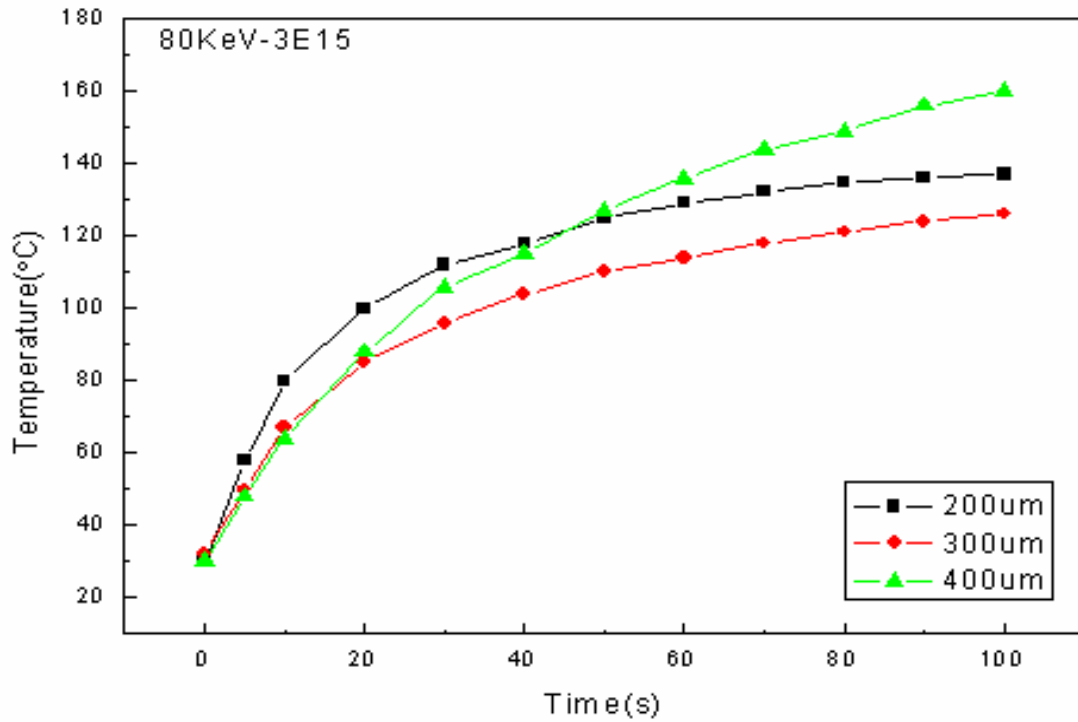


圖 2-18 不同的矽基導線線寬下，模仁的加熱升溫特性
(80keV、 $3E15cm^{-2}$)

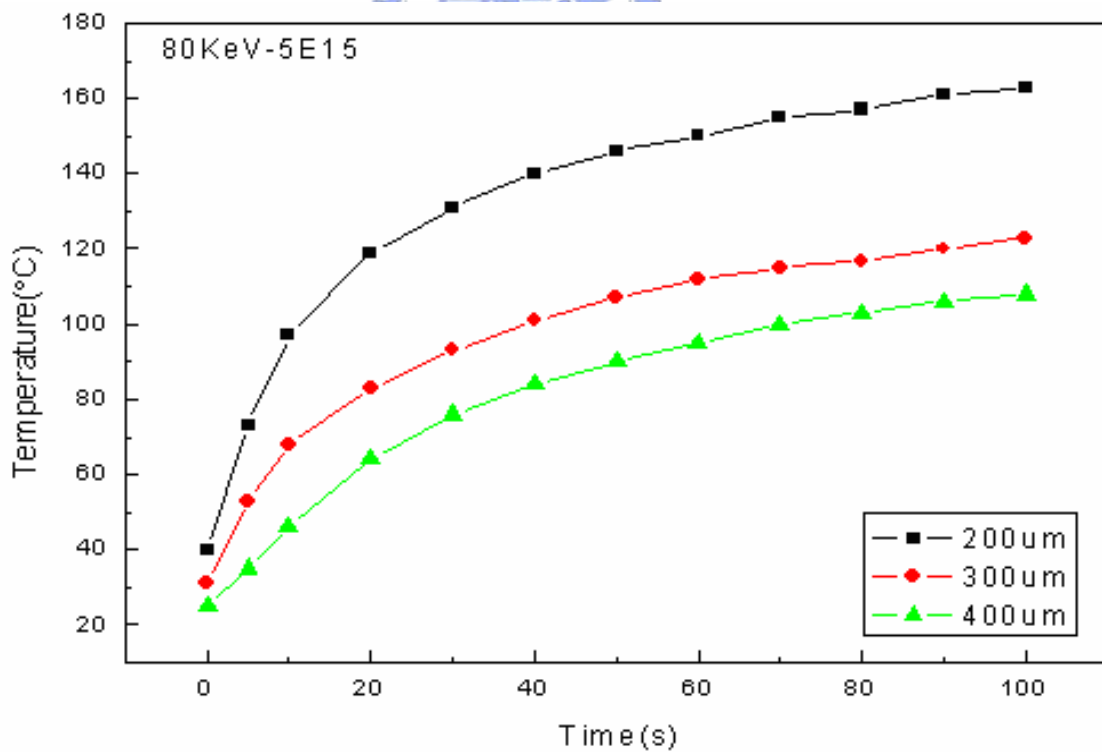


圖 2-19 不同的矽基導線線寬下，模仁的加熱升溫特性
(80keV、 $5E15cm^{-2}$)

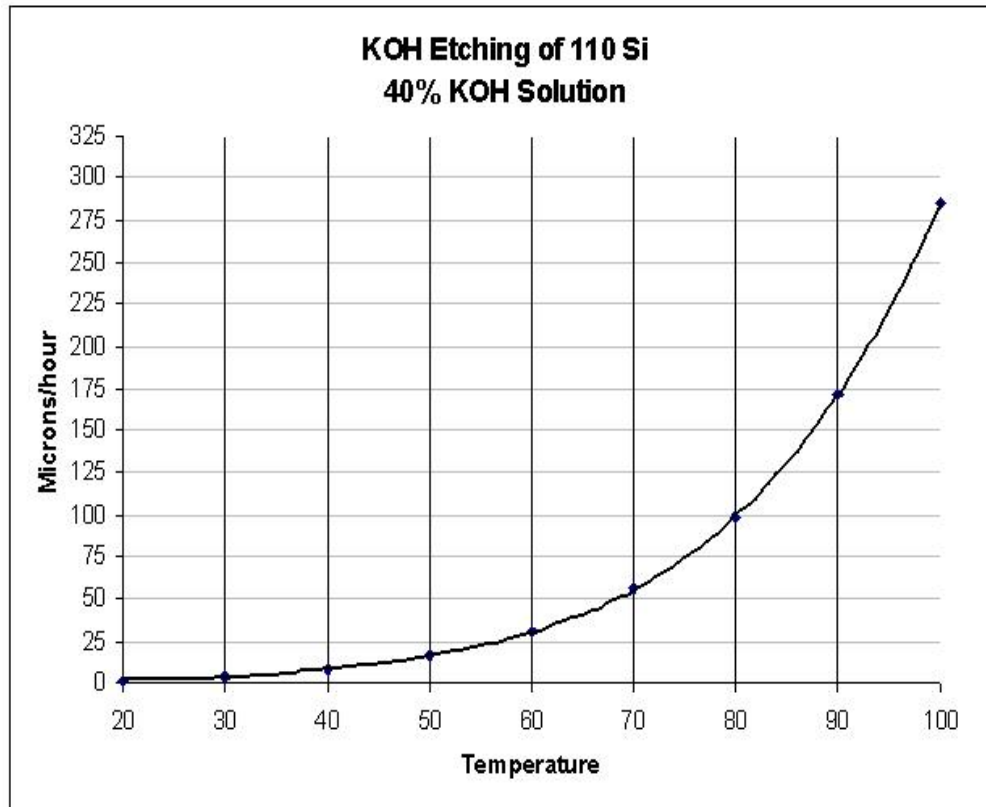


圖 2-20 40wt%KOH 水溶液對矽 (110) 蝕刻速率[32]

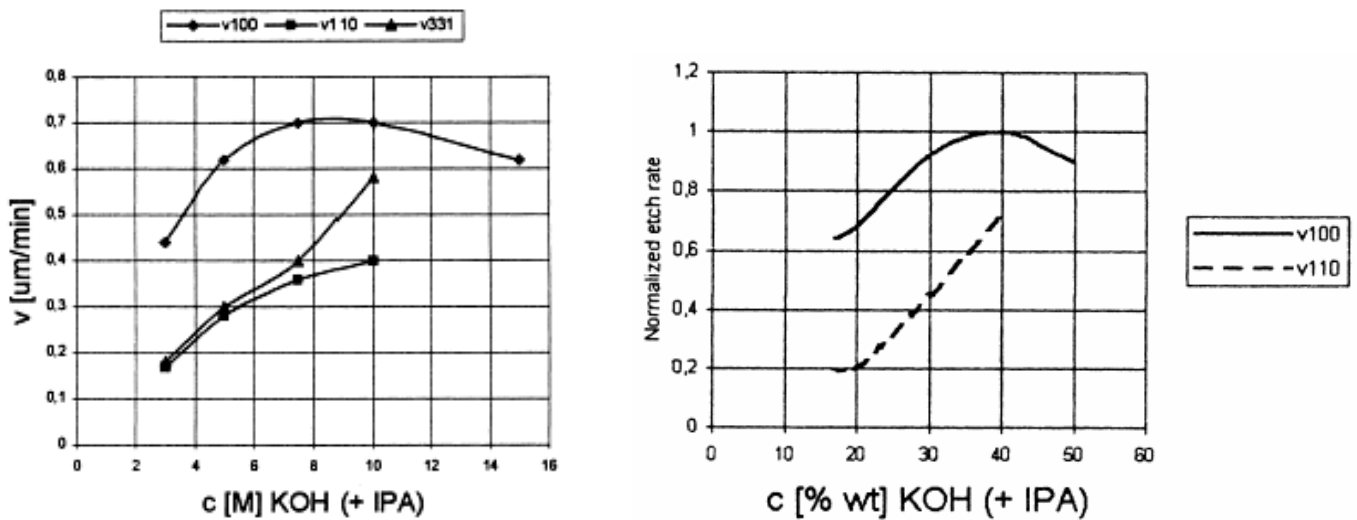


圖 2-21 KOH+IPA 飽和溶液對矽蝕刻速率[24]

第三章熱壓成形實驗

3.1 實驗設備與裝置

3.1.1 熱壓機

熱壓機為實驗室林威宇學長自行開發組裝完成，為一可程式化並擴充設備之成形機。熱壓機的力量輸出可以高達 5 噸，並可以做力量控制和速度控制，同時亦具有加熱控制和水冷裝置。熱壓機的控制系統則由圖控式軟體 Labview 所架構，藉由程式的撰寫並配合數據擷取系統送出、擷取訊號，進行監控、計算及判斷等程序。在熱壓實驗中所需要擷取並監控的參數為熱壓力量、溫度及壓板的位置控制。熱壓機的配置和實體圖如圖 3-1、3-2。

熱壓機在硬體方面可以分為以下幾項：

- A. 熱壓機本體結構。
- B. 電腦:利用 Labview 軟體配合訊號處理模組，做溫度和壓力控制。
- C. 訊號處理模組:處理擷取到溫度和壓力訊號轉成電腦可以讀取的數值。
- D. 動態應變放大器:專為應變類之感測器而設計，可以做類比訊號的濾波與放大。
- E. 控制電路盤:配合達林頓電路做溫度控制。
- F. 馬達驅動器:驅動伺服馬達並做轉速和扭矩控制。
- G. 伺服馬達:帶動熱壓板上下移動，配合程式可作力量控制。
- H. 加熱器:裝設熱壓機模具內部，用來加熱熱壓材料用
- I. 模溫機:控制熱壓機冷卻水路循環並配合熱電偶做溫度控制。

在軟體方面，熱壓機的控制程式由圖控式軟體 Labview 所撰寫，主要為軟體操作面板和溫度、壓力控制程式。藉由數據擷取系統送出和擷取類比訊號，壓力可以依照時間做多階段的變化，溫度的控制則藉由溫度感測器回傳的數值配合加熱器的開關來達到控制。

3.1.2 可局部加熱的模仁

本實驗以 4 吋晶圓加工製作可加熱模仁，一片 4 吋晶圓可以製作 9 塊面積為 17mm X 17mm 之模仁，如圖 3-3，製作完成的模仁再利用銀膠將導線與模仁相接，以電源供應器提供電壓和電流於模仁的加熱線路上。

3.1.3 直流電源供應器

如圖 3-4，採用擎宏電子型號為 CD-350-002AS 的直流電源供應器，最大電壓可達 350V；最大電流可達 2A，並有定電壓和定電流兩種模式可以選擇，利用此電源供應器提供模仁電流電壓。

3.1.4 熱壓材料

高分子材料其分子排列方式有結晶(crystalline)與不定形(amorphous)兩個狀態。結晶性高分子其排列極為規則，而不定型高分子其排列則呈隨機狀(random)。對不定形分子而言，其存在一溫度為玻璃轉移溫度，當不定形高分子的溫度低於此溫度時，會呈現出如玻璃堅硬而脆的特性。結晶性高分子也會有 T_g 的存在，只是相當不明顯，此乃因為其結晶結構的關係，且其流動性極差，會在某溫度稱為熔融溫度(melt temperature, T_m)時熔融。一般而言，高分子材料的結晶性越高，其強度隨著增加而透明度隨著降低，因此結晶性高分子大多不透明。結晶性高分子與不定形高分子的特性可以歸納為以下三點[33]:

1. 不定形高分子一般只有 T_g 而無 T_m ，也就是當溫度達 T_g 時，不定形高分子即會融化。
2. 結晶性高分子同時具有 T_g 與 T_m ，室溫的溫度一般高於 T_g ，因此結晶性高分子在室溫下均具有可撓性。
3. 大部分的高分子具有 15~80% 的結晶性。

本實驗採用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)作為熱壓用的材料，俗稱壓克力，PMMA 是一種非晶性的高分子材料，材料透明度良好且 T_g 點明顯。PMMA 的一些基本材料特性如表 3-1。

3.1.4 場發射掃描式電子顯微鏡

如圖 3-5，場發射掃描式電子顯微鏡(emission schottky scanning electron microscope, FESEM)，掃描式二次電子顯微鏡的原理主要是利用一入射電子束打在觀測試片的表面上，在試片表面上激發出背向散射電子、歐傑(auger)電子和二次電子，儀器再接收二次電子的資訊，掃描出試片表面的影像，藉此來觀察試片表面的型態。

3.1.5 CCD 顯微鏡

如圖 3-6，利用 CCD 顯微鏡與螺旋測微儀的搭配來量測模仁或成形微結構上各個點的距離，藉此量測收縮率的變化。

3.2 實驗流程與實驗設置

3.2.2 熱壓方式及流程

首先利用可局部加熱的模仁為成形模具，並以 PMMA 為熱壓材料，熱壓的流程與實驗各個參數的的設定如圖 3-8、3-9 所示。

- 1.備料: 首先將模仁固定於熱壓機台上面，並準備一片 PMMA，做為接下來步驟的熱壓材料。
- 2.預壓: 將熱壓材料放置於模仁上並利用熱壓機上下壓板施加一個輕微壓力，以固定熱壓材料和模仁，防止材料因加熱變形而偏離原先的位置，影響到材料加熱的均勻性。
- 3 加熱: 當預壓階段完成以後開使對熱壓材料進行加熱的動作，加熱的溫度必須超過材料的玻璃轉移溫度，當達到預定的熱壓溫度以後就開此進行下一階段的熱壓動作。
- 4.熱壓: 當達到熱壓的溫度時，會施加一個固定的熱壓壓力進行熱壓的動作，此一階段的熱壓溫度和壓力是影響成形賦形性好壞的因素。
- 5.冷卻保壓: 在冷卻保壓的階段，材料開始降溫，而壓力則視實驗需要，可維持和熱壓階段一樣的壓力或者施加另一個固定的壓

力，冷卻保壓的目的主要為減少材料在冷卻時的收縮。

6.開模: 當達到預定的開模溫度時，即可開模取出成形品。

3.2.3 成形微結構量測

在聚合物材料的熱壓實驗中，材料從模仁上的轉印效果和完整脫模判定，我們可以從幾何外形和結構尺寸來評估。幾何外形主要是用來判斷材料的賦形性與有無脫模破壞；結構尺寸主要是指微結構的尺寸、相對位置跟模仁之間的差異。因此實驗使用掃描式電子顯微鏡做為觀察微結構幾何外形，利用 CCD 顯微鏡搭配螺旋測微儀量測成形結構間的距離。

3.3 實驗方法與實驗參數

實驗的目的是找尋各個熱壓製程參數對材料成形的影響以解決熱壓成形所產生的脫模破壞等問題。首先以一組中心的實驗參數，變換某一製程參數，藉由此種方法我們可以觀察此一製程參數對實驗結果的影響。Tadmor 等人首先提出以成形操作窗來判定可成形區域的觀念[34]，先找出兩個重要的成形操作參數，變動此兩個參數作實驗，繪出可成形的區域。在本實驗中我們觀察各個實驗參數對脫模難易度的影響來製作成形操作窗。如圖 3-7，以模仁加熱時間和模仁加熱功率為例，當加熱時間過短或加熱功率不足以有效的消除模仁和材料間的熱應力，在脫模時就會產生成形結構斷裂或者是結構傾倒等問題，而當加熱時間過長或者功率過大時會產生成形結構熔融，嚴重時甚至導致材料發生熱裂解 (degradation)。因此，如何有效的掌握良好脫模的實驗參數就是本研究的重點。

3.3.1 熱壓溫度

熱壓溫度是影響高分子材料能不能順利成形的關鍵，通常在做熱壓製程時，熱壓的溫度必須高於材料的玻璃轉移溫度使材料熔融軟化，材料才有辦法順利成形，而 PMMA 的玻璃轉移溫度在 106°C 左右，雖然在越高的熱壓溫度之下材料會有較佳的流動性，但為了保護模仁上的導

線，避免過高的溫度對線路造成傷害，因此本實驗選擇 140°C 的熱壓溫度。

3.3.2 預壓壓力、熱壓壓力與保壓壓力

熱壓成形的製程中，根據不同階段的溫度變化，壓力主要可以分為三個部份。預壓、熱壓和保壓壓力。

預壓：預壓是使熱壓機上下壓板能夠貼緊熱壓材料與模仁，使熱壓材料能夠均勻的加熱，並防止材料在加熱的過程中變形，設定預壓的力量為 980N。

熱壓壓力：熱壓壓力的設定則和成形結構的線寬和深寬比有很大的關係，適當的熱壓壓力可以使微結構的成形高度有效的增加，太低的熱壓壓力則不足以完全填充結構，如圖 3-10 所示以線寬 4 μ m、深度 13 μ m、深寬比為 3 的模仁為例，以 2MPa 的熱壓壓力 30 秒的熱壓時間設定，實驗發現 PMMA 只能充填到 10~11 μ m 左右的高度，如圖 3-11、3-12，而 3MPa 則能完整的充填模仁，當熱壓壓力上升到 5MPa 時則能完整的充填深寬比 5 以下模仁，如圖 3-13、3-14。雖然較高的熱壓壓力能夠有效的充填模仁，然而當熱壓壓力到達 10MPa 以後則會導致矽模仁不穩定，容易在連接導線的凹槽部份產生破裂，因此適當的熱壓壓力選擇對於熱壓製程是一項重要的參數。

保壓壓力：當熱壓結束材料開始冷卻時，則進入保壓的階段。保壓的目的是為了降低材料在冷卻時的收縮，越大的保壓壓力越能夠有效的抑制材料收縮，但過大的保壓壓力容易造成矽模仁的破裂，也不符合經濟效益。為了簡化實驗參數，避免過多的實驗因素影響脫模的結果，本研究的保壓壓力設定採取和熱壓壓力一樣的設定值，而保壓壓力的時間則是持續到開模為止，時間的長短則依開模的溫度來決定。

3.3.3 模仁加熱功率與時間

如圖 3-15，當熱壓過程結束後材料開始降溫，因矽模仁與 PMMA 熱壓材料之熱膨脹係數的差異以及高分子材料冷卻收縮的特性，在冷卻保壓的階段，材料對模仁產生收縮挾持的應力。如圖 3-9，模仁施加功率的時間點在 PMMA 降溫到 106°C 玻璃轉移溫度時開始，施加功率大小和時間長短的實驗參數如表 3-2。當 PMMA 降溫到玻璃轉移溫度時，其分子鏈的運動大部分被凍結，材料開始呈現出堅硬且脆的玻璃態特性，此時材料對模仁的收縮應力開始大幅的上升，因此我們在這個時間點施加功率於模仁上，加熱材料表面以軟化結構根部，藉以減低熱收縮應力。



表 3-1 PMMA 的材料特性

比重	1.17~1.20
抗拉強度	490~770 Kg/cm ²
彎曲強度	910~1200 Kg/cm ²
衝擊強度	1.3~2.1 kg • cm/cm ²
玻璃轉移溫度	106°C
光線透過率	90~99%
吸水率	0.3~0.4%
成形收縮率	0.3~0.4%

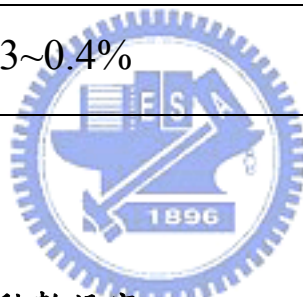


表 3-2 模仁施加功率與秒數設定

模仁施加功率 (W)	15	20	25	30	35	40
施加功率秒數 (S)	20	25	30	35	40	45

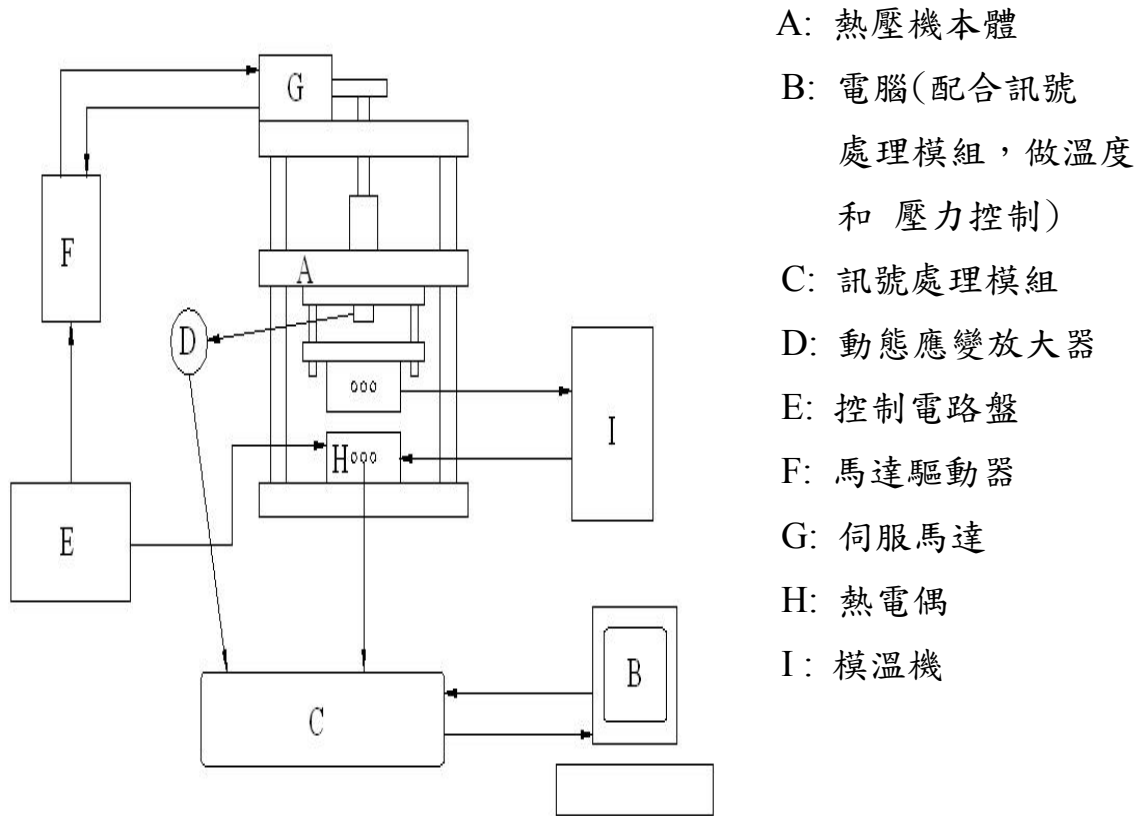


圖 3-1 熱壓機硬體配置圖



圖 3-2 熱壓機本體



圖 3-3 可局部加熱的模仁



圖 3-4 直流電源供應器



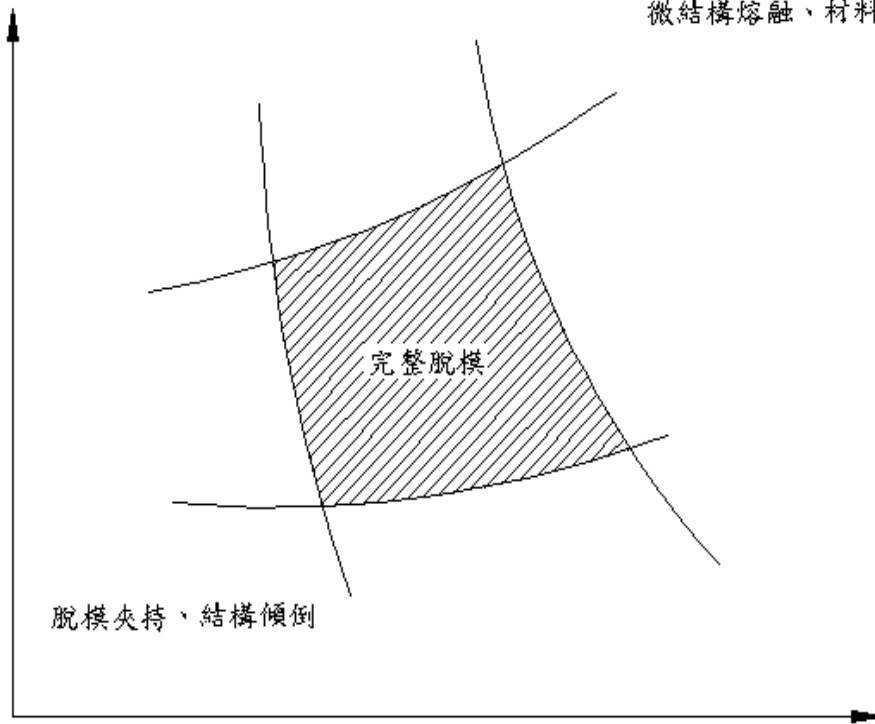
圖 3-5 場發射掃描式電子顯微鏡



圖 3-6 CCD 顯微鏡與螺旋測微儀

模仁加熱時間

微結構熔融、材料熱裂解



模仁加熱功率

圖 3-7 成形操作窗

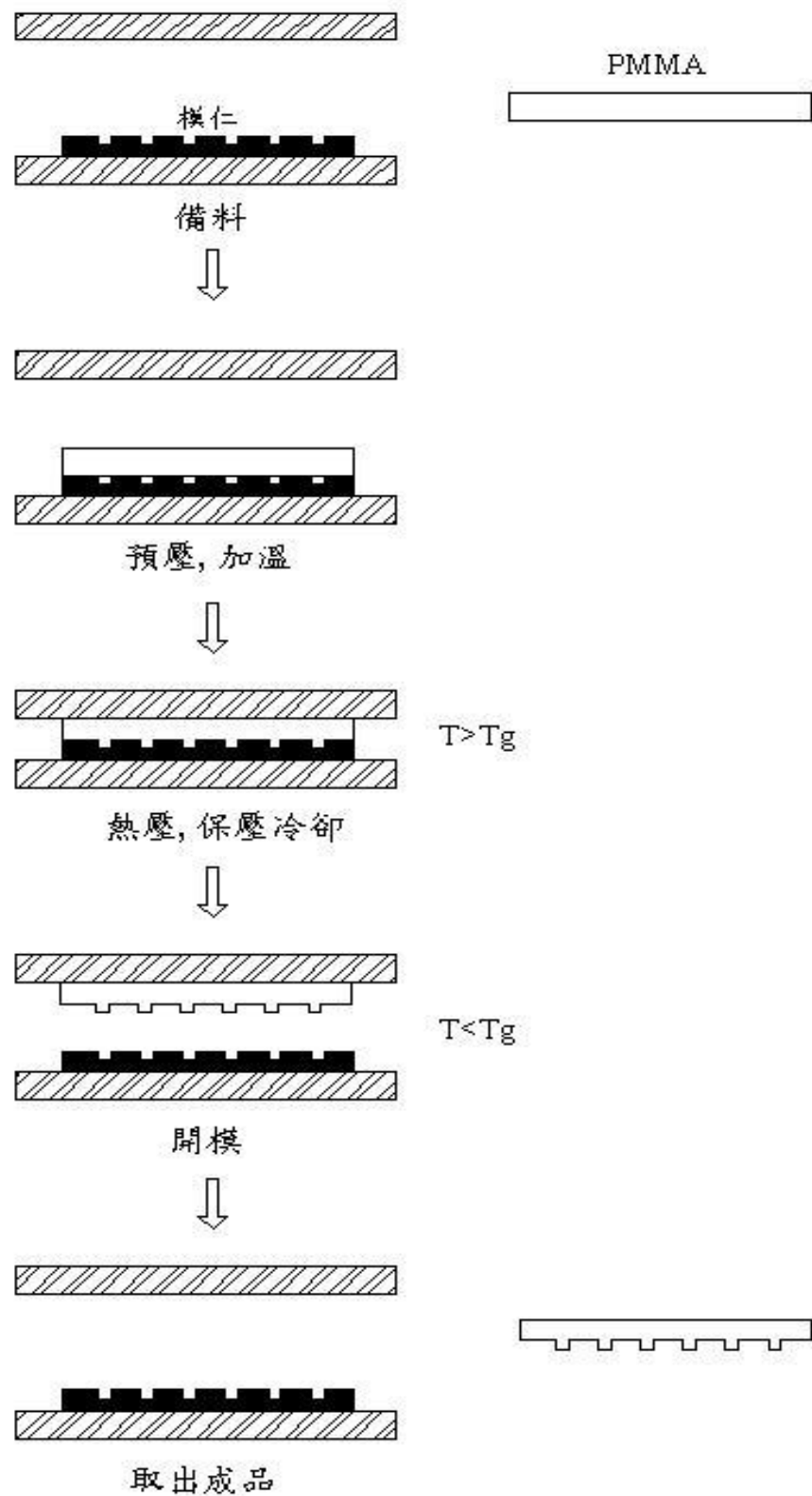


圖 3-8 熱壓流程

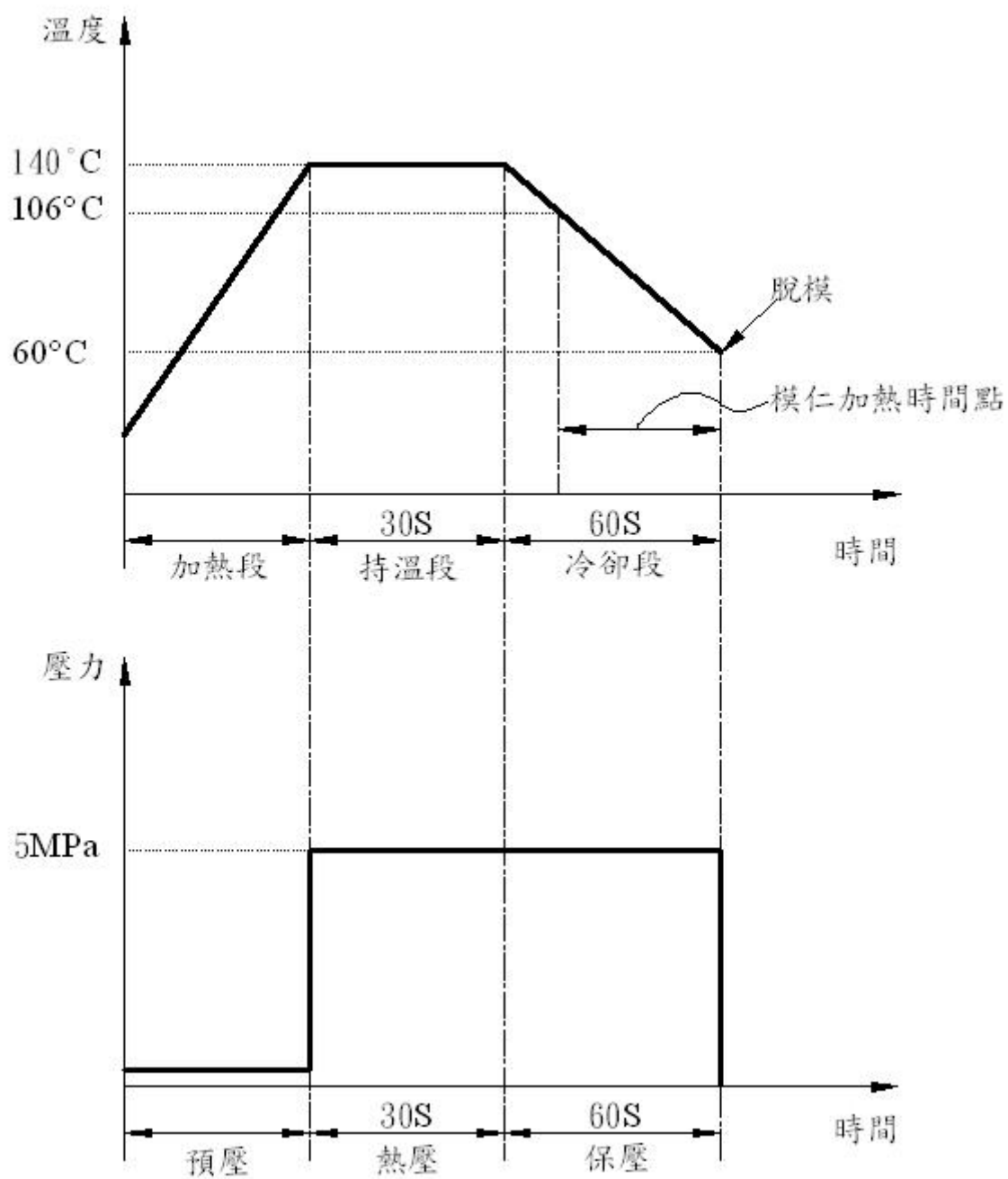


圖 3-9 熱壓製程之溫度與壓力設定曲線圖

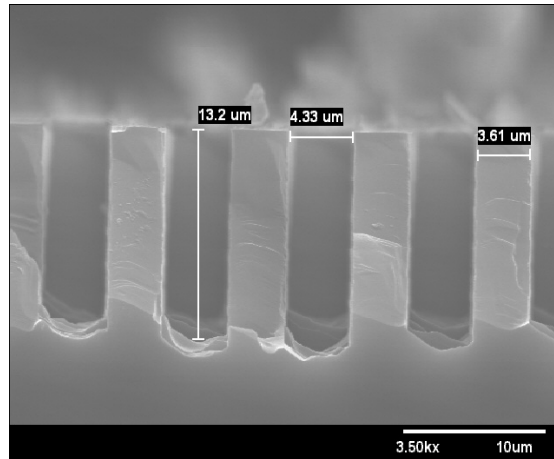


圖 3-10 實驗用模仁 (AR=3)

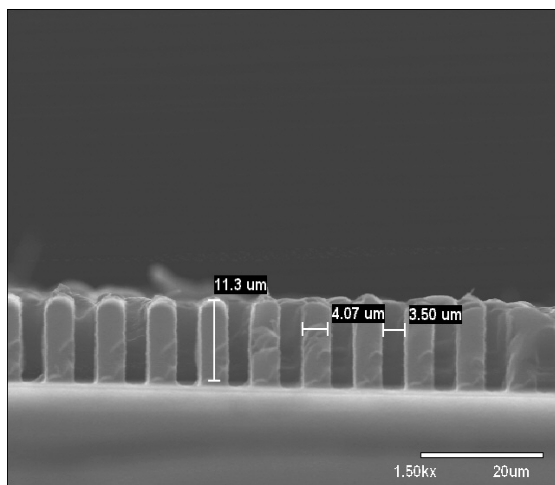


圖 3-11 未完整充填的成形結構

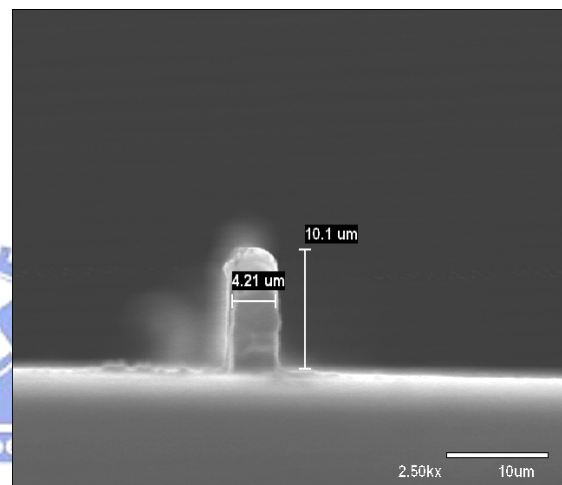


圖 3-12 未完整充填的成形結構

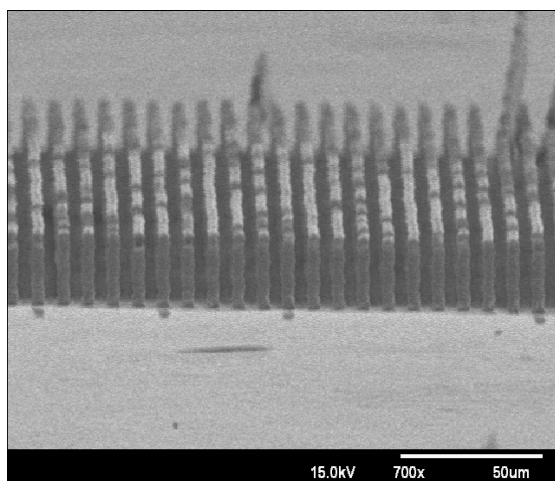


圖 3-13 深寬比 5 的成形結構

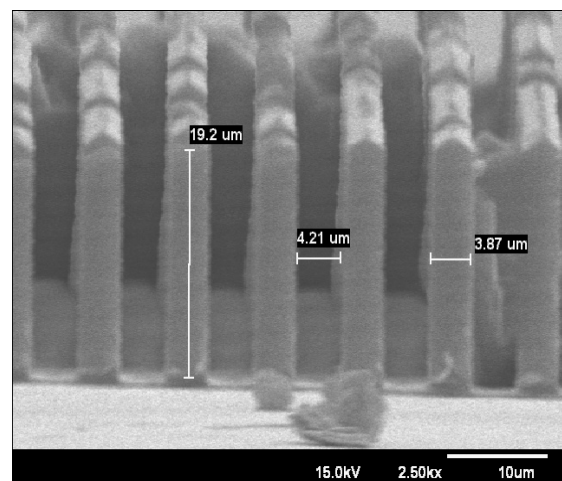


圖 3-14 深寬比 5 的成形結構

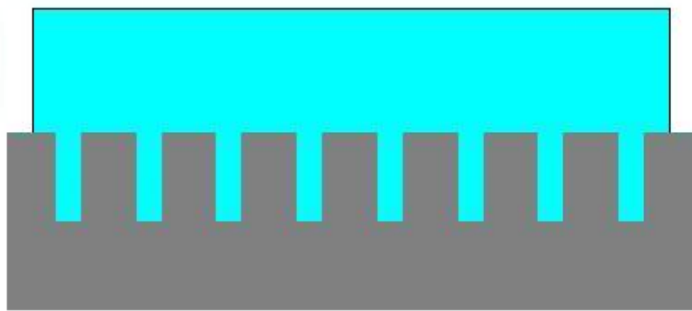
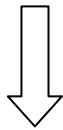
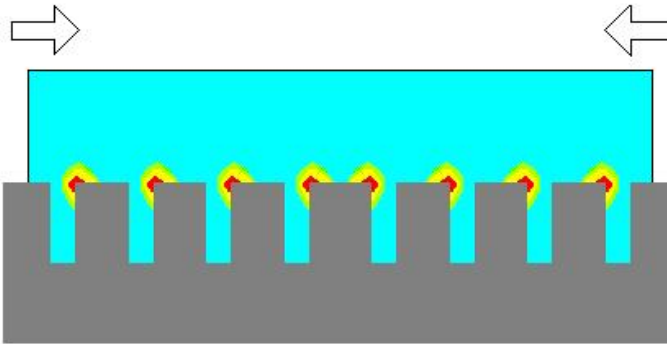
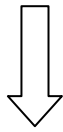
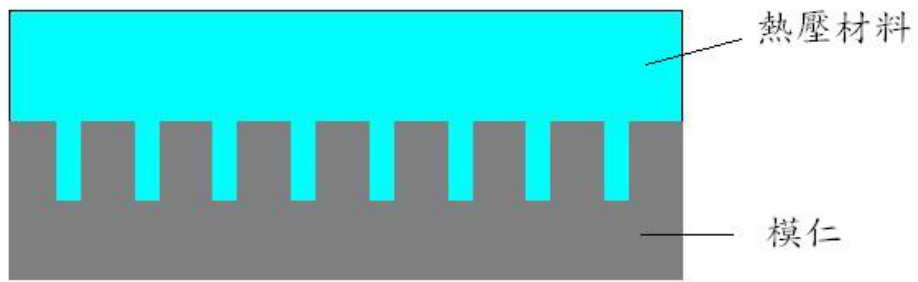


圖 3-15 熱收縮應力消除示意圖

第四章 實驗結果與討論

4.1 熱壓時模仁加熱功率與模仁表面溫度變化關係

為了量測在熱壓時模仁施加功率與實際模仁表面的溫度變化情況，我們在模仁表面裝設一條熱電偶，量測熱壓時模仁中心表面的溫度變化，並比較在冷卻保壓時，不同功率下模仁表面的溫度變化，實驗架設如圖 4-1。但在比較脫模結果的實驗時，由於模仁表面的熱電偶會有凸起的現象，將影響到脫模實驗的結果，故不裝設熱電偶。

4.1.1 未施加功率時模仁表面的溫度變化

如圖 4-2，首先量測未施加功率時，熱壓全程模仁表面的溫度變化，並以三片不同的模仁各做一次量測，發現三次的溫度變化量測幾乎在同一條線上，證實在同樣的條件下模仁的降溫速度為一穩定值。設定 60°C 為脫模溫度，則整個熱壓流程約需 300 秒。在冷卻保壓的階段時，由 140°C 降到 106°C (PMMA 的玻璃轉移溫度) 時約需 20 秒，而由 140°C 降溫到 60°C 的開模溫度時約需 60 秒。

4.1.2 施加功率時模仁表面的溫度變化

如圖 4-3，比較不同功率下模仁表面的溫度變化，當模仁表面降溫到 106°C 時開始施加功率，功率施加時間為 30 秒。發現當施加功率在 10W 以下時，晶片所產生的熱量並不足以抵抗模具降溫時所帶走的熱量，因此當施加功率時模仁表面並沒有辦法量測到明顯的溫度變化，而當施加功率提高 20W 以上時，可以明顯發現模仁表面的溫度可以迅速提高到一個穩定值，再隨著模具降溫，當停止施加功率時模仁表面溫度則會迅速降溫到與模具相同的溫度。

4.2 脫模破壞

4.2.1 影響脫模難易度因素

1. 模仁與高分子材料熱膨脹係數的差異：當熱壓過程結束進入冷卻脫模的階段時，材料與模仁因為各具不同的膨脹係數導致不同的收縮率，而高分子材料的收縮率大都會比模仁來的大，導致冷卻後材料與模仁結構之間產生夾持的力量，在脫模時造成斷裂的現象，在大面積成形時邊緣結構因熱應力產生的脫模破壞最為明顯。此因素為產生脫模破壞最主要的原因，本研究就是探討如何利用可局部加熱的模仁，來解決脫模破壞的問題。

2. 模仁與成形材料之間的摩擦力：這與模仁的製作方式有關，光滑的結構表面可降低脫模時所產生的摩擦力，使成形結構不易斷裂。本實驗利用 KOH 蝕刻矽來製作模仁結構，發現蝕刻面並不是非常的光滑，尤其在蝕刻高深寬比的結構時也會產生蝕刻不均勻的現象，如圖 4-1、4-2，當改以 KOH+IPA 蝕刻配方蝕刻時可以得到比較光滑且均勻的蝕刻表面，如圖 4-3、4-4、4-5、4-6，藉此降低脫模時的摩擦力。參考 X.C. Shan 等人利用熱壓成形製作微光學反射鏡開關，為了克服脫模破壞，將模仁浸泡在利用甲苯稀釋的 chlorinated fluoroalkyl methylsiloxane (CF) 溶液中，再烘烤模仁 110°C、20 分鐘使模仁表面形成一層薄膜，藉此薄膜降低模仁與熱壓材料脫模時所產生的摩擦力，以解決脫模破壞[9]。但一般的高分子材料熱壓成形較少人使用此種方式，因塗佈在模仁表面的脫模劑容易充填微結構，造成成形材料無法完整充填模穴，在熱壓時也容易污染成形材料。

3. 成形結構設計與深寬比：模仁結構形狀也會影響脫模的難易度，具有拔模角的結構較不容易發生脫模破壞。拔模角的設計可以利用非等向性蝕刻溶液對晶格面蝕刻速率的不同，就可以蝕刻出具有拔模角度的結構。如圖 4-10，分別為 KOH 和 EDP 蝕刻液沿(100)方向之長方形結構側邊所造成，利用 EDP 蝕刻液和可以蝕刻出具有拔模角度的結構[2]。但除非必要，在熱壓成形中少有人會刻意製作具有拔模角的微結構，因為

這樣的設計會影響到微結構的幾何形狀，幾何形狀的改變就會導致光學特性的不同。

4.2.2 一般熱壓成形時所產生的脫模破壞

當成形結構深寬比在三以上時，脫模時僅結構中心點有較為好的脫模效果，其餘部份皆會產生不同程度的脫模破壞以至於無法順利成形，首先觀察模仁未施功率時所產生的脫模破壞種類：

1. 材料殘留在模仁內或成形結構產生撕裂的現象：如圖 4-10、4-11，在脫模時材料結構斷裂在模仁內部並且有撕裂的現象。材料在冷卻時產生的收縮夾持的剪切應力就是造成此種脫模破壞的主要原因，觀察圖 4-12，發現殘留在模仁內的材料其撕裂的方向都指向中心點，可能原因為在冷卻保壓階段時，材料根部向中心點收縮量過大，導致在未脫模時成形材料已收縮並夾斷成形結構。觀察圖 4-13、4-14，脫模時成形材料雖未殘留在模仁內部，材料收縮所產生的挾持力量已將結構拔起。

2. 成形結構傾倒：當材料冷卻收縮時與模仁之間產生熱應力，雖然在脫模時沒有產生結構斷裂，但殘留的應力卻會使成形結構在脫模時產生結構傾倒，影響成形結構的賦形性，在大面積成形的邊緣結構最容易發生此種脫模破壞，如圖 4-19、4-20。

3. 模仁損壞：當模仁的結構比較薄弱易斷裂時，在脫模時因為模仁結構和成形材料間的挾持力量就容易破壞模仁上的結構。此種脫模破壞會導致模仁毀損嚴重降低模仁壽命，因此在成形時應避免此情形發生。如圖 4-17、4-18，因材料收縮的挾持力，使脫模時模仁上的結構斷裂在成形材料之間。

4.3 模仁施加功率對脫模破壞的改善

以施加功率的大小和功率施加時間為實驗參數製作成形操作窗，實驗參數的設定如表 4-1，如圖 4-21、4-22 分別為深寬比三和寬比四的成形操作窗，成形結構區的總面積為 14mm X 8.8mm，而可完整脫模的面積為 10.3mm X 8.8mm，最外部的成形區域其脫模情況並不是很穩定，需要

更高的施加功率條件，但由於材料特性和摻雜條件設定的緣故，模仁最大施加功率只可達 40W，因此無法對最外圍的結構做有效的脫模。觀察施加功率在 20W 的情形，雖然脫模破壞的情形有改善但僅限於中心部份的區域，邊緣部份則仍然未完全釋除熱應力，仍然有脫模挾持的情形，延長施加功率的秒數，仍有脫模破壞的情形產生。深寬比三的微結構其完整脫模的條件在施加功率 25W、30 秒開始；深寬比四的微結構其完整脫模的條件則在 25W、35 秒開始。當施加功率 40 秒左右時已達開模溫度，發現在功率 35W、40 秒時模仁溫度過高來不及冷卻降溫時已開模，導致在開模時微結構還處於軟化的狀態下，而產生傾倒的現象，如圖 4-38、4-39、4-40。比較不同深寬比的成形操作窗，發現越高深寬比的可成形面積會越小。圖 4-23~4-32 為深寬比三的實驗脫模結果，觀察圖 4-23、圖 4-27 發現邊緣結構賦形性和脫模效果都非常良好，無任何的脫模破壞和結構傾倒的問題，圖 4-26 為結構的成形尺寸，圖 4-24 則為最邊緣的成形區域，可以發現結構已斷裂。圖 4-28 則為中心結構密集區的成形圖，圖 4-30 為密集區的結構尺寸。觀察邊緣區域的密集區成形結果，如圖 4-29，結構邊緣的部份有脫模斷裂的現象，圖 4-31、4-32 則可以發現部份的成形結構已斷裂在模仁內部。圖 4-33~4-38 為深寬比四的實驗脫模結果，圖 4-34 為結構的尺寸圖，圖 4-35 則為觀察較大面積的脫模結果，顯示脫模的情形都非常良好，圖 4-36、4-37 顯示在第 7 排結構皆無法順利成形。實驗結果顯示除了第 1 排和第 7 排的結構脫模結果並不是很穩定以外，其餘部份的結構，在施加功率以後都有非常良好的脫模結果。

4.4 模仁施加功率對收縮率的影響

為了了解模仁施加功率對成形品收縮率的影響，首先比較未施加功率與施加功率之後的收縮率差異，再比較不同的保壓壓力下收縮率之間的差異。實驗參數的設定如表 4-2，收縮率的計算方式如下：

$$\text{收縮率} = \frac{\text{模仁量測點間距} - \text{成形品量測點間距}}{\text{模仁量測點間距}} \times 100\%$$

量測的方式如圖 4-41，此圖為模仁上成形結構區的配置圖以成形結構的中心為原點，各個密集區結構的中心為間距，利用 CCD 顯微鏡觀察並紀錄每個間距的距離，只探討一維方向的收縮率以便觀察施加功率對收縮率的影響。

由於採用開放式的熱壓方式，因此在熱壓時材料的正向壓力會由中心向外逐漸遞減，且外部的材料會有向外流動的現象，導致開放式的熱壓有材料收縮不均勻的現象。觀察在 3MPa 的保壓壓力下施加功率與未施加功率的收縮率比較，如圖 4-42，由結構中心點向外，收縮率有逐漸增加的趨勢，尤其在最外端的部份收縮率有大幅上升的現象，當施加功率時可以有效的降低收縮率，對整體收縮率的均勻性也有顯著的改善，代表模仁與結構之間的熱應力能夠有效的釋除。如圖 4-43，對於收縮量的變化，施加功率後可以很有效的抑制收縮量的增加，比較在 7000um 位置的總收縮量，施加功率後可以減少收縮量約 22% 左右。如圖 4-44，觀察在 5MPa 的保壓壓力下，外端收縮率一樣有變大的情形，如圖 4-45，施加功率後可以些微的抑制收縮量的增加。



表 4-1 成形操作窗實驗參數設定

熱壓壓力 (MPa)	熱壓溫度 (°C)	保壓壓力 (MPa)	開模溫度 (°C)	成形深寬比
5	140	5	60	3
5	140	5	60	4
熱壓時間 (s)	保壓時間 (s)			
30	65			
30	65			

表 4-2 收縮率實驗參數設定

熱壓時間 (s)	熱壓溫度 (°C)	保壓時間 (s)	開模溫度 (°C)
30	140	65	60
熱壓時間 (s)	施加功率 (w)	施加功率時間 (s)	
30	30	30	

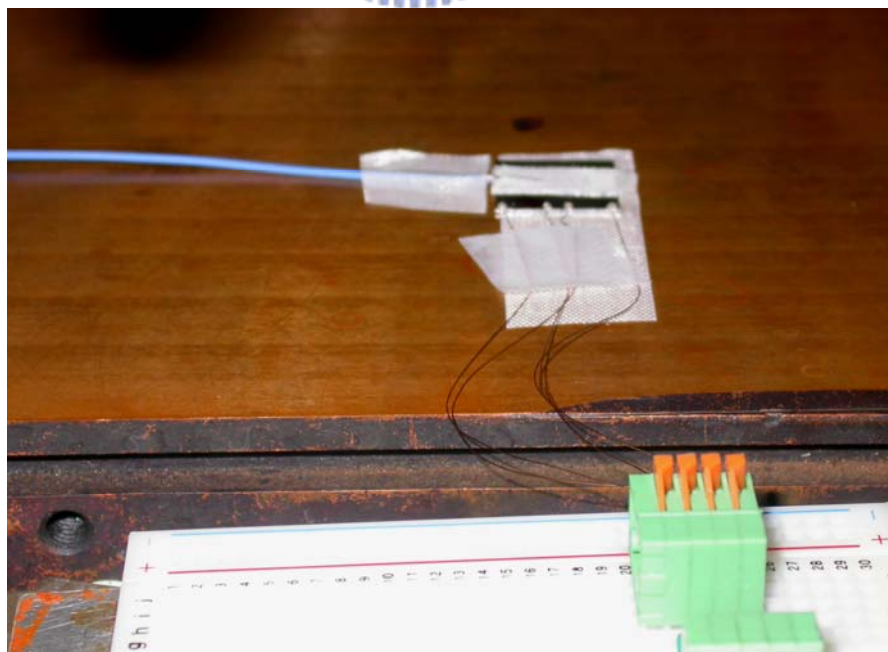


圖 4-1 模仁表面溫度量測實驗架設

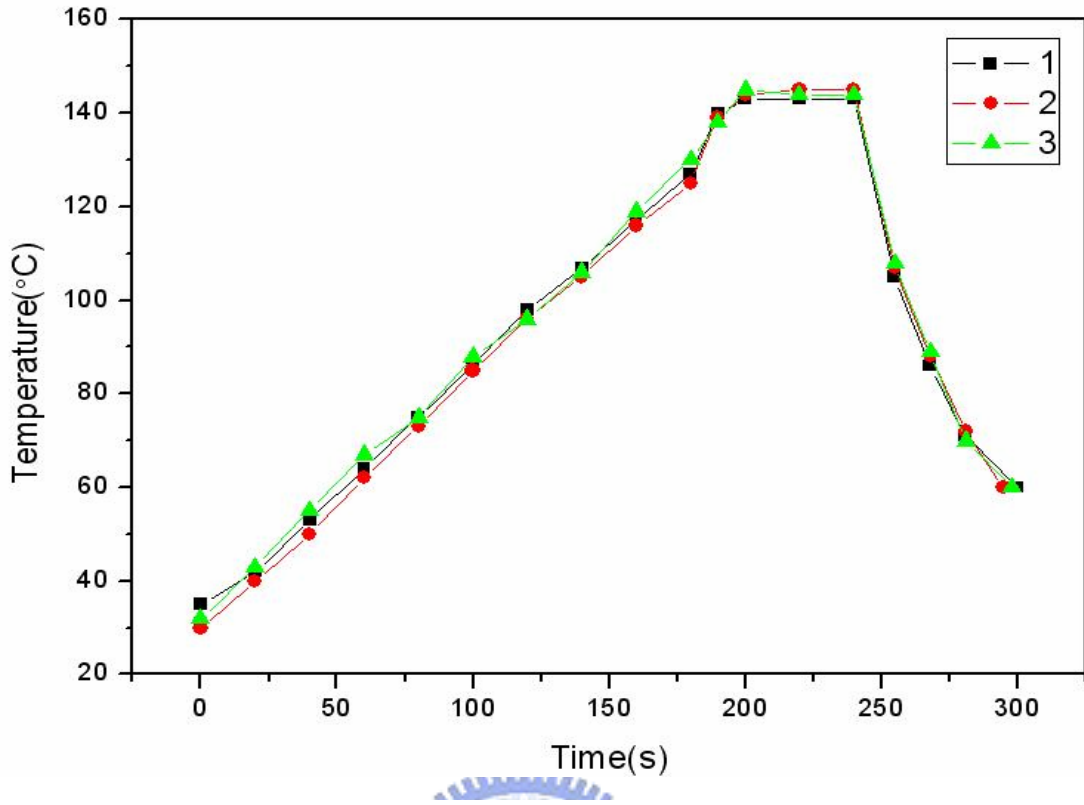


圖 4-2 在熱壓流程時模仁表面的溫度變化

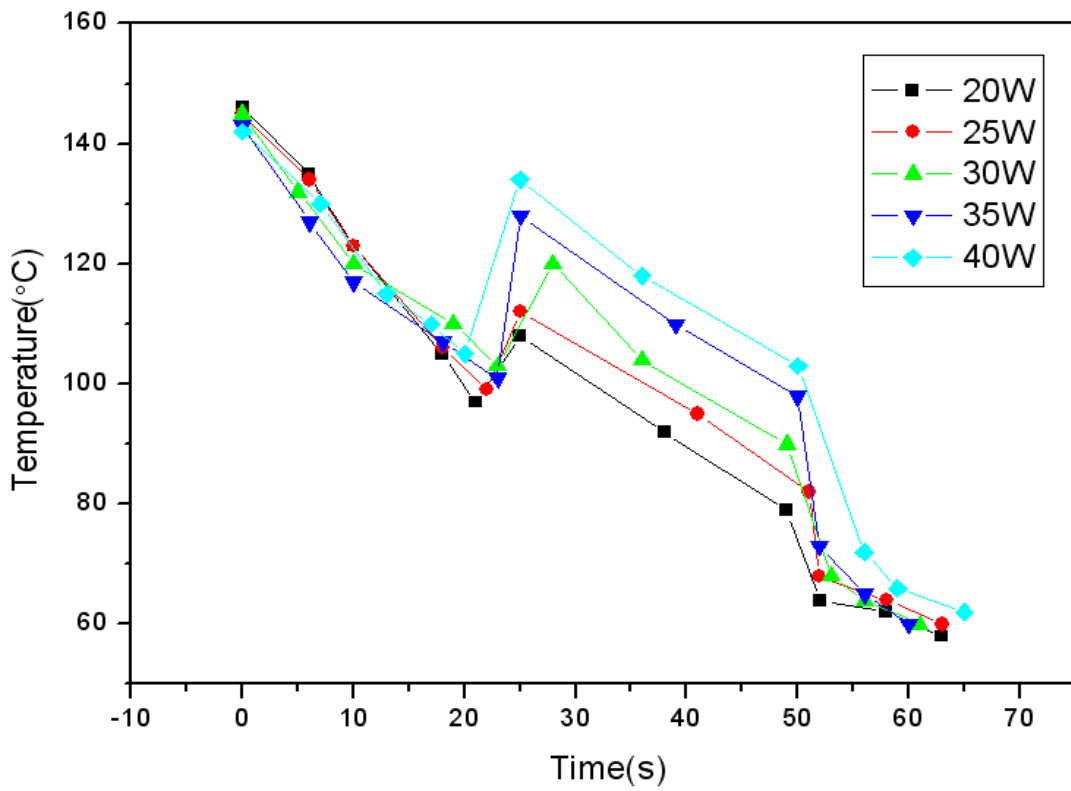


圖 4-3 施加不同功率時模仁表面的溫度變化

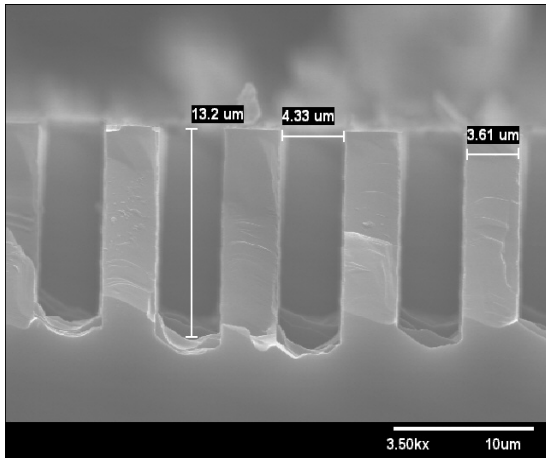


圖 4-4 KOH 蝕刻結構
(AR=3)

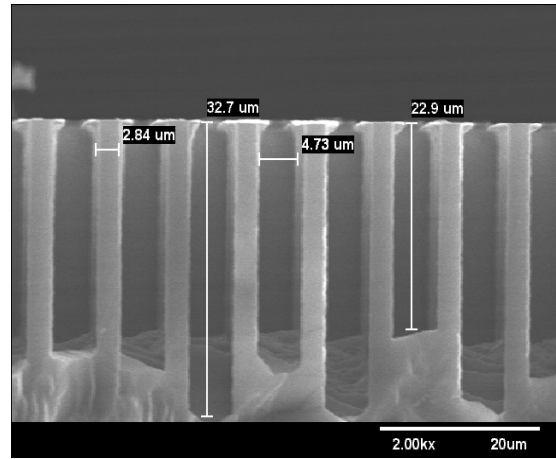


圖 4-5 KOH 蝕刻結構
(AR=7)

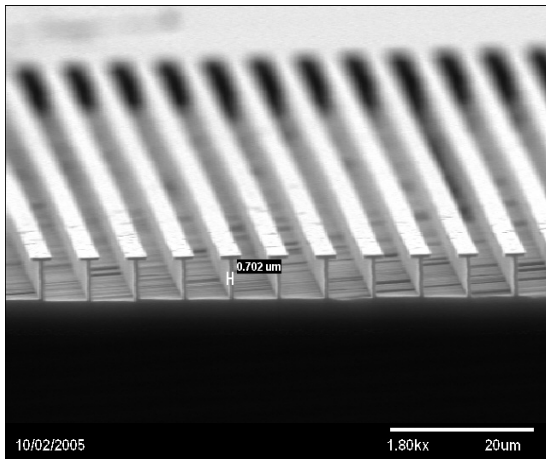


圖 4-6 KOH+IPA 蝕刻結構
(AR=1)

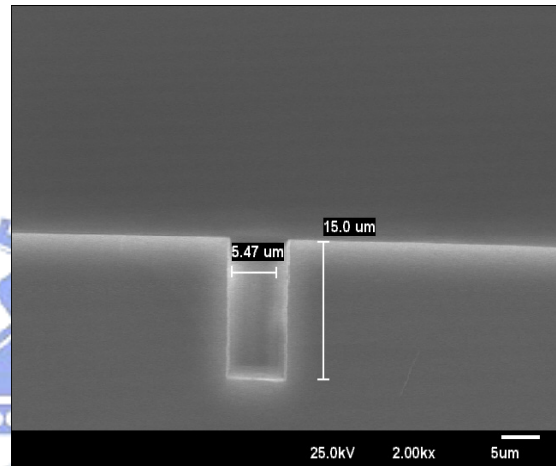


圖 4-7 KOH+IPA 蝕刻結構
(AR=3)

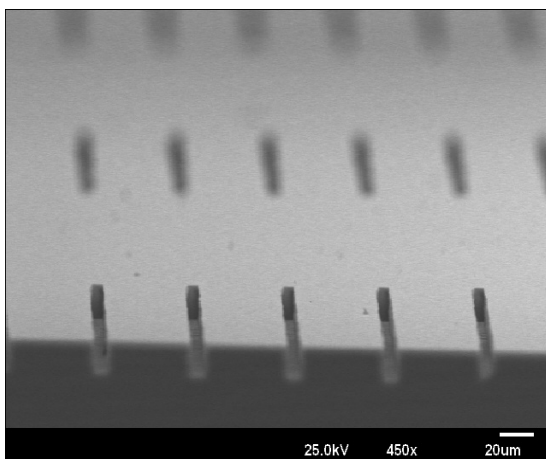


圖 4-8 KOH+IPA 蝕刻結構
(AR=3)

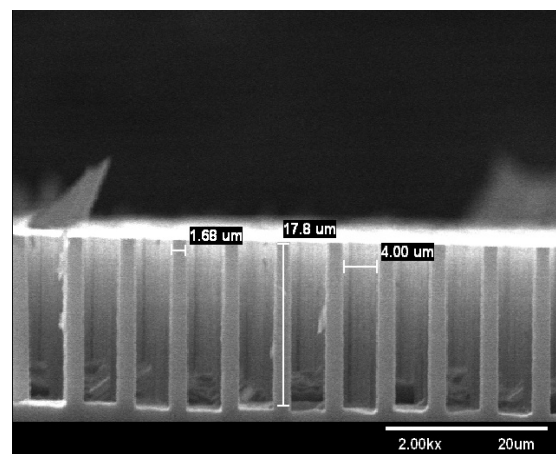


圖 4-9 KOH+IPA 蝕刻結構
(AR=4)

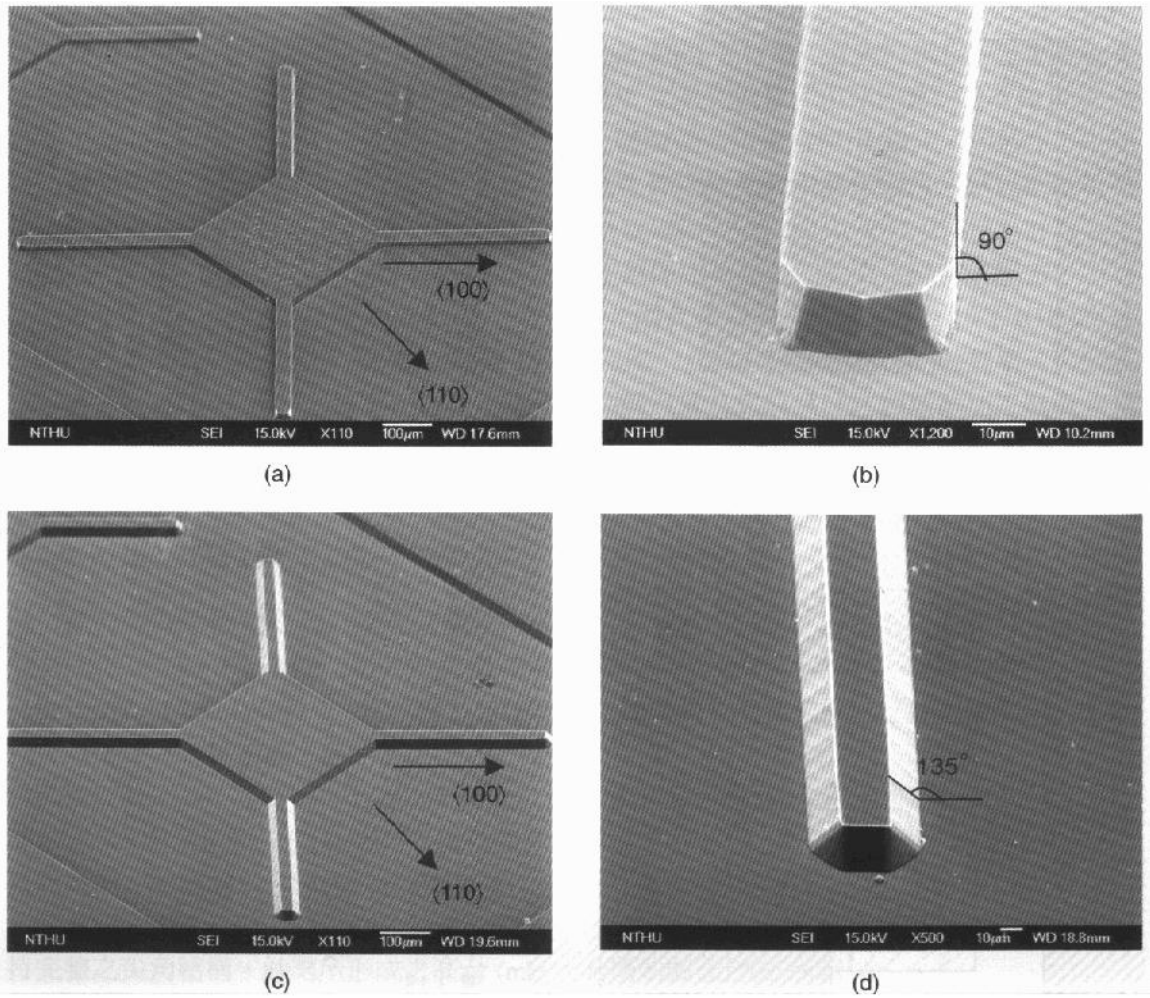


圖 4-10 KOH 和 EDP 對同一個晶格面所產生的不同蝕刻結果[2]

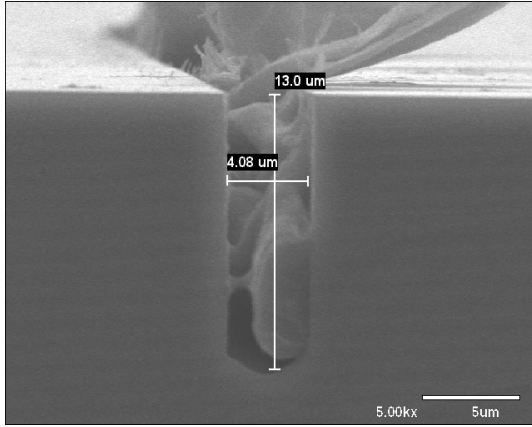


圖 4-11 脫模破壞-材料殘留在模仁內部

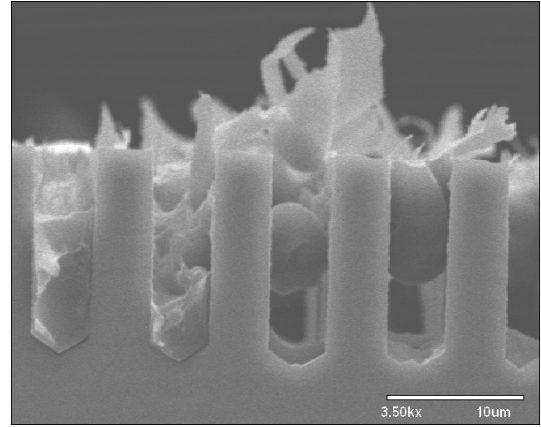


圖 4-12 脫模破壞-材料殘留在模仁內部

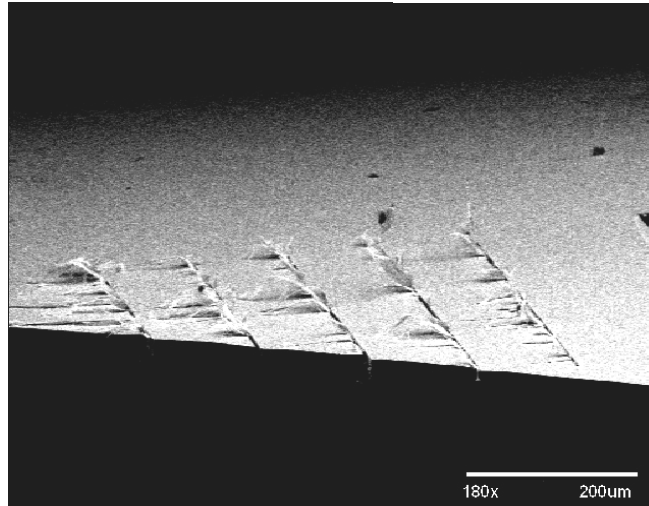


圖 4-13 脫模破壞-材料殘留在模仁內部

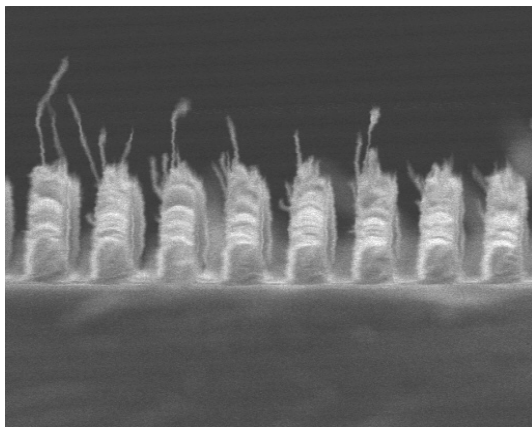


圖 4-14 脫模破壞-成形結構產生撕裂

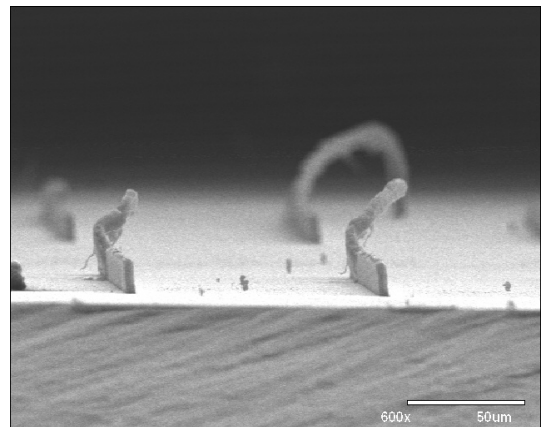


圖 4-15 脫模破壞-成形結構產生撕裂

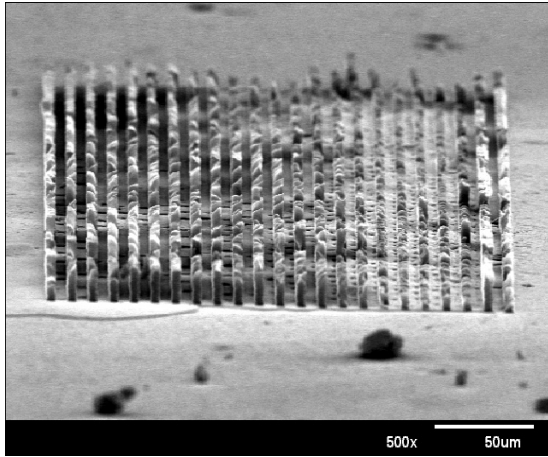


圖 4-16 脫模破壞-成形結構斷裂

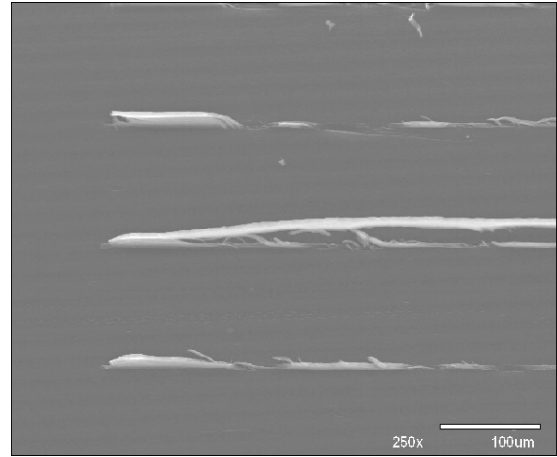


圖 4-17 脫模破壞-成形結構撕裂

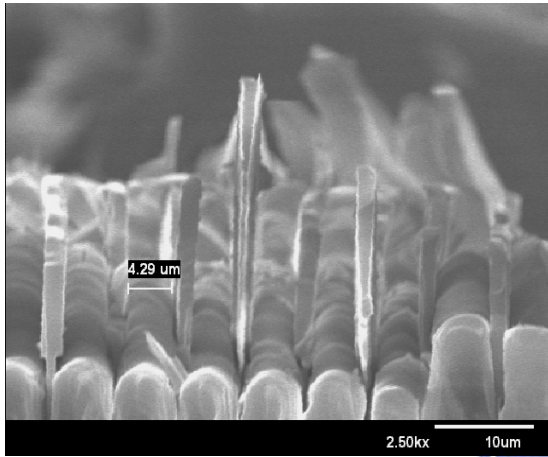


圖 4-18 脫模破壞-模仁結構斷裂
在成形材料之間

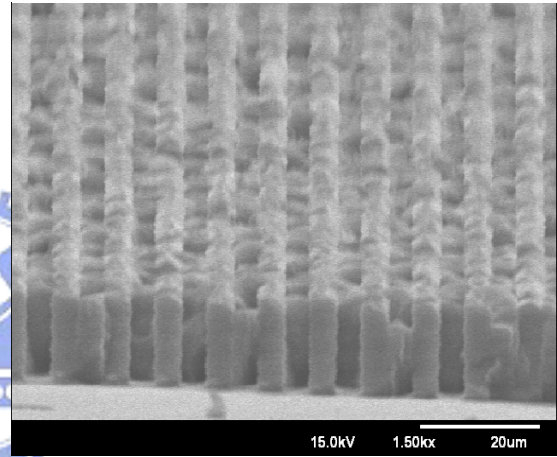


圖 4-19 脫模破壞-模仁結構斷裂
在成形材料之間

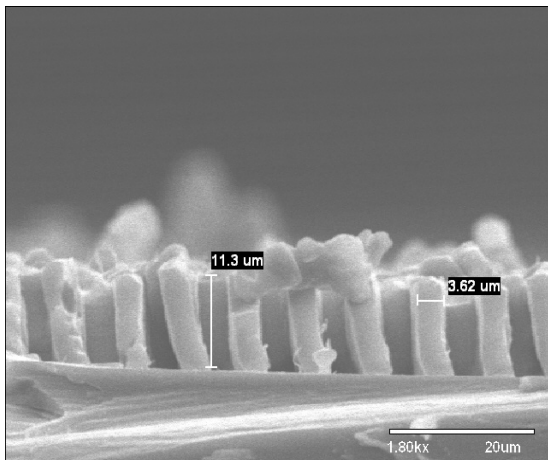


圖 4-20 脫模破壞-成形結構傾倒

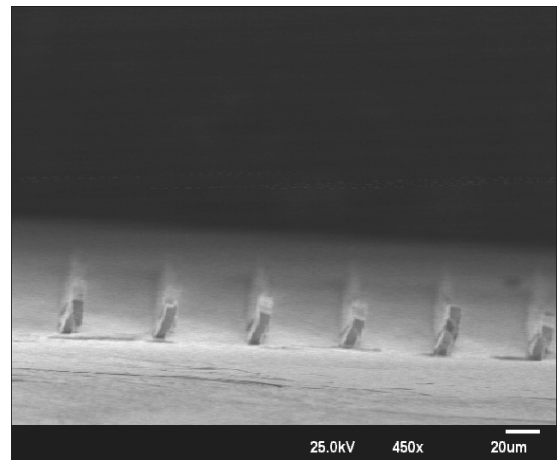


圖 4-21 脫模破壞-成形結構傾倒

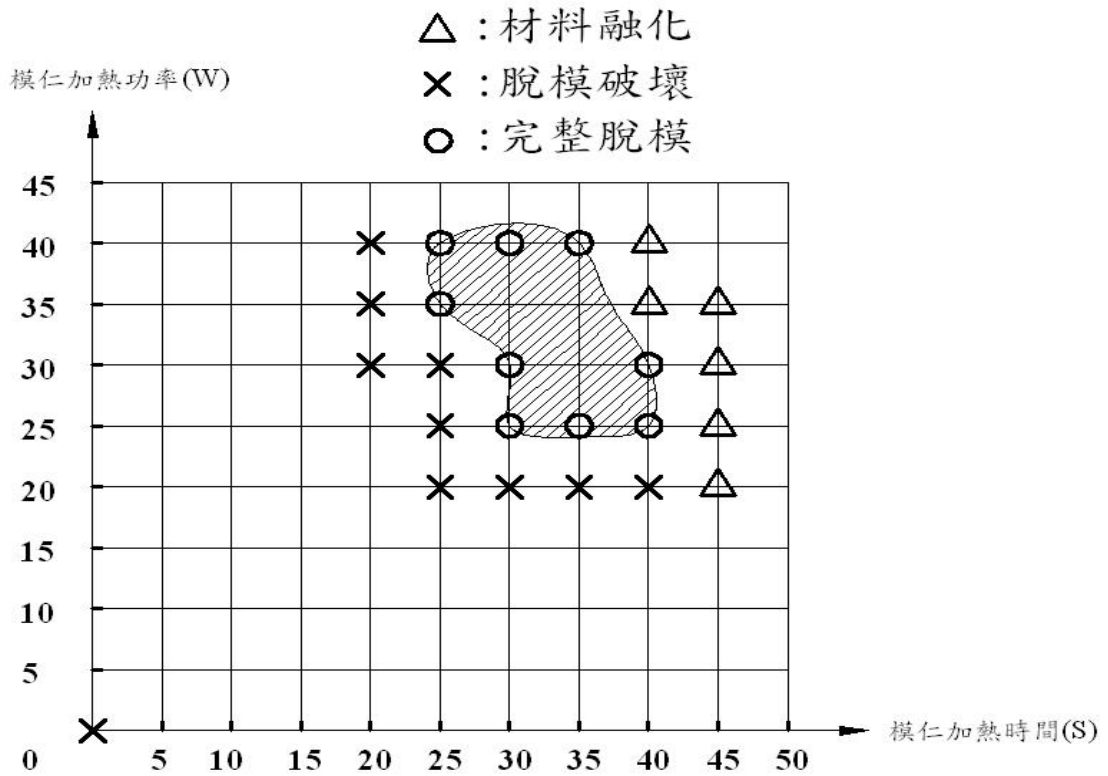


圖 4-22 深寬比三-成形操作窗

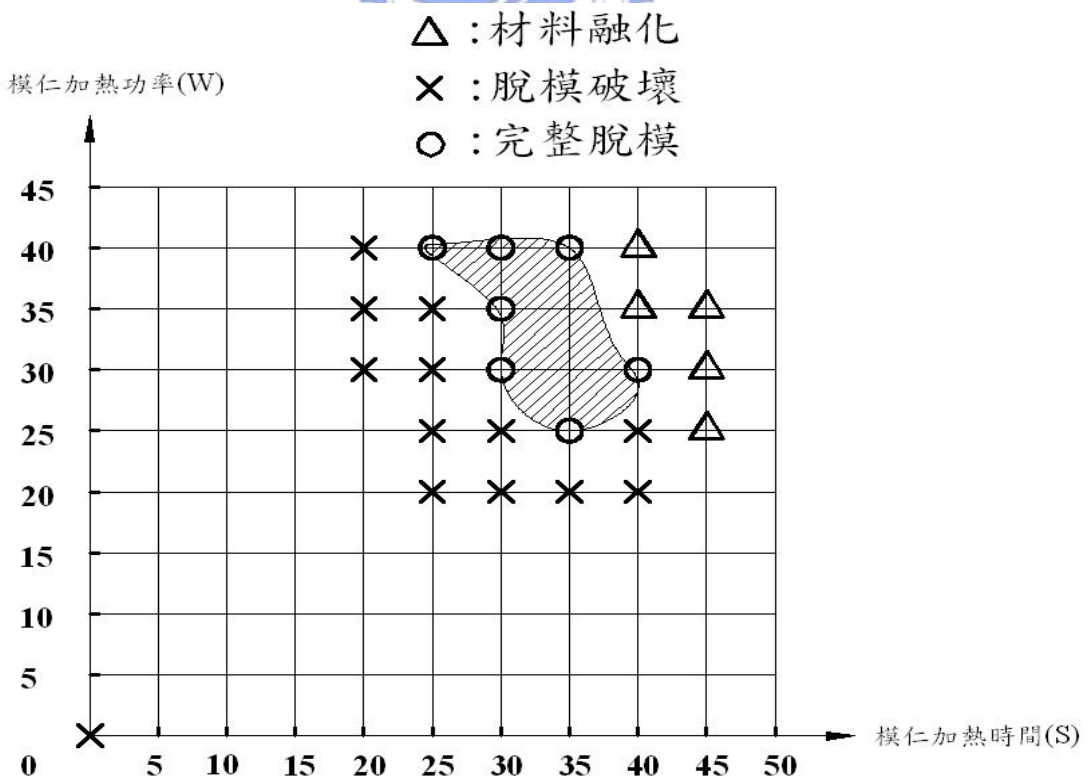


圖 4-23 深寬比四-成形操作窗

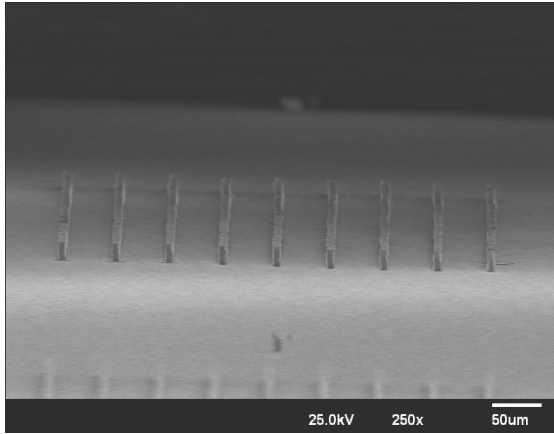


圖 4-24 A2 區域成形結構

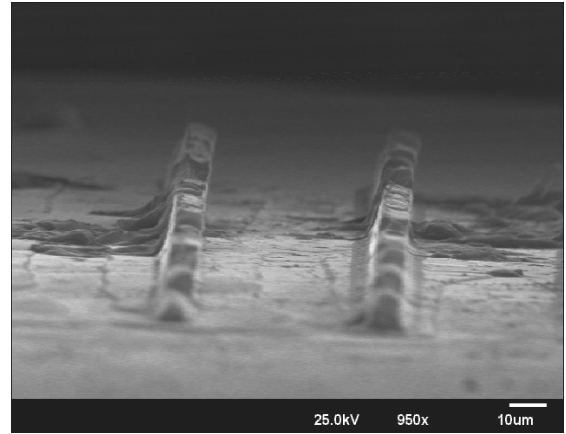


圖 4-25 C1 區域成形結構

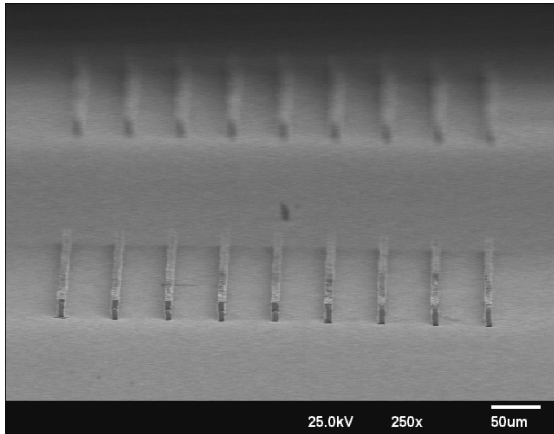


圖 4-26 C4 區域成形結構

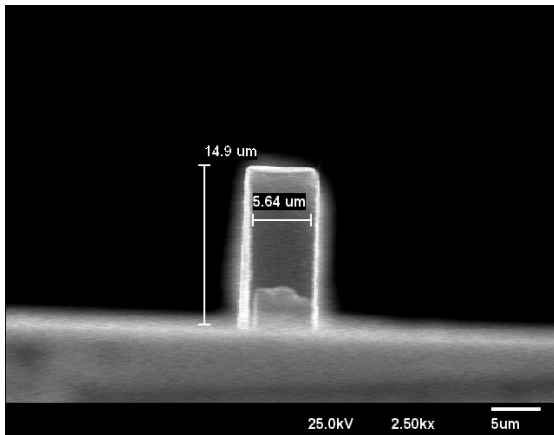
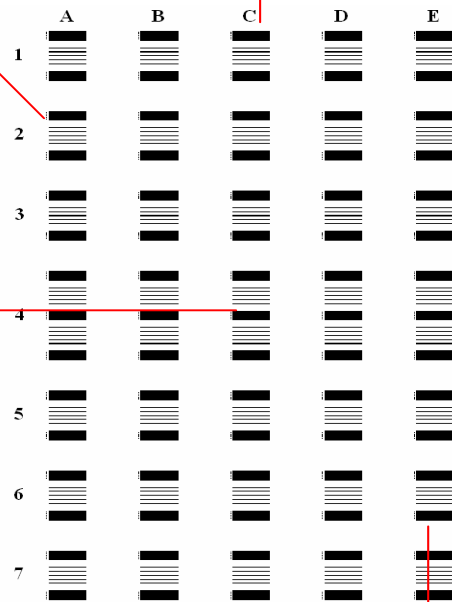


圖 4-27 成形結構尺寸

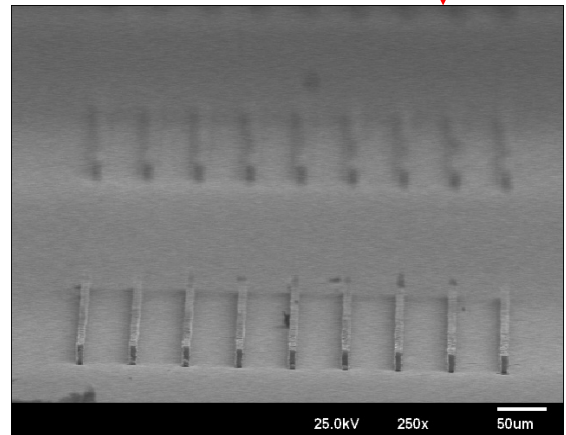


圖 4-28 E6 區域成形結構

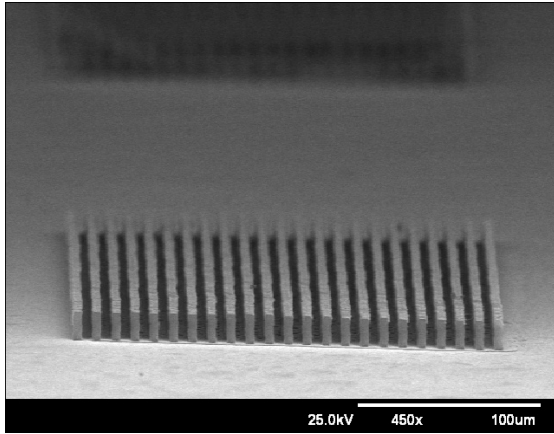


圖 4-29 A2 密集區成形結構

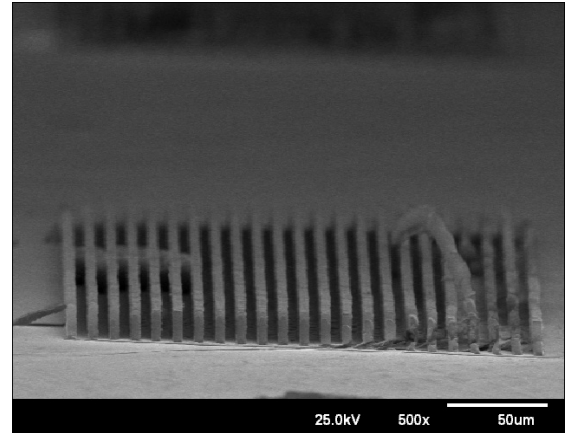


圖 4-30 D1 密集區成形結構

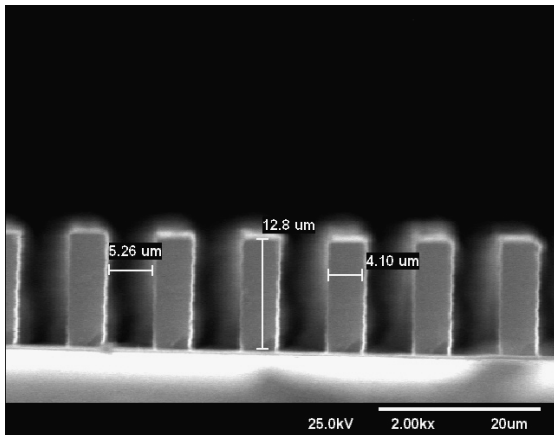


圖 4-31 密集區結構尺寸

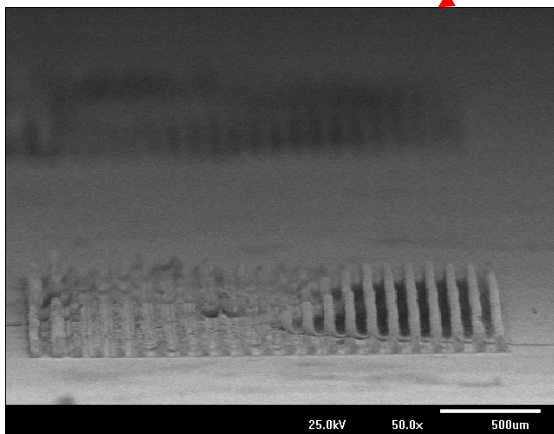
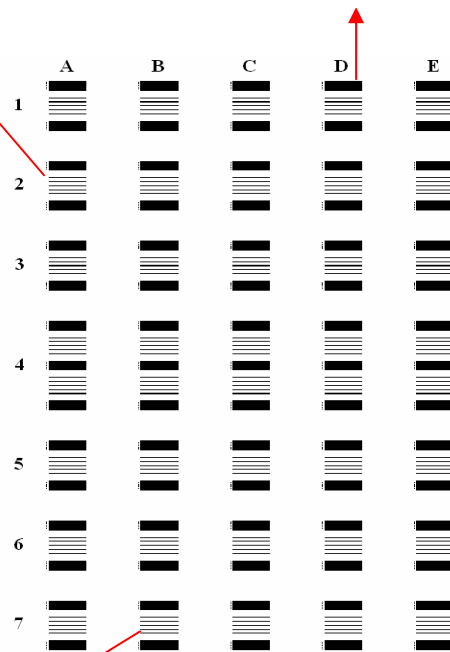


圖 4-32 B7 密集區成形結構

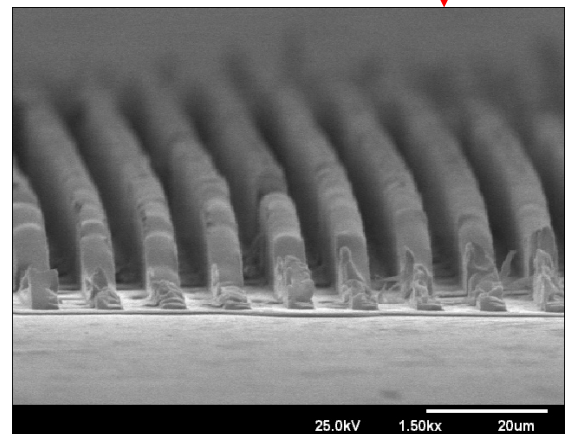


圖 4-33 E7 密集區成形結構

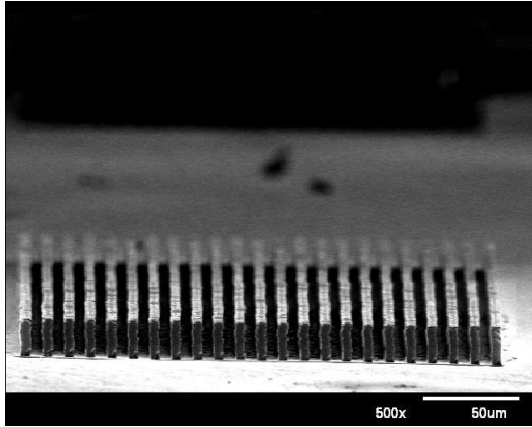


圖 4-34 B2 區域成形結構

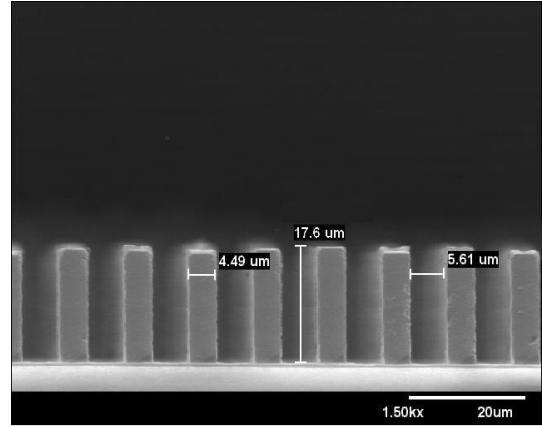


圖 4-35 密集區結構尺寸

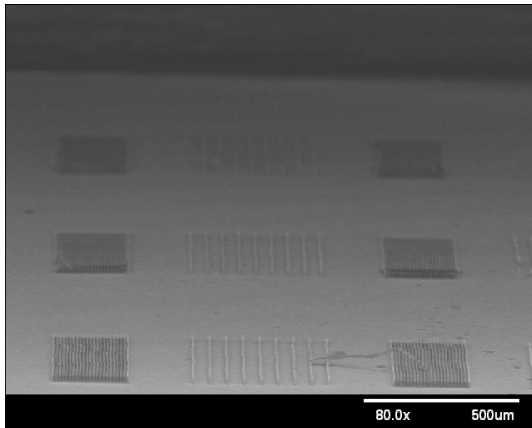


圖 4-36 B4 區域成形結構

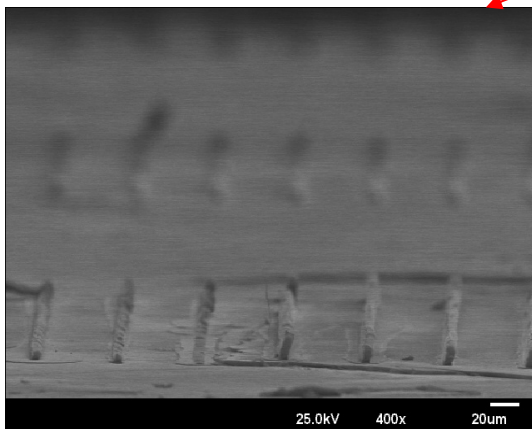
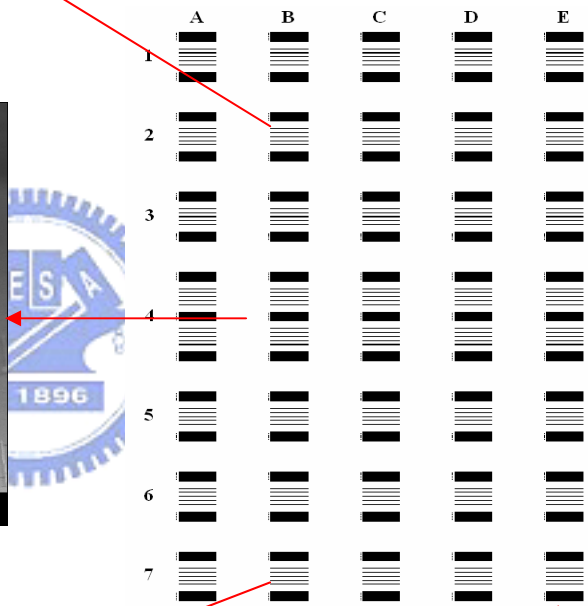


圖 4-37 B7 區域成形結構

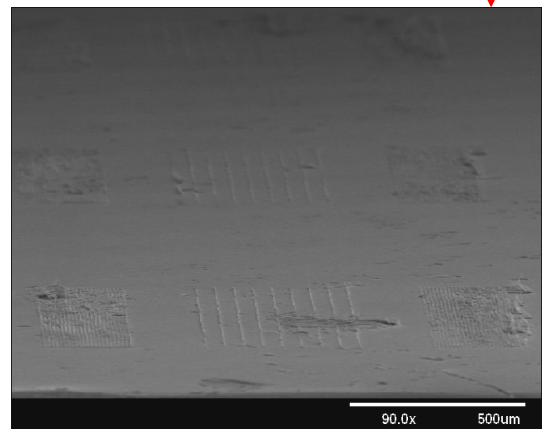


圖 4-38 E7 區域成形結構

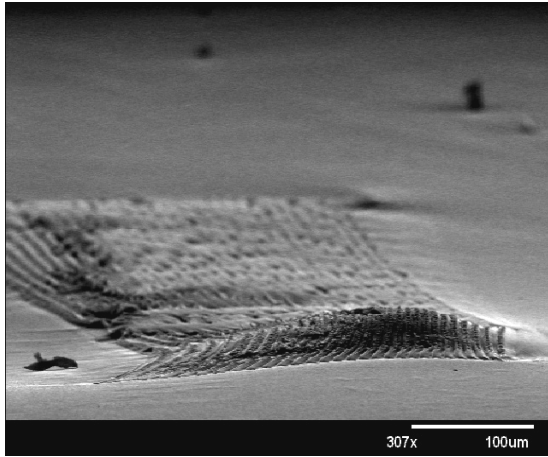


圖 4-39 微結構融化傾倒

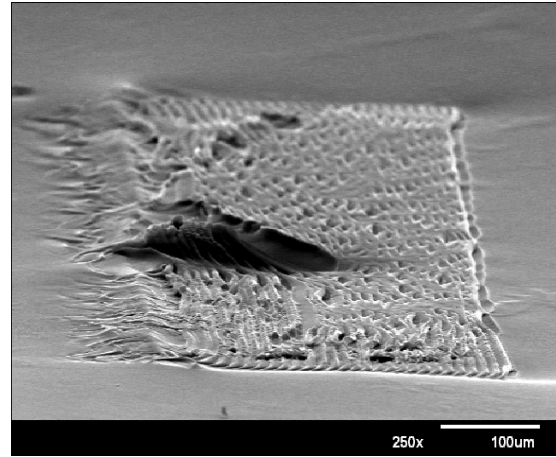


圖 4-40 微結構融化傾倒

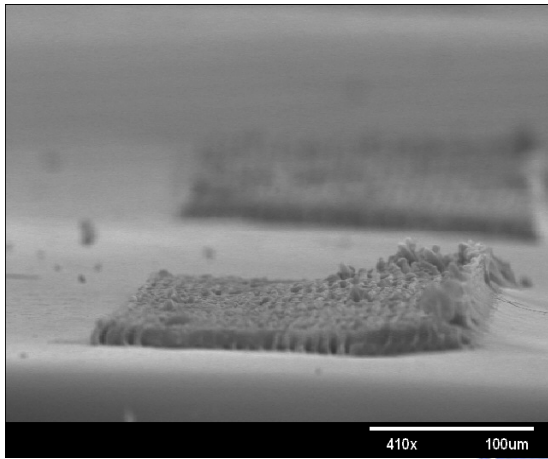


圖 4-41 材料表面變形



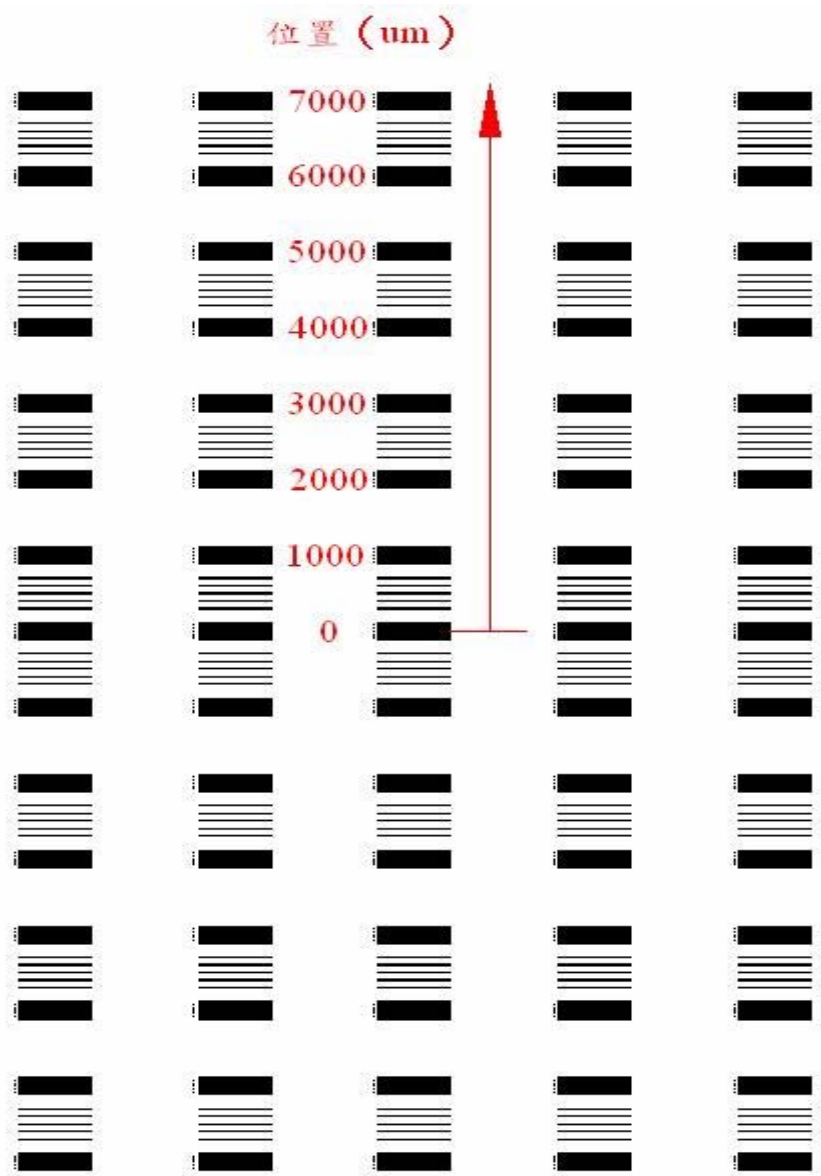


圖 4-42 收縮率量測方式

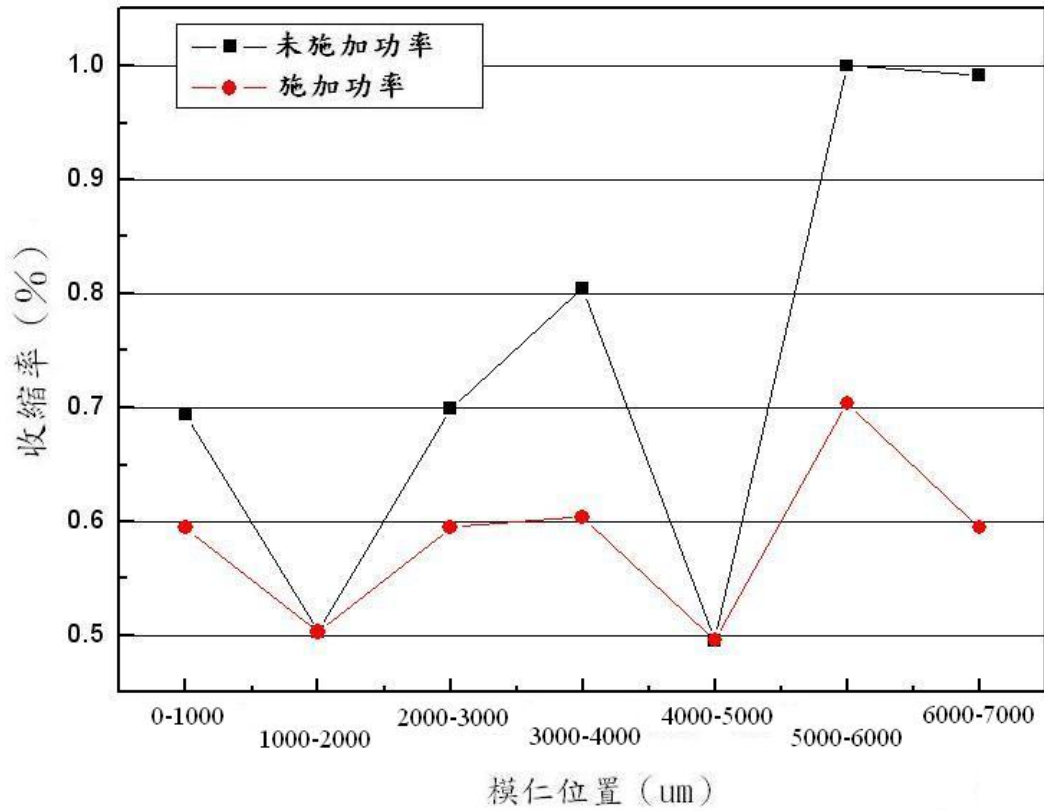


圖 4-43 3MPa 保壓壓力下收縮率曲線

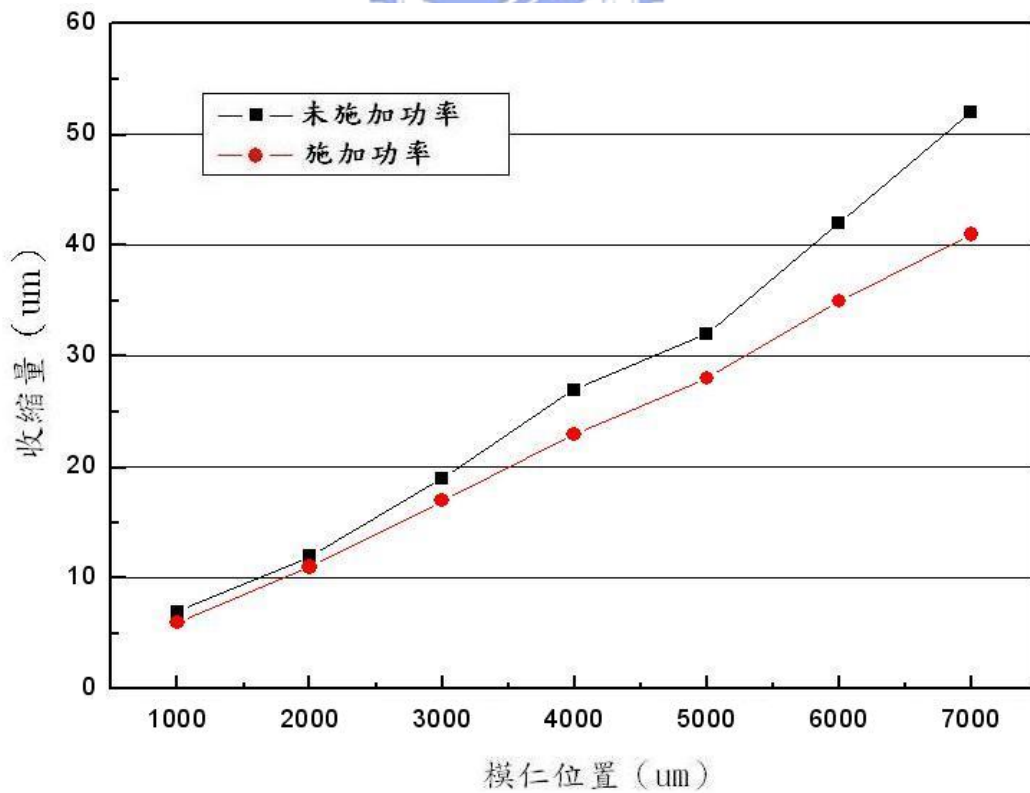


圖 4-44 3MPa 保壓壓力下收縮量曲線

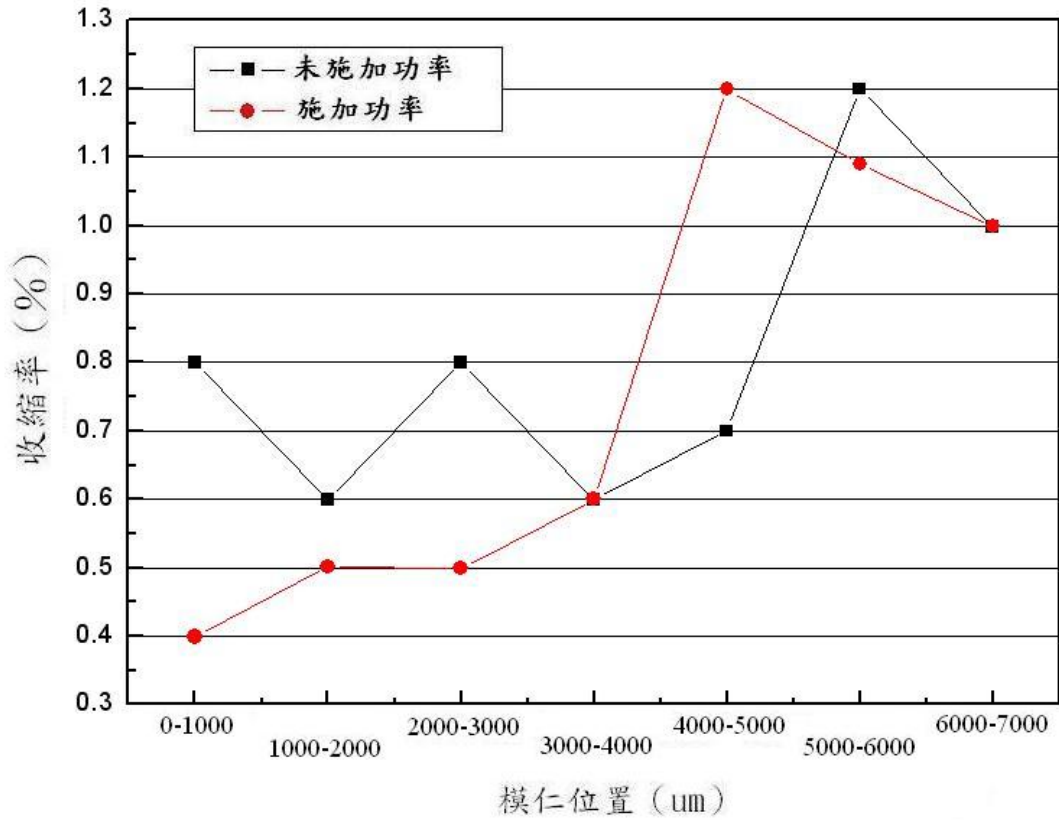


圖 4-45 5MPa 保壓壓力下收縮率曲線

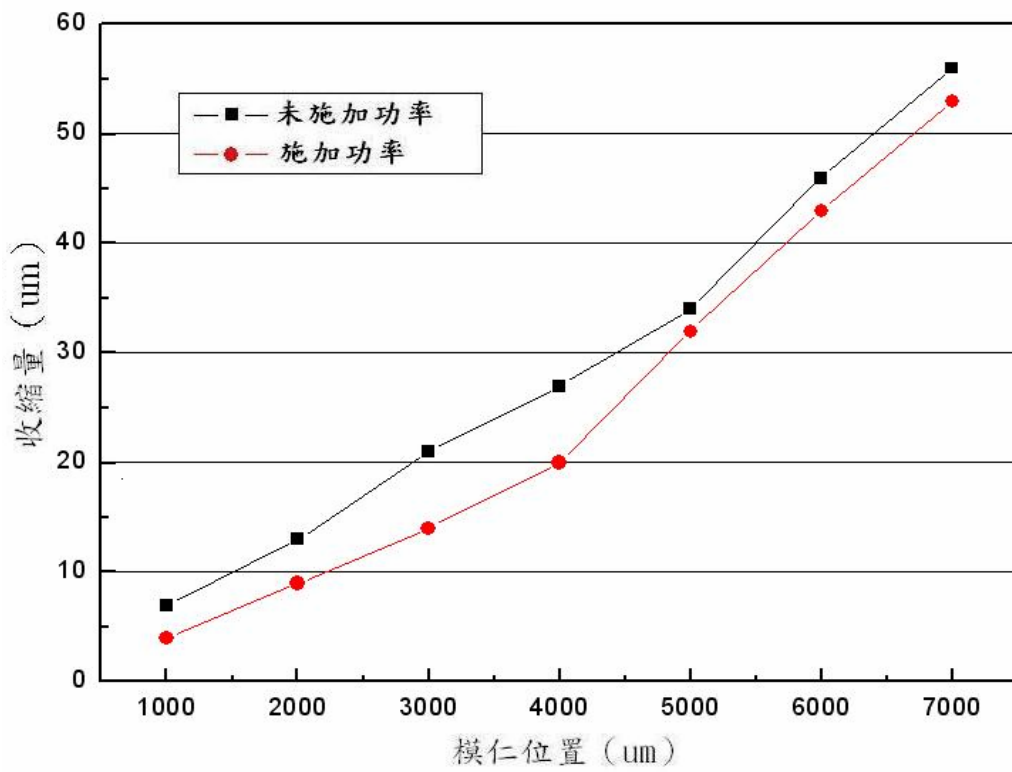


圖 4-46 5MPa 保壓壓力下收縮量曲線

第五章 結論與未來展望

本研究以 PMMA 作為熱壓材料，利用 P type 晶圓製作具有可局部加熱功能的模仁，並討論模仁施加不同功率和時間長度對改善脫模破壞的影響，茲提出以下的結論：

- (1) 以離子佈植方式製作的模仁加熱線路其加熱性能受到佈植條件和加熱線路設計的影響，晶片升溫的性能可以隨著佈植能量和劑量的增加而提高，而在佈植較大的能量和劑量下，較短的線長和較窄的線寬可使晶片達到較高的加熱溫度。
- (2) 在傳統的熱壓實驗中，在成形深寬比三以上的微結構時，根據材料和模仁之間的熱收縮應力大小的不同會使脫模產生微結構斷裂、傾倒或模仁毀損等不同程度的破壞。
- (3) 在材料從玻璃轉移溫度到脫模的降溫期間，施加適當的功率可以有有效的釋除因材料與模仁間的熱收縮應力，獲得良好無脫模破壞的微結構成形品，當施加功率在 25W 以上時，可以完整的脫模面積為 10.3mm X 8.8mm 的深寬比三和四的微結構，且皆具有良好的賦形性。
- (4) 在材料的收縮率方面，模仁施加功率以後可以有有效的改善成形材料整體收縮率不均勻的現象，並能抑制收縮量的增加。

本實驗尚有許多需改進和檢討的地方如下：

- (1) 在模仁製作方面：由於濕式蝕刻存在側向蝕刻的問題，因此在奈米等級的微結構模仁製作上勢必採用等向性蝕刻的方式來製作，如反應離子蝕刻或者感應耦合電漿蝕刻。
- (2) 模仁加熱線路的改進：在更大面積模仁的製作上，建議可以使用多組的加熱線路對成形區域做不同的溫度控制，減少成形材料因

冷卻產生的收縮現象，可以有效抑制材料收縮量的增加。

- (3) 在模仁的功能上：可整合江忠晉同學的溫度和壓力微感測器，對模仁表面溫度做即時的監控，由此可觀察模仁加熱溫度對材料熱收縮應力的影響。
- (4) 熱壓實驗方面：由於本實驗是使用開放式的熱壓方式，材料在熱壓的過程中會有側向的流動，使的壓力分佈由中心往邊緣方向會逐漸遞減，導致在未施加功率時成形微結構有收縮不均勻的現象，若改以封閉式的熱壓方式則材料所受到的正向壓力為一定值，可以有效的改善收縮率不均的現象，在此條件下對模仁施加功率與可完整脫模面積之間的關係可做更為精確的討論。



參考文獻

- [1] E. W. Becher, W. Ehrfeld, P. Haggmann, A. Maner and D. Munchmeyer, “Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process)”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 4, pp. 33-56, 1986.
- [2] 程建人，”微機電系統技術與應用”，行政院國家科學委員會精密儀器發展中心，民國 92 年 7 月。
- [3] H. Becker and U. Heim “Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 83, pp. 130-135, 1999.
- [4] M. Heckeke, W. Bacher, and K. D. Muller, “Hot embossing – The molding technique for plastic microstructures”, *Microsystem Technologies*, Vol. 4, pp. 122-124, 1998.
- [5] L. Weber, W. Ehrfeld, H. Freimuth, M. Lacher, H. Lehr, and B. Pech, “Micro molding – A powerful tool for the large scale production of precise microstructure”, *SPIE*. 2879, pp. 156-167, 1996.
- [6] J. Taniguchi, Y. Tokano, I. Miyamoto, M. Komuro and H. Hiroshima, “Diamond nanoimprint lithography”, *Nanotechnology*, Vol. 13, pp. 592-596, 2002.
- [7] J. Tao, Y. Chen, X. Zhao, A. Malik, and Z. Cui, “Room temperature nanoimprint lithography using a bilayer of HSQ /PMMA resist stack”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 78-79, pp. 665-669, 2005.
- [8] M. Bender, M. Otto, B. Hadam, B. Vratzov, B. Spangenberg, and H. Kurz, “Fabrication of nanostructures using UV-based imprint technique”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 53, pp.233-236, 2000.
- [9] P. B. Grabiec, M. Zaborowski, K. Domanski, T. Gotszalk b, and I. W.

- Rangelow, "Nano-width lines using lateral pattern definition technique for nanoimprint template fabrication", *Microelectronic Engineering*, Vol. 73-74, pp. 599-603, 2004.
- [10] M. D. Austin, H. Ge, W. Wu, M. Li, Z. Yu, D. Wasserman, S. A. Lyon, and S. Y. Chou, "Fabrication of 5 nm linewidth and 14 nm pitch features by nanoimprint lithography", *Applied physics letter*, Vol. 5299-5301, 2004.
- [11] Y. Y. Zhang, J. Zhang, G. Luo, X. Zhou, G. Y. Xie, T. Zhu, and Z. F. Liu, "Fabrication of silicon-based multilevel nanostructures via scanning probe oxidation and anisotropic wet etching", *Nanotechnology*, Vol. 16, pp. 422-428, 2005.
- [12] C. Perret, C. Gourgon, F. Lazzarino, J. Tallal, S. Landis and R. Pelzer, "Characterization of 8-in. wafers printed by nanoimprint lithography", *Microelectronic Engineering*, Vol. 73-74, pp. 172-177, 2004.
- [13] K. Seunarine, N. Gadegaard, M. O. Riehle and C. D. W. Wilkinson, "Optical heating for short hot embossing cycle times", *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 859-863, 2006.
- [14] H. D. Rowland and W. P. William, "Polymer deformation and filling modes during microembossing", *Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, pp. 1625-1632, 2004.
- [15] N. Roos, M. Wissen, T. Glinsner and H. C. Scheer, "Impact of vacuum environment on the hot embossing process", *Proceedings of SPIE*, Vol. 5037, pp. 211-218, 2003.
- [16] Y. Zhao, and T. Cui "Fabrication of high-aspect-ratio polymer-based electrostatic comb drives using the hot embossing technique", *Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, pp. 430-435, 2003.
- [17] X. C. Shan, T. Ikehara, Y. Murakoshi, and R. Maeda

- “Applications of micro hot embossing for optical switch formation”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 119, pp. 433-440, 2005.
- [18] C. G. Choi, “Fabrication of optical waveguides in thermosetting polymers using hot embossing”, *Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, pp. 945-949, 2004.
- [19] Y. Guo, G. Liu, Y. Xiong, X. Zhu, W. Jun, and Y. Tian, “Fabrication of LIGA mold insert using Ni-PTFE composite micro-electroforming”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 34 pp. 870-874, 2006.
- [20] O.V. Makarova, D. C. Mancini, N. Moldovan, R. Divan, C. M. Tang, D. G. Ryding, and R. H. Lee, “Microfabrication of freestanding metal structures using graphite substrate”, *Sensor and actuators A*, Vol. 103 pp. 182-186, 2003.
- [21] C. Zhang, C. Yang, and D. Ding, “Deep reactive ion etching of PMMA”, *Applied Surface Science*, Vol. 227 pp. 139-143, 2004.
- [22] Kim, Sangwon Park, Harish Manohara, and Jeong-Bong Lee, “Rapid replication of polymeric and metallic high aspect ratio microstructures using PDMS and LIGA technology”, *Microsystem Technologies*, Vol. 9, pp. 5-10, 2002.
- [23] K. Sato, M. Shikida, T. Yamashiro, M. Tsunekawa, and S. Ito, “Roughening of single-crystal silicon surface etched by KOH water”, *Sensor and Actuators A*, Vol. 73, pp. 122-130, 1999.
- [24] I. Zubel, I. Barycka, K. Kotowska, M. Kramkowska, “Silicon anisotropic etching in alkaline solutions IV The effect of organic and inorganic agents on silicon anisotropic etching process”, *Sensor and Actuators A*, Vol. 87, pp. 163-171, 2001.
- [25] I. Zubel and M. Kramkowska, “The effect of isopropyl alcohol on etching rate and roughness of (1 0 0) Si surface etched in KOH and TMAH solutions”, *Sensor and actuators A*, Vol. 93, pp. 138-147,

2001.

- [26] 賴文章，“微結構熱壓成形缺陷之探討”，國立交通大學碩士論文，民國 89 年。
- [27] 林威宇，“動態熱壓控制對微結構熱壓特性的影響既加工過程中聚丙烯的結晶特性的初步探討”，國立交通大學碩士論文，民國 92 年。
- [28] 黃重凱，“智慧型模仁的初步開發”，國立交通大學碩士論文，民國 92 年。
- [29] 蘇濬賢，“微機電系統化的模仁及其配套熱壓成形技術的開發”，國立交通大學碩士論文，民國 94 年。
- [30] Hong Xiao, “Introduction to semiconductor manufacturing technology”, Prentice Hall, 2004.
- [31] 張俊彥，鄭晃忠，“積體電路製程及設備技術手冊”，中華民國產業科技發展協進會，民國 86 年 7 月。
- [32] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, and H. Baumgartel, “Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions”, J. Electrochem. Soc., Vol. 137, pp. 3612–3632, 1990.
- [33] 劉士榮，“高分子流變學”，滄海書局，民國 94 年 2 月。
- [34] Zehev Tadmor and Costas G. Gogos, “Principles of Polymer Processing”, John Wiley&Sons, 1979.