

# 微冷卻器之製程技術研究

The research on the processing techniques of silicon micro-coolers

計畫編號：NSC 88-2218-E-032-002

執行期限：87 年 08 月 01 日至 88 年 07 月 31 日

主持人：楊龍杰 執行機構：淡江大學機械工程學系

E-mail：ljyang@mail.tku.edu.tw

## 一、中文摘要

本計劃配合「微冷卻器」之整合研究，製作符合要求之矽質 U 型垂直槽，作為熱沉式(heat-sink)或熱管式(heat-pipe)微冷卻器之熱交換管壁。基材(substrate)為 4 吋(110)矽晶；加工方式採體型微細加工(bulk-micromachining)之非等向性蝕刻法(anisotropic etching)與陽極鍵合法(anodic bonding)。為滿足(110)被蝕刻面底部粗糙度小於 1 微米之要求，因應不同之蝕刻深度(亦即不同微流道深寬比；aspect ratio)，分別使用 KOH 與 KOH+IPA 兩種系列之濕式腐蝕液，並發展(110)矽晶深度尺相關技術，監控微流道之深度。

關鍵詞：微冷卻器、非等向性蝕刻法、粗糙度、深度監控

## Abstract

This project focused on the development of the processing techniques using to fabricate the micro-coolers. The main job is to construct the U-grooves as the heat-exchanging parts of the heat-sink type or heat-pipe type micro-coolers. For satisfying the roughness requirement about the U-groove bottom of the etched (110) silicon samples, two kinds of etching system, KOH and KOH+IPA, were used. This project also explored a new method to monitor the height of micro channels from U-grooves.

**Keywords:** micro-cooler, anisotropic etching, roughness, depth-monitoring

## 二、緣由與目的

具氧化層保護之(110)矽晶上，若以{111}為主切面(primary flat)，並依之行光蝕刻術(photo-lithography)，將柵狀(gratings)的圖案轉寫至矽晶上，並將氧化層予以開洞後，概念上便可在 KOH 等非等向性蝕刻液中，蝕出垂直之 U 型凹槽。但此類體型微細加工，事實上要面臨兩大問題，以數微冷卻器系統設計之需求：

第一、如何營造出最高深寬比的 U 槽結構？〔1〕

第二、U 槽底部粗糙度是否合乎微通道流體特性要求？〔2〕

前者意味著 U 型凹槽可以加工多深，或最小槽寬為何；後者粗糙度之考量，係因為不平坦的底部激起之擾動，有可能誘導微通道之流動型態提早由層流(laminar flow)轉為紊流(turbulent flow)，或者拉長了非完全發展區(entrance region)距離，使二維層流分析模型之誤差增大。

## 三、結果與討論

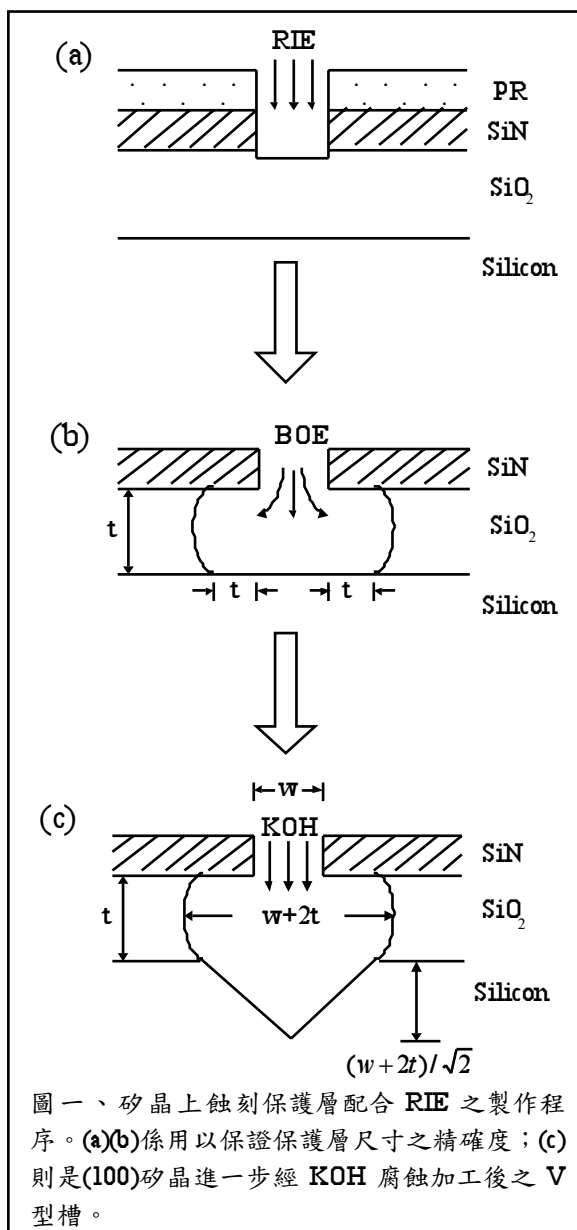
因應上述製作微流道之幾何外型需要，本計劃分別就各個體型加工課題之執行結果，討論如下：

### (一)蝕刻保護層之選定

本計劃採「LPCVD 氮化矽—二氧化矽—矽晶」的保護層配置。800°C 成長之 LPCVD 氮化矽 1000 Å 厚度，對類似條件之 KOH 腐蝕時間可拉長至 7 小時以上，極適合作為 KOH 之蝕刻罩幕；而底下之熱氧化層，擔任之角色則由蝕刻罩幕轉為中間介層（氮化矽表面不如氧化層緻密，可能

造成矽晶局部的單幕缺陷)，厚度也因之可減薄至 3000 Å 以下。

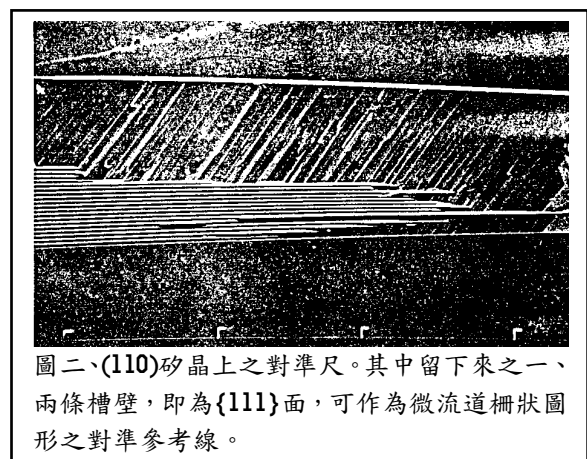
至於蝕刻保護層之開洞方式，係先以  $CF_4$  系列之活性離子乾蝕刻術 (RIE) 在 LPCVD 氮化矽完成圖形轉寫，以防止造成過大之側向尺寸 (undercut) 誤差。但  $CF_4$  系列電漿也能去除氧化層與矽晶，故 RIE 開洞過程停於氧化層之中間，剩下之氧化層厚度交給不傷及矽晶之 BOE 腐蝕液去除 (換言之，具有自動停止的效果，參照圖一之(a)(b))。RIE 設備與製程，係由台灣大學電機系半導體實驗室所提供。



## (二)(110)矽晶圓光蝕刻術中之[111]方向對準法

一般購買 (110) 矽晶時，可直接訂購到具 {111} 主切面的晶圓，其誤差可能在  $\pm 1^\circ$  左右。而 U 型槽之柵狀單幕圖案，只要順著主切面方向行光蝕刻轉寫，可粗略得到  $\pm 3^\circ$  以內之指向 (orientation) 準確度，具經驗的操作者甚至可以準確至  $\pm 2^\circ$  以內。然而對於大面積矽晶圓 (如 4" 以上) 之加工，意謂需要更佳之指向對準準確度，以保 U 型槽寬度符合設計之尺寸。

Ciarlo 等 [3] [4] 在製作栓扣式加速度計 (latching accelerometer) 時，曾發展一套 (110) 矽晶之扇形精確對準槽尺，使蝕刻單幕指向平行於 {111} 面  $\pm 0.2^\circ$  以內，而成功製成  $20 \mu m$  寬、 $200 \mu m$  高、 $2000 \mu m$  長之懸臂長樑 (long cantilever beam)。其方法是事先在 (110) 矽晶上作一次扇形槽列的 KOH 腐蝕，使槽列中不與 {111} 面對準之槽壁，盡被側向腐蝕殆盡 (undercut)；而留下來之一、兩條槽壁部份，再作為 U 型槽圖案之對準依據。圖二是依上述對準尺精神所製作之樣品。



## (三)非等向性蝕刻液之條件選定與穩定

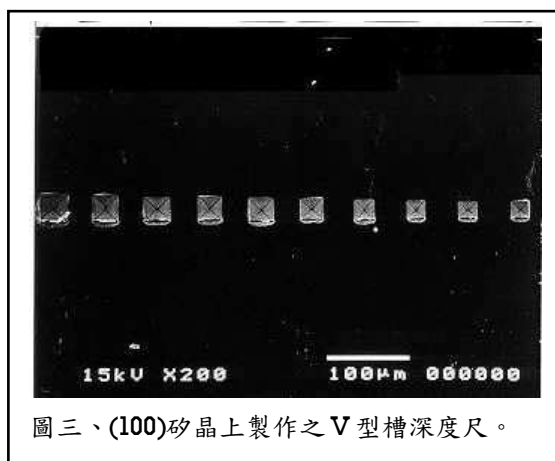
非等向性蝕刻液 KOH 系統之條件包括 KOH 水溶液濃度與溫度，另外為免除不確定因素，蝕刻實驗均不加上 IPA 以及攪拌(請參照粗糙度控制一節之討論。)本計劃使用的矽晶片為 4 吋、550 微米厚、n 型、電阻率(resistivity) 20~100 Ω/cm，表面粗糙度低於 100 埃。若以蝕刻率為考量，KOH 重量百分比在 20%~40% 是較佳選擇，溫度方面，則不宜低於 60 度 C。至於蝕刻率之快慢，可依(1)式之 Arrhenius 定律描述：

$$R=R_0 \cdot \exp(-E_a/kT) \quad (1)$$

其中 T 為絕對溫度(°K)，k 為波茲曼常數(0.8617×10<sup>-4</sup>eV/°K)。E<sub>a</sub> 與 R<sub>0</sub> 則為蝕刻參數，以 20%與 34%KOH 為例，<110>方向 E<sub>a</sub> 分別為 0.59eV 與 0.60eV，R<sub>0</sub> 則為 3.17×10<sup>10</sup>μm/h 與 3.66×10<sup>10</sup>μm/h。

#### (四) 用以監控 U 型垂直槽深度之 (110)矽晶深度尺研發

(100)矽晶之 V 型槽深度尺法 (depth ruler) [5] [6]，可成功控制壓力計薄膜至 μm 之解析度。其精神是利用{111}晶面之 V 型槽成形後寬度及深度成比例(√:1)的特性，事先在(100)矽晶正面蝕刻一系列深度(寬度)不一之 V 型槽列，然後從矽晶背面蝕刻壓力計薄膜之同時，也一併腐蝕一旁 V 型槽列下之背面區域，最後由何者 V 型槽(深度或厚度已知)被蝕穿，來判斷旁邊之壓力薄膜厚度是多少。圖三為(100)矽晶上製作之深度尺，可以監控 20~30μm 之薄膜厚度。



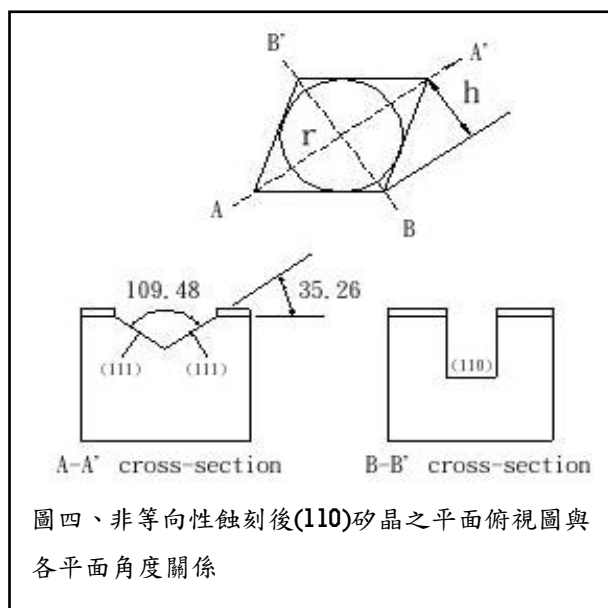
圖三、(100)矽晶上製作之 V 型槽深度尺。

(110)矽晶上也可以發展類似的 V 型深度尺法，來監控 U 型微通道之深度。圖四是非等向性蝕刻後(110)矽晶之平面俯視圖與各平面角度關係。而深度尺之圓形窗口半徑 r 與<110>矽晶片的蝕刻深度 h 之關係式如(2)式所示：

$$h = \frac{\sqrt{6}}{2} r \quad (2)$$

(110)矽晶深度尺成功前提是 KOH 蝕刻下的(110)底面要平整。另外，設計製作人對(110)矽晶之晶面指向必須很清楚(正、反面晶片有左手與右手指向之分)，以免加工不出所需之 V 型槽。當然，V 型槽深度尺列，必須設計加工於 U 型微通道之背面，且適當取距避開 U 型微通道之所在。

或言，加工過之微流道尺寸可直接使用測厚儀 (surface profiler or alpha-step) 量測。然而一般測厚儀有深度限制 (<300 微米)。且當 U 型通道過窄或太深，對測厚儀探針均造成妨礙，嚴重影響量測之可信度。更何況深度尺法尚有現場監控 (in-situ monitoring) 之功能，故。

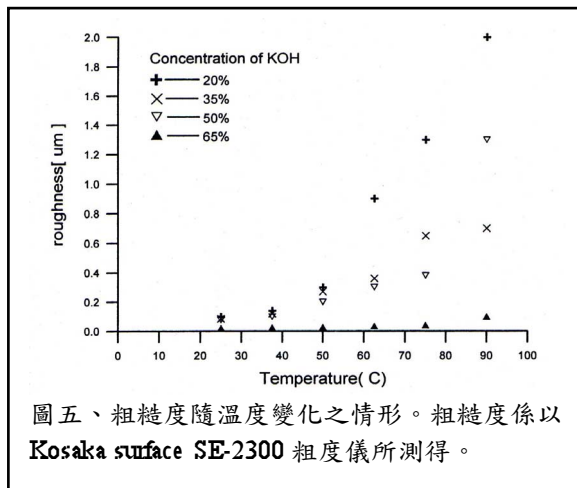


圖四、非等向性蝕刻後(110)矽晶之平面俯視圖與各平面角度關係

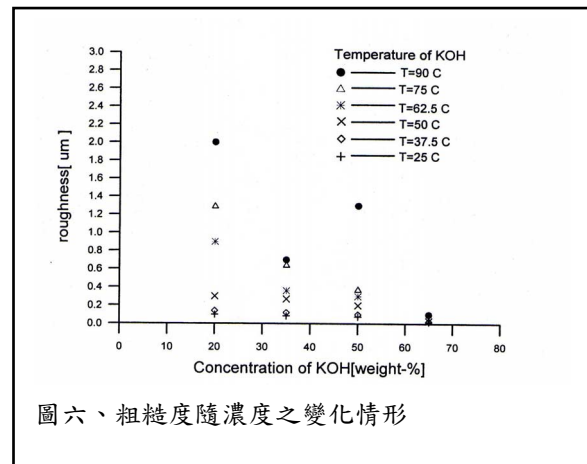
### (五) (110) 矽晶 U 型槽粗糙度控制

有關{110}晶面之蝕刻粗糙度改進問題，本計劃由圖五與圖六結果中，歸結出以下論點：

1. 蝕刻液溫度與濃度，影響非等向性(anisotropy)，即{111}與其它晶面之蝕刻率比值。但{110}晶面加工粗糙度不與非等向性有最直接的關係。
2. 欲改善{110}矽晶面粗糙度，意謂{110}晶面之蝕刻速率必須減慢。由圖四之粗糙度量測結果，發現藉由調高 KOH 濃度，配合不要加入異丙醇 (IPA；一般用以精進{111}面之粗糙度) [7]，可使{110}面之蝕刻率略於{100}面 [8]；但對於其他晶面 (high index surface)，例如{211}、{311}等晶面之蝕刻率如何控制而小於{110}面之蝕刻率，便不易辦到。
3. 深的 U 型微通道，其中隱涵著未明之低雷諾數流動行為，故底部溼蝕刻之質量擴散機制，要受到被加工面本身幾何外形之影響。一般 (100) 矽晶用得到的蝕刻液攪動 (stirring，促使蝕刻液溫度、濃度均勻)，在此地根本無法促進蝕刻液進入微通道內，反而提早破壞頂部蝕刻保護層之邊緣，故建議不用之。



圖五、粗糙度隨溫度變化之情形。粗糙度係以 Kosaka surface SE-2300 粗度儀所測得。



圖六、粗糙度隨濃度之變化情形

### 四、計畫成果自評

本計畫本是 87-88 年「微冷卻器」整合計劃之第三子計劃。雖然總計劃未獲通過，但本製程研究仍繼續執行，以配合 89 年度以後淡大微機電計劃執行所需技術。具體成果歸結如下：

- (一) 成功發展 (110) 矽晶圓光蝕微影對準尺，供製作垂直 U 型槽所需之對準依據。其與{111}面之對準誤差可縮至  $\pm 0.2^\circ$  以內。
- (二) 成功發展穩定之矽晶非等向性腐蝕系統，含 KOH 與 KOH+IPA 兩類，以 KOH 濃度 34%，溫度  $75^\circ\text{C}$  較適用於 (110) 矽晶上垂直 U 型槽之製作。
- (三) 發展監控 U 型垂直槽深度之 (110) 矽晶深度尺，其解析度理論上可達到微米，但前提是蝕刻面之粗糙度需達 0.5 微米。
- (四) 建立了 (110) 矽晶 U 型槽之蝕刻面粗糙度資料庫，可供進一步探討非等向性腐蝕加工時，其粗糙度改善之研究使用。

### 五、參考文獻

- [1] E. Bassous, "Fabrication of Novel 3-D Micro-structure by the An-isotropic Etching of (100) & (110) Silicon", IEEE Trans. Elect. Dev., v. ED-25, pp.1178-1184 (1978).

- [2] P. Krause and E. Obermeyer, "Etch Rate and Surface Roughness of Deep Narrow U-Grooves in (110)-oriented Silicon", *J. of Micro-mechanics and Micro-engineering*, v.5, pp.112-114 (1992).
- [3] 潘世淦, "以(110)矽晶片溼蝕刻技術製造加速度計與散熱片", 國立台灣大學電機工程學研究所碩士論文, 指導教授呂學士, 民國八十四年六月。
- [4] D.R. Ciarlo, "A Latching accelerometer fabricated by the an-isotropic etching of (110) oriented silicon wafer", *J. Micromech. Microeng.*, v.2, pp.10-13 (1992).
- [5] L.J. Yang(楊龍杰), P.Z. Chang(張培仁), and C.C. Chiang(江振家), "The Application of V-Groove Slot-Array Method to the Piezoresistive Pressure Sensor", *J. of the Chinese Institute of Engineers*, v.20, n.3, pp.335-341 (1997).
- [6] L.J. Yang and P.Z. Chang, "A Method Using V-Grooves to Monitor the Thickness of Silicon Membrane with  $\mu\text{m}$  Resolution", *J. Micromech. Microeng.*, v.8, n.3, pp.182-187 (1998).
- [7] I. Barycka and I. Zobel, "Silicon An-isotropic Etching in KOH-IPA Etchant", *Sensors and Actuators A*, v.48, pp.229-238 (1995).
- [8] 黃慶安, 矽微機械加工技術, 第三章, (大陸北京)科學出版社, 1996年。