

國立臺灣大學工學院應用力學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Applied Mechanics


College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

石英單晶蝕刻行為研究與振盪器設計

Etching-behavior Study of Single Crystal Quartz and
Design of Quartz Resonator



葉幸芳

Yeh, Hsing-Fang

指導教授：張家歐 博士 張簡文添 博士

Advisor: Chia-Ou Chang, Ph.D. Wen-Tian Chang Chein, Ph.D

中華民國 99 年 7 月

July, 2010

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

石英單晶蝕刻行為與振盪器設計

Etching-behavior Study of Single Crystal Quartz
and Design of Quartz Resonator

本論文係葉幸芳君（學號：R97543021）在國立臺灣大學應用力學研究所完成之碩士學位論文，於民國 99 年 7 月 28 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

張家歐 張家歐 張簡文添 張簡文添

(指導教授)
謝發華 謝發華

陳柏志 陳柏志

所 長

張建成 張建成

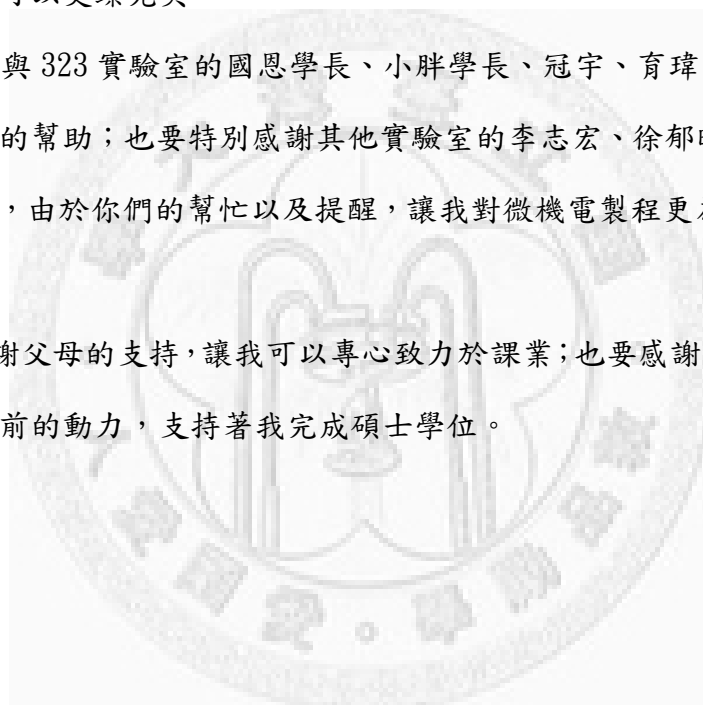
誌謝

光陰如箭，論文的撰寫到了一個段落，研究所生活也要畫上句點。在應力所的兩年時間中，最感謝的就是指導教授張家歐博士的悉心指導以及生活上的處處關懷；還要感謝張簡文添博士的傾囊相授，兩年來高雄台北兩地奔波，給予我許多的建議與幫助。

口試期間，承蒙謝發華博士與陳柏志博士的細心指正，點出了論文中缺失，而使我的論文可以更臻完美。

感謝 418 與 323 實驗室的國恩學長、小胖學長、冠宇、育璋、忠翰、鈞策，以及學弟妹們的幫助；也要特別感謝其他實驗室的李志宏、徐郁晴、秦懷安、鈺閔哥與俊傑哥，由於你們的幫忙以及提醒，讓我對微機電製程更為熟悉，實驗才能順利完成。

最後，感謝父母的支持，讓我可以專心致力於課業；也要感謝家人們的鼓勵，那成為了我向前的動力，支持著我完成碩士學位。



摘要

本論文的目的在於研究 $(ZYw)+2^\circ$ 低溫石英晶圓(α -Quartz)的蝕刻行為、石英振盪器設計與製程的規劃。利用門字型蝕刻圖案，來研究石英的蝕刻行為如蝕刻速率、底缺面的米勒指標。藉由各蝕刻面的夾角相互關係，來決定晶格面米勒指標(或方向)；使用二維蝕刻理論，量測蝕刻後的晶格面長度變化率來計算晶格面的蝕刻速率。利用實驗所求得的數據，設計雙端固定式石英振盪器的幾何結構與尺寸，與設計製程上所需的光罩圖形尺寸，使其第一彎曲模態的自然頻率達到35kHz。

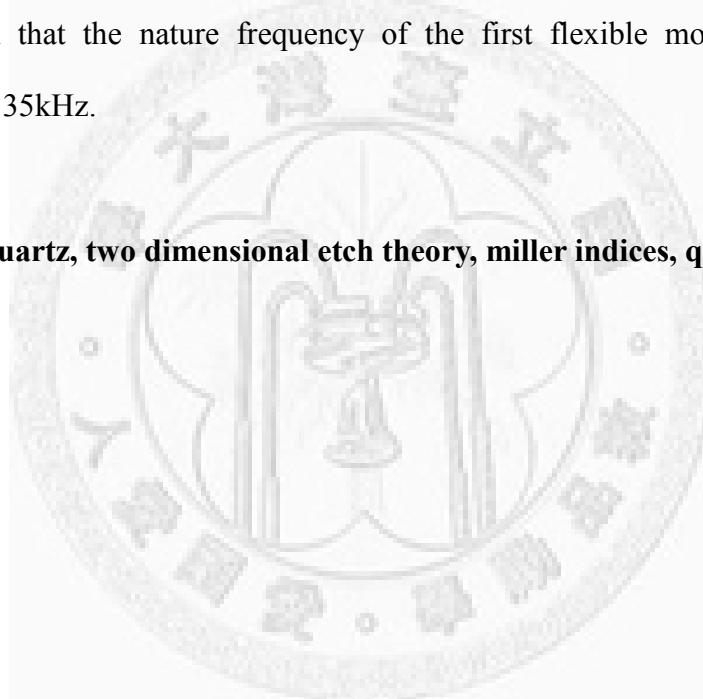
關鍵詞： 低溫石英、二維蝕刻理論、米勒指標、石英振盪器



Abstract

The purpose of this thesis is to study the etching behavior of $(ZYw)+2^\circ$ α -quartz. We can decide miller indices of lattice planes of etched quartz by measuring the intersecting angles between lattice planes. Using the two dimensional etch theory and measuring the time rate of length can calculate the etch rates of lattice planes. In this thesis, we also design the geometry and size of double-ended tuning fork quartz resonator such that the nature frequency of the first flexible mode matches the requirement of 35kHz.

Keyword: α -quartz, two dimensional etch theory, miller indices, quartz oscillator



目錄

| | |
|--|-----|
| 摘要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 目錄..... | III |
| 圖目錄..... | V |
| 表目錄..... | IX |
| 第壹章 導論..... | 1 |
| 1.1 前言..... | 1 |
| 1.2 文獻回顧..... | 2 |
| 1.3 本文目的與章節摘要..... | 7 |
| 第貳章 石英材料特性..... | 8 |
| 2.1 石英基本性質..... | 8 |
| 2.2 石英晶體的切角..... | 10 |
| 第參章 米勒-布拉法斯指標與蝕刻速率理論..... | 12 |
| 3.1 晶面米勒指標..... | 12 |
| 3.1.1 米勒指標定義..... | 12 |
| 3.1.2 $(ZYt)+2^\circ$ 石英米勒-布拉法斯指標..... | 12 |
| 3.2 蝕刻長度變化率與蝕刻速率關係..... | 17 |
| 3.2.1 濕式蝕刻速率理論..... | 17 |
| 3.2.2 利用內凹角隅理論量測石英蝕刻速率..... | 24 |
| 第肆章 實驗製程規劃..... | 27 |
| 4.1 蝕刻製程概要..... | 27 |
| 4.2 實驗步驟..... | 29 |
| 第伍章 實驗觀測與結果分析..... | 34 |
| 5.1 實驗量測結果..... | 34 |

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 5.2 | 計算晶格面米勒-布拉法斯指標 | 58 |
| 5.3 | 利用內凹角隅理論公式計算晶格面蝕刻速率 | 62 |
| 5.4 | 微型石英振盪器尺寸設計 | 66 |
| 第陸章 | 石英振盪器製程規劃 | 72 |
| 6.1 | 石英振盪器製程步驟規劃 | 72 |
| 6.1.1 | 製作石英振盪器外型 | 72 |
| 6.1.2 | 製作石英振盪器驅動電極 | 75 |
| 6.2 | 石英振盪器光罩設計與分析 | 78 |
| 6.2.1 | 設計石英振盪器外型光罩 | 78 |
| 6.2.2 | 設計石英振盪器電極光罩 | 91 |
| 第柒章 | 結論 | 93 |
| 參考文獻 | | 94 |
| 附錄 A | 實驗材料與儀器 | 96 |
| 附錄 B | 實驗各項參數 | 97 |

圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 1-1 Klass Hjort 使用 ^{129}Xe 蝕刻 AT-cut 石英[1]..... | 3 |
| 圖 1-2 Hedlund 使用 HF 與 NH_4F 蝕刻 Z-cut 石英[4]..... | 3 |
| 圖 1-3 石英振盪器類型(a)Paros,(b)Serra[8]..... | 4 |
| 圖 1-4 石英振盪器類型(a)Kirman,(b)EerNisse[8]..... | 5 |
| 圖 1-5 壓電石英晶體振盪器的結構示意圖..... | 5 |
| 圖 1-6 溫度變化與 Z-Cut 旋轉角度的頻率變化曲線圖[9]..... | 6 |
| 圖 2-1 低溫石英晶胞示意圖..... | 8 |
| 圖 2-2 左旋及右旋石英示意圖[11]..... | 9 |
| 圖 2-3 Z 板人工石英與各種切斷面[12]..... | 10 |
| 圖 2-4 選擇石英震盪器切角..... | 11 |
| 圖 3-1 四軸座標系..... | 12 |
| 圖 3-2 石英晶體三軸座標系與四軸座標系關係圖[11]..... | 13 |
| 圖 3-3 $(ZYw)+2^\circ$ 座標系統與石英晶體三軸座標系關係圖..... | 14 |
| 圖 3-4 量測角度示意圖..... | 15 |
| 圖 3-5 四軸座標截距示意圖..... | 16 |
| 圖 3-6 平面蝕刻後仍維持平面且其長度不變示意圖..... | 17 |
| 圖 3-7 兩個晶格面構成一個角隅..... | 17 |
| 圖 3-8 內凹角隅經過微小時間蝕刻後其長度變化之示意圖[14]..... | 18 |
| 圖 3-9 多個內凹角隅經過微小時間蝕刻後其長度變化之示意圖[14]..... | 19 |
| 圖 3-10 內凹角隅經過微小時間蝕刻後有新面出現之長度變化之示意圖[14]..... | 20 |
| 圖 3-11 外凸角隅經過微小時間蝕刻後其長度變化之示意圖[14]..... | 21 |
| 圖 3-12 多個外凸角隅經過微小時間蝕刻後其長度變化之示意圖[14]..... | 22 |
| 圖 3-13 外凸角隅經過微小時間蝕刻後有新面出現之長度變化之示意圖[14]..... | 23 |
| 圖 3-14 實驗光罩圖形示意圖..... | 25 |

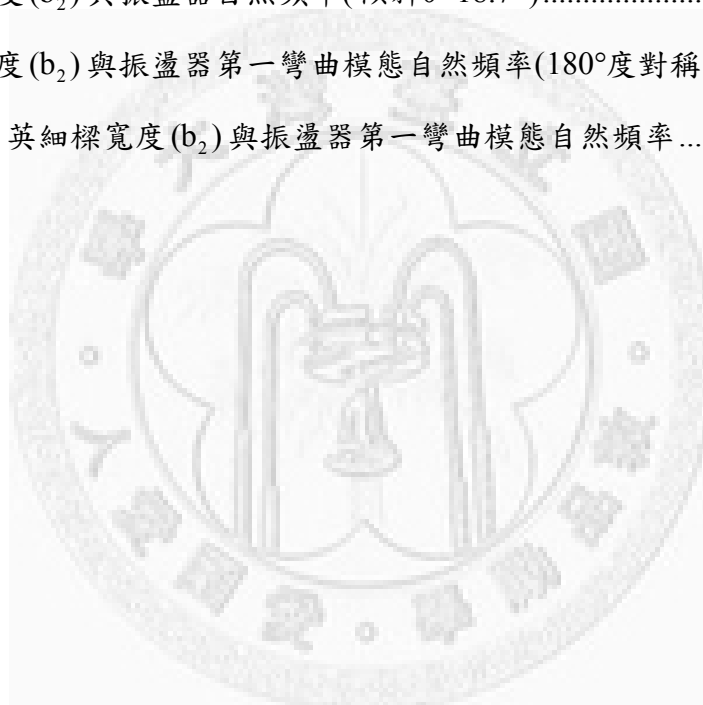
| | |
|--|----|
| 圖 3-15 五個底切面與六個角度示意圖 | 26 |
| 圖 4-1 實驗光罩圖形 | 28 |
| 圖 5-1 旋轉角度(φ)與剖面各參數示意圖 | 35 |
| 圖 5-2 $\varphi=0^\circ$ 之剖面圖 | 36 |
| 圖 5-3 $\varphi=0^\circ$ 之量測剖面圖 | 36 |
| 圖 5-4 $\varphi=5^\circ$ 之量測剖面圖 | 37 |
| 圖 5-5 $\varphi=10^\circ$ 之量測剖面圖 | 37 |
| 圖 5-6 $\varphi=195^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=15^\circ$ 為鏡射對稱 | 38 |
| 圖 5-7 $\varphi=20^\circ$ 之量測剖面圖 | 38 |
| 圖 5-8 $\varphi=25^\circ$ 之量測剖面圖 | 39 |
| 圖 5-9 $\varphi=40^\circ$ 之量測剖面圖 | 39 |
| 圖 5-10 $\varphi=225^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=45^\circ$ 為鏡射對稱 | 40 |
| 圖 5-11 $\varphi=230^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=50^\circ$ 為鏡射對稱 | 40 |
| 圖 5-12 $\varphi=235^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=55^\circ$ 為鏡射對稱 | 41 |
| 圖 5-13 $\varphi=240^\circ$ 之量測剖面圖與 $\varphi=60^\circ$ 為鏡射對稱 | 41 |
| 圖 5-14 $\varphi=65^\circ$ 之量測剖面圖 | 42 |
| 圖 5-15 $\varphi=250^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=70^\circ$ 為鏡射對稱 | 42 |
| 圖 5-16 $\varphi=75^\circ$ 之量測剖面圖 | 43 |
| 圖 5-17 $\varphi=80^\circ$ 之量測剖面圖 | 43 |
| 圖 5-18 $\varphi=265^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=85^\circ$ 為鏡射對稱 | 44 |
| 圖 5-19 $\varphi=90^\circ$ 之量測剖面圖 | 44 |
| 圖 5-20 $\varphi=95^\circ$ 之量測剖面圖 | 45 |
| 圖 5-21 $\varphi=100^\circ$ 之量測剖面圖 | 45 |
| 圖 5-22 $\varphi=105^\circ$ 之量測剖面圖 | 46 |
| 圖 5-23 $\varphi=110^\circ$ 之量測剖面圖 | 46 |
| 圖 5-24 $\varphi=115^\circ$ 之量測剖面圖 | 47 |

| | |
|--|----|
| 圖 5-25 $\varphi=125^\circ$ 之量測剖面圖 | 47 |
| 圖 5-26 $\varphi=130^\circ$ 之量測剖面圖 | 48 |
| 圖 5-27 $\varphi=135^\circ$ 之量測剖面圖 | 48 |
| 圖 5-28 $\varphi=140^\circ$ 之量測剖面圖 | 49 |
| 圖 5-29 $\varphi=145^\circ$ 之量測剖面圖 | 49 |
| 圖 5-30 $\varphi=150^\circ$ 之量測剖面圖 | 50 |
| 圖 5-31 $\varphi=335^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=155^\circ$ 為鏡射對稱..... | 50 |
| 圖 5-32 $\varphi=340^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=160^\circ$ 為鏡射對稱..... | 51 |
| 圖 5-33 $\varphi=345^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=165^\circ$ 為鏡射對稱..... | 51 |
| 圖 5-34 $\varphi=170^\circ$ 之量測剖面圖 | 52 |
| 圖 5-35 $\varphi=175^\circ$ 之量測剖面圖 | 52 |
| 圖 5-36 $\varphi=0^\circ$ 之左邊外凸角隅..... | 53 |
| 圖 5-37 $\varphi=0^\circ$ 之右邊外凸角隅..... | 53 |
| 圖 5-38 $\varphi=90^\circ$ 之左邊外凸角隅..... | 54 |
| 圖 5-39 $\varphi=90^\circ$ 之右邊外凸角隅..... | 54 |
| 圖 5-40 旋轉角度(φ)與 θ_a 、 θ_c 關係圖 | 55 |
| 圖 5-41 旋轉角度(φ)與 L_A 、 L_B 關係圖 | 55 |
| 圖 5-42 旋轉角度(φ)與 L_C 、 L_D 關係圖 | 56 |
| 圖 5-43 壓電石英晶體振盪器的結構示意圖 | 66 |
| 圖 5-44 石英振盪器與晶圓方向示意圖 | 66 |
| 圖 5-45 石英振盪器剖面形狀示意圖(傾斜 3.2° 、 18.7°)..... | 67 |
| 圖 5-46 石英振盪器剖面形狀示意圖(傾斜 0° 、 18.7°)..... | 68 |
| 圖 5-47 石英振盪器剖面形狀示意圖(180° 度對稱)..... | 69 |
| 圖 5-48 Z-cut 石英振盪器剖面形狀示意圖..... | 70 |
| 圖 6-1 未蝕刻前金屬層位置示意圖 | 79 |
| 圖 6-2 $\varphi=90^\circ$ 之量測剖面圖 | 80 |

| | |
|---|----|
| 圖 6-3 第一階段蝕刻後剖面示意圖 | 80 |
| 圖 6-4 第一階段蝕刻後減化圖形 | 81 |
| 圖 6-5 第二階段蝕刻後剖面示意圖 | 82 |
| 圖 6-6 第三階段蝕刻後剖面示意圖 | 84 |
| 圖 6-7 石英振盪器光罩尺寸圖 | 84 |
| 圖 6-8 偏移補償金屬位置示意圖 | 85 |
| 圖 6-9 偏移補償後蝕刻剖面示意圖 | 85 |
| 圖 6-10 Z-cut 石英在 $\varphi = 90^\circ$ 的蝕刻結果 | 87 |
| 圖 6-11 Z-cut $\varphi = 90^\circ$ 之左邊外凸角隅 | 88 |
| 圖 6-12 Z-cut $\varphi = 90^\circ$ 之右邊外凸角隅 | 88 |
| 圖 6-13 Z-cut 石英第一階段蝕刻後剖面示意圖 | 89 |
| 圖 6-14 Z-cut 石英第二階段蝕刻後剖面示意圖 | 90 |
| 圖 6-15 Z-cut 石英第三階段蝕刻後剖面示意圖 | 91 |
| 圖 6-16 使用 Z-cut 石英振盪器光罩尺寸圖 | 91 |
| 圖 6-17 石英振盪器上下電極圖 | 92 |
| 圖 6-18 石英振盪器電極圖，左圖為立體電極圖，右圖為細樑截面電極圖 | 92 |
| 圖 6-19 影子光罩實體 | 92 |

表目錄

| | |
|---|----|
| 表 4-1 AZ4620 厚膜光阻塗佈參數..... | 31 |
| 表 5-1 (ZYw)+2° 石英晶圓於 HF:NH ₄ F=2:3，55°C 下 晶格夾角與晶格長度... | 57 |
| 表 5-2 (ZYw)+2° 石英晶圓於 HF:NH ₄ F=2:3，55°C 下 晶格指標..... | 59 |
| 表 5-3 (ZYw)+2° 石英晶圓於 HF:NH ₄ F=2:3，55°C 下 蝕刻速率表..... | 63 |
| 表 5-4 細樑寬度 (b ₂) 與振盪器自然頻率(傾斜3.2°~18.7°)..... | 68 |
| 表 5-5 細樑寬度 (b ₂) 與振盪器自然頻率(傾斜0°~18.7°)..... | 68 |
| 表 5-6 細樑寬度 (b ₂) 與振盪器第一彎曲模態自然頻率(180°度對稱)..... | 69 |
| 表 5-7 Z-cut 石英細樑寬度 (b ₂) 與振盪器第一彎曲模態自然頻率..... | 71 |



第壹章、導論

1.1 前言：

石英元件的應用歷史可以追溯自西元 1921 年美國學者 Walter G. Cady 發明了石英晶體振盪器，而後 Warren Marrison 與日本著名的鐘錶製造商 Seiko 集團先後發明了石英鐘以及指針式石英錶，開啟了石英元件的廣大應用；早期石英元件應用主要都以鐘錶產業為主，近年來則因為無線通訊的發展，石英開始應用在資訊、通訊及消費性電子產業，目前則大多使用在無線電話、行動電話、衛星定位接收器、個人電腦、筆記型電腦上。

石英晶體振盪器是利用石英晶體的壓電效應製成的一種諧振元件，因為有抵抗外在干擾的能力強、較好的抗老化能力與穩定性、訊號可以長距離的傳輸、體積小易攜帶等優點，因此被廣泛的應用在各個不同的工業領域，如石英手錶、個人通訊器系統、個人電腦主機板、儀器電路板。

隨著現在個人通訊系統要求越來越輕薄，石英振盪器的尺寸也被要求需要微小化，使用微機電製程製作石英振盪器也漸漸成為研究方向；然而石英材料並沒有完整的濕式蝕刻資料庫提供其蝕刻行為的各項參數。本論文即是利用微機電技術來探討石英晶圓的濕蝕刻行為，計算石英蝕刻晶面米勒指標及濕蝕刻速率；利用實驗數據可以計算出第一彎曲模態頻率為 35KHz 的微型石英振盪器尺寸，並設計製作石英振盪器的製程。

1.2. 文獻回顧

微機電技術，是使用電子電路或半導體製程來製做出微小化精密機械的技術統稱，包含了黃光微影術、金屬薄膜沉積、介電質沉積、蝕刻等技術。其中的蝕刻製程，可以利用化學或是物理方法來去除晶圓上沒有被沉積層或光阻所覆蓋保護的部分，以達到元件微結構定義以及圖形轉移的功能。

蝕刻技術主要分為兩種：乾式蝕刻以及濕式蝕刻。乾式蝕刻可以再分為物理性的離子撞擊反應以及化學性的分解基材反應，來分別移除晶圓基材；其優點是能蝕刻出細微且垂直的線條圖形。濕式蝕刻主要是利用化學溶液來溶解晶圓表面基材，具有較好的選擇性以及較高的蝕刻速率，濕式蝕刻的蝕刻速率與其蝕刻溶劑的溫度、濃度及參雜物有非常大的相關性，一般常用的蝕刻溶液有氫氟酸(HF)、硝酸(HNO₃)、氫氧化鉀(KOH)等。相對於乾式蝕刻，濕式蝕刻因為不需要真空、射頻以及空氣輸送系統，因此其成本便宜很多。

在乾式蝕刻石英的研究上，1996年 Klass Hjort, Greger Thornell 等人[1]，使用離子撞擊法來蝕刻石英晶體，利用¹⁹⁷Au與¹²⁹Xe重離子撞擊 AT-cut 與 Z-cut 石英以得到想要的圖案，此種蝕刻方式雖然有較好的蝕刻垂直面，但蝕刻表面較粗糙，如圖 1-1。1997年 Thornell[2]同樣使用¹²⁹Xe離子蝕刻 Z-cut 石英，進而提出乾蝕刻製程方法來製作單音叉石英振盪器，並同時提出溼式蝕刻方法來蝕刻石英。2000年 Thornell[3]提出使用¹²⁹Xe離子蝕刻 X-cut 石英並製作石英振盪器的方法。

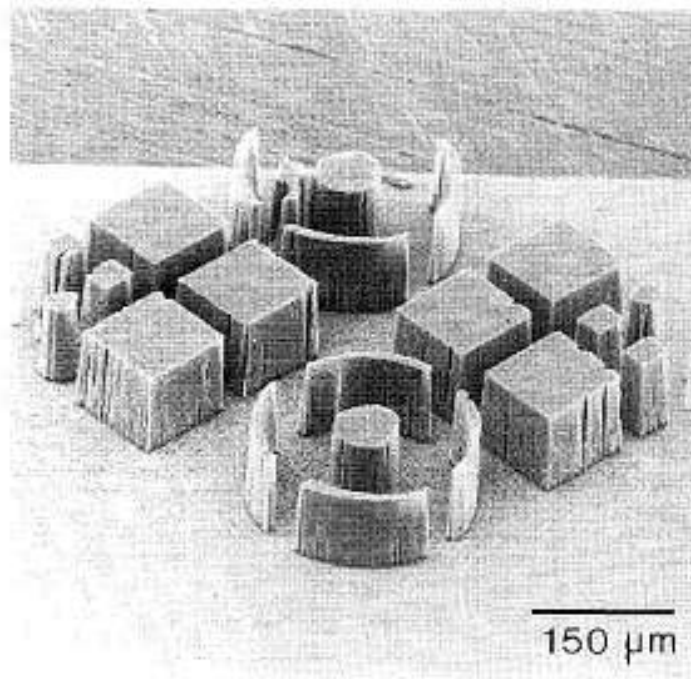


圖 1-1 Klass Hjort 使用 ^{129}Xe 蝕刻 AT-cut 石英[1]

在濕式蝕刻石英的研究上，1993 年 Hedlund 等人[4]研究 Z-cut 溼式蝕刻的行為。他們以不同的 HF 與 NH_4F 比例與溫度條件進行濕蝕刻，瞭解溫度、蝕刻液濃度對 Z-cut 蝕刻速率的變化與側向蝕刻的情況。如圖 1-2，與乾蝕刻相比較，溼式蝕刻的蝕刻垂直面較差，但表面較光滑。Lee[5,6,7]在 2001 與 2002 年分別提出以溼蝕刻製程方法來製作單音叉石英振盪器方法。

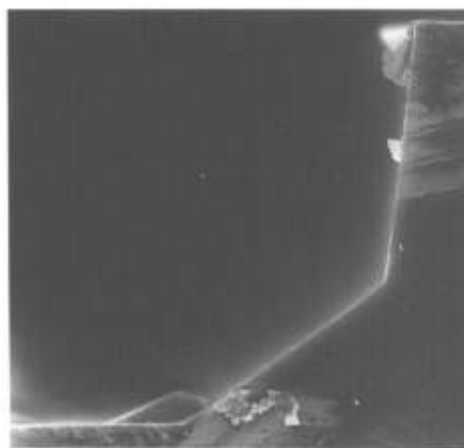
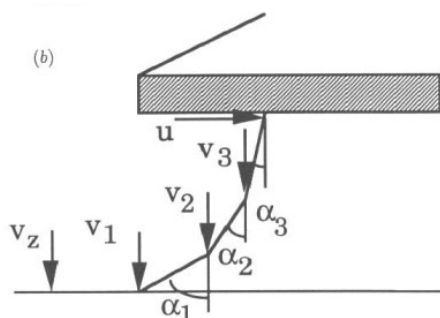


圖 1-2 Hedlund 使用 HF 與 NH_4F 蝕刻 Z-cut 石英[4]

製做微型石英振盪器時，石英振盪器外型種類以及尺寸都會導致其共振頻

率的不同。石英振盪器可分為單邊固定以及雙邊固定兩種。單邊固定的石英振盪器具有高穩定性的共振頻率，可應用於鐘錶等計時器，如單音叉式振盪器。雙邊固定的石英振盪器則可應用在加速度的量測，R. M. Langdon [8]整理出有以下幾種雙邊固定的石英振盪器：

- I. 單一樑水平振盪的石英振盪器：Karrer and Leach 1969, Karrer 1977, Paros 1975 均發表過此設計模型，圖 1-3(a)為 Paros 在 1975 年所發表的石英振盪器。
- II. 雙樑水平異向振盪的石英振盪器：Serra 在 1968 年發表此種設計，如圖 1-3(b)；EerNisse 在 1975 年提出了改良後的設計，如圖 1-4(b)，讓石英振盪器的穩定性更高。
- III. 雙樑垂直異向振盪的石英振盪器：Kirman 在 1982 年提出的設計，如圖 1-4(a)，此設計的優點是在裝置點可以抵消彎曲力矩以及剪力的作用，並且在兩端的支撐架上只有非常微小的振動能量施加。

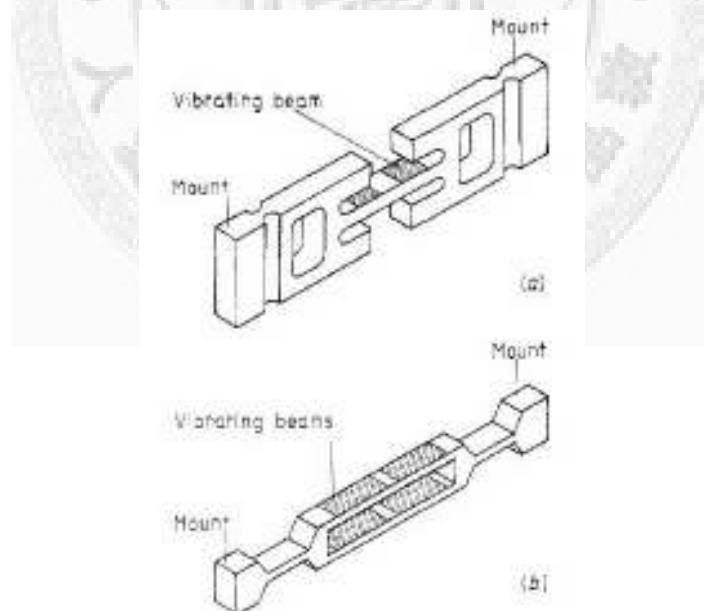


圖 1-3 石英振盪器類型(a)Paros,(b)Serra [8]

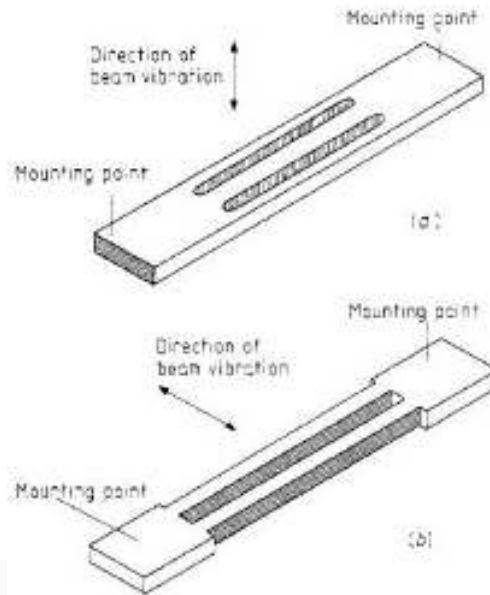


圖 1-4 石英振盪器類型(a)Kirman,(b)EerNisse [8]。

本文所探討的石英振盪器為雙端固定音叉式(Double-ended tuning fork, DETF)石英振盪器，此類型為 EerNisse 在 1975 年提出的版本。圖 1-5 為本文所研究的石英振盪器結構圖，主要分為兩個部分，在外側的兩個對稱區域(A)為質量塊(Proof Mass)，質量塊中間以兩條細長狀區域(B)連接。



圖1-5 壓電石英晶體振盪器的結構示意圖

E. D. Reedy[9]於 1990 年發表的文獻中，提到關於溫度對 DETF 石英振盪器共振頻率的影響。在不同工作溫度環境下，分別對 Z-cut 石英的幾種旋轉切角，量測其溫度對頻率變化的影響，如圖 1-6，發現使用 Z-cut 對 X 軸旋轉 2 度的石英晶圓，在工作溫度下對於溫度敏感度較低，頻率變化最為平緩而穩定，故以此切割角度下的石英晶片，較為適合應用於 DETF 石英振盪器。

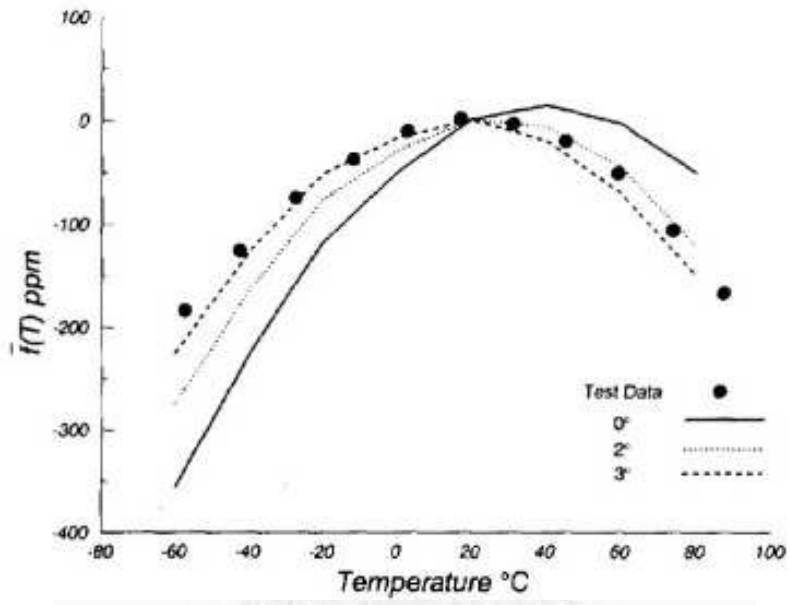


圖 1-6 溫度變化與 Z-Cut 旋轉角度的頻率變化曲線圖[9]



1.3. 本文目的與章節概要

本論文是利用微機電製程及濕式蝕刻來探討石英晶圓的蝕刻行為，計算出蝕刻面之米勒指標及蝕刻速率，並設計第一彎曲模態頻率為 35KHz 的雙端固定微型石英振盪器的尺寸與製程。

論文的第二章將會先簡單介紹石英晶體及其晶格，並定義不同方向切角的石英晶圓名稱。

論文第三章介紹了利用蝕刻面的角度來決定石英晶面之正確米勒指標方法，並說明蝕刻速率理論以及石英蝕刻速率計算方法。

論文第四章介紹實驗概要流程，以及詳細的實驗製程，實驗完成後再利用光學顯微鏡並配合量測軟體 measure tools 來量測蝕刻面的長度以及角度。

論文第五章為實驗量測結果與分析，利用量測長度與角度結果，決定蝕刻面的正確米勒指標；再搭配內凹角隅理論公式，求出蝕刻晶面正確的蝕刻速率。利用實驗的蝕刻結果，設計微型石英振盪器尺寸，使其第一彎曲模態自然頻率為 35kHz。

論文第六章為微型石英振盪器的製程規劃，利用實驗的蝕刻結果來決定製程參數，並設計實驗光罩圖形。

論文最後一章會對本文作一完整的結論與未來展望。

第貳章、 石英材料特性

2.1 石英基本性質

石英為大自然中常見的礦物，在地殼中含量約為 12%，通常為無色透明至白色，常見的石英多為塊狀體，具良好且透明之結晶外形者稱為水晶。石英的化學成分為二氧化矽(SiO_2)，屬於六方晶系，硬度為 7，比重為 2.66，折射率為 1.54 至 1.55。石英晶體可以分為兩種：低溫石英(low quartz、 α -quartz)以及高溫石英(high quartz、 β -quartz)，本文所探討的為低溫石英，其晶體結構低於 573°C 就趨於穩定。低溫石英的晶胞如圖 2-1，晶格長度 $a=b=4.9135$ 、 $c=5.4050$ ；晶軸 a_1 、 a_3 夾角 $\alpha=90^\circ$ ， a_2 、 a_3 夾角 $\beta=90^\circ$ ， a_1 、 a_2 夾角 $\gamma=120^\circ$ [10]。

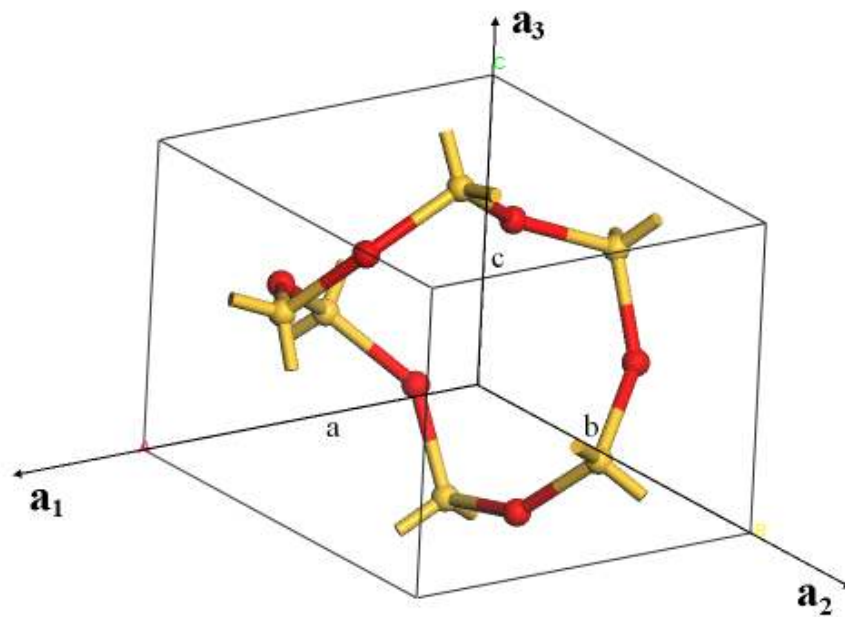


圖 2-1 低溫石英晶胞示意圖

石英的理想外型有 30 個晶體面，大致上可以分為五種晶面，m 面、R 面、r 面、s 面和 x 面如圖 2-2，但實際上，天然石英晶體的晶面一般不會全部出現。低溫石英晶體屬於 Class 32 的對稱性，其中的 3 表示對 Z 軸旋轉 120° 後晶格外型仍與未旋轉前相同，由圖 2-2，可觀察到圖中三個 X 軸交角各為 120° ；Class 32

中的 2 即是對 X 軸旋轉 180° 後，晶格外型與未旋轉前相同。在座標軸定義時，須要先定義出 Z 軸方向，Z 軸即為三重旋轉軸；第二步則定義 X 軸方向，Class 32 有三條二重旋轉軸，分別各夾 120° 角且與 Z 軸垂直；定義出 X 軸後，Y 軸方向則由已定義的 X、Z 軸經由右手定則來定義。

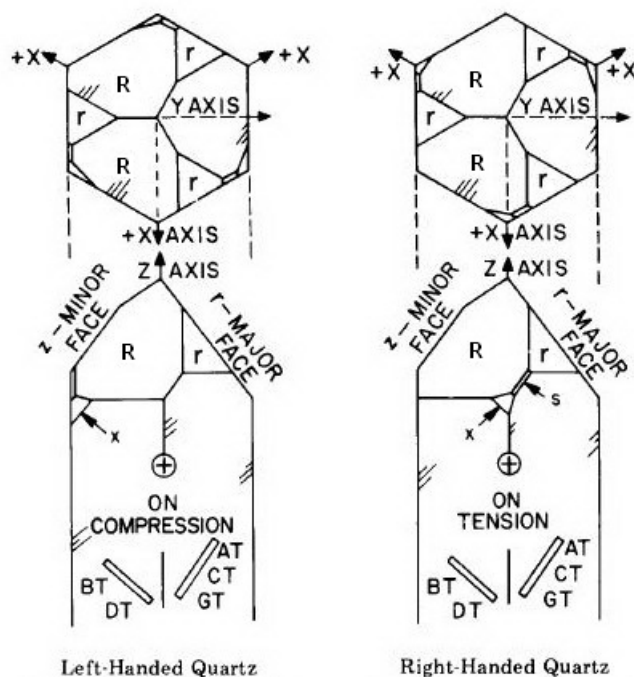


圖 2-2 左旋及右旋石英示意圖[11]

石英晶格具有左右旋兩種結構的特性(Left-Hand Quartz 與 Right-Hand Quartz)，圖 2-2 左圖為左旋石英晶體，圖 2-2 右圖為右旋石英晶體，左旋石英晶體與右旋石英晶體兩者為鏡像對稱晶體；本文所使用的石英晶體為右旋石英晶體。石英左右旋的辨別方法可由理想幾何外型來判斷外，也可利用旋光器 (polariscope) 來判斷。

2.2 石英晶體的切角

石英為非等向性的材料，因此若對石英晶體選擇不同的切割角度，則會有不同的材料特性，如彈性係數(elastic constant)、壓電模數(piezoelectric modulus)等均會不同。市面上使用的石英切角皆有其特殊名稱，圖 2-3 為目前市面上較常用的石英切角，主要是以大寫字母所排列組成，如 AT、CT、DT、和 X、Z 等不同切割角度，通常以 cut 來稱呼其切角，如 AT-cut、Z-cut。

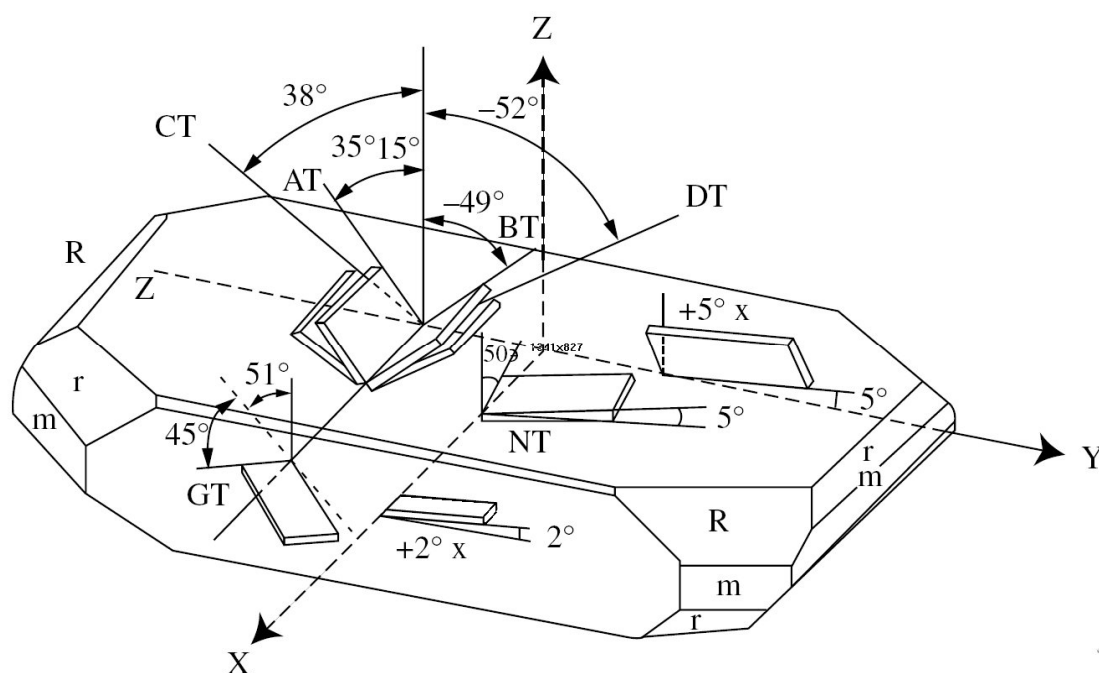


圖 2-3 Z 板人工石英與各種切斷面[12]

除了石英晶體的慣用符號，IEEE 對各種壓電晶體也有國際通用的命名標準，如(2-1)式：

$$(YXlwt)\phi/\theta/\psi \quad (2-1)$$

首先先假設石英有一個矩型平面，有著長度、寬度以及厚度，則可以使用(2-1)式來命名。在括號裡面的前兩個大寫英文，分別代表厚度以及長度在初始時的參考軸，如(2-1)式的 YX，代表一開始厚度落在 Y 軸，長度落在 X 軸，而寬度就會決定坐落在第三方向的 Z 軸，所以在命名上只需決定厚度及長度即可。(2-1)式括號內的後三項： l, w, t ，分別表示為矩形平面的長度、寬度以及厚度，表示矩形平面要依著哪個方向為旋轉軸，所以 l, w, t 也分別對應著 $\phi/\theta/\psi$ ，分別代表著

此三方向旋轉角度的值[13]。

本論文所使用的石英切角，考量到溫度係數影響石英振盪器頻率，故使用 Z-cut 對 X 軸逆時針旋轉兩度的石英切角，如圖 2-3 石英震盪器的細樑部份垂直 X；若以 IEEE 標準命名，則將厚度放置在 Z 軸而長度放置在 Y 軸，再將此矩形對 X 軸(寬度 w)旋轉兩度，因此可將此切角命名為 $(ZYw)+2^\circ$ 。

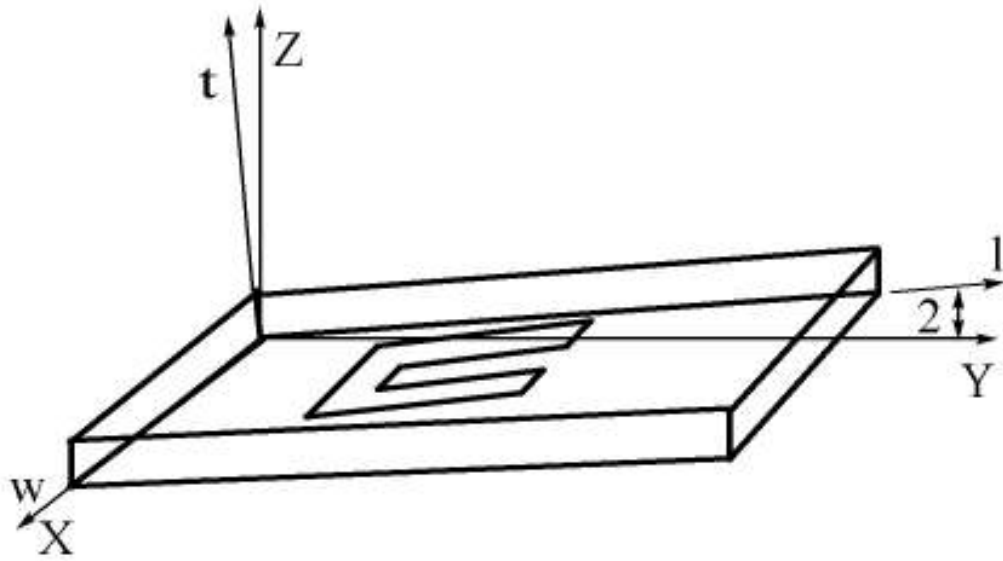


圖 2-3 選擇石英震盪器切角

第參章、 米勒-布拉法斯指標與蝕刻速率理論

3.1 晶面米勒指標

3.1.1 米勒指標定義

米勒指標(Miller indices)說明任何有理晶面與三結晶軸 a 、 b 、 c 相交，其截距為 $\frac{a}{h}$ 、 $\frac{b}{k}$ 、 $\frac{c}{l}$ ，則 h 、 k 、 l 必為有理整數或零，將其定名為米勒指標 $(h k l)$ 。

但若晶體為六角柱體(如菱形晶系、六方晶系)時，則通常採用另一種四軸記法，如圖 3-1，將晶體三重或六重旋轉軸定為 a_3 軸，在垂直 a_3 軸的平面上，沿主要晶向定義三個對稱的 a_1 、 a_2 、 a_4 軸，三軸間夾角各為 120° 。對此四軸座標系統，若有理晶面對四軸的截距分別為 $\frac{a_1}{h}$ 、 $\frac{a_2}{k}$ 、 $\frac{a_3}{l}$ 、 $\frac{a_4}{i}$ ，則其指標稱為米勒-布拉法斯指標(Miller-Bravais indices)，記為 $(h k i l)$ 。

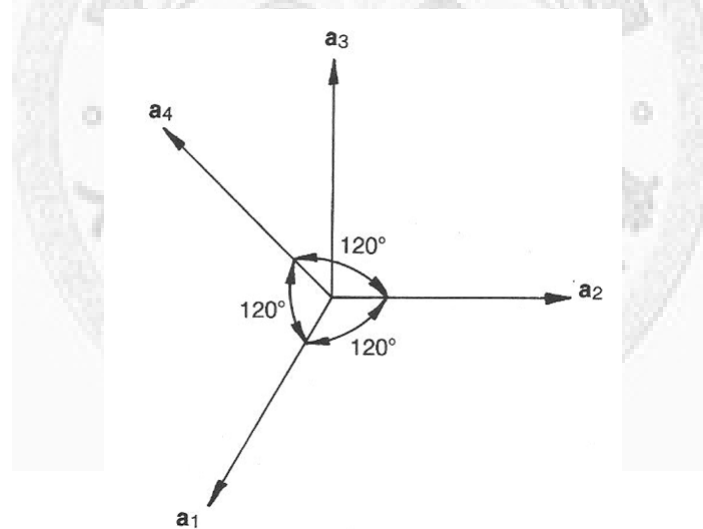


圖3-1 四軸座標系

3.1.2 $(ZYw)+2^\circ$ 石英米勒-布拉法斯指標

對石英晶體而言，由於低溫石英屬於 Class 32 的對稱性，因此其指標須採用四軸記法，然而通用的石英座標軸是採用三軸的直角坐標系，兩者之間的相對關係如圖 3-2，可表示為：

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_1 &= \mathbf{X} \\
 \mathbf{a}_2 &= -\frac{1}{2}\mathbf{X} + \frac{\sqrt{3}}{2}\mathbf{Y} \\
 \mathbf{a}_3 &= \mathbf{Z} \\
 \mathbf{a}_4 &= -(\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2) = -\frac{1}{2}\mathbf{X} - \frac{\sqrt{3}}{2}\mathbf{Y}
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

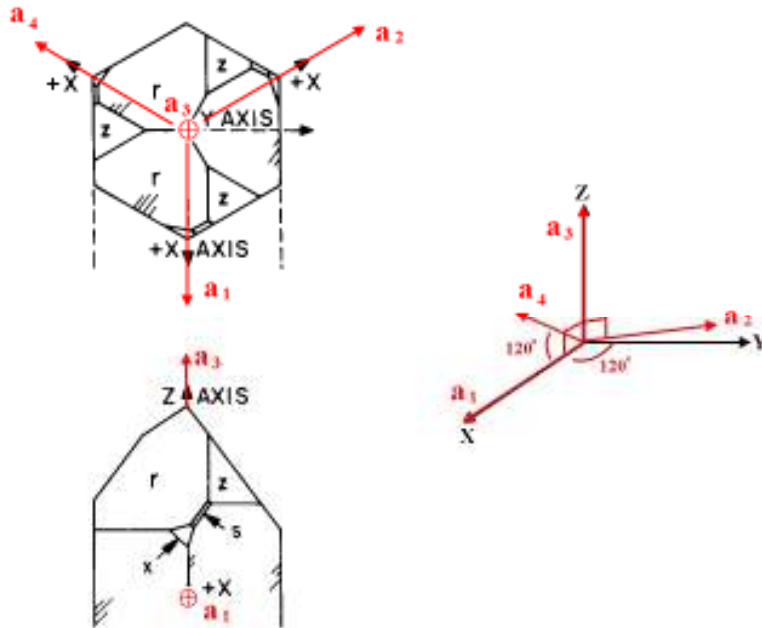


圖3-2 石英晶體三軸座標系與四軸座標系關係圖[11]

本文所使用之石英切角為 $(ZYw)+2^\circ$ ，以三軸石英座標系統而言，為XY平面對X軸逆時針旋轉 2° ，如圖3-3， $(ZYw)+2^\circ$ 的石英座標軸 x 、 y 、 z 與三軸石英座標系統 x_2 、 y_2 、 z_2 關係為：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2^\circ) & \sin(2^\circ) \\ 0 & -\sin(2^\circ) & \cos(2^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}
 \tag{3-2}$$

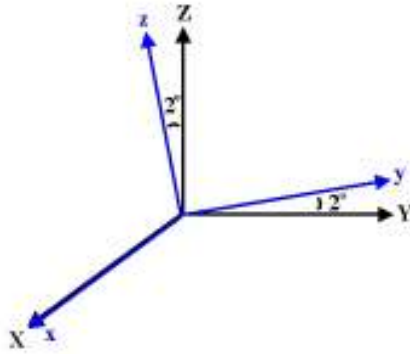


圖3-3 $(ZYw)+2^\circ$ 座標系統與石英晶體三軸座標系關係圖

求取實驗之石英蝕刻晶面米勒-布拉法斯指標方法如下：如圖 3-4，若想決定門字型圖案左邊凹槽內側圖形的米勒指標，則須先量測門字型圖案在 xy 平面上之旋轉角度 φ ，以及晶面與 xy 平面夾角 θ ，可以得到在 $(ZYw)+2^\circ$ 座標系統下之晶面法向量為：

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

接著進行 $(ZYw)+2^\circ$ 座標系統與石英三軸座標之座標軸旋轉，得到在石英三軸座標下之晶面法向量 \mathbf{N} 為：

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-2^\circ) & \sin(-2^\circ) \\ 0 & -\sin(-2^\circ) & \cos(-2^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

則晶面對石英三軸座標之平面方程式即為 $x_2X+y_2Y+z_2Z=1$ 。利用此平面方程式，求取晶面對石英四軸座標 \mathbf{a}_1 、 \mathbf{a}_2 、 \mathbf{a}_3 、 \mathbf{a}_4 之交點，如圖 3-5：

$$D = \left(\frac{1}{x_2}, 0, 0\right)$$

$$E = \left(\frac{1}{x_2 - \sqrt{3}y_2}, \frac{-\sqrt{3}}{x_2 - \sqrt{3}y_2}, 0\right)$$

$$F = \left(0, 0, \frac{1}{z_2}\right)$$

$$G = \left(\frac{1}{x_2 + \sqrt{3}y_2}, \frac{-\sqrt{3}}{x_2 + \sqrt{3}y_2}, 0\right)$$

(3-5)

可得到晶面對石英四軸座標 \mathbf{a}_1 、 \mathbf{a}_2 、 \mathbf{a}_3 、 \mathbf{a}_4 之截距為 OD、OE、OF、OG。

根據石英晶面截距與米勒-布拉法斯指標關係 $OD = \frac{4.9135}{h}$ 、 $OE = \frac{4.9135}{k}$ 、
 $OF = \frac{5.4050}{l}$ 、 $OG = \frac{4.9135}{i}$ ，可以求得米勒-布拉法斯指標指標 $(h k i l)$ 。

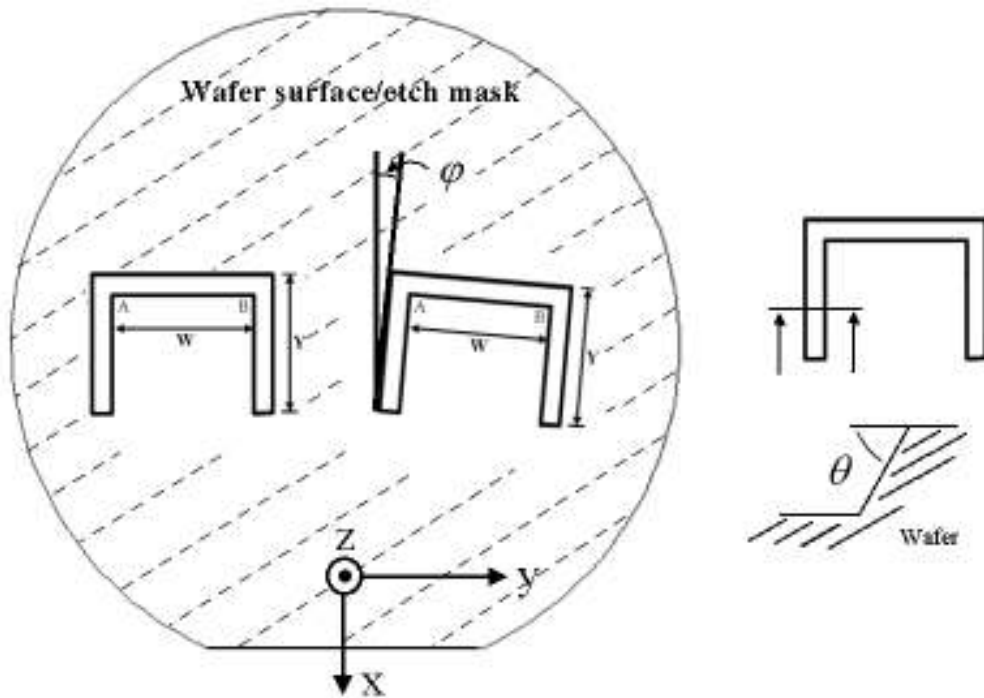


圖3-4 量測角度示意圖

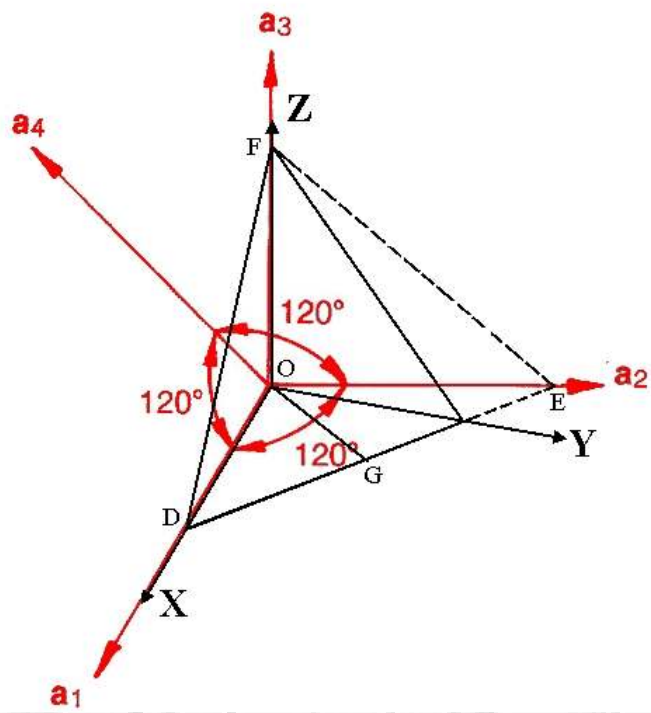


圖3-5 四軸座標截距示意圖

3.2 蝕刻長度變化率與蝕刻速率

3.2.1 濕式蝕刻速率理論

本文討論的計算濕式蝕刻速率方法，是依據張簡文添[14]提出二維蝕刻理論為中心，以幾何方法來探討基本的蝕刻長度變化率與蝕刻速率的關係。此理論的基本假設為：蝕刻速率僅跟晶格面的方向有關，而與晶格面的大小無關，並且將蝕刻速率定義在沿著晶格面的負法線方向上；一個角隅(corner)的法線向量有很多個，因此將角隅的頂點視為有無限多個長度趨近於零的微小面。根據這樣的假設條件，一個平面被蝕刻後仍維持平面，且其長度不會有任何變化，如圖3-6；而若產生長度變化和幾何形狀的改變，則必定發生在兩個非平行的晶格面相交之角隅，如圖3-7。

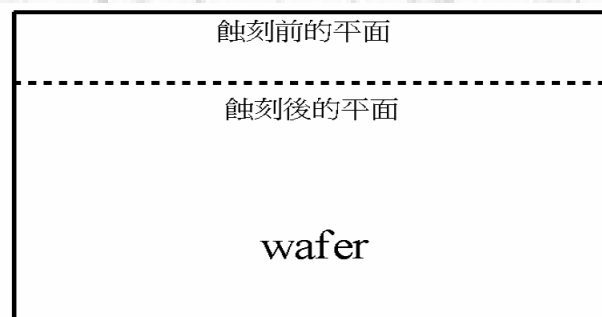


圖3-6 平面蝕刻後仍維持平面且其長度不變示意圖

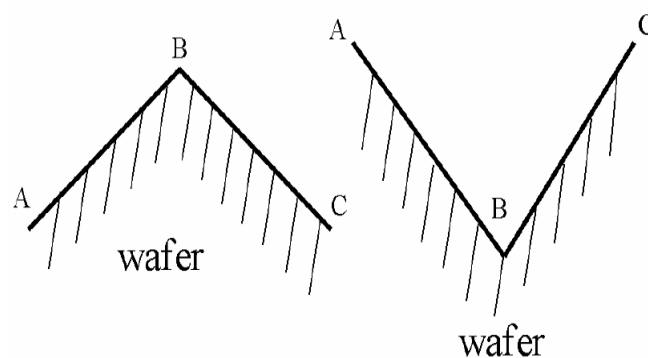


圖3-7 兩個晶格面構成一個角隅，左圖是外凸角隅，右圖是內凹角隅

而研究晶體的蝕刻行為與蝕刻速率時，只需討論蝕刻後的角隅附近之變化情形就可瞭解所有蝕刻的行為，並將應用到任意形狀之蝕刻速率與長度變化率的關係，以下將分別討論內凹角隅和外凸角隅的情形。

內凹角隅的長度變化率與蝕刻速率的關係：

(1) 內凹角隅無角隅底切的情形

如圖3-8，AB晶格面與BC晶格面組成內凹角隅，AB、BC晶格面的法線夾角為 θ ，蝕刻速率分別為 R_{AB} 與 R_{BC} 。圖中 $d_{AB} = R_{AB}\Delta t$ 、 $d_{BC} = R_{BC}\Delta t$ ，代表AB與BC晶格面在微小時間 Δt 的蝕刻所走距離，圖中粗虛線表蝕刻後的曲面輪廓，其中 L_{AB} 與 L_{BC} 分別代表AB與BC晶格面的長度。

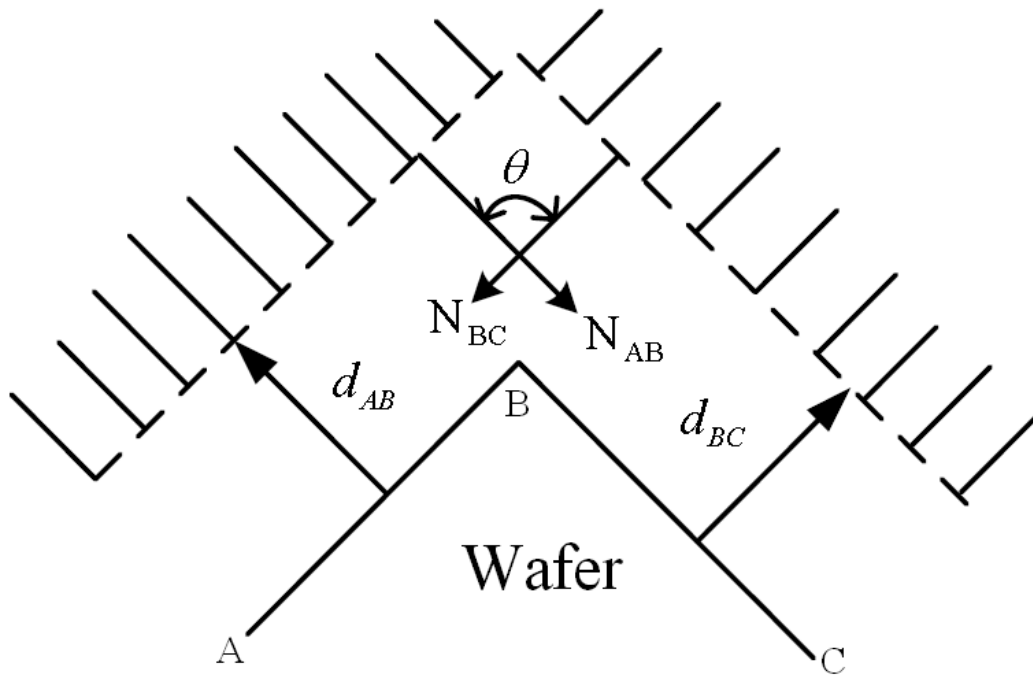


圖3-8 內凹角隅經過微小時間蝕刻後其長度變化之示意圖[14]

當微小時間趨近於零時，則 L_{AB} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{AB}}{dt} = \frac{R_{BC}}{\sin \theta} - \frac{R_{AB}}{\tan \theta} \quad (3-6)$$

L_{BC} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{BC}}{dt} = \frac{R_{AB}}{\sin \theta} - \frac{R_{BC}}{\tan \theta} \quad (3-7)$$

由此兩方程式可知：

當 $R_{BC} > R_{AB} \cos \theta$ ，AB晶格面的長度變長。

當 $R_{BC} = R_{AB} \cos \theta$ ，AB晶格面的長度不變。

當 $R_{AB} > R_{BC} \cos \theta$ ，BC晶格面的長度變長。

當 $R_{AB} = R_{BC} \cos \theta$ ，BC晶格面的長度不變。

當 $\theta > 90^\circ$ ，AB晶格面的長度不變。

(2) 三個晶格面構成兩個內凹角隅之無角隅底切的情形

如圖3-9，AB晶格面、BC晶格面與CD晶格面組成了內凹角隅，BA晶格面與BC晶格面的法線夾角為 α ，BC晶格面與CD晶格面的法線夾角為 β ，蝕刻速率分別為， R_{AB} 、 R_{BC} 與 R_{CD} 。圖中 $d_{AB} = R_{AB}\Delta t$ 、 $d_{BC} = R_{BC}\Delta t$ 、 $d_{CD} = R_{CD}\Delta t$ ，代表AB、BC與CD晶格面在微小時間 Δt 的蝕刻所走距離。

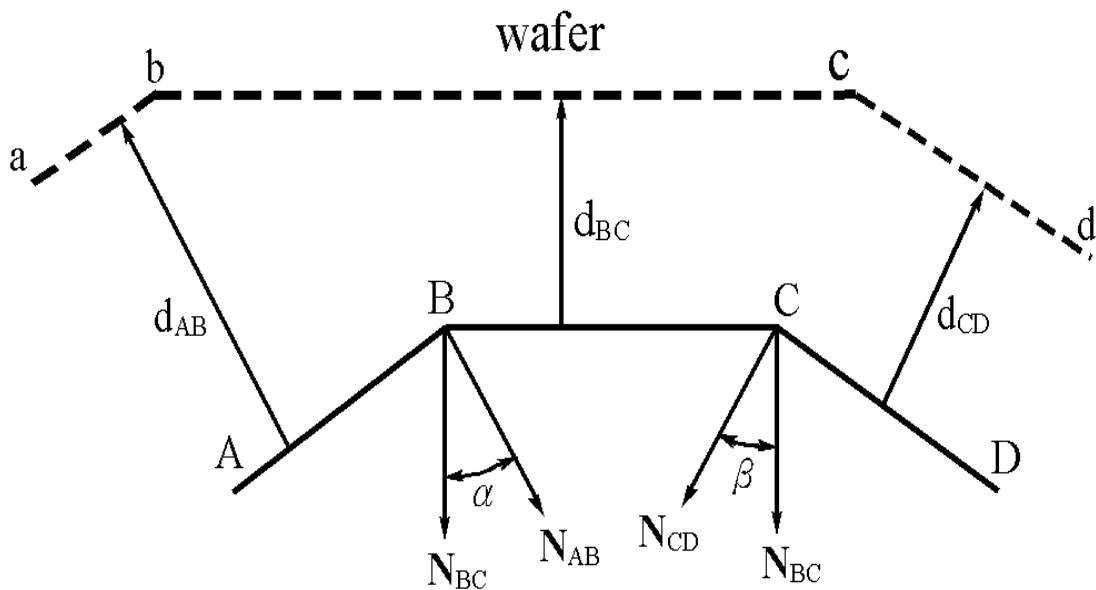


圖3-9 多個內凹角隅經過微小時間蝕刻後其長度變化之示意圖[14]

當微小時間趨近於零時，則 L_{AB} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{AB}}{dt} = \frac{R_{BC}}{\sin \alpha} - \frac{R_{AB}}{\tan \alpha} \quad (3-8)$$

L_{BC} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{BC}}{dt} = \frac{R_{AB}}{\sin \alpha} - \frac{R_{BC}}{\tan \alpha} + \frac{R_{CD}}{\sin \beta} - \frac{R_{BC}}{\tan \beta} \quad (3-9)$$

L_{CD} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{CD}}{dt} = \frac{R_{BC}}{\sin \beta} - \frac{R_{CD}}{\tan \beta} \quad (3-10)$$

(3) 內凹角隅發角隅底切的情形

如圖3-10，BA晶格面與BC晶格面組成了內凹角隅，兩晶格面的法線夾角為 θ ，經過微小時間蝕刻後，會出現新的DE晶格面。BA晶格面與DE晶格面的法線夾角為 α ，BC晶格面與DE晶格面的法線夾角為 β 。圖中 $d_{AB} = R_{AB}\Delta t$ 、 $d_{BC} = R_{BC}\Delta t$ 、 $d_{DE} = R_{DE}\Delta t$ ，代表AB、BC與DE晶格面在微小時間 Δt 的蝕刻所走距離。

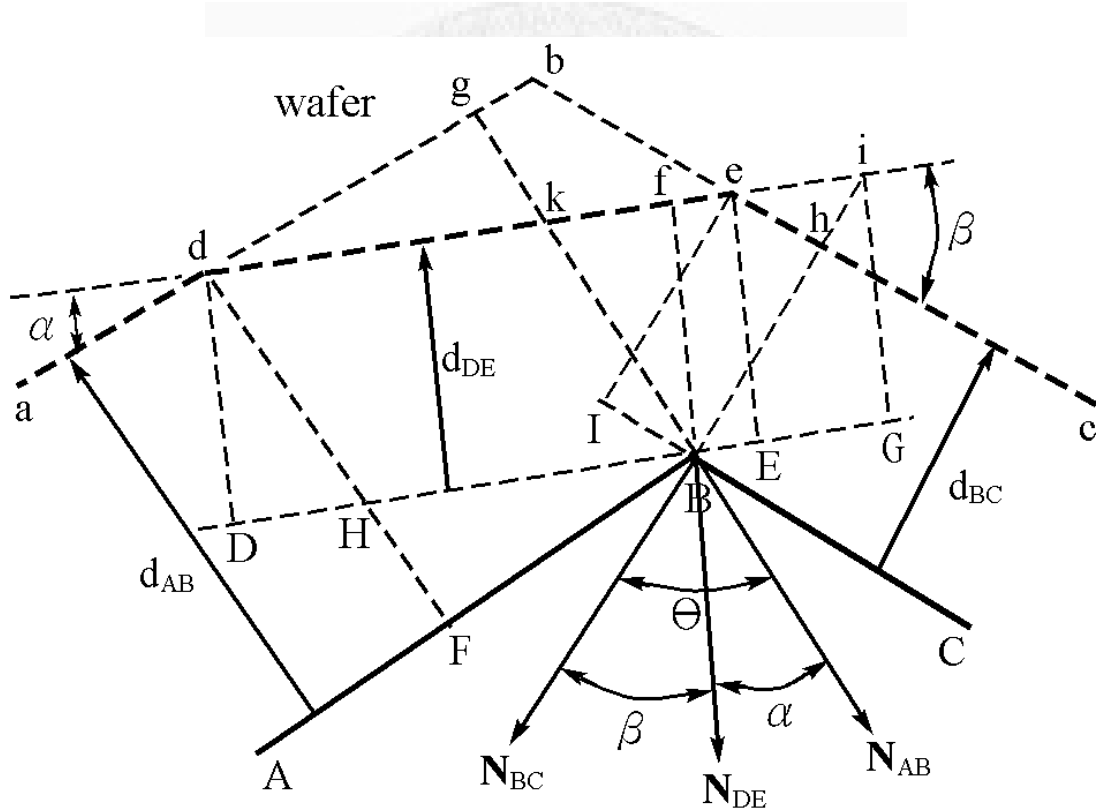


圖3-10 內凹角隅經過微小時間蝕刻後有新面出現之長度變化之示意圖[14]

當微小時間趨近於零時，則 L_{AB} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{AB}}{dt} = \frac{R_{DE}}{\sin \alpha} - \frac{R_{AB}}{\tan \alpha} \quad (3-11)$$

L_{BC} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{BC}}{dt} = \frac{R_{DE}}{\sin \beta} - \frac{R_{BC}}{\tan \beta} \quad (3-12)$$

L_{DE} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{DE}}{dt} = \frac{R_{AB}}{\sin \alpha} - \frac{R_{DE}}{\tan \alpha} + \frac{R_{BC}}{\sin \beta} - \frac{R_{DE}}{\tan \beta} \quad (3-13)$$

外凸角隅的長度變化率與蝕刻速率的關係

(1)外凸角隅無角隅底切的情形

如圖3-6所示，AB晶格面與BC晶格面組成了外凸角隅，AB、BC晶格面的法線夾角為 θ ，蝕刻速率分別為 R_{AB} 與 R_{BC} 。圖中 $d_{AB} = R_{AB}\Delta t$ 、 $d_{BC} = R_{BC}\Delta t$ ，代表AB與BC晶格面在微小時間 Δt 的蝕刻所走距離，圖中粗虛線表蝕刻後的曲面輪廓，其中 L_{AB} 與 L_{BC} 分別代表AB與BC晶格面的長度。

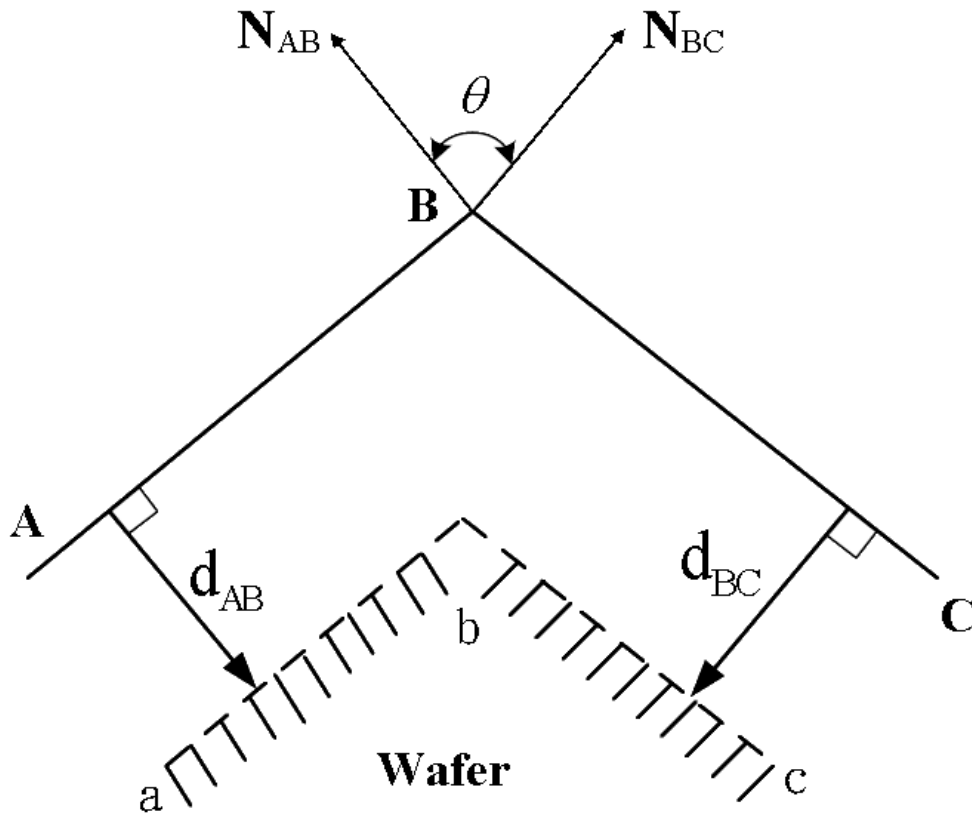


圖3-11 外凸角隅經過微小時間蝕刻後其長度變化之示意圖[14]

當微小時間趨近於零時，則 L_{AB} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{AB}}{dt} = \frac{R_{AB}}{\tan \theta} - \frac{R_{BC}}{\sin \theta} \quad (3-14)$$

L_{BC} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{BC}}{dt} = \frac{R_{BC}}{\tan \theta} - \frac{R_{AB}}{\sin \theta} \quad (3-15)$$

由此兩方程式可知：

當 $R_{AB} \cos \theta > R_{BC}$ ，AB晶格面的長度變長。

當 $R_{AB} \cos \theta = R_{BC}$ ，AB晶格面的長度不變。

當 $R_{BC} \cos \theta > R_{AB}$ ，BC晶格面的長度變長。

當 $R_{BC} \cos \theta = R_{AB}$ ，BC晶格面的長度不變。

當 $\theta > 90^\circ$ ，AB與BC晶格面的長度都會縮短。

(2) 三個晶格面構成兩個外凸角隅之無角隅底切的情形

如圖3-12，AB晶格面、BC晶格面與CD晶格面組成了外凸角隅，BA晶格面與BC晶格面的法線夾角為 α ，BC晶格面與CD晶格面的法線夾角為 β ，蝕刻速率分別為， R_{AB} 、 R_{BC} 與 R_{CD} 。圖中 $d_{AB} = R_{AB} \Delta t$ 、 $d_{BC} = R_{BC} \Delta t$ 、 $d_{CD} = R_{CD} \Delta t$ ，代表AB、BC與CD晶格面在微小時間 Δt 的蝕刻所走距離。

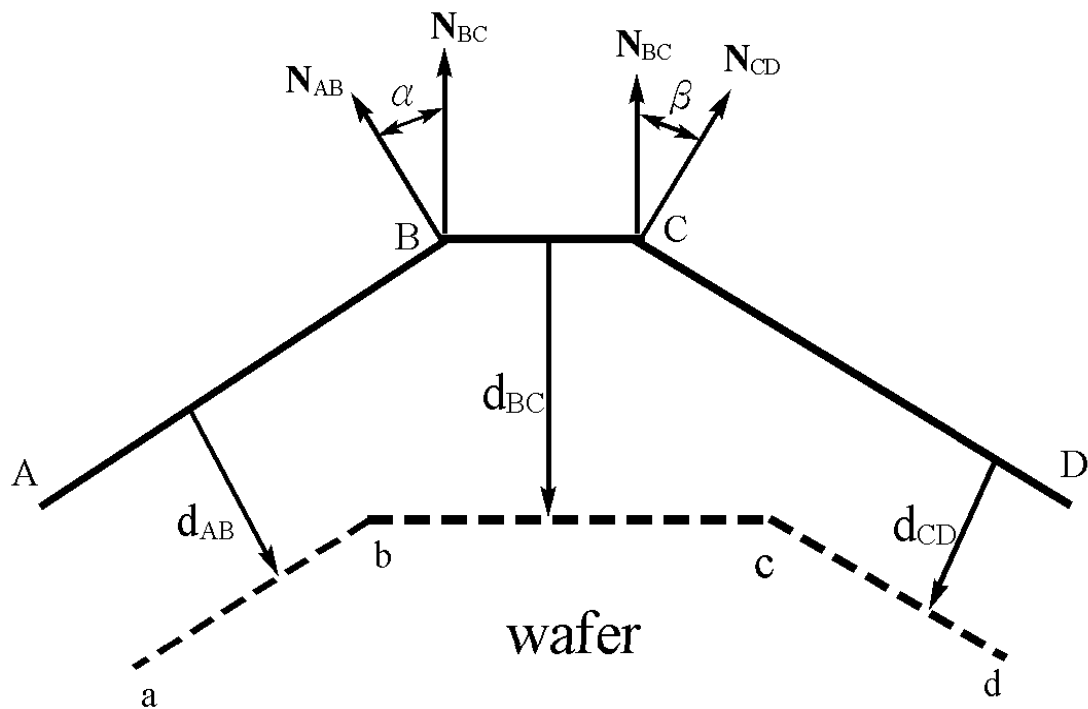


圖3-12 多個外凸角隅經過微小時間蝕刻後其長度變化之示意圖[14]

當微小時間趨近於零時，則 L_{AB} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{AB}}{dt} = \frac{R_{AB}}{\tan \alpha} - \frac{R_{BC}}{\sin \alpha} \quad (3-16)$$

L_{BC} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{BC}}{dt} = \frac{R_{BC}}{\tan \alpha} - \frac{R_{AB}}{\sin \alpha} + \frac{R_{BC}}{\tan \beta} - \frac{R_{CD}}{\sin \beta} \quad (3-17)$$

L_{CD} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{CD}}{dt} = \frac{R_{CD}}{\tan \beta} - \frac{R_{BC}}{\sin \beta} \quad (3-18)$$

(3) 外凸角隅發角隅底切的情形

如圖3-13，BA晶格面與BC晶格面組成了外凸角隅，兩晶格面的法線夾角為 θ ，經過微小時間蝕刻後，會有新的DE晶格面出現。BA晶格面與DE晶格面的法線夾角為 α ，BC晶格面與DE晶格面的法線夾角為 β 。圖中 $d_{AB} = R_{AB}\Delta t$ 、 $d_{BC} = R_{BC}\Delta t$ 、 $d_{DE} = R_{DE}\Delta t$ ，代表AB、BC與DE晶格面在微小時間 Δt 的蝕刻所走距離。

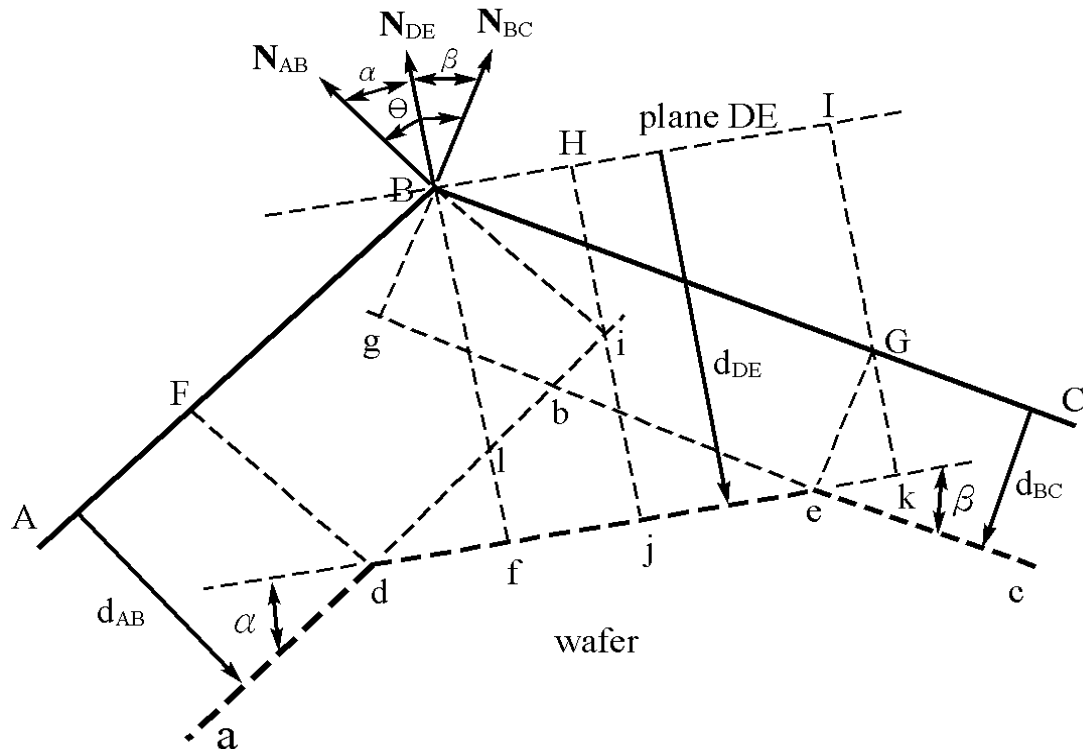


圖3-13 外凸角隅經過微小時間蝕刻後有新面出現之長度變化之示意圖[14]

當微小時間趨近於零時，則 L_{AB} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{AB}}{dt} = \frac{R_{AB}}{\tan \alpha} - \frac{R_{DE}}{\sin \alpha} \quad (3-19)$$

L_{BC} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{BC}}{dt} = \frac{R_{BC}}{\tan \beta} - \frac{R_{DE}}{\sin \beta} \quad (3-20)$$

L_{DE} 的長度變化率為：

$$\frac{dL_{DE}}{dt} = \frac{R_{DE}}{\tan \alpha} - \frac{R_{AB}}{\sin \alpha} + \frac{R_{DE}}{\tan \beta} - \frac{R_{BC}}{\sin \beta} \quad (3-21)$$

3.2.2 利用內凹角隅理論量測石英蝕刻速率

如圖 3-14，在 $(ZYw)+2^\circ$ 石英晶圓上製做口字型圖形，並以口字型左下點為中心，順時針每 5° 旋轉一次，共 72 組蝕刻圖形進行蝕刻。將上有蝕刻圖形的晶圓浸泡在氫氟酸與氟化銨的混合液中，即可蝕刻出多邊形的曲面。本文以實驗中得到的晶格面情形加以探討，並以上述之長度變化率與蝕刻速率關係推導出應用公式。

如圖 3-15， $(ZYw)+2^\circ$ 石英晶圓蝕刻後有五個底切面與六個角度；設左邊側向蝕刻長度為 L_L ，右邊側向長度為 L_R ，各晶面蝕刻速率分別為 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 、 R_Z ，則其長度變化率與蝕刻速率關係為：

$$L_L + L_R = L_T - L_o \quad (3-22)$$

$$R_A = \frac{L_L}{t} \times \sin(\theta_a) \quad (3-23)$$

$$R_C = \frac{L_R}{t} \times \sin(\theta_c) \quad (3-24)$$

$$\frac{dL_A}{dt} = \frac{R_B}{\sin(180-\theta_{ab})} - \frac{R_A}{\tan(180-\theta_{ab})} - \frac{R_A}{\tan(180-\theta_a)} \quad (3-25)$$

$$\frac{dL_B}{dt} = \frac{R_A}{\sin(180-\theta_{ab})} - \frac{R_B}{\tan(180-\theta_{ab})} + \frac{R_Z}{\sin(180-\theta_{bz})} - \frac{R_B}{\tan(180-\theta_{bz})} \quad (3-26)$$

$$\frac{dL_C}{dt} = \frac{R_D}{\sin(180-\theta_{cd})} - \frac{R_C}{\tan(180-\theta_{cd})} - \frac{R_C}{\tan(180-\theta_c)} \quad (3-27)$$

$$\frac{dL_D}{dt} = \frac{R_C}{\sin(180-\theta_{cd})} - \frac{R_D}{\tan(180-\theta_{cd})} + \frac{R_Z}{\sin(180-\theta_{dz})} - \frac{R_D}{\tan(180-\theta_{dz})} \quad (3-28)$$

借由量測 L_T 、 L_A 、 L_B 、 L_C 、 L_D 的長度，以及 θ_a 、 θ_b 、 θ_c 、 θ_d 、 θ_{bz} 、 θ_{dz} 等角度，可將 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 、 R_Z 以 L_L 來表示。又因式(3-26)之 R_Z 與(3-28) 之 R_Z 為相同平面之蝕刻速率，兩者恆相等，可解出 L_L ；再將 L_L 代入，則可解出蝕刻速率 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 、 R_Z 之值。

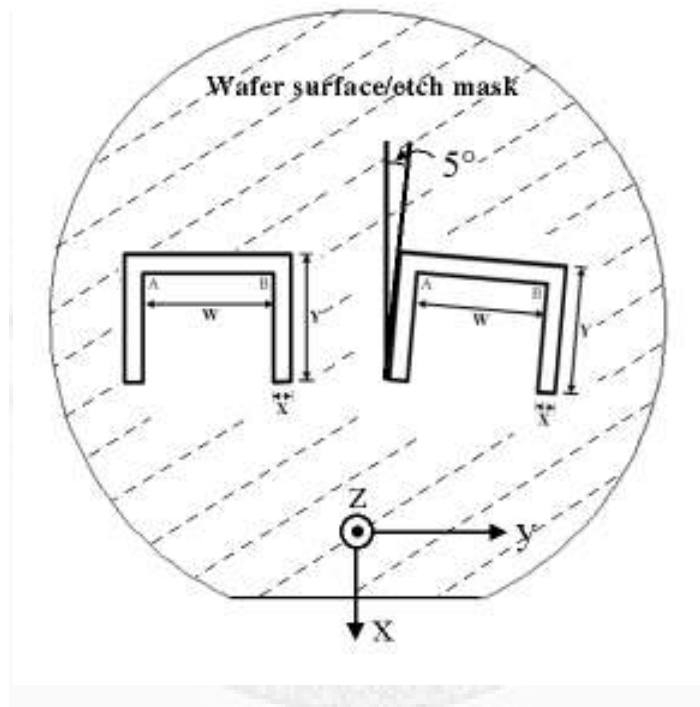


圖3-14 實驗光罩圖形示意圖

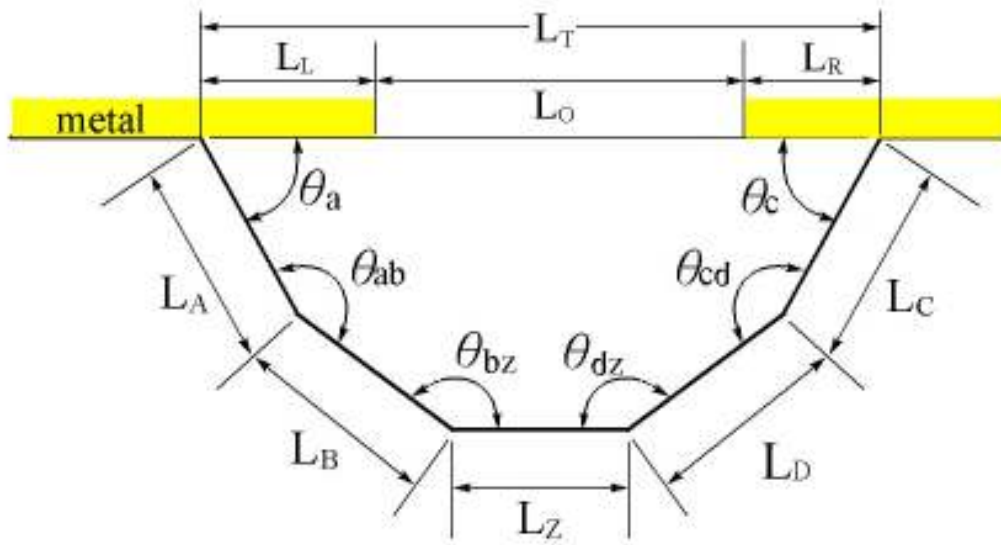


圖3-15 五個底切面與六個角度示意圖



第肆章、 實驗製程規劃

4.1 蝕刻製程概要

本文實驗使用切角為 $(ZYw)+2^\circ$ ，厚度為 $350\mu m$ ，雙面拋光之四吋石英晶圓。在清潔乾淨的石英晶圓上雙面沉積金屬層，做為濕式蝕刻時之抵擋層。實驗使用氫氟酸(HF)與氟化銨(NH_4F)混合之蝕刻溶液，氫氟酸主要用途為蝕刻石英，而氟化銨為其催化劑，兩者混合比例為 $HF:NH_4F=2:3$ 。由於一般的光阻抵擋層無法有效阻擋此蝕刻溶液長時間之侵蝕，因此本實驗選擇鉻與金的金屬層做為其抵擋層。先利用電子槍蒸鍍(E-beam Evaporator)之方法在晶圓表面蒸鍍 600 \AA 鉻層作為黏著層，再蒸鍍 2000 \AA 金層，接著利用黃光微影製程將實驗圖形轉移到晶圓上，光罩圖形如圖4-1，細部圖形如圖3-14，其規格為： $X=200\mu m$ 、 $Y=1500\mu m$ 、 $W=1600\mu m$ ，之後利用王水與鉻蝕刻液除去蝕刻窗口之金屬層，使原先設計之圖形露出，以進行蝕刻動作。將整片晶圓浸泡入調配好的蝕刻溶液中，蝕刻溶液參數選定為蝕刻溶液濃度 $HF49.5\%$ 、 $NH_4F40\%$ (重量百分濃度)，蝕刻溫度為 $55^\circ C$ ，蝕刻時間為六十分鐘。晶圓蝕刻完成後，利用晶圓精密切割機(Dicing Saw)將晶圓切割成小試片，進而把剖面透過光學顯微鏡觀察其蝕刻輪廓，使用量測軟體measurement tools量測蝕刻面之長度與角度，配合米勒指標與內凹角隅之計算公式，精確的計算出其蝕刻速率及米勒指標。

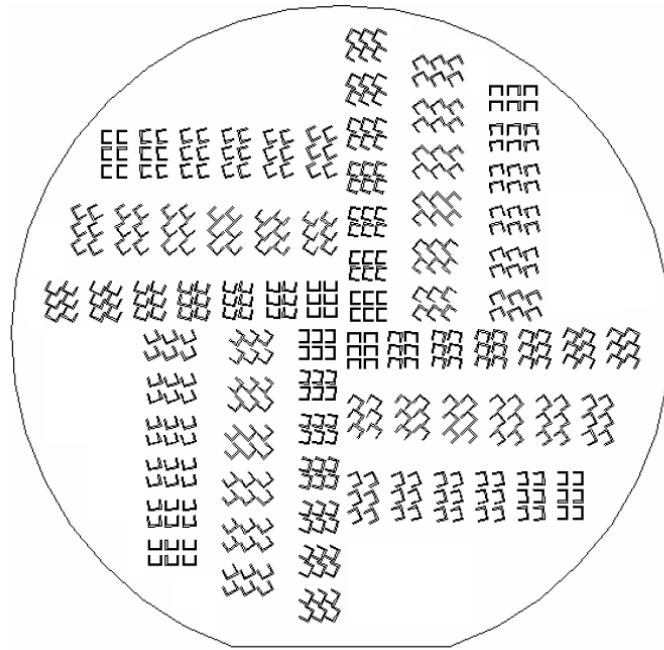
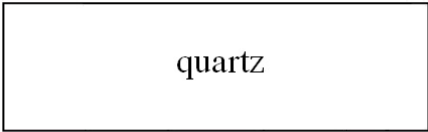


圖4-1 實驗光單圖形



2.2. 實驗步驟

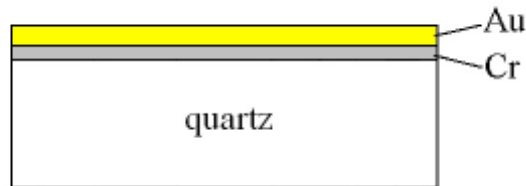
1. 清洗石英晶圓：將新晶片以下列步驟清洗，以去除表面之有機物及重金屬等雜質。
 - I. 以丙酮、甲醇，配合超音波振洗機清洗晶圓 5 分鐘，再以太離子水沖淨晶圓上的有機溶液。
 - II. 將硫酸(H_2SO_4)與雙氧水(H_2O_2)以 3:1 的比例，調配卡羅酸(Caro Acid)溶液，將石英晶圓置於卡羅酸中 15 分鐘，取出後再以太離子水清洗 5 分鐘。此步驟是利用硫酸的強氧化力去除晶圓上殘留的有機物。
 - III. 將氨水(NH_4OH)、雙氧水(H_2O_2)、去離子水以 0.25:1:5 的比例調配，並加溫溶液至 $80^\circ C$ 。將晶圓置於溶液中 15 分鐘，取出後再以太離子水清洗 5 分鐘。此步驟可以去除晶圓上殘留的微粒與部分金屬離子。
 - IV. 將鹽酸(HCl)、雙氧水(H_2O_2)、去離子水以 1:1:6 的比例調配，並加溫溶液至 $80^\circ C$ 。將晶圓置於溶液中 15 分鐘。此步驟可以去除晶圓上殘留的金屬離子。
 - V. 以太離子水清洗石英晶圓 5 分鐘，並以氮氣槍吹乾，完成晶圓清洗步驟。



quartz

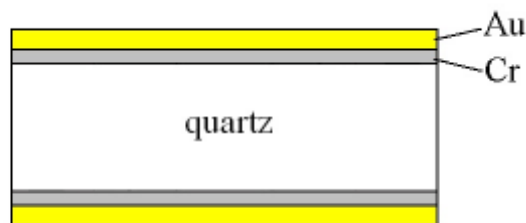
2. 預烤(Pre-bake)：將晶圓放置於 $120^\circ C$ 的加熱平板上 5 分鐘，將其表面水氣烤乾。此步驟可以確保晶圓上沒有水氣殘留，乾燥的晶圓表面有助於金屬的附著。
3. 正面沉積鉻層：利用電子槍蒸鍍機(E-beam Evaporator)於石英晶圓正面鍍上 600 \AA 的鉻(Cr)做為黏著層，蒸鍍速率平均為每秒 0.3 \AA 。

4. 正面沉積金層：利用電子槍蒸鍍機於石英晶圓正面鍍上 2000 \AA 的金(Au)，蒸鍍速率為每秒 0.4 \AA 。



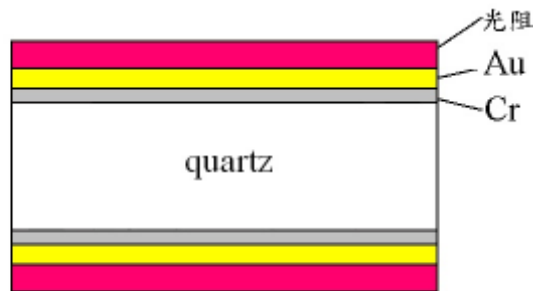
5. 反面沉積鉻層：利用電子槍蒸鍍機於石英晶圓反面鍍上 600 \AA 的鉻(Cr)做為黏著層，蒸鍍速率平均為每秒 0.3 \AA 。

6. 反面沉積金層：利用電子槍蒸鍍機於石英晶圓反面鍍上 2000 \AA 的金(Au)，蒸鍍速率為每秒 0.4 \AA 。

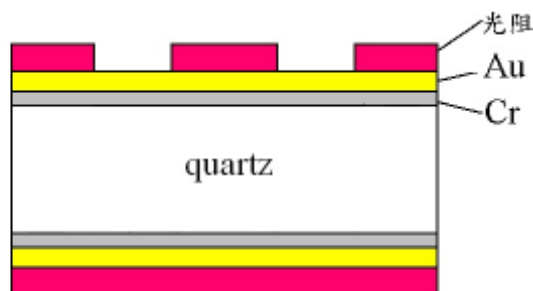


7. 光阻塗佈：利用旋轉塗佈機(Spin Coater)於晶圓雙面各塗佈一層均勻厚度且附著力強之光阻。為了在濕式蝕刻中能夠長時間抵擋侵蝕，故必須用厚膜光阻才能達到要求，本實驗使用的光阻為 AZ4620 厚膜光阻，其塗佈參數如表 4-1。

| 步驟 | 轉速(rpm) | 旋轉時間(秒) |
|----|---------|---------|
| 1 | 500 | 5 |
| 2 | 1500 | 5 |
| 3 | 3000 | 30 |



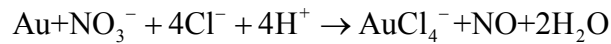
8. 軟烤(Soft bake)：將塗佈光阻後的晶圓置於90°C加熱平板上，加熱90秒鐘。此步驟可以加速光阻中溶劑蒸散，使光阻固化。
9. 曝光(Exposure)：利用單面對準曝光機(Top Side EVG Aligner)，在石英晶圓的正面做對準及曝光；曝光方式為軟接觸(Soft Contact)，曝光時間15秒，對準間隙(Align Gap)為30 μm 。此步驟目的在於將光罩上的圖案轉移到晶圓上，當紫外光線透過光罩照射在光阻上時，光阻上的感光物質會產生高分子分解反應，進而達到圖形轉移的目的。
10. 顯影(Develop)：將曝光後的晶圓置入MF-450顯影液進行顯影，顯影時間為20秒，顯影後將晶圓以去離子水沖洗，以去除殘留之顯影液。



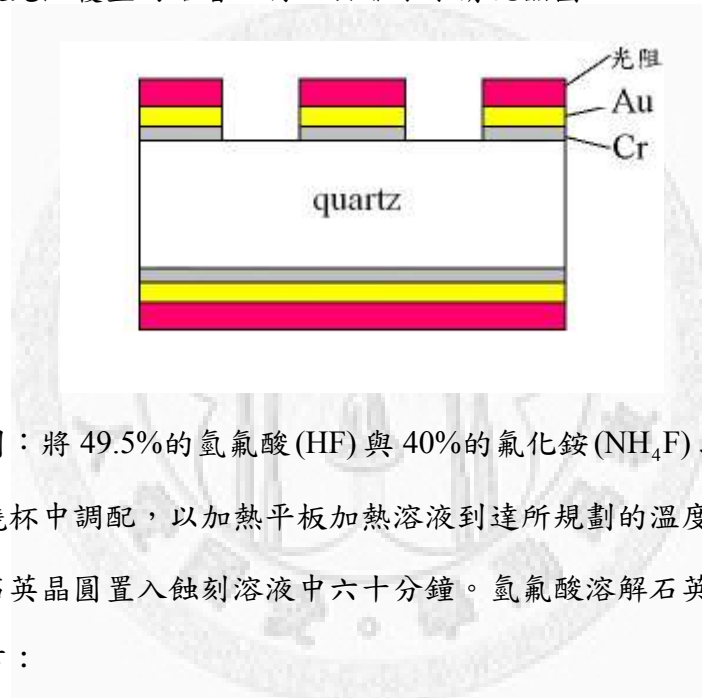
11. 硬烤(Hard bake)：將晶圓放置於溫度為120°C的加熱平板20分鐘，以去除

光阻中多餘的有機溶劑，使光阻結構更緊實。

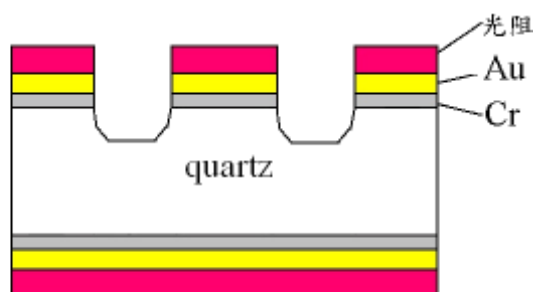
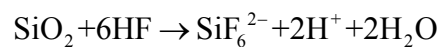
12. 去除蝕刻窗口金層：將硝酸(HNO₃)與鹽酸(HCl)以1:3的比例，調配王水溶液，將晶圓置於王水中30秒鐘，直到未被光阻覆蓋的鍍金層完全溶解後取出，再的去離子水清洗晶圓以去除殘留之王水。王水溶解金之化學反應方程式如下：



13. 去除蝕刻窗口鉻層：利用鉻蝕刻液將未被光阻覆蓋的鍍鉻層溶解。去除晶圓上未被光阻覆蓋的鉻層，再的去離子水清洗晶圓。

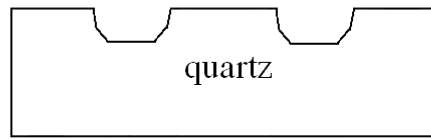


14. 濕式蝕刻：將49.5%的氫氟酸(HF)與40%的氟化銨(NH₄F)以2:3的比例在鐵氟龍燒杯中調配，以加熱平板加熱溶液到達所規劃的溫度(55°C±2°C)後，將石英晶圓置入蝕刻溶液中六十分鐘。氫氟酸溶解石英的化學反應方程式如下：



15. 去除抵擋層：將晶圓分別置入丙酮、王水、鉻蝕刻液中，清除晶圓表面的

光阻層、金層、鉻層，再以太離子水沖洗晶圓以去除殘留化學物質。



16. 晶圓切割：利用晶圓精密切割機，將晶圓依蝕刻圖形設計切割，以利後續資料截取。
17. 輪廓截取與蝕刻速率計算：以光學顯微鏡拍攝晶圓剖面，並以量測軟體 measurement tools 量測蝕刻面之長度與角度，配合米勒指標與內凹角隅蝕刻速率之計算公式，精確的計算出其蝕刻速率及米勒指標。



第五章、 實驗觀測與結果分析

5.1 實驗量測結果

將濕式蝕刻完成之試片，利用光學顯微鏡觀察其剖面圖之蝕刻結果。一個冂字型圖案可以得到六個方向(S1 至 S6)的側牆蝕刻圖形，選擇左邊的蝕刻凹槽進行剖面，則剖面蝕刻圖形會如同圖 5-1、5-2。將冂字型圖案定義為旋轉角度(φ) 0° ，訂定順時針方向旋轉為正方向，則冂圖案為 $\varphi=90^\circ$ ，依此類推。

將冂字型圖案做橫向剖面，再將剖面圖形利用量測軟體 measure tools 量測出蝕刻面之間的角度以及蝕刻面長度，如圖 5-3 至 5-35，部份剖面因實驗因素無法取得，使用旋轉角度(φ)加上 180° 之圖形取代，兩者互為鏡射圖形；而其角隅的部分圖形如圖 5-36 至 5-39。每個旋轉角度的剖面皆會產生五個蝕刻面，定義蝕刻面名稱為 A、B、C、D、Z，其晶格夾角分別為 θ_a 、 θ_{ab} 、 θ_{bz} 、 θ_c 、 θ_{cd} 、 θ_{dz} ，蝕刻面長度為 L_A 、 L_B 、 L_C 、 L_D 、 L_Z ，如圖 5-40；旋轉角度(φ)與角度 θ_a 、 θ_c 、關係、長度 L_A 、 L_B 、 L_C 、 L_D 關係如圖 5-41、圖 5-42、圖 5-43。剖面形狀與旋轉角度(φ)約為 120° 對稱，推測是由於石英為 Class 32 對稱，因此 Z-cut 石英蝕刻後的凹槽截面不會左右對稱，而是每旋轉 120° 對稱。本文使用的石英切角為 $(ZYw)+2^\circ$ ，亦即 Z-cut 對 X 軸旋轉兩度，對所使用之晶圓法線 z 軸而言仍然趨近 120° 對稱，因此於其蝕刻後的凹槽剖面也會約為 120° 對稱。

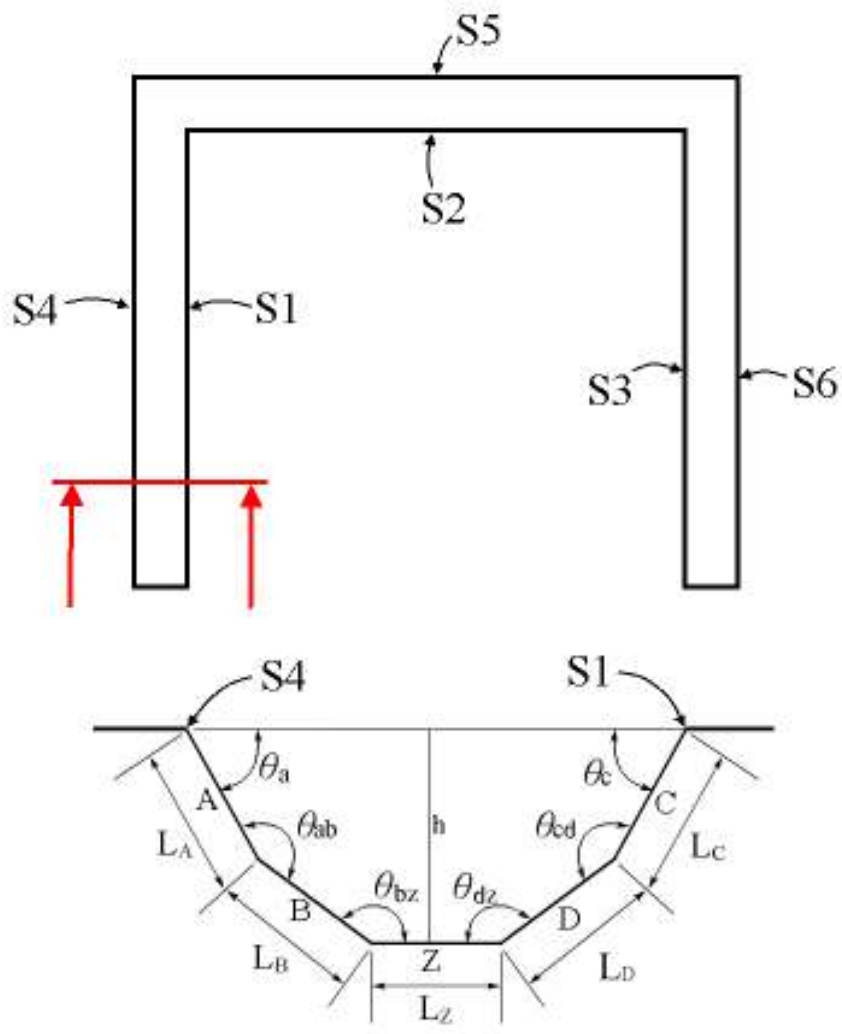


圖 5-1 旋轉角度(φ)與剖面各參數示意圖

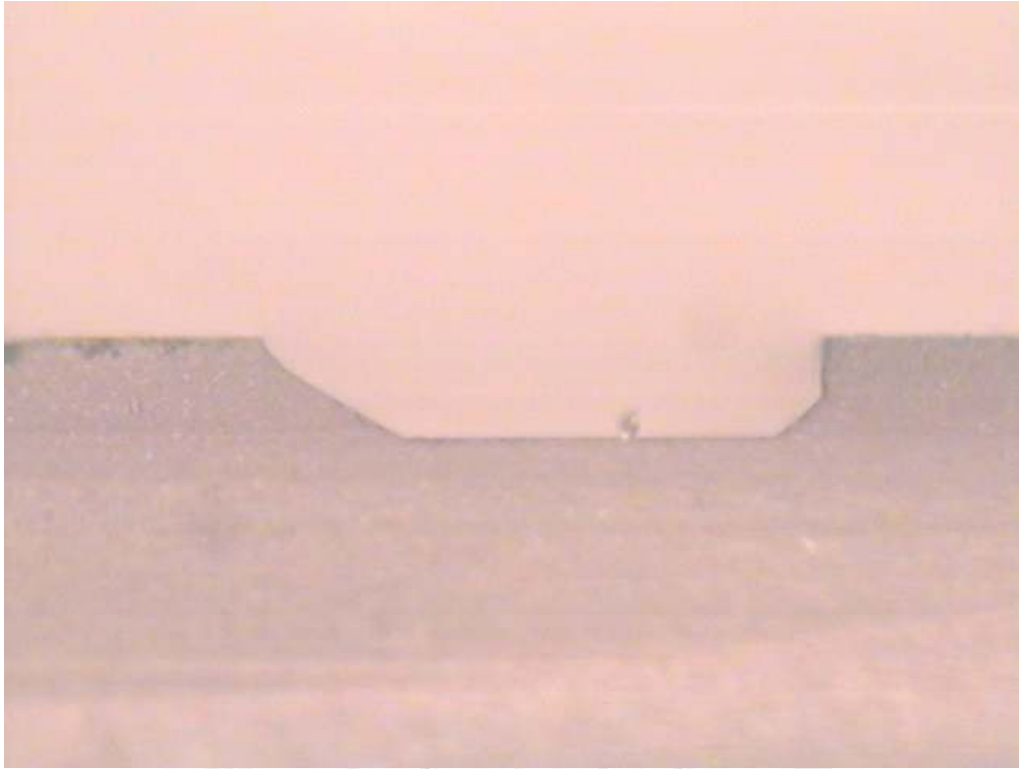


圖 5-2 $\phi=0^\circ$ 之剖面圖

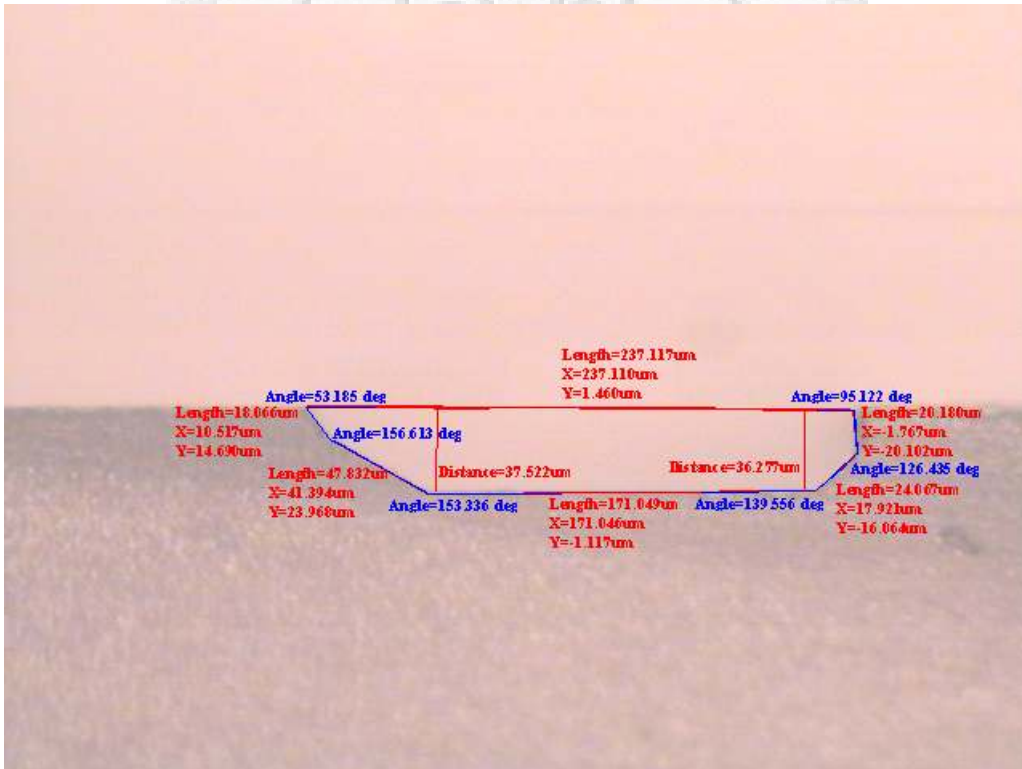


圖 5-3 $\phi=0^\circ$ 之量測剖面圖

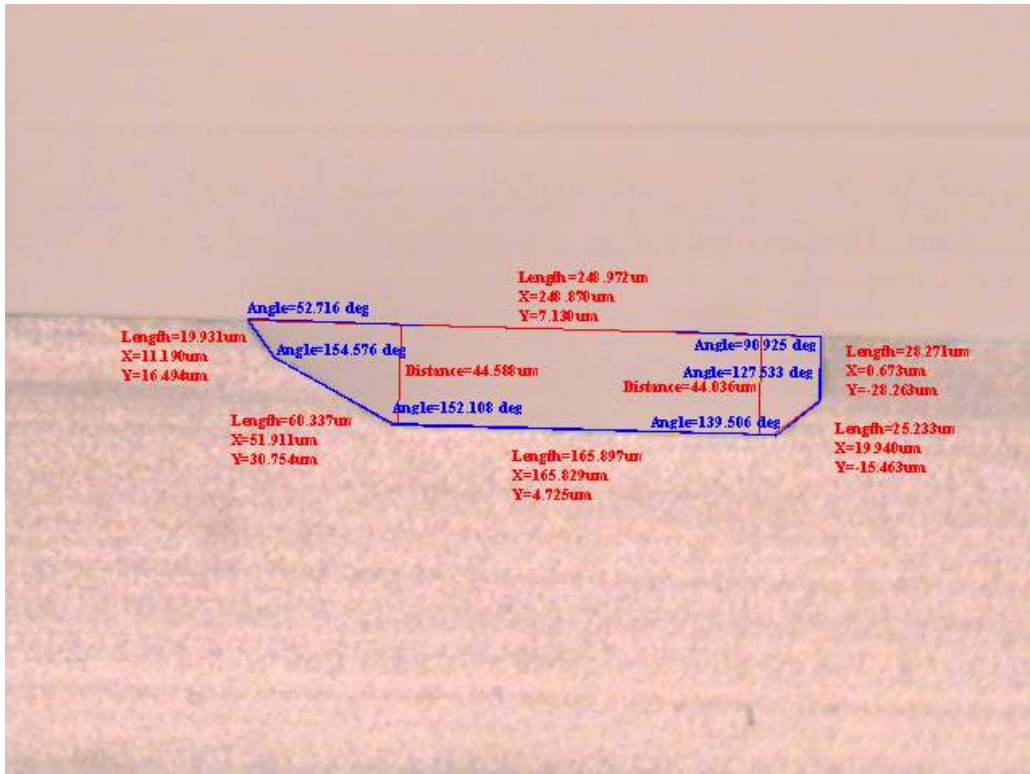


圖 5-4 $\phi=5^\circ$ 之量測剖面圖

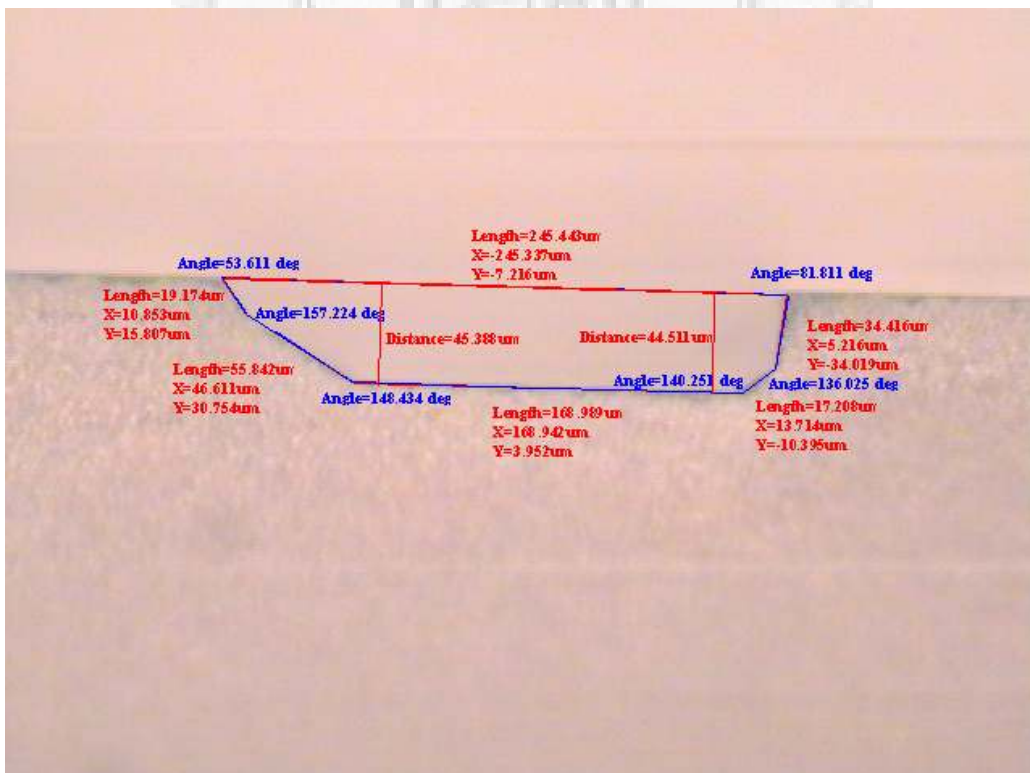


圖 5-5 $\phi=10^\circ$ 之量測剖面圖

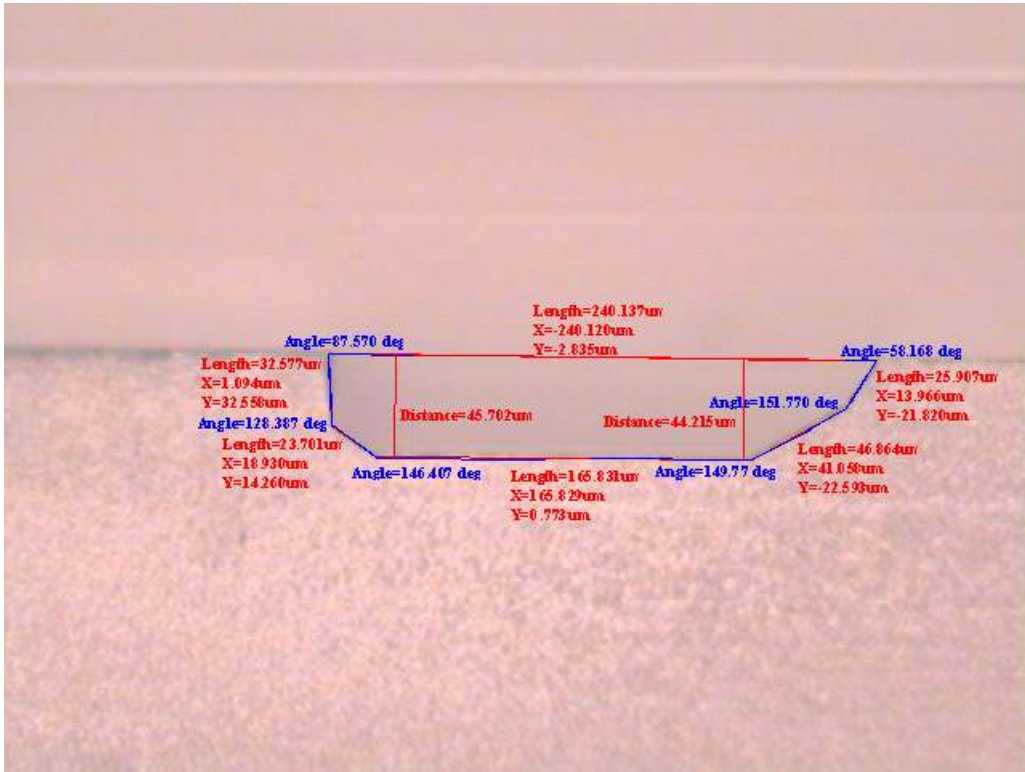


圖 5-6 $\varphi=195^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=15^\circ$ 為鏡射對稱

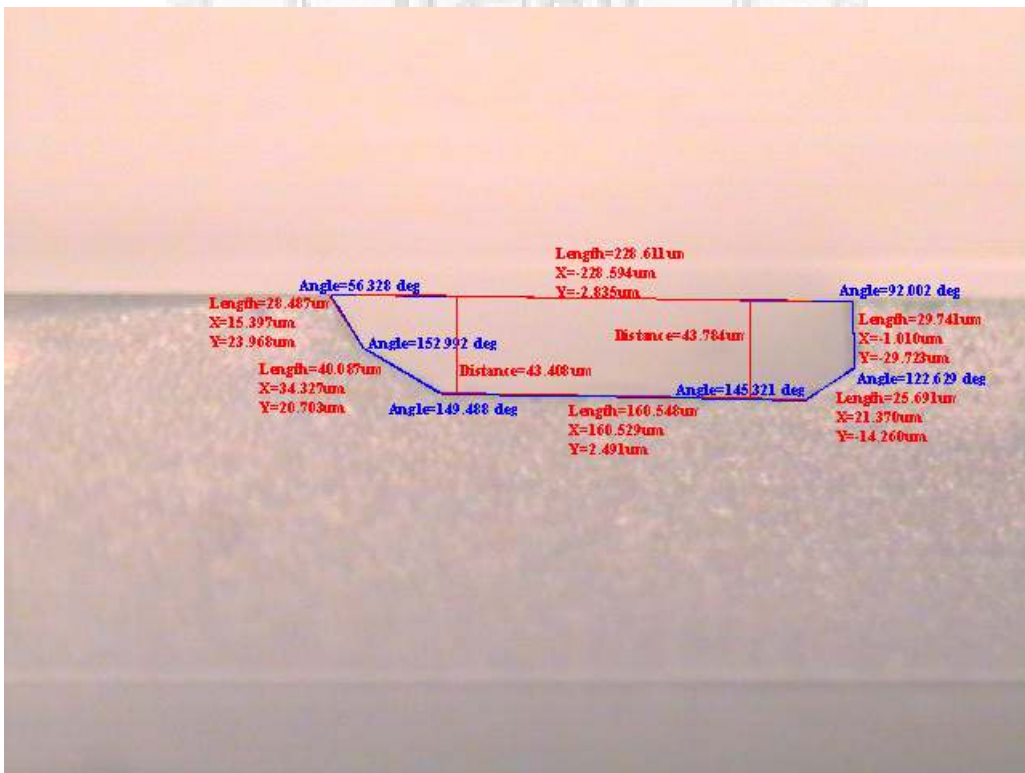


圖 5-7 $\varphi=20^\circ$ 之量測剖面圖

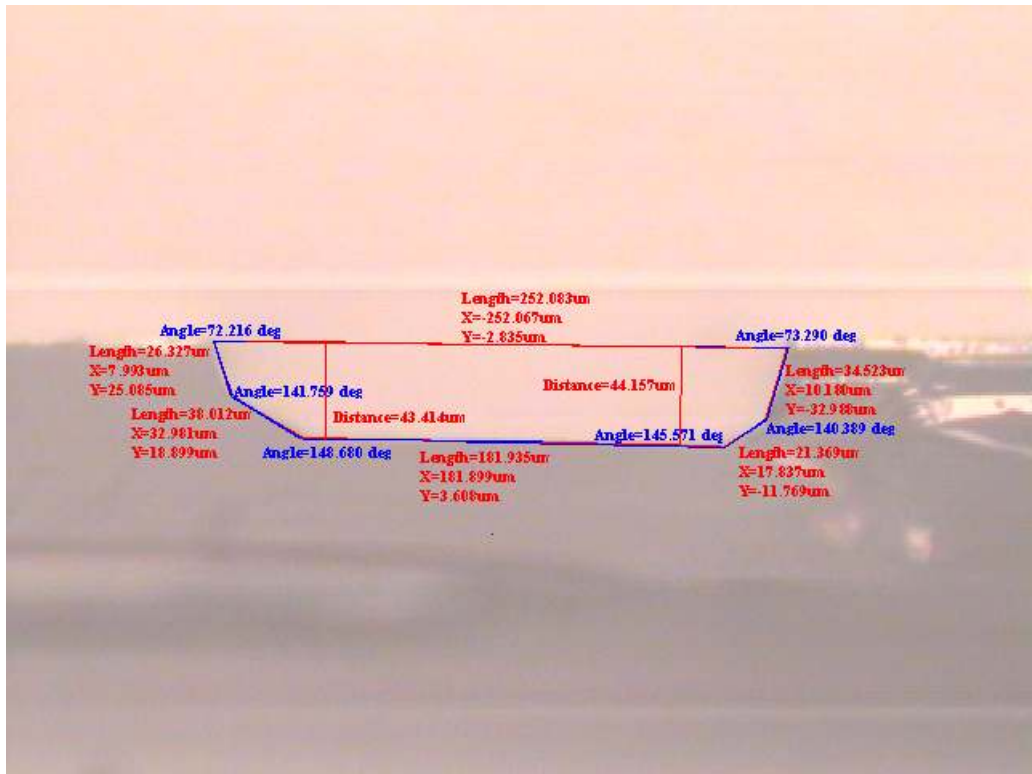


圖 5-8 $\varphi=35^\circ$ 之量測剖面圖

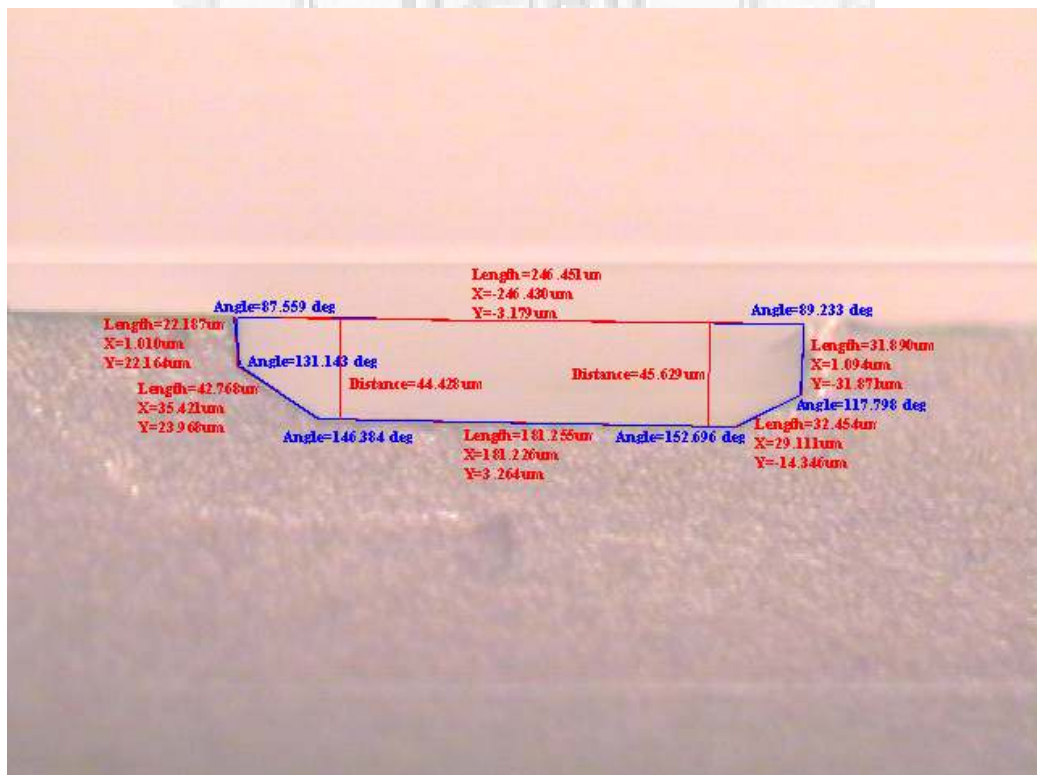


圖 5-9 $\varphi=40^\circ$ 之量測剖面圖

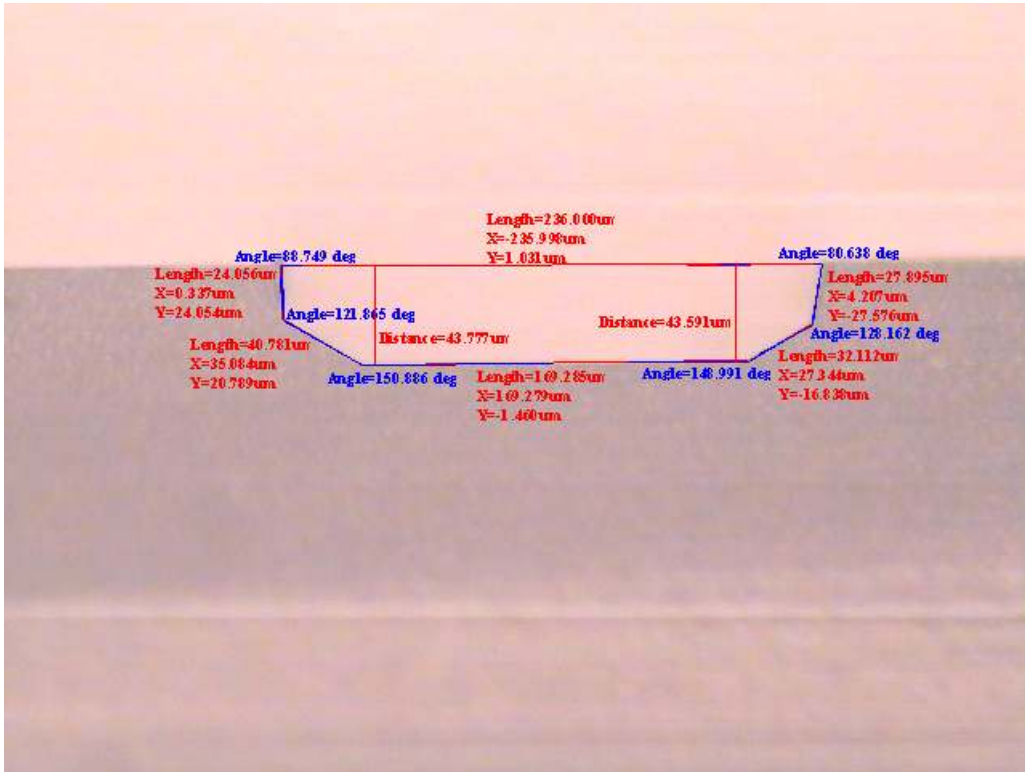


圖 5-10 $\varphi=225^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=45^\circ$ 為鏡射對稱

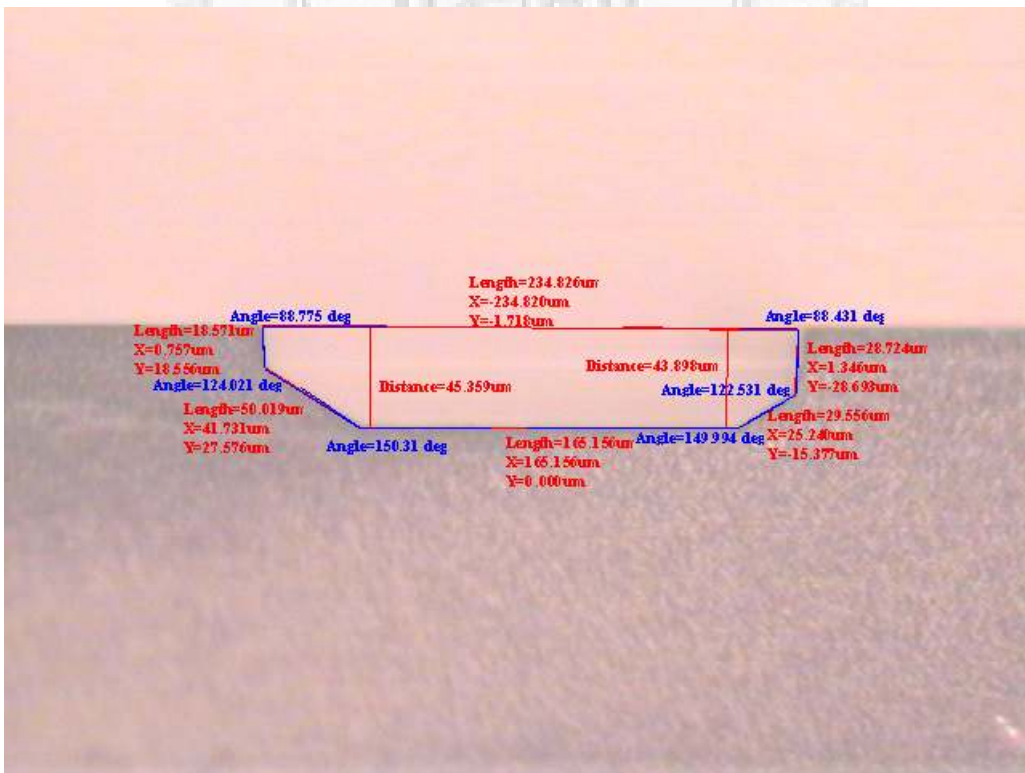


圖 5-11 $\varphi=230^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=50^\circ$ 為鏡射對稱

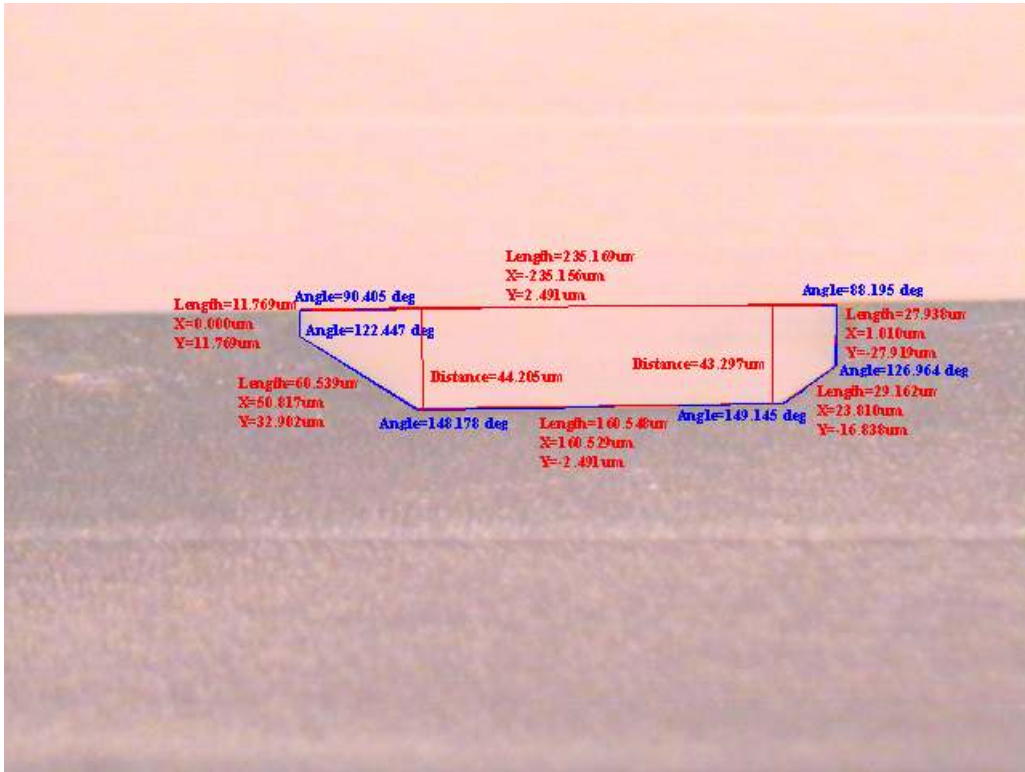


圖 5-12 $\varphi=235^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=55^\circ$ 為鏡射對稱

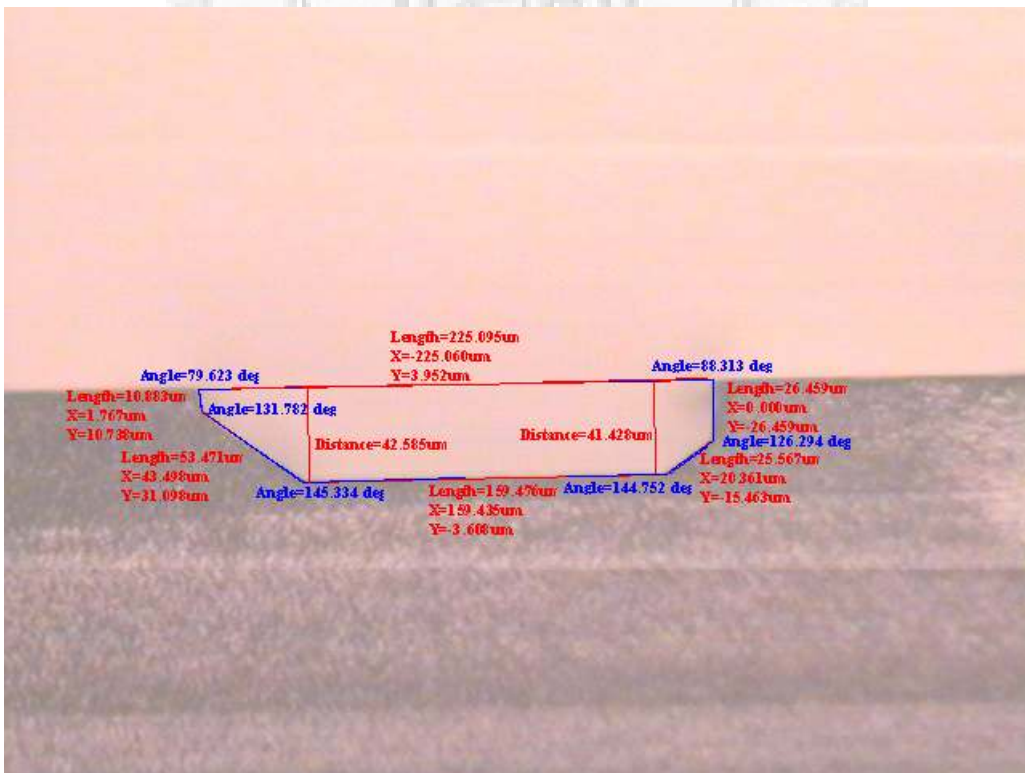


圖 5-13 $\varphi=240^\circ$ 之量測剖面圖與 $\varphi=60^\circ$ 為鏡射對稱

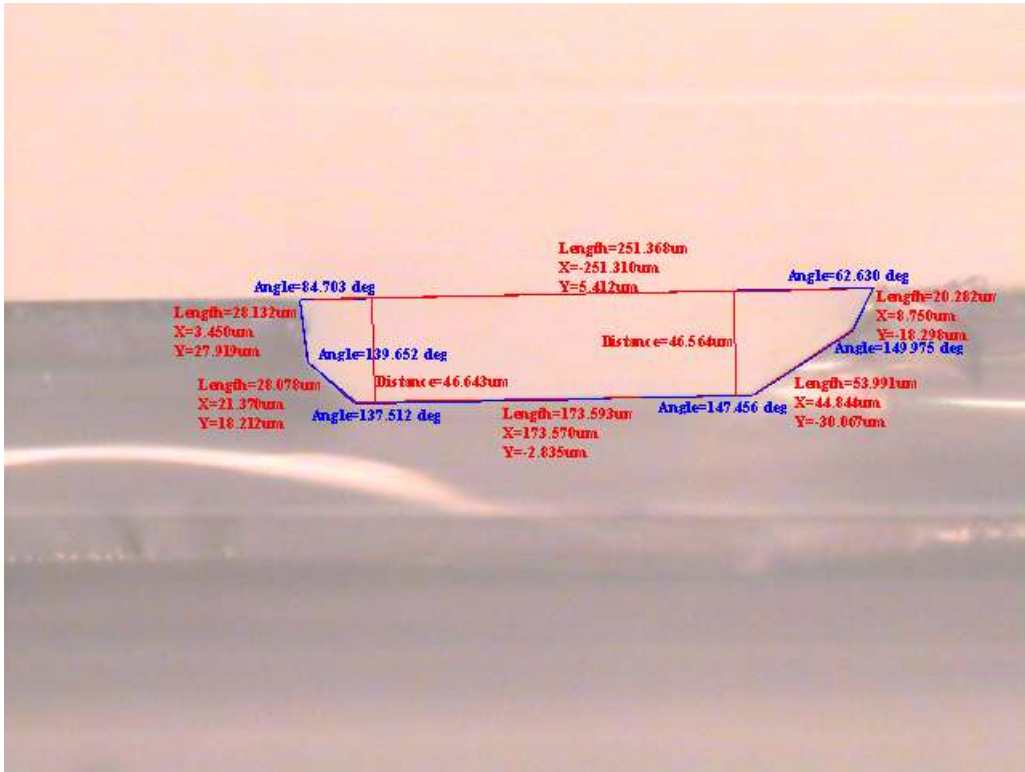


圖 5-14 $\phi=65^\circ$ 之量測剖面圖

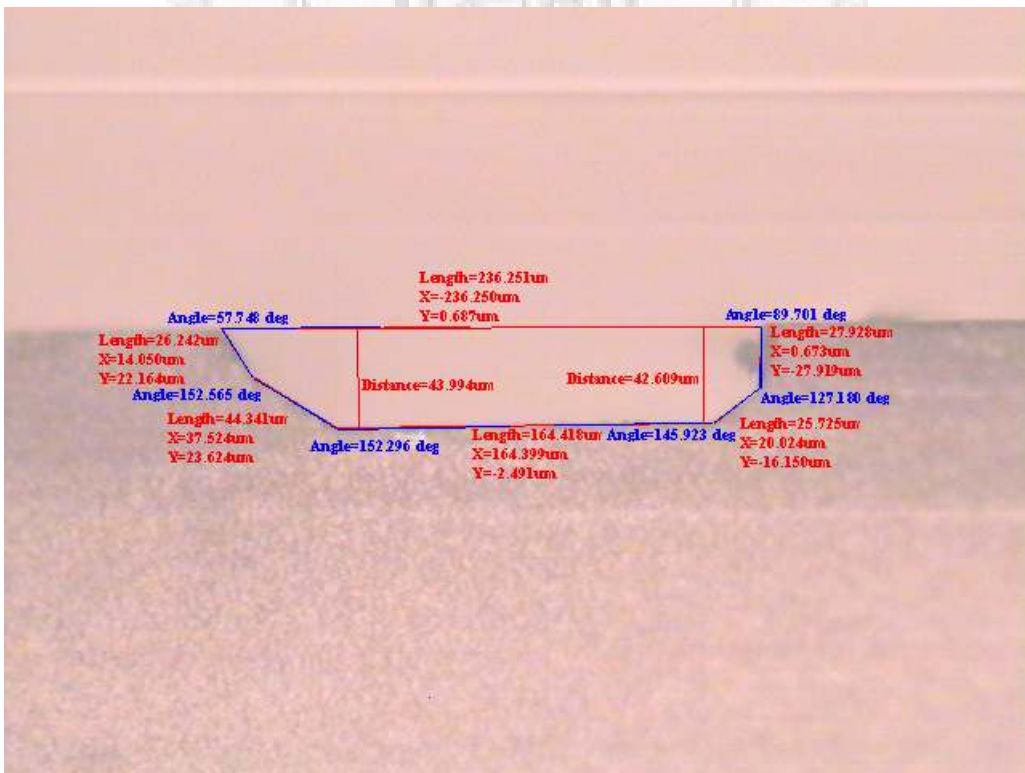


圖 5-15 $\phi=250^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\phi=70^\circ$ 為鏡射對稱

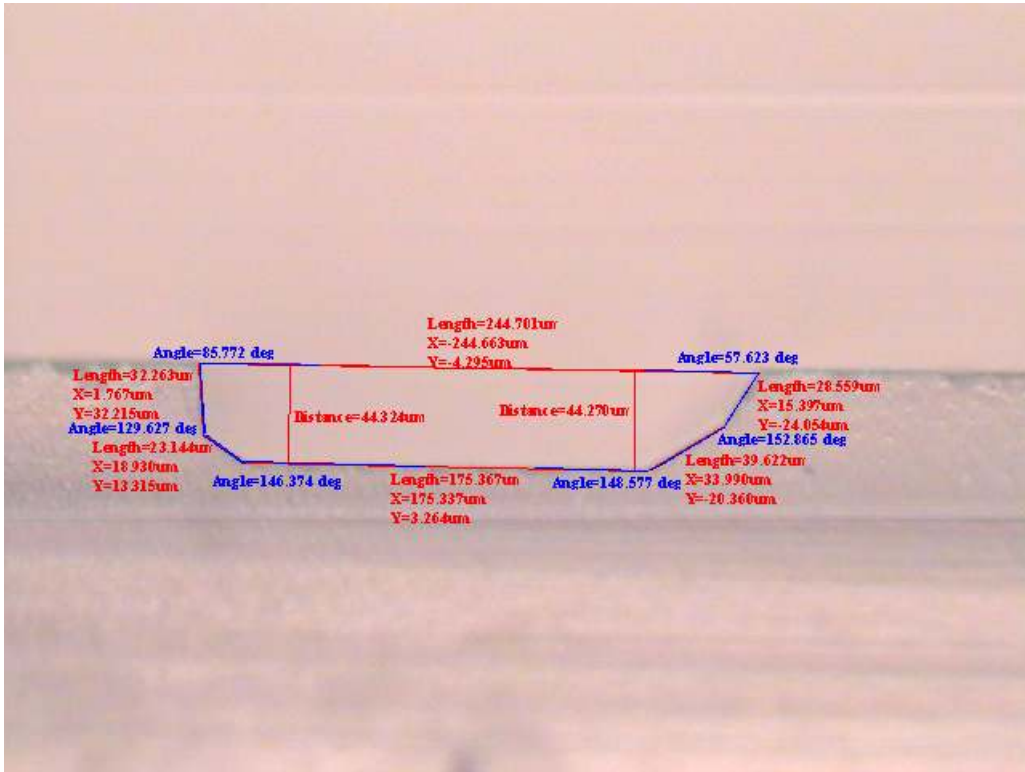


圖 5-16 $\phi=75^\circ$ 之量測剖面圖

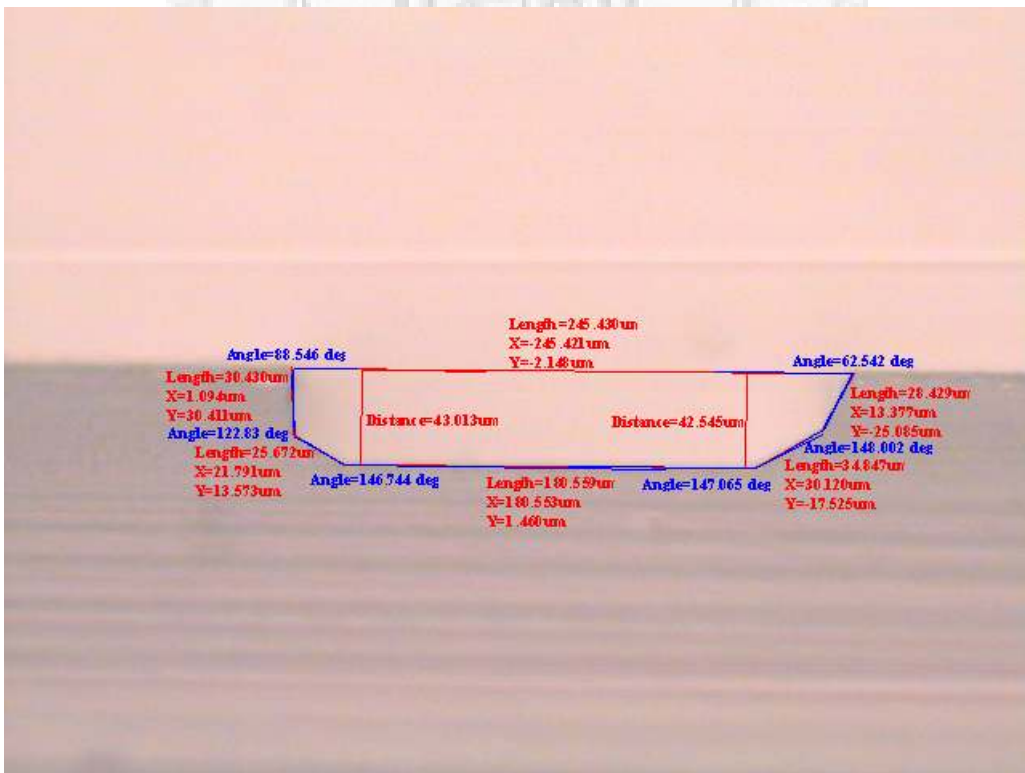


圖 5-17 $\phi=80^\circ$ 之量測剖面圖

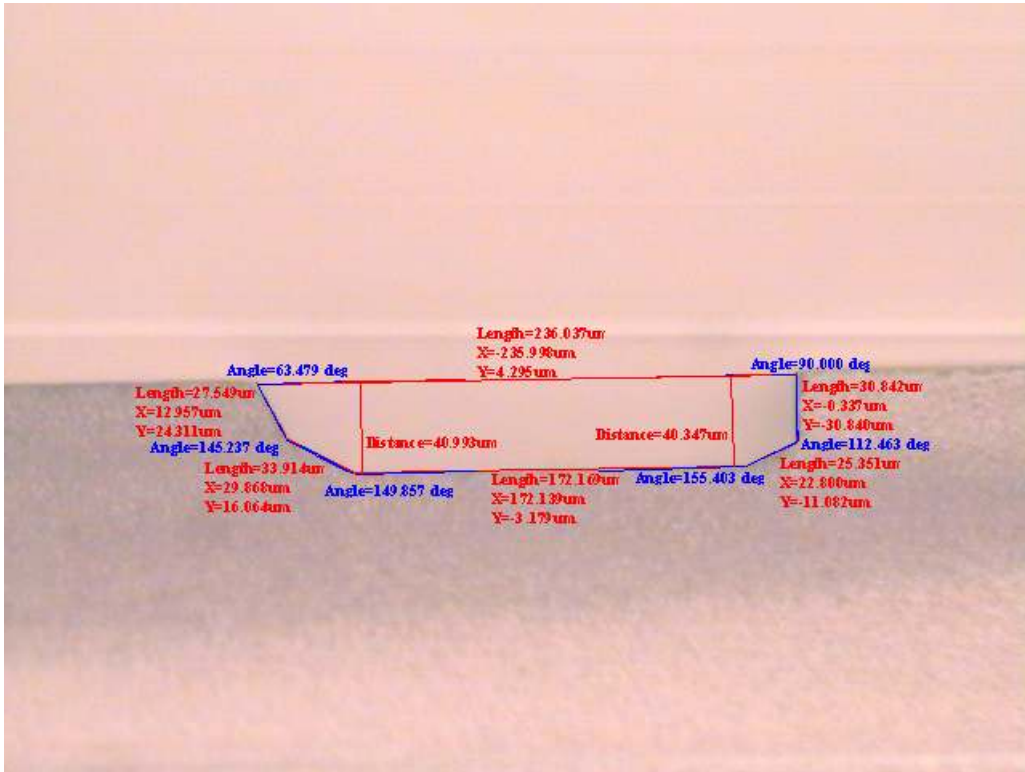


圖 5-18 $\varphi=265^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=85^\circ$ 為鏡射對稱

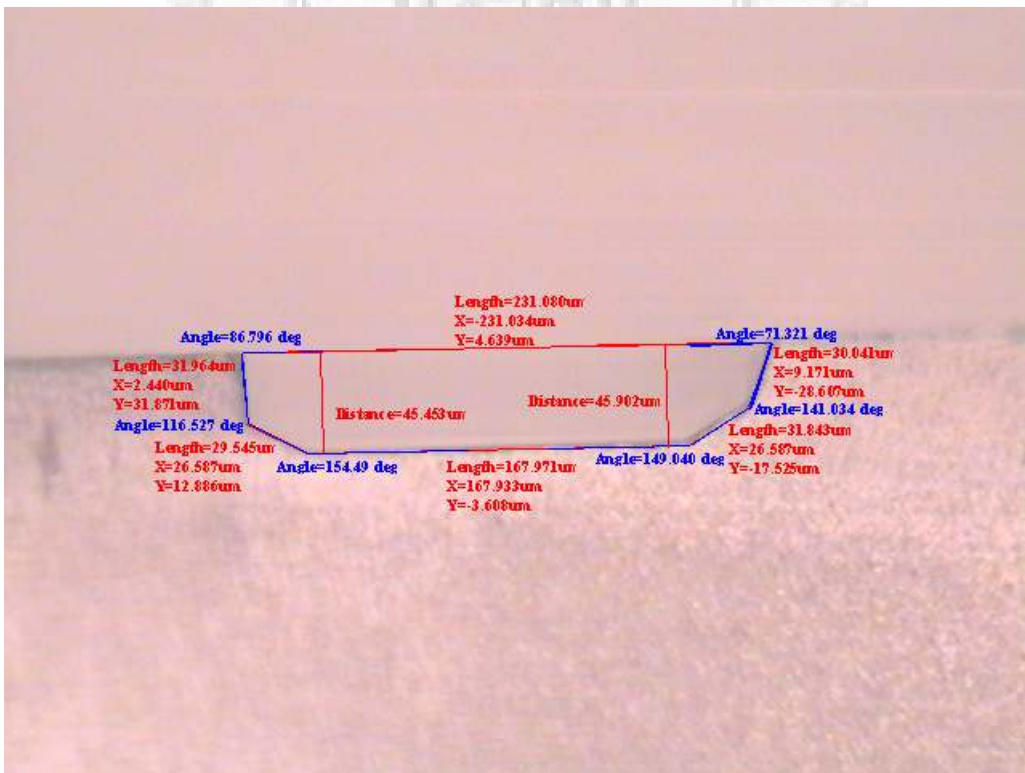


圖 5-19 $\varphi=90^\circ$ 之量測剖面圖

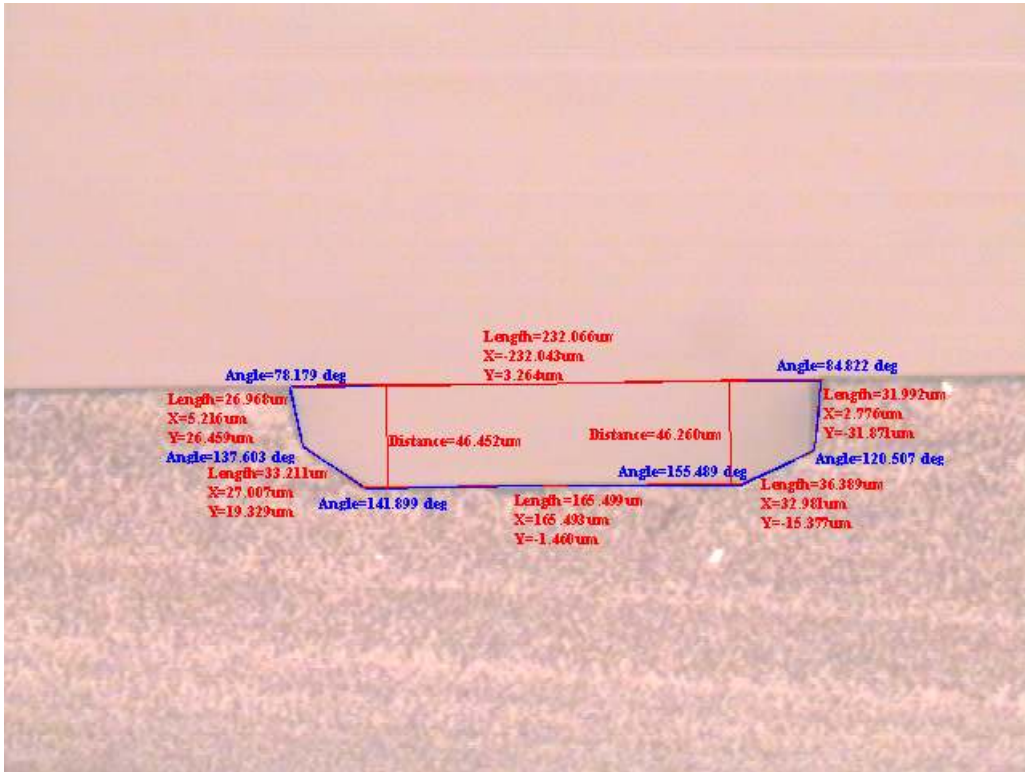


圖 5-20 $\phi=95^\circ$ 之量測剖面圖

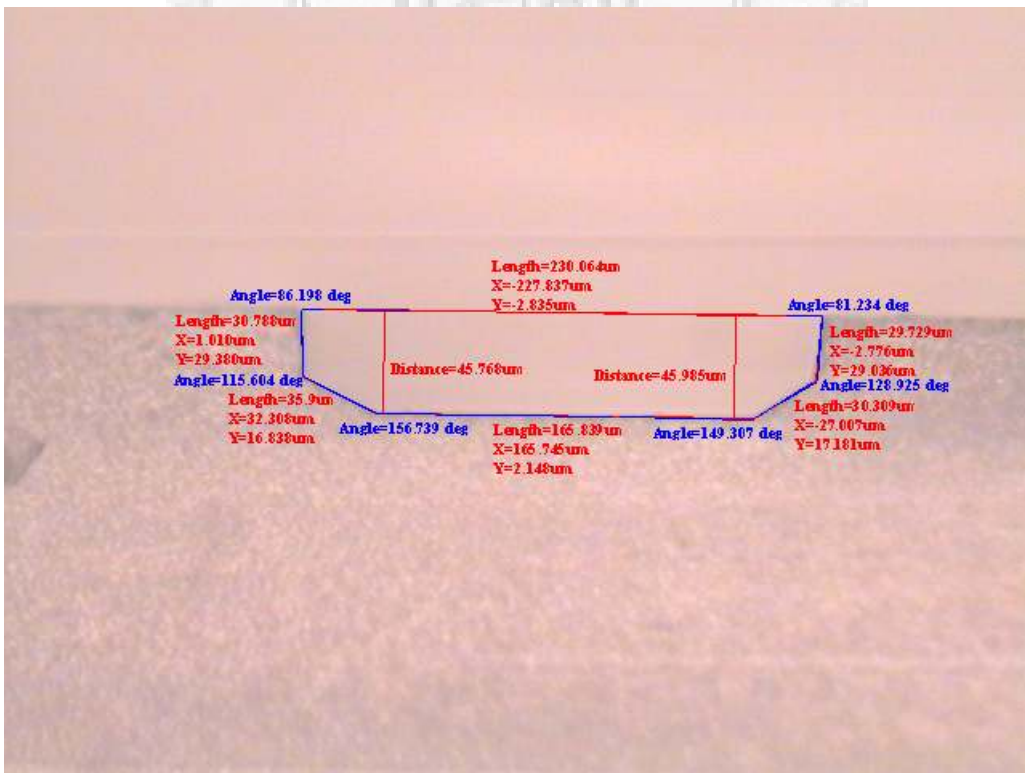


圖 5-21 $\phi=100^\circ$ 之量測剖面圖

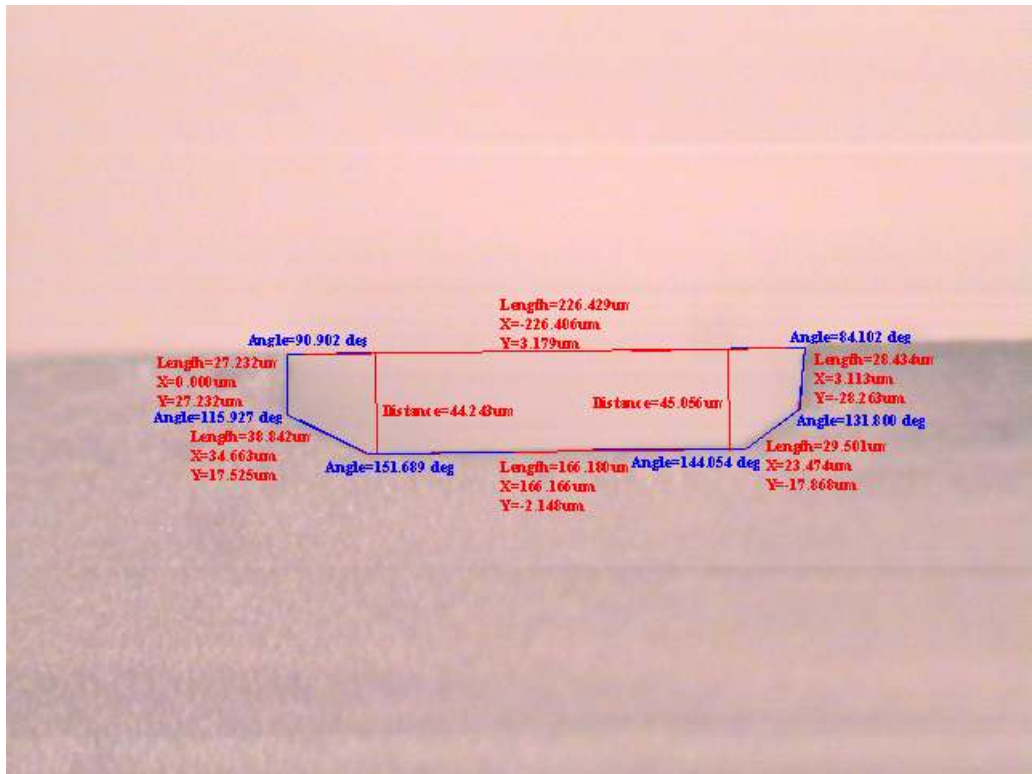


圖 5-22 $\varphi=105^\circ$ 之量測剖面圖

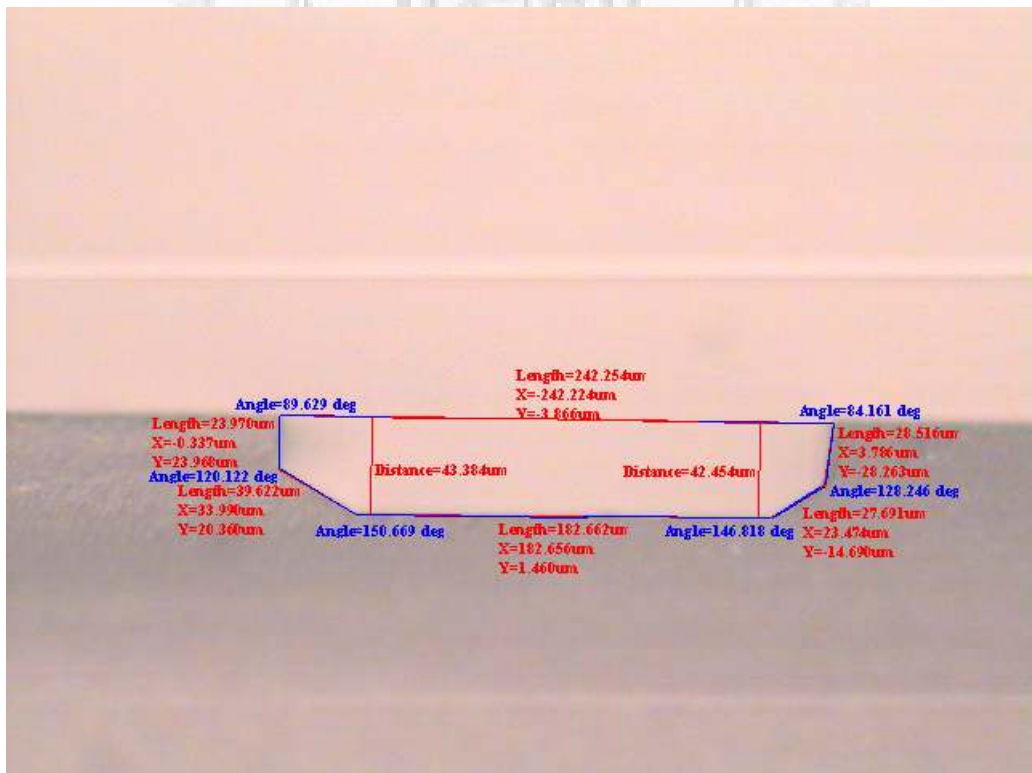


圖 5-23 $\varphi=110^\circ$ 之量測剖面圖

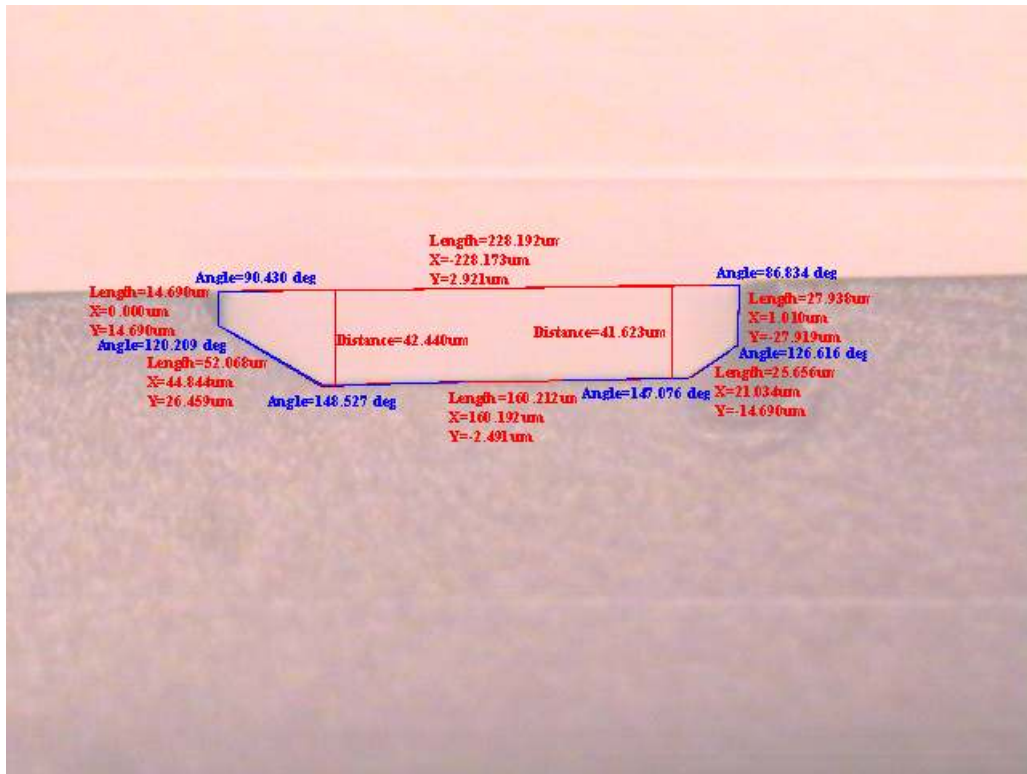


圖 5-24 $\phi=115^\circ$ 之量測剖面圖

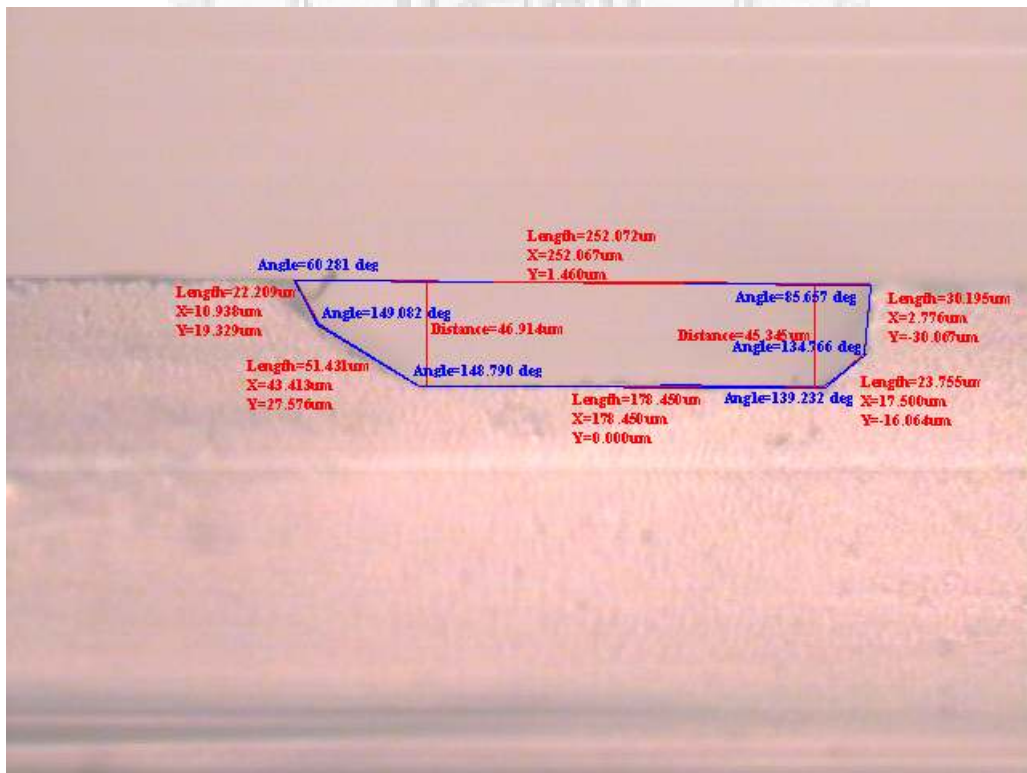


圖 5-25 $\phi=125^\circ$ 之量測剖面圖

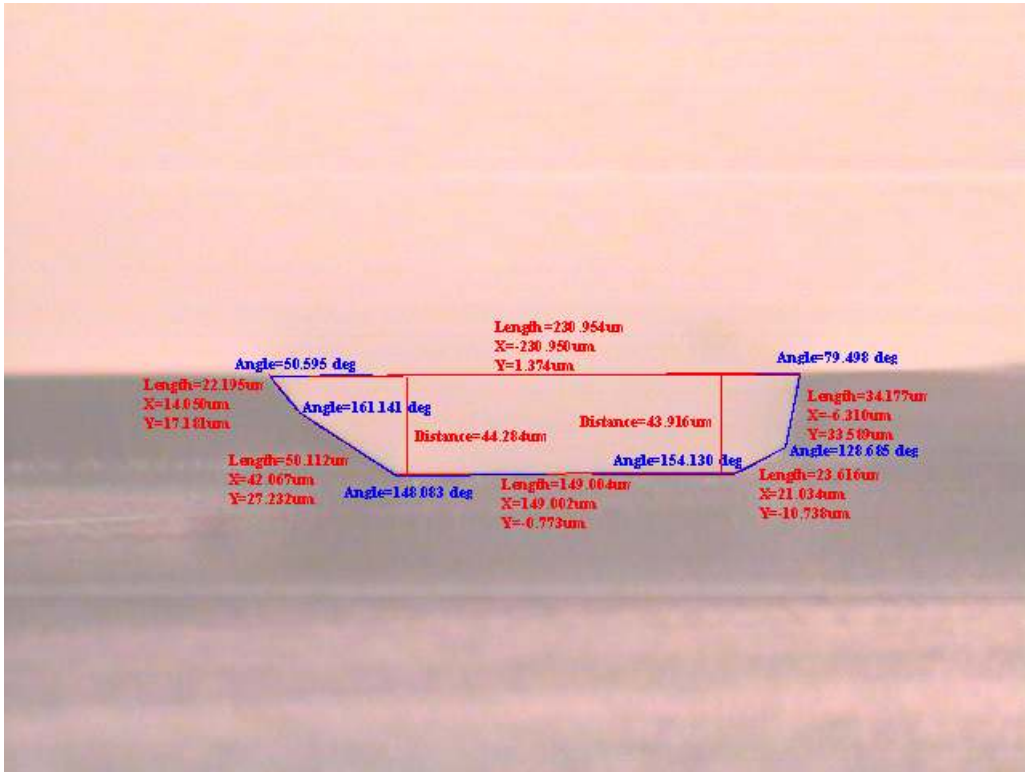


圖 5-26 $\varphi=130^\circ$ 之量測剖面圖

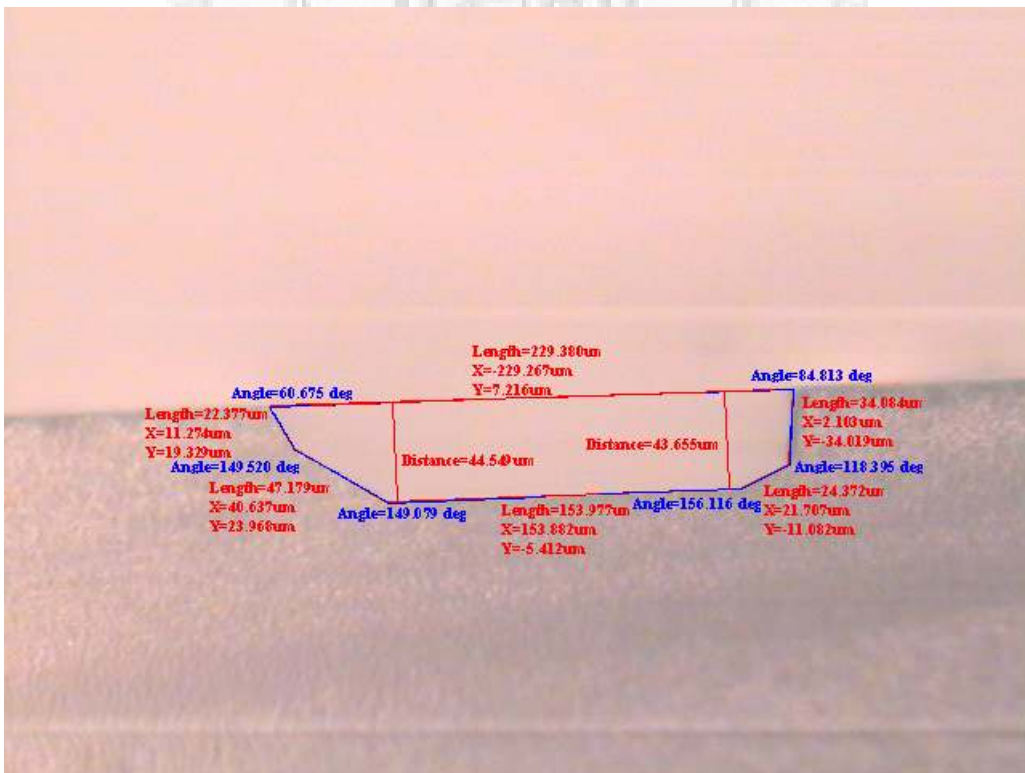


圖 5-27 $\varphi=135^\circ$ 之量測剖面圖

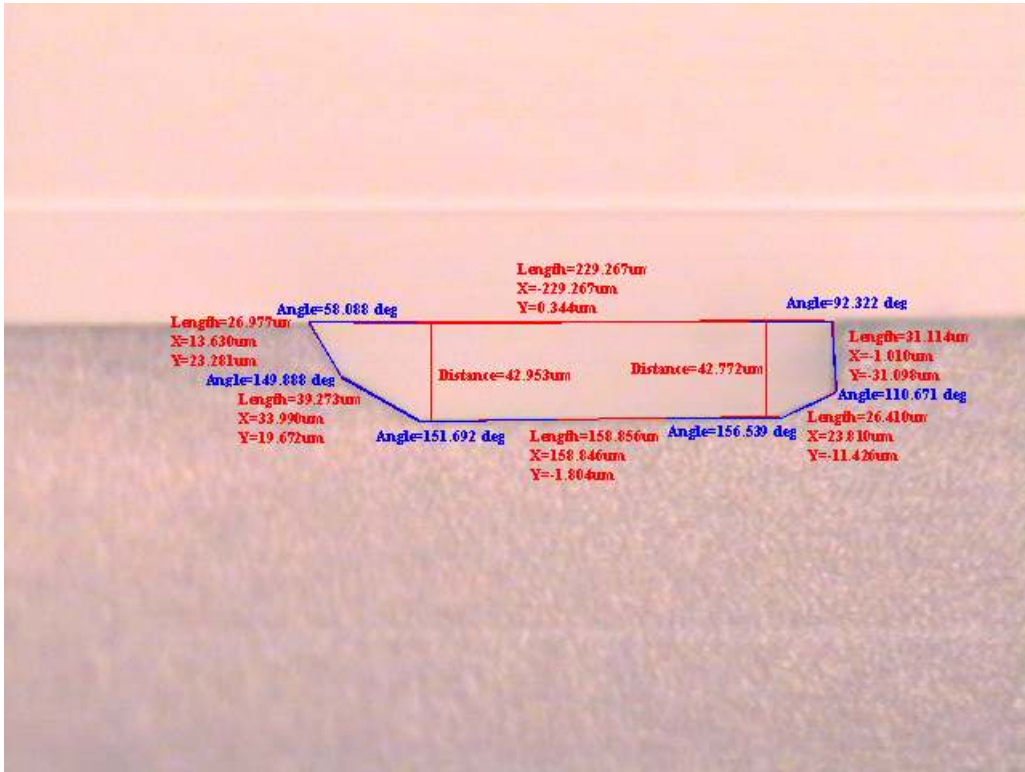


圖 5-28 $\varphi=140^\circ$ 之量測剖面圖

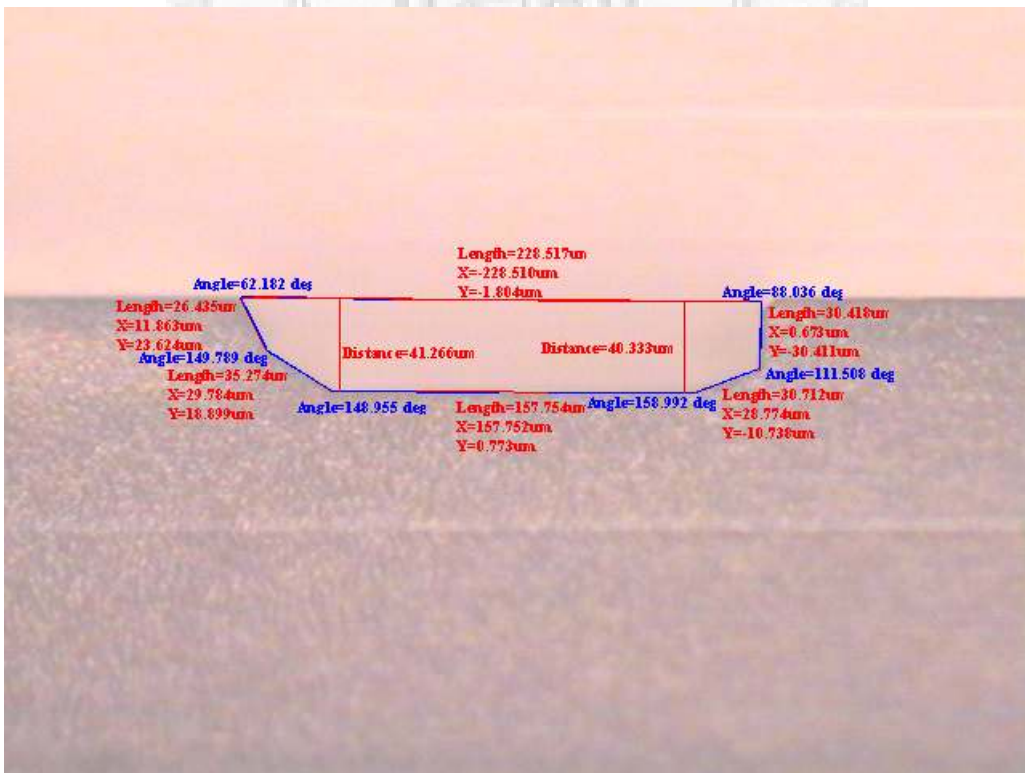


圖 5-29 $\varphi=145^\circ$ 之量測剖面圖

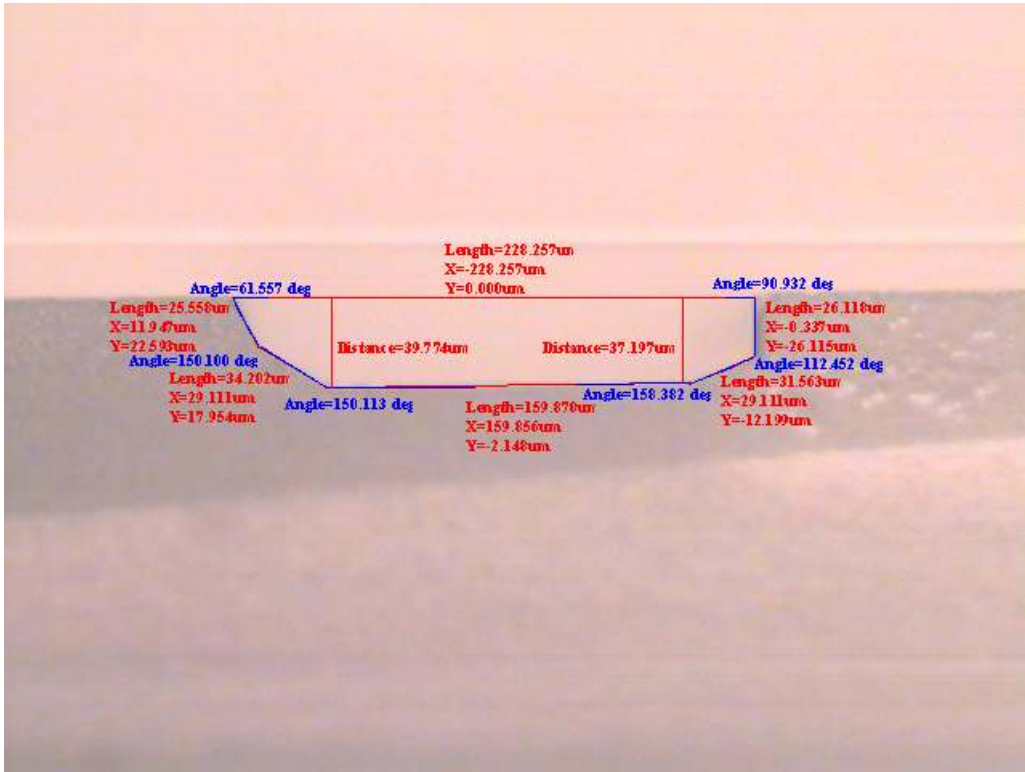


圖 5-30 $\varphi=150^\circ$ 之量測剖面圖

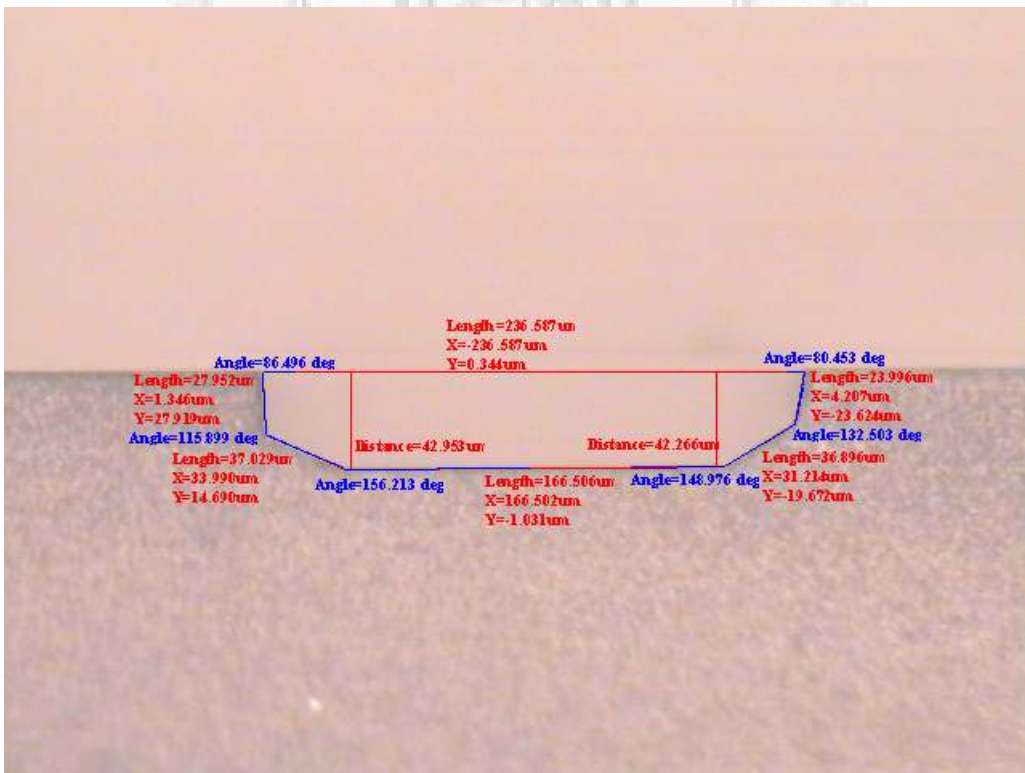


圖 5-31 $\varphi=335^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=155^\circ$ 為鏡射對稱

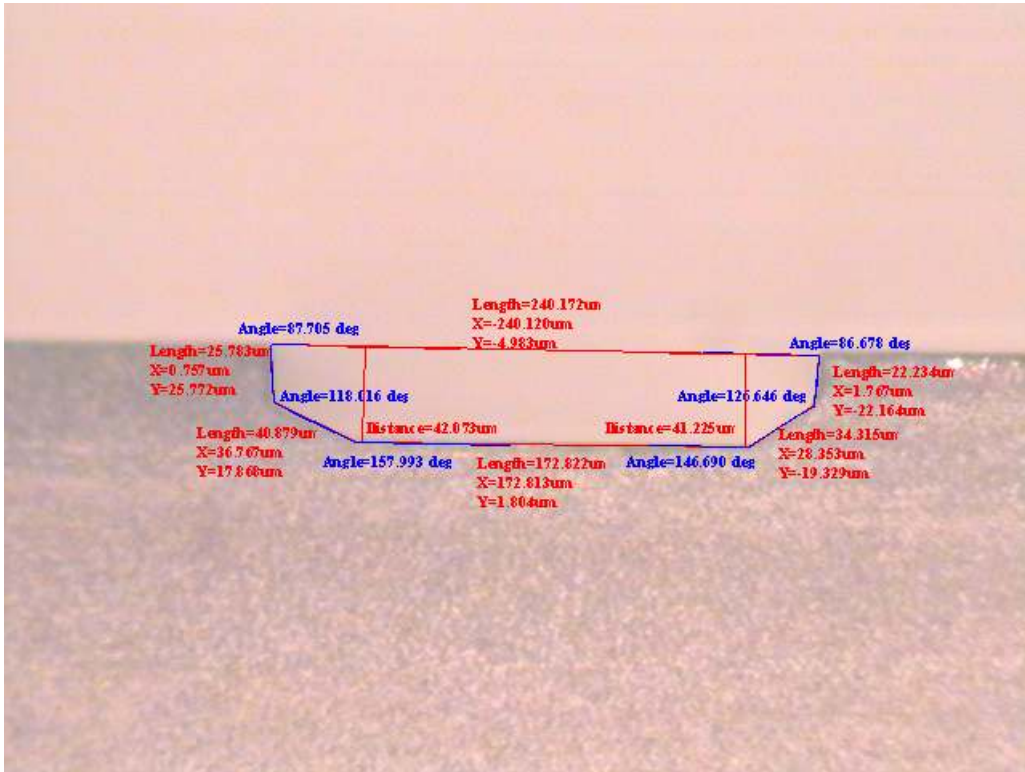


圖 5-32 $\varphi=340^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=160^\circ$ 為鏡射對稱

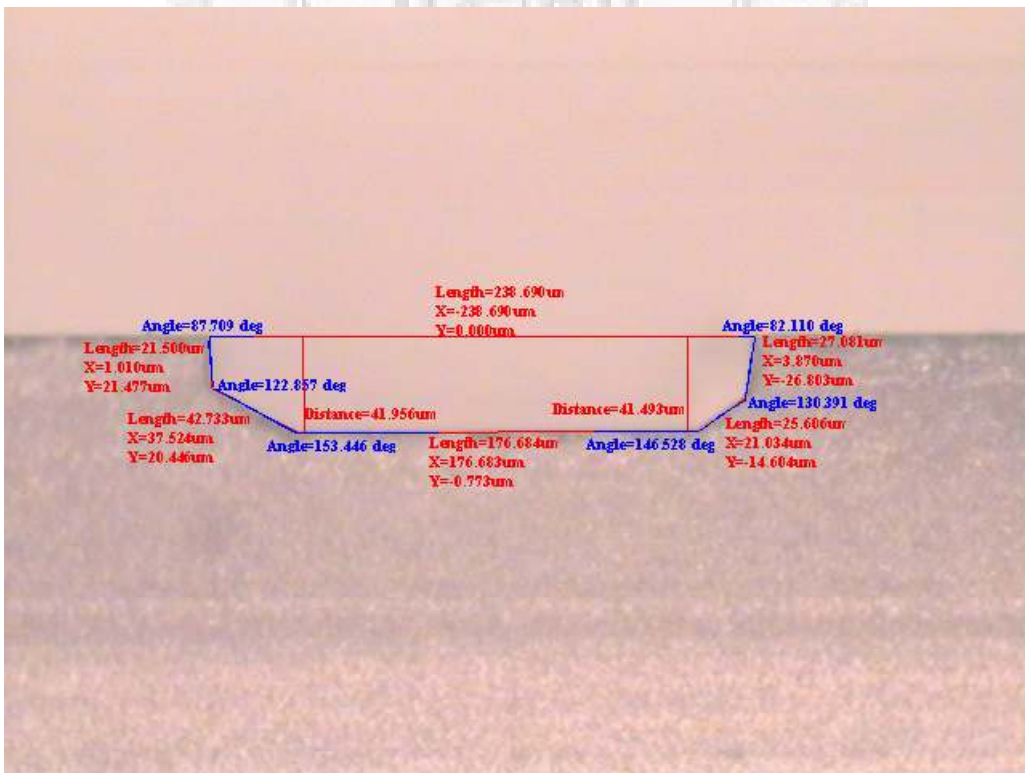


圖 5-33 $\varphi=345^\circ$ 之量測剖面圖，與 $\varphi=165^\circ$ 為鏡射對稱

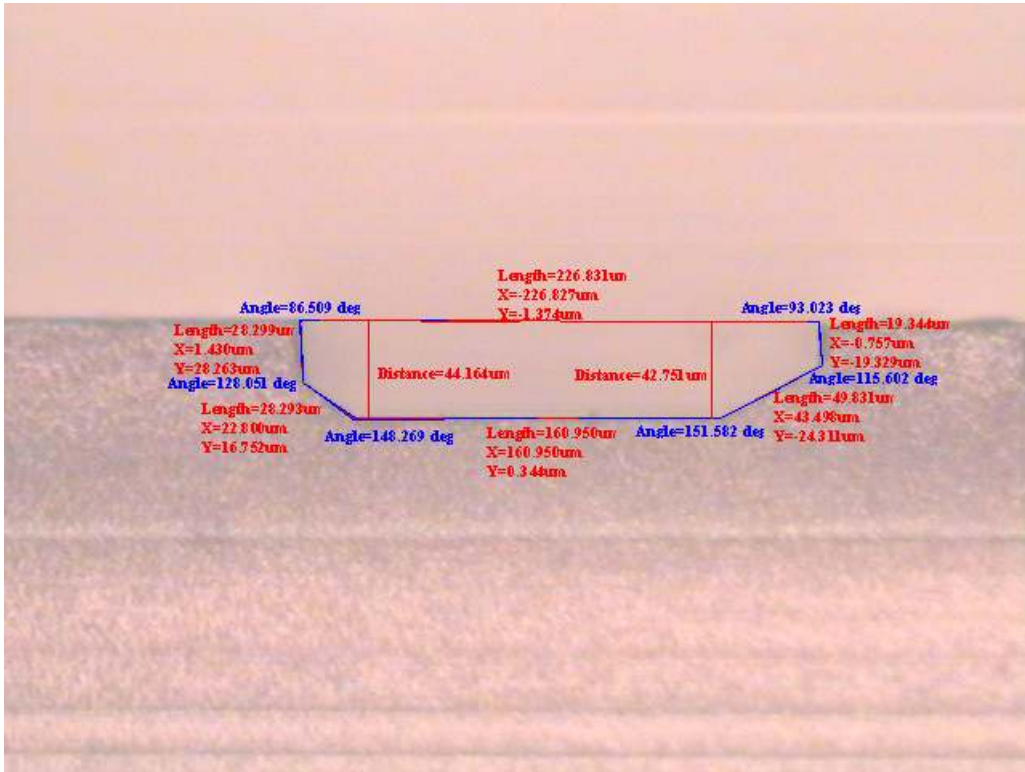


圖 5-34 $\varphi=170^\circ$ 之量測剖面圖

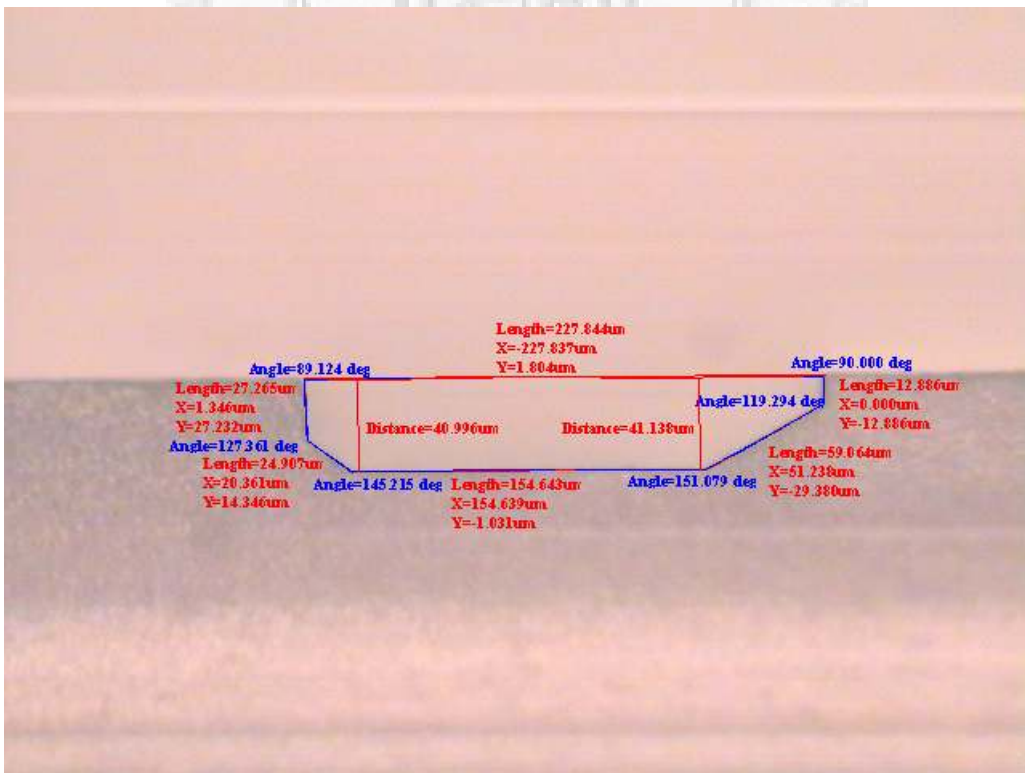


圖 5-35 $\varphi=175^\circ$ 之量測剖面圖



圖 5-36 $\varphi=0^\circ$ 之左邊外凸角隅



圖 5-37 $\varphi=0^\circ$ 之右邊外凸角隅

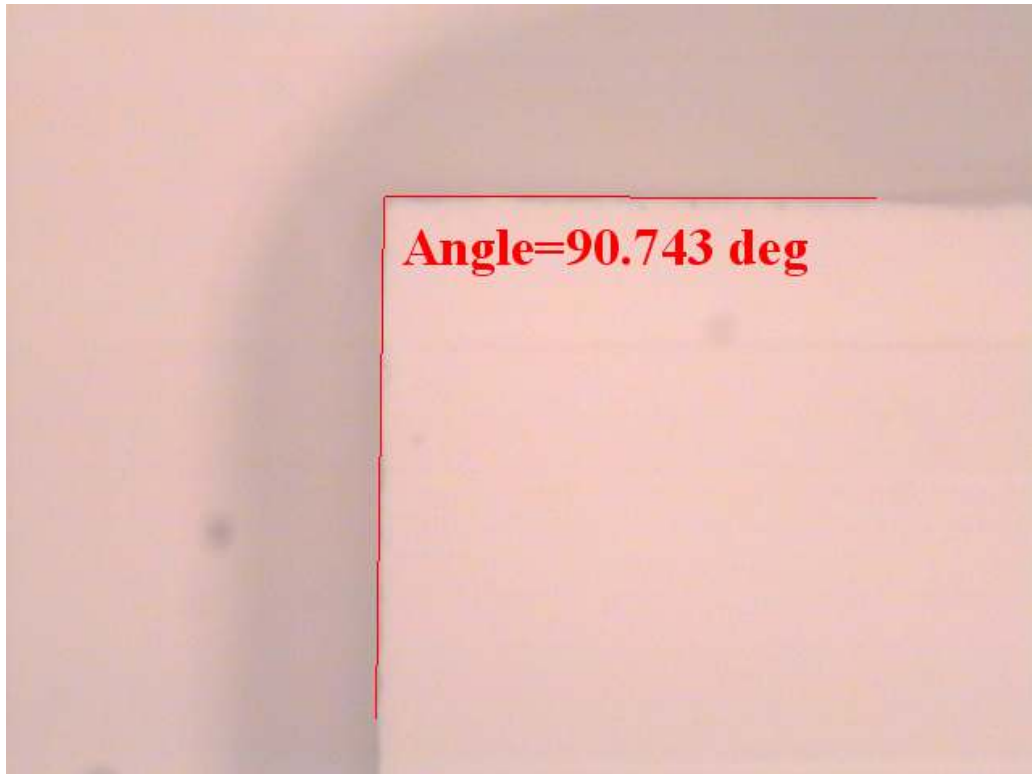


圖 5-38 $\varphi=90^\circ$ 之左邊外凸角隅



圖 5-39 $\varphi=90^\circ$ 之右邊外凸角隅

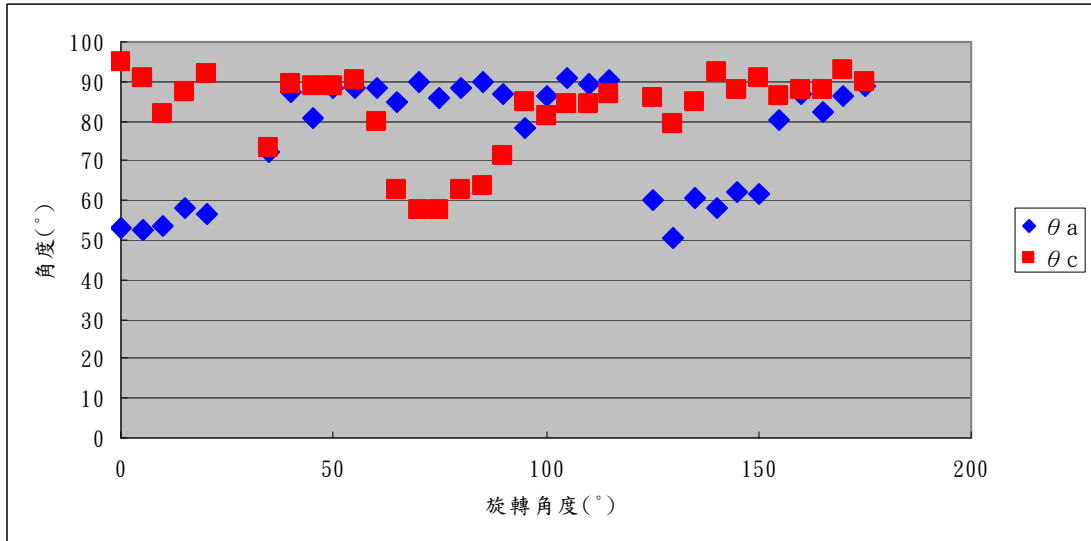


圖 5-40 旋轉角度(φ)與 θ_a 、 θ_c 關係圖

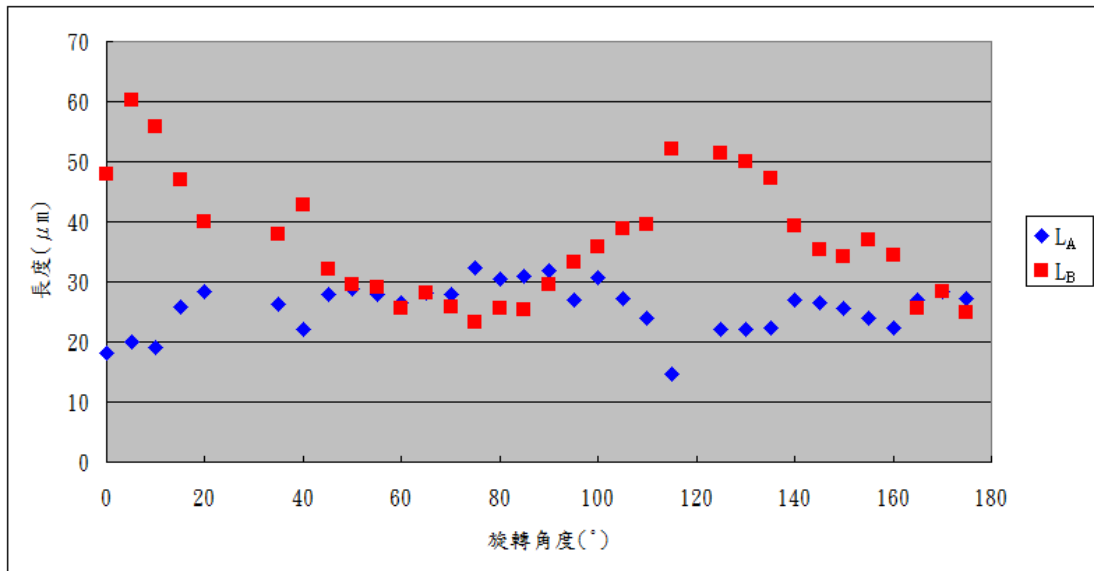


圖 5-41 旋轉角度(φ)與 L_A 、 L_B 關係圖

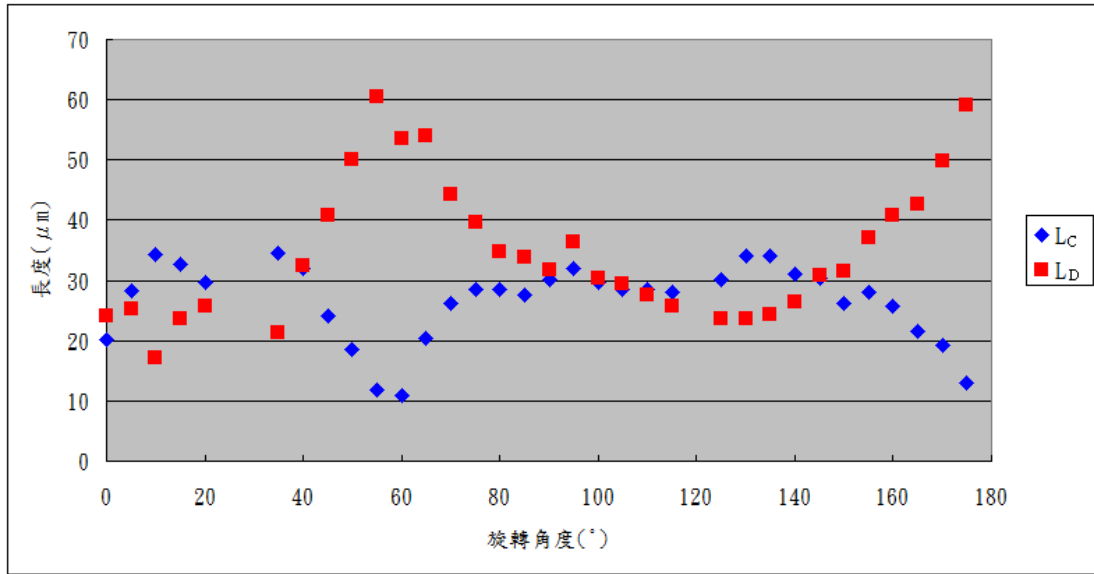


圖 5-42 旋轉角度(φ)與 L_C 、 L_D 關係圖

表 5-1 (ZYw)+2° 石英晶圓於 $HF:NH_4F = 2:3$ ，55°C 下 晶格夾角與晶格長度表

| 旋轉角度 φ (°) | θ_a | θ_{ab} | θ_{bz} | θ_c | θ_{cd} | θ_{dz} | L_A | L_B | L_C | L_D | L_T | h |
|-----------------------|------------|---------------|---------------|------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 0 | 53.185 | 156.613 | 153.336 | 95.122 | 126.435 | 139.556 | 18.066 | 47.832 | 20.180 | 24.067 | 237.117 | 36.227 |
| 5 | 52.716 | 154.576 | 152.108 | 90.925 | 127.533 | 139.506 | 19.931 | 60.337 | 28.271 | 25.233 | 248.972 | 44.588 |
| 10 | 53.611 | 157.224 | 148.434 | 81.811 | 136.025 | 140.215 | 19.170 | 55.842 | 34.416 | 17.208 | 245.443 | 45.388 |
| 15 | 58.168 | 151.77 | 149.77 | 87.570 | 128.387 | 146.407 | 25.907 | 46.864 | 32.577 | 23.701 | 240.137 | 45.702 |
| 20 | 56.328 | 152.992 | 149.488 | 92.002 | 122.629 | 145.321 | 28.487 | 40.087 | 29.741 | 25.691 | 228.611 | 43.408 |
| 35 | 72.216 | 141.759 | 148.68 | 73.290 | 140.389 | 145.571 | 26.327 | 38.012 | 34.523 | 21.369 | 252.083 | 43.414 |
| 40 | 87.559 | 131.143 | 146.384 | 89.233 | 117.789 | 152.696 | 22.187 | 42.768 | 31.890 | 32.454 | 246.451 | 44.428 |
| 45 | 80.638 | 128.162 | 148.991 | 88.749 | 121.865 | 150.886 | 27.895 | 32.112 | 24.056 | 40.781 | 236.000 | 43.777 |
| 50 | 88.431 | 122.531 | 149.994 | 88.775 | 124.021 | 150.31 | 28.724 | 29.556 | 18.571 | 50.019 | 234.826 | 45.359 |
| 55 | 88.195 | 126.964 | 149.145 | 90.405 | 122.447 | 148.178 | 27.938 | 29.162 | 11.769 | 60.539 | 235.169 | 44.205 |
| 60 | 88.313 | 126.294 | 144.752 | 79.623 | 131.782 | 145.334 | 26.459 | 25.567 | 10.883 | 53.471 | 225.095 | 42.585 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 65 | 84.703 | 139.652 | 137.512 | 62.630 | 149.975 | 146.456 | 28.132 | 28.078 | 20.282 | 53.991 | 251.368 | 46.643 |
| 70 | 89.701 | 127.18 | 145.923 | 57.748 | 152.565 | 152.296 | 27.928 | 25.725 | 26.242 | 44.341 | 236.251 | 43.994 |
| 75 | 85.772 | 129.627 | 146.374 | 57.623 | 152.865 | 148.577 | 32.263 | 23.144 | 28.559 | 39.662 | 244.701 | 44.324 |
| 80 | 88.546 | 122.83 | 146.744 | 62.542 | 148.002 | 147.065 | 30.430 | 25.672 | 28.429 | 34.847 | 245.43 | 43.013 |
| 85 | 90 | 112.463 | 155.403 | 63.479 | 145.237 | 149.857 | 30.842 | 25.351 | 27.549 | 33.914 | 236.037 | 40.993 |
| 90 | 86.796 | 116.527 | 154.49 | 71.321 | 141.034 | 149.040 | 31.964 | 29.545 | 30.041 | 31.843 | 231.080 | 45.453 |
| 95 | 78.179 | 137.603 | 141.899 | 84.822 | 120.507 | 155.489 | 26.968 | 33.211 | 31.992 | 36.389 | 232.066 | 46.452 |
| 100 | 86.198 | 115.604 | 156.739 | 81.234 | 128.925 | 149.307 | 30.788 | 35.900 | 29.729 | 30.309 | 230.064 | 45.768 |
| 105 | 90.902 | 115.927 | 151.689 | 84.102 | 131.800 | 144.054 | 27.232 | 38.844 | 28.434 | 29.501 | 226.429 | 44.243 |
| 110 | 89.629 | 120.122 | 150.669 | 84.161 | 128.246 | 146.818 | 23.970 | 39.622 | 28.516 | 27.691 | 242.254 | 43.384 |
| 115 | 90.430 | 120.209 | 148.527 | 86.834 | 126.616 | 147.076 | 14.690 | 52.068 | 27.938 | 25.656 | 228.192 | 42.440 |
| 125 | 60.281 | 149.-82 | 148.79 | 85.657 | 134.766 | 139.232 | 22.209 | 51.431 | 30.195 | 23.755 | 252.072 | 46.910 |
| 130 | 50.595 | 161.141 | 148.083 | 79.498 | 128.685 | 154.13 | 22.195 | 50.112 | 34.177 | 23.616 | 230.954 | 44.284 |
| 135 | 60.675 | 149.52 | 149.079 | 84.813 | 118.395 | 156.116 | 22.377 | 47.179 | 34.084 | 24.372 | 229.380 | 44.549 |
| 140 | 58.088 | 149.888 | 151.692 | 92.322 | 110.671 | 156.539 | 26.977 | 39.273 | 31.114 | 26.410 | 229.267 | 42.953 |
| 145 | 62.182 | 149.789 | 148.955 | 88.036 | 111.508 | 158.992 | 26.435 | 35.274 | 30.418 | 30.712 | 228.517 | 41.266 |
| 150 | 61.557 | 150.100 | 150.113 | 90.932 | 112.452 | 158.382 | 25.558 | 34.202 | 26.118 | 31.563 | 228.257 | 39.774 |
| 155 | 80.453 | 132.503 | 148.976 | 86.496 | 115.899 | 156.213 | 23.996 | 36.896 | 27.952 | 37.029 | 236.587 | 42.953 |
| 160 | 86.678 | 126.646 | 146.690 | 87.705 | 118.016 | 157.933 | 22.234 | 34.315 | 25.783 | 40.879 | 240.172 | 42.073 |
| 165 | 82.110 | 130.391 | 146.528 | 87.709 | 122.857 | 153.446 | 27.081 | 25.606 | 21.500 | 42.733 | 238.690 | 41.956 |
| 170 | 86.509 | 128.051 | 148.269 | 93.023 | 115.602 | 151.582 | 28.299 | 28.293 | 19.344 | 49.831 | 226.831 | 44.164 |
| 175 | 89.124 | 127.361 | 145.215 | 90.000 | 119.294 | 151.079 | 27.265 | 24.907 | 12.886 | 59.064 | 227.844 | 40.996 |

5.2 計算晶格面米勒-布拉法斯指標

將試片置於光學顯微鏡下觀察，配合量測軟體 measure tools，則可量測出蝕刻面角度(θ_a 、 θ_c 、 θ_{bz} 、 θ_{dz})，再透過式(3-3)至式(3-5)，即可求出其晶面米勒-布拉法斯指標。以旋轉角度 $\varphi=0^\circ$ ，蝕刻面傾斜角度 $\theta_c=95.122^\circ$ 為例，如圖 5-3：

根據式(3-3)，可以得知在(ZYw)+2°座標系統下之晶面法向量 \mathbf{n} ：

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin 95.122^\circ \times \cos 0^\circ \\ \sin 95.122^\circ \times \sin 0^\circ \\ \cos 95.122^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.996 \\ 0 \\ -0.08928 \end{bmatrix}$$

利用座標軸旋轉，將晶面法向量轉換至石英三軸座標系統：

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-2^\circ) & \sin(-2^\circ) \\ 0 & -\sin(-2^\circ) & \cos(-2^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.996 \\ 0 \\ -0.08928 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.996 \\ 0.003 \\ -0.892 \end{bmatrix}$$

晶面對石英三軸座標之平面方程式即為 $0.996X + 0.003Y - 0.892Z = 1$ 。利用此平面方程式，求取晶面對石英四軸座標 \mathbf{a}_1 、 \mathbf{a}_2 、 \mathbf{a}_3 、 \mathbf{a}_4 之交點 D、E、F、G：

$$D = \left(\frac{1}{x_2}, 0, 0 \right) = (1.004, 0, 0)$$

$$E = \left(\frac{1}{x_2 - \sqrt{3}y_2}, \frac{-\sqrt{3}}{x_2 - \sqrt{3}y_2}, 0 \right) = (1.009, -1.748, 0)$$

$$F = \left(0, 0, \frac{1}{z_2} \right) = (0, 0, -11.208)$$

$$G = \left(\frac{1}{x_2 + \sqrt{3}y_2}, \frac{-\sqrt{3}}{x_2 + \sqrt{3}y_2}, 0 \right) = (0.999, 1.730, 0)$$

晶面對石英四軸座標 \mathbf{a}_1 、 \mathbf{a}_2 、 \mathbf{a}_3 、 \mathbf{a}_4 之截距為：

$$OD=1.004$$

$$OE=-2.019$$

$$OF=-11.208$$

$$OG=-1.997$$

根據石英晶面截距與米勒-布拉法斯指標關係 $OD = \frac{4.9135}{h}$ 、 $OE = \frac{4.9135}{k}$ 、

OF= $\frac{5.4050}{l}$ 、OG= $\frac{4.9135}{i}$ ，可以得到 h 、 k 、 i 、 l 比例關係約為

4.85 : -2.42 : -2.43 : -0.484，將其化減為簡單整數比，則可得到米勒-布拉法斯

指標 $(h k i l) = (10 \bar{5} \bar{5} \bar{1})$ 。依此方式計算所有晶面之米勒-布拉法斯指標，結果如

表 5-2。

| 表 5-2(ZYw)+2° 石英晶圓於 HF:NH ₄ F = 2:3，55°C 下 晶格指標 | | | | |
|--|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 旋轉角度 ϕ (°) | 晶面 A 米勒-布拉 法斯指標 | 晶面 B 米勒-布拉 法斯指標 | 晶面 C 米勒-布拉 法斯指標 | 晶面 D 米勒-布拉 法斯指標 |
| 0 | ($\bar{16} 8 8 13$) | ($\bar{9} 4 5 19$) | ($10 \bar{5} \bar{5} \bar{1}$) | ($13 \bar{7} \bar{6} 16$) |
| 5 | ($\bar{9} 4 5 7$) | ($\bar{9} 3 6 19$) | ($33 \bar{14} \bar{19} 1$) | ($13 \bar{6} \bar{7} 16$) |
| 10 | ($\bar{8} 3 5 6$) | ($\bar{5} 2 3 10$) | ($12 \bar{4} \bar{8} 1$) | ($3 \bar{1} \bar{2} 3$) |
| 15 | ($\bar{4} 1 3 3$) | ($\bar{3} 1 2 6$) | ($158 \bar{43} \bar{115} 9$) | ($5 \bar{2} \bar{3} 9$) |
| 20 | ($\bar{5} 1 4 4$) | ($\bar{4} 1 3 8$) | ($77 \bar{14} \bar{63} 2$) | ($8 \bar{2} \bar{6} 13$) |
| 35 | ($\bar{11} \bar{1} 12 4$) | ($\bar{4} 1 5 9$) | ($9 1 \bar{10} 4$) | ($15 1 \bar{16} 30$) |
| 40 | ($\bar{25} \bar{6} 31 2$) | ($\bar{7} \bar{2} 9 15$) | ($20 4 \bar{24} 1$) | ($3 1 \bar{4} 10$) |
| 45 | ($\bar{14} \bar{5} 19 3$) | ($\bar{4} \bar{2} 6 9$) | ($\bar{14} \bar{5} 19 1$) | ($7 2 \bar{9} 19$) |
| 50 | ($\bar{32} \bar{17} 49 1$) | ($\bar{2} \bar{1} 3 6$) | ($\bar{43} \bar{23} 66 4$) | ($3 2 \bar{5} 10$) |
| 55 | ($\bar{11} \bar{8} 19 1$) | ($\bar{7} \bar{4} 11 18$) | ($26 19 \bar{45} 1$) | ($6 4 \bar{10} 19$) |
| 60 | ($\bar{22} \bar{22} 44 1$) | ($\bar{6} \bar{5} 11 18$) | ($3 3 \bar{6} 1$) | ($6 5 \bar{11} 18$) |
| 65 | ($\bar{4} \bar{6} 10 1$) | ($\bar{6} \bar{8} 14 15$) | ($7 10 \bar{17} 11$) | ($3 4 \bar{7} 11$) |
| 70 | ($\bar{5} \bar{9} 14 1$) | ($\bar{2} \bar{4} 6 9$) | ($1 2 \bar{3} 2$) | ($1 2 \bar{3} 6$) |

| | | | | |
|-----|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 75 | $(\bar{1} \bar{3} 4 1)$ | $(\bar{1} \bar{3} 4 7)$ | $(1 2 \bar{3} 3)$ | $(1 3 \bar{4} 7)$ |
| 80 | $(\bar{3} \bar{15} 18 1)$ | $(\bar{1} \bar{5} 6 10)$ | $(2 11 \bar{13} 9)$ | $(1 5 \bar{6} 11)$ |
| 85 | $(\bar{1} \bar{10} 11 1)$ | $(\bar{1} \bar{9} 10 24)$ | $(1 10 \bar{11} 8)$ | $(1 9 \bar{10} 22)$ |
| 90 | $(0 \bar{17} 17 1)$ | $(0 \bar{1} 1 3)$ | $(0 2 \bar{2} 1)$ | $(0 1 \bar{1} 2)$ |
| 95 | $(1 \bar{9} 8 2)$ | $(1 \bar{14} 13 21)$ | $(\bar{1} 11 \bar{10} 2)$ | $(\bar{1} 9 \bar{8} 25)$ |
| 100 | $(2 \bar{13} 11 1)$ | $(1 \bar{5} 4 12)$ | $(\bar{1} 6 \bar{5} 1)$ | $(\bar{1} 5 \bar{4} 11)$ |
| 105 | $(6 \bar{21} 15 \bar{1})$ | $(1 \bar{4} 3 9)$ | $(\bar{2} 9 \bar{7} 2)$ | $(\bar{2} 7 \bar{5} 13)$ |
| 110 | $(8 \bar{24} 16 1)$ | $(4 \bar{12} 8 23)$ | $(\bar{5} 14 \bar{9} 2)$ | $(\bar{1} 3 \bar{2} 5)$ |
| 115 | $(16 \bar{38} 22 \bar{1})$ | $(2 \bar{5} 3 9)$ | $(\bar{8} 19 \bar{11} 2)$ | $(\bar{3} 7 \bar{4} 12)$ |
| 125 | $(2 \bar{4} 2 3)$ | $(3 \bar{5} 9 2)$ | $(\bar{6} 10 \bar{4} 1)$ | $(\bar{7} 12 \bar{5} 17)$ |
| 130 | $(2 \bar{3} 1 3)$ | $(2 \bar{3} 1 6)$ | $(\bar{4} 6 \bar{2} 1)$ | $(\bar{3} 4 \bar{1} 10)$ |
| 135 | $(3 \bar{5} 2 3)$ | $(7 \bar{10} 3 18)$ | $(\bar{12} 16 \bar{4} 1)$ | $(\bar{2} 3 \bar{1} 7)$ |
| 140 | $(5 \bar{6} 1 4)$ | $(7 \bar{9} 2 20)$ | $(\bar{11} 13 \bar{2} 2)$ | $(\bar{3} 4 \bar{1} 10)$ |
| 145 | $(9 \bar{10} 1 6)$ | $(6 \bar{7} 1 13)$ | $(\bar{9} 10 \bar{1} 3)$ | $(\bar{4} 4 0 15)$ |
| 150 | $(4 \bar{4} 0 3)$ | $(16 \bar{17} 1 36)$ | $(\bar{1} 1 0 \bar{0})$ | $(\bar{7} 6 1 20)$ |
| 155 | $(10 \bar{9} \bar{1} 2)$ | $(\bar{1} 1 0 2)$ | $(10 \bar{9} \bar{1} 1)$ | $(\bar{6} 5 1 16)$ |
| 160 | $(15 \bar{13} \bar{2} 1)$ | $(5 \bar{4} \bar{1} 9)$ | $(13 \bar{11} \bar{2} 1)$ | $(\bar{4} 3 1 12)$ |
| 165 | $(15 \bar{13} \bar{2} 1)$ | $(3 \bar{2} \bar{1} 5)$ | $(19 \bar{14} \bar{5} 1)$ | $(\bar{5} 3 2 11)$ |
| 170 | $(9 \bar{6} \bar{3} 1)$ | $(4 \bar{3} \bar{1} 8)$ | $(\bar{81} 53 \bar{28} 4)$ | $(\bar{3} 2 1 7)$ |

| | | | | |
|-----|------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------|
| 175 | (66 $\bar{38}$ $\bar{28}$ 3) | (19 $\bar{12}$ $\bar{7}$ 30) | ($\bar{49}$ 28 21 1) | ($\bar{5}$ 3 2 9) |
|-----|------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------|



5.3 利用內凹角隅理論公式計算晶格面蝕刻速率

將試片置於光學顯微鏡下觀察，配合量測軟體 measure tools，則可量測出蝕刻面角度(θ_a 、 θ_{ab} 、 θ_{bz} 、 θ_c 、 θ_{cd} 、 θ_{dz})以及蝕刻面長度(L_A 、 L_B 、 L_C 、 L_D 、 L_Z)；蝕刻剖面有五個底切面與六個角度，依據方程式(3-22)至(3-28)即可推算出晶格面的蝕刻速率。

以旋轉角度 $\varphi=0^\circ$ 剖面為例，來計算晶格面蝕刻速率，計算過程如下：

t：蝕刻時間(50min)

$$L_L + L_R = L_T - L_o = 237.117 - 225 = 12.117$$

$$R_A = \frac{L_L}{t} \times \sin(\theta_a) = \frac{L_L}{60} \times \sin(53.185) = 0.013343L_L$$

$$R_C = \frac{L_R}{t} \times \sin(\theta_c) = \frac{14.117 - L_L}{60} \times \sin(95.122) = 0.20114 - 0.0166L_L$$

$$\frac{dL_A}{dt} = \frac{R_B}{\sin(180 - \theta_{ab})} - \frac{R_A}{\tan(180 - \theta_{ab})} - \frac{R_A}{\tan(180 - \theta_a)}$$

$$\Rightarrow R_B = \sin(23.387) \left(\frac{0.013343L_L}{\tan(23.387)} + \frac{0.013343L_L}{\tan(126.815)} + \frac{18.066}{60} \right) = 0.00828245L_L + 0.1195186$$

$$\frac{dL_B}{dt} = \frac{R_A}{\sin(180 - \theta_{ab})} - \frac{R_B}{\tan(180 - \theta_{ab})} + \frac{R_Z}{\sin(180 - \theta_{bz})} - \frac{R_B}{\tan(180 - \theta_{bz})}$$

$$\Rightarrow R_{Z(\text{left})} = \sin(26.664) \times$$

$$\left(\frac{8.28245 \times 10^{-3} L_L + 0.1195186}{\tan(23.387)} + \frac{8.28245 \times 10^{-3} L_L + 0.1195186}{\tan(26.664)} - \frac{0.013343L_L}{\sin(23.387)} + \frac{47.832}{60} \right)$$

$$= 9.1119 \times 10^{-4} L_L + 0.585886$$

$$\frac{dL_C}{dt} = \frac{R_D}{\sin(180 - \theta_{cd})} - \frac{R_C}{\tan(180 - \theta_{cd})} - \frac{R_C}{\tan(180 - \theta_c)}$$

$$\Rightarrow R_D = \sin(53.565) \left(\frac{0.20114 - 0.0166L_L}{\tan(53.565)} + \frac{0.20114 - 0.0166L_L}{\tan(84.848)} + \frac{20.18}{60} \right)$$

$$= 0.404557 - 0.011056L_L$$

$$\frac{dL_D}{dt} = \frac{R_C}{\sin(180-\theta_{cd})} - \frac{R_D}{\tan(180-\theta_{cd})} + \frac{R_Z}{\sin(180-\theta_{dz})} - \frac{R_D}{\tan(180-\theta_{dz})}$$

$$\Rightarrow R_{Z(\text{right})} = \sin(40.444) \times \left(\frac{0.404557 - 0.011063L_L}{\tan(53.565)} + \frac{0.404557 - 0.011063L_L}{\tan(40.444)} - \frac{0.2011434 - 0.0166L_L}{\sin(53.565)} + \frac{24.067}{60} \right)$$

$$= 0.599639 - 4.9906 \times 10^{-4} L_L$$

由於底面的蝕刻速率需相等， $R_{z(\text{left})} = R_{z(\text{right})}$ ，可求出 L_L ：

$$9.1119 \times 10^{-4} L_L + 0.588568 = 0.599639 - 4.9906 \times 10^{-4} L_L$$

$$\Rightarrow 0.00141096 L_L = 0.011071$$

$$\Rightarrow L_L = 7.8464 (\mu\text{m})$$

將 L_L 代入則可得到各蝕刻速率值： $R_A=0.12 \mu\text{m}/\text{min}$ 、 $R_B=0.194 \mu\text{m}/\text{min}$ 、 $R_C=0.053 \mu\text{m}/\text{min}$ 、 $R_D=0.306 \mu\text{m}/\text{min}$ 、 $R_{Z(\text{left})}=R_{Z(\text{right})}=0.597 \mu\text{m}/\text{min}$ 。

此系列蝕刻長度變化率與蝕刻速率的公式是否正確，可以利用直接量測底面蝕刻速率 R_Z 來進行驗證：

$$R_Z = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{36.277}{60} = 0.605 \mu\text{m}/\text{min}$$

$$Error = \frac{|0.597 - 0.605|}{0.605} \times 100\% = 1.303\%$$

經由上述的驗證方法與誤差結果可以發現利用此方法計算蝕刻速率的誤差皆在4%以內，因此可以證明內凹角隅蝕刻理論公式計算之蝕刻速率為正確。利用此方法計算所有蝕刻面之蝕刻速率，如表 5-3，其中部份數據因實驗因素而無法完成，在表格中將之略過。

| 旋轉角度 φ (°) | 蝕刻速率 R_A ($\mu\text{m}/\text{min}$) | 蝕刻速率 R_B ($\mu\text{m}/\text{min}$) | 蝕刻速率 R_C ($\mu\text{m}/\text{min}$) | 蝕刻速率 R_D ($\mu\text{m}/\text{min}$) | 蝕刻速率 R_Z ($\mu\text{m}/\text{min}$) | 計算 R_Z 與 實驗 R_Z 誤 差(%) |
|-----------------------|---|---|---|---|---|----------------------------------|
| 0 | 0.120 | 0.194 | 0.0525 | 0.306 | 0.597 | 1.303 |

| | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | 0.128 | 0.216 | 0.239 | 0.522 | 0.735 | 1.075 |
| 10 | 0.169 | 0.231 | 0.278 | 0.571 | 0.744 | 1.625 |
| 15 | 0.206 | 0.325 | 0.010 | 0.431 | 0.760 | 0.222 |
| 20 | 0.030 | 0.024 | 0.233 | 0.431 | 0.739 | 2.143 |
| 35 | 0.234 | 0.409 | 0.197 | 0.481 | 0.752 | 3.913 |
| 40 | 0.131 | 0.532 | 0.226 | 0.420 | 0.781 | 2.733 |
| 45 | 0.098 | 0.391 | 0.084 | 0.406 | 0.734 | 0.566 |
| 50 | 0.082 | 0.301 | 0.082 | 0.446 | 0.726 | 3.969 |
| 55 | 0.116 | 0.229 | 0.053 | 0.403 | 0.730 | 0.882 |
| 60 | 0.001 | 0.136 | 0.001 | 0.356 | 0.356 | 0.687 |
| 65 | 0.097 | 0.372 | 0.304 | 0.353 | 0.784 | 0.911 |
| 70 | 0.105 | 0.264 | 0.063 | 0.409 | 0.708 | 3.427 |
| 75 | 0.104 | 0.475 | 0.189 | 0.331 | 0.747 | 1.081 |
| 80 | 0.148 | 0.503 | 0.171 | 0.349 | 0.737 | 2.796 |
| 85 | 0.070 | 0.502 | 0.102 | 0.317 | 0.697 | 1.990 |
| 90 | 0.041 | 0.495 | 0.057 | 0.348 | 0.745 | 1.617 |
| 95 | 0.048 | 0.331 | 0.069 | 0.489 | 0.783 | 1.121 |
| 100 | 0.045 | 0.479 | 0.039 | 0.405 | 0.748 | 1.959 |
| 105 | 0.017 | 0.416 | 0.007 | 0.357 | 0.760 | 3.074 |
| 110 | 0.135 | 0.412 | 0.152 | 0.455 | 0.724 | 0.120 |
| 115 | 0.052 | 0.238 | 0.001 | 0.374 | 0.697 | 1.449 |
| 125 | 0.307 | 0.364 | 0.097 | 0.420 | 0.760 | 2.796 |
| 130 | 0.063 | 0.163 | 0.017 | 0.453 | 0.728 | 1.382 |
| 135 | 0.057 | 0.222 | 0.008 | 0.503 | 0.731 | 1.689 |
| 140 | 0.050 | 0.253 | 0.013 | 0.490 | 0.693 | 3.184 |

| | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 145 | 0.050 | 0.251 | 0.002 | 0.472 | 0.690 | 0.381 |
| 150 | 0.045 | 0.239 | 0.003 | 0.404 | 0.654 | 1.385 |
| 155 | 0.096 | 0.456 | 0.095 | 0.347 | 0.712 | 0.525 |
| 160 | 0.022 | 0.389 | 0.231 | 0.424 | 0.684 | 2.445 |
| 165 | 0.102 | 0.352 | 0.125 | 0.412 | 0.681 | 2.570 |
| 170 | 0.011 | 0.378 | 0.020 | 0.300 | 0.717 | 2.546 |
| 175 | 0.010 | 0.367 | 0.038 | 0.206 | 0.691 | 1.142 |



5.4 微型石英振盪器設計

本文所探討的石英振盪器為雙端固定音叉式(Double-ended tuning fork, DETF)石英振盪器，圖 5-40 為本文所研究的石英振盪器結構圖，外側的兩個對稱區域為質量塊(Proof Mass)，兩質量塊間以兩條細長狀區域連接，稱之為細樑。本文先設定石英振盪器基本方向與尺寸，再透過改變細樑寬度(b_2)與厚度(h)來設計石英振盪器，使其第一彎曲模態的自然頻率為 35kHz。設定石英振盪器細樑方向垂直(ZYw)+2°座標中之 x 軸如圖 5-44；尺寸為：長度 $L_1 = 0.000528m$ ， $L_2 = 0.003746m$ ， $L_3 = 0.000528m$ ；寬度 $b_1 = 0.00032m$ ， $b_3 = 0.00032m$ ；中間空隙 $p = 0.000075m$ 。

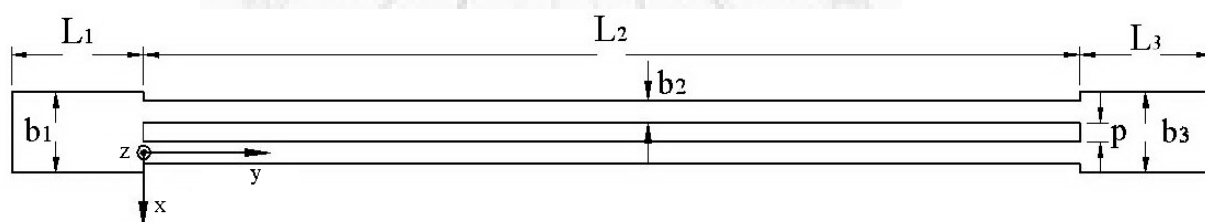


圖5-43 壓電石英晶體振盪器的結構示意圖

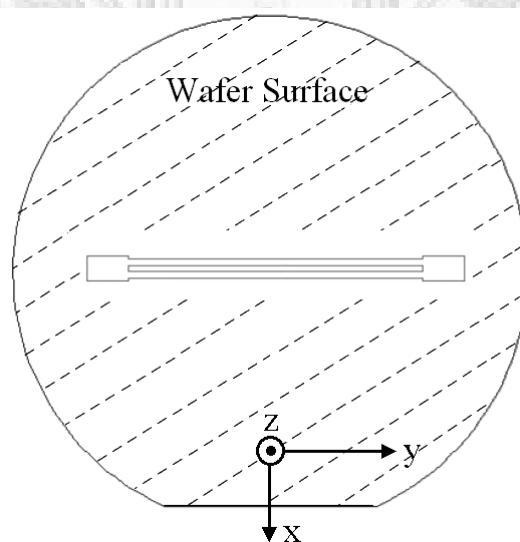


圖5-44 石英振盪器與晶圓方向示意圖

本文討論石英振盪器自然頻率的方法，是依據陳明澤[15]提出的濕式蝕刻石英振盪器求解方法，利用尤拉樑(Euler beam)的假設來計算濕式蝕刻後石英振盪

器的自然頻率。石英振盪器細樑方向垂直 $(ZYw)+2^\circ$ 座標中之 x 軸，亦即其細樑方向為旋轉角度 $\varphi=90^\circ$ ，由表 5-1 可以得知在此方向之蝕刻面傾斜角度分別為 $\theta_a=86.796^\circ$ 、 $\theta_{bz}=154.49^\circ$ 、 $\theta_c=71.321^\circ$ 、 $\theta_{dz}=149.04^\circ$ 。為了簡化問題，假設濕式蝕刻的時間足夠讓晶格面 B、D 消失而只剩晶格面 A、C，則石英振盪器斷面如圖 5-45，一邊傾斜 3.2° ，一邊傾斜 18.7° 的狀況。

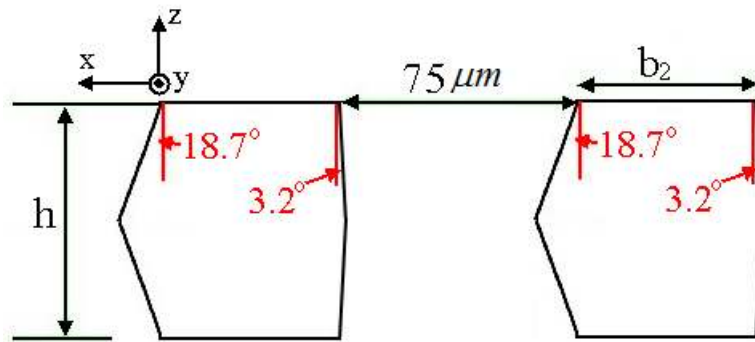


圖5-45 石英振盪器剖面形狀示意圖(傾斜 3.2° 、 18.7°)

計算石英振盪器自然頻率時，調整石英振盪器細樑寬度(b_2)與厚度(h)參數，來達到理想的 35kHz；假設厚度參數分別為 $h=90\ \mu\text{m}$ 與 $h=100\ \mu\text{m}$ ，則細樑寬度(b_2)與振盪器自然頻率如表 5-4；可以發現當厚度 $h=90\ \mu\text{m}$ 時，細樑寬度為 $b_2=77.5\ \mu\text{m}$ 可以使振盪器第一彎曲模態自然頻率最接近 35kHz；當厚度 $h=100\ \mu\text{m}$ 時，細樑寬度 $b_2=76\ \mu\text{m}$ 可以使振盪器頻率最接近 35kHz。

若假設 θ_a 趨近於 90° ，則石英振盪器剖面如圖 5-46，一邊為理想垂直面、一邊傾斜 18.7° 。同樣以此剖面設計石英振盪器尺寸，結果如表 5-5。

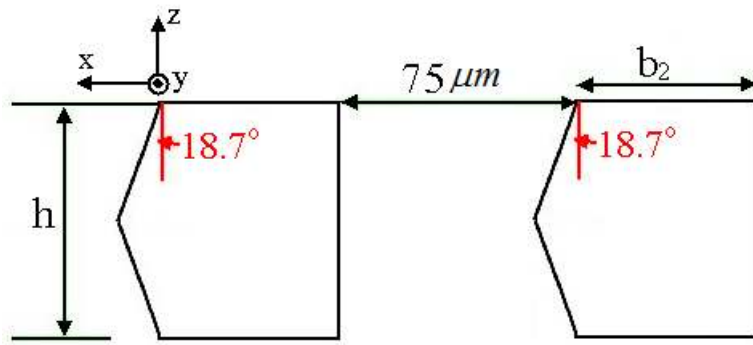


圖 5-46 石英振盪器剖面形狀示意圖(傾斜 0° ~ 18.7°)

表 5-4 細樑寬度(b_2)與振盪器第一彎曲模態自然頻率(傾斜 3.2° ~ 18.7°)

| $h = 90\mu\text{m}$ | | $h = 100\mu\text{m}$ | |
|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|
| 細樑寬度 b_2 (μm) | 第一振盪頻率(Hz) | 細樑寬度 b_2 (μm) | 第一振盪頻率(Hz) |
| 80 | 36048 | 78.5 | 35978 |
| 79.5 | 35852 | 78 | 35782 |
| 79 | 35655 | 77.5 | 35586 |
| 78.5 | 35458 | 77 | 35391 |
| 78 | 35262 | 76.5 | 35195 |
| 77.5 | 35065 | 76 | 34999 |
| 77 | 34869 | 75.5 | 34804 |
| 76.5 | 34673 | 75 | 34608 |
| 76 | 34776 | 74.5 | 34413 |
| 75.5 | 34280 | 74 | 34218 |

表 5-5 細樑寬度(b_2)與振盪器第一彎曲模態自然頻率(傾斜 0° ~ 18.7°)

| $h = 90\mu\text{m}$ | | $h = 100\mu\text{m}$ | |
|------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 細樑寬度 b_2 (μm) | 第一振盪頻率(Hz) | 細樑寬度 b_2 (μm) | 第一振盪頻率(Hz) |

| | | | |
|-----------|--------------|-----------|--------------|
| 88 | 38783 | 79 | 35749 |
| 85.5 | 37802 | 78.5 | 35555 |
| 83 | 36823 | 78 | 35360 |
| 80.5 | 35844 | 77.5 | 35166 |
| 78 | 34867 | 77 | 34971 |
| 75.5 | 33891 | 76.5 | 34777 |
| 73 | 32915 | 76 | 34583 |
| 70.5 | 31942 | 75.5 | 34388 |
| 68 | 30970 | 75 | 34194 |

由於石英晶體並非鏡射對稱，而是旋轉180°度對稱，假設濕式蝕刻後之剖面上下並沒有偏移，則蝕刻後圖形如圖 5-47。同樣計算石英振盪器自然頻率，調整石英振盪器細樑寬度(b_2)與厚度(h)參數，來達到理想的 35kHz；細樑寬度(b_2)與振盪器自然頻率如表 5-4；可以發現當厚度 $h = 90\mu m$ 時，細樑寬度為 $b_2 = 83\mu m$ 可以使振盪器第一彎曲模態自然頻率最接近 35kHz；當厚度 $h = 100\mu m$ 時，細樑寬度 $b_2 = 82.5\mu m$ 可以使振盪器頻率最接近 35kHz。

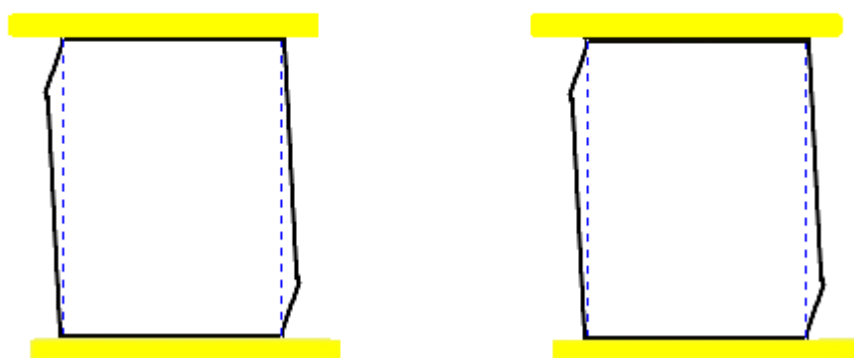


圖 5-47 石英振盪器剖面形狀示意圖(180°度對稱)

表 5-6 細樑寬度(b_2)與振盪器第一彎曲模態自然頻率(180°度對稱)

| $h = 90\mu\text{m}$ | | $h = 100\mu\text{m}$ | |
|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|
| 細樑寬度 b_2 (μm) | 第一振盪頻率 (Hz) | 細樑寬度 b_2 (μm) | 第一振盪頻率 (Hz) |
| 85 | 35717 | 84.5 | 35714 |
| 84.5 | 35517 | 84 | 35515 |
| 84 | 35318 | 83.5 | 35315 |
| 83.5 | 35118 | 83 | 35116 |
| 83 | 34919 | 82.5 | 34916 |
| 82.5 | 34719 | 82 | 34717 |
| 82 | 34519 | 81.5 | 34518 |
| 81.5 | 34320 | 81 | 34318 |
| 81 | 34120 | 80.5 | 34119 |

若將使用的石英晶圓切角改為 Z-cut 石英，其剖面如圖 5-48，則可利用同樣的方法可以達到理想的 35kHz；假設厚度參數分別為 $h = 90\mu\text{m}$ 與 $h = 100\mu\text{m}$ ，則細樑寬度 (b_2) 與振盪器自然頻率如表 5-7；可以發現當厚度 $h = 90\mu\text{m}$ 與 $h = 100\mu\text{m}$ 時，細樑寬度為 $b_2 = 87.5\mu\text{m}$ 可以使振盪器第一彎曲模態自然頻率最接近 35kHz。

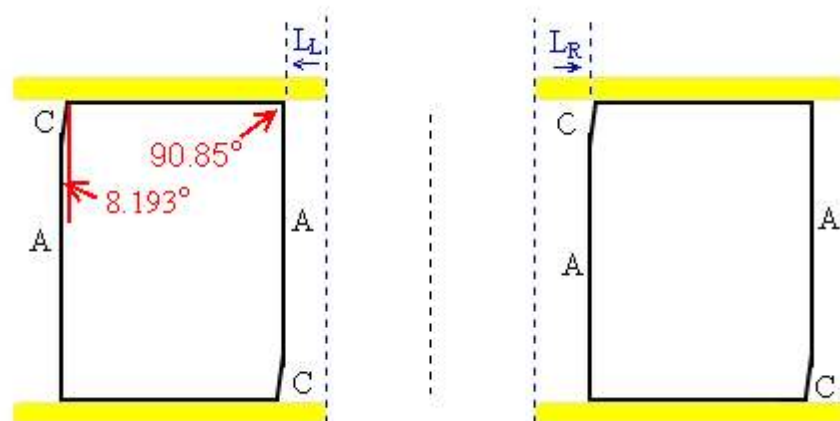


圖 5-48 Z-cut 石英振盪器剖面形狀示意圖

表 5-7 Z-cut 石英細樑寬度(b_2)與振盪器第一彎曲模態自然頻率

| $h = 90\mu m$ | | $h = 100\mu m$ | |
|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
| 細樑寬度 $b_2(\mu m)$ | 第一振盪頻率(Hz) | 細樑寬度 $b_2(\mu m)$ | 第一振盪頻率(Hz) |
| 89.5 | 35700 | 89.5 | 35753 |
| 89 | 35503 | 89 | 35557 |
| 88.5 | 35306 | 88.5 | 35360 |
| 88 | 35109 | 88 | 35163 |
| 87.5 | 34913 | 87.5 | 34966 |
| 87 | 34716 | 87 | 34769 |
| 86.5 | 34519 | 86.5 | 34573 |
| 86 | 34322 | 86 | 34376 |
| 85.5 | 34125 | 85.5 | 34179 |
| 85 | 33928 | 85 | 33982 |

第陸章、 石英振盪器製程規劃

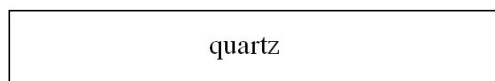
6.1 石英振盪器製程步驟規劃

6.1.1 製作石英振盪器外型

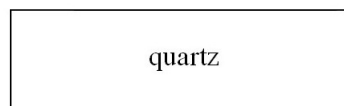
1. 清洗石英晶圓

- I. 以丙酮、甲醇，配合超音波振洗機清洗 5 分鐘，再以太離子水沖淨晶圓上的有機溶液。
- II. 將硫酸(H_2SO_4)與雙氧水(H_2O_2)以 3:1 的比例，調配卡羅酸(Caro Acid)溶液，將石英晶圓置於卡羅酸中 15 分鐘，取出後再以太離子水清洗 5 分鐘。
- III. 將氨水(NH_4OH)、雙氧水(H_2O_2)、去離子水以 0.25:1:5 的比例調配，並加溫溶液至 $80^{\circ}C$ 。將晶圓置於溶液中 15 分鐘，取出後再以太離子水清洗 5 分鐘。
- IV. 將鹽酸(HCl)、雙氧水(H_2O_2)、去離子水以 1:1:6 的比例調配，並加溫溶液至 $80^{\circ}C$ 。將晶圓置於溶液中 15 分鐘。
- V. 以太離子水清洗石英晶圓 5 分鐘，並以氮氣槍吹乾，完成晶圓清洗步驟。

正面



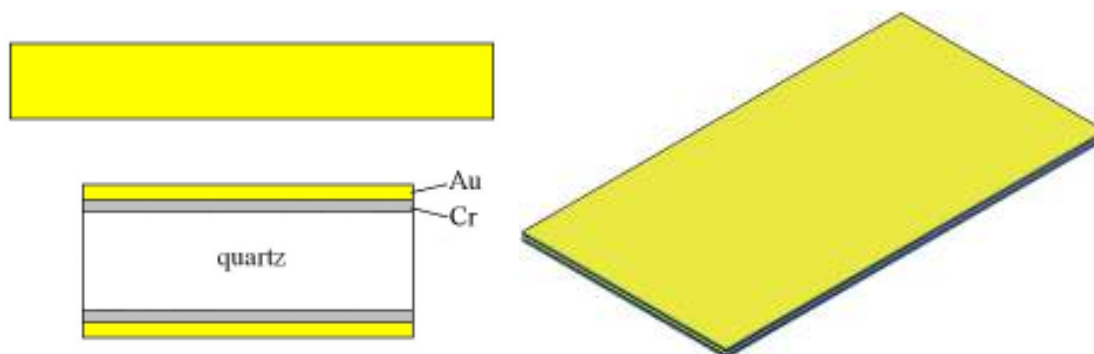
截面



2. 蒸鍍金屬製程

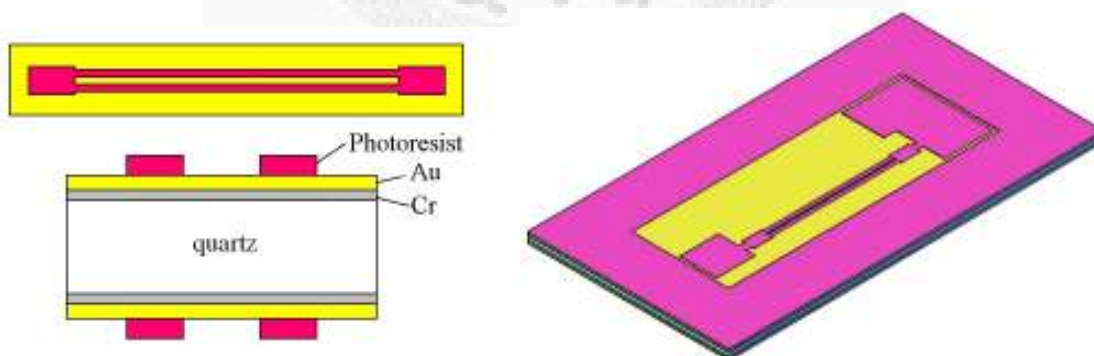
- I. 將晶圓放置於 $120^{\circ}C$ 的加熱平板上 5 分鐘，將其表面水氣烤乾，確保晶圓上沒有水氣殘留。
- II. 於石英晶圓正反面鍍上 600 \AA 的鉻(Cr)做為黏著層。

III. 於石英晶圓正反面鍍上 2000 Å 的金(Au)。



3. 厚膜光阻製程

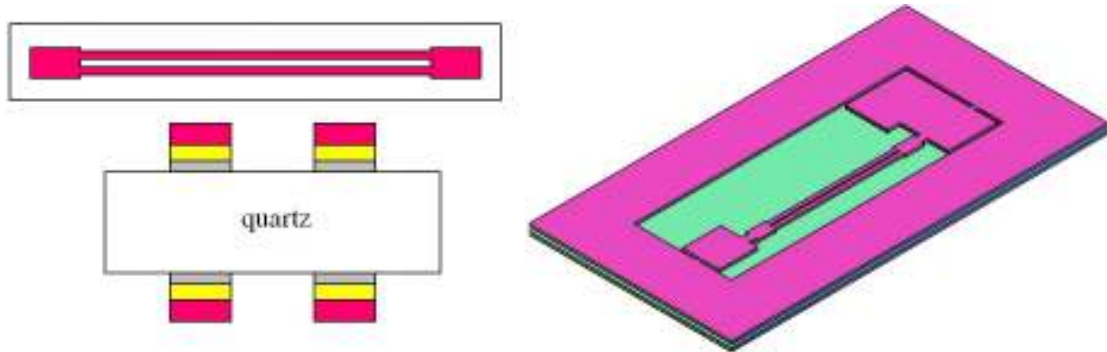
- I. 利用旋轉塗佈機(Spin Coater), 在石英晶圓正面塗佈 AZ4620 厚膜光阻。
- II. 將塗佈光阻後的晶圓置於 90°C 加熱平板上, 加熱 90 秒鐘。
- III. 利用雙面對準曝光機, 在石英晶圓的正面曝光。將曝光後的晶圓置入顯影液進行顯影。
- IV. 在石英晶圓反面塗佈 AZ4620 厚膜光阻, 利用雙面對準曝光機, 在石英晶圓的背面背對準及曝光。將曝光後的晶圓置入 MF-450 顯影液進行顯影。
- V. 將晶圓放置於 120°C 加熱板中, 加熱 20 分鐘, 進行硬烤。



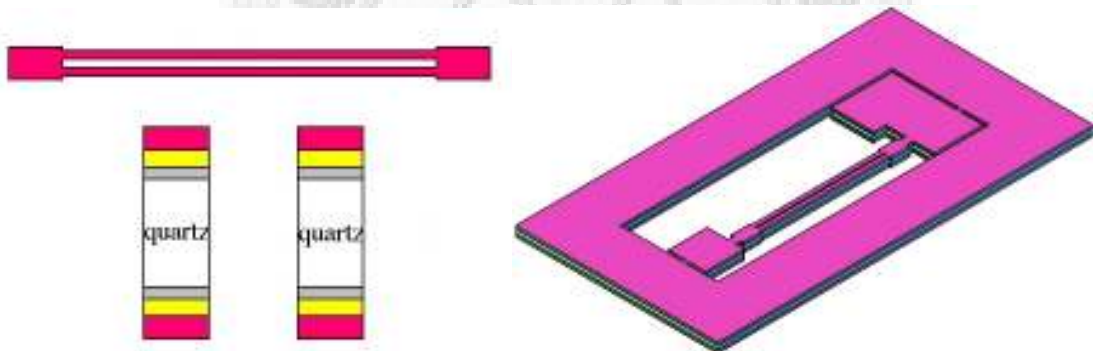
4. 濕式蝕刻製程

- I. 將硝酸(HNO₃)與鹽酸(HCl)以 1:3 的比例, 調配王水溶液, 將晶圓置於王水中 30 秒鐘, 直到未被光阻覆蓋的鍍金層完全溶解後取出。

II. 以去離子水沖淨晶圓上殘留的王水，再利用鉻蝕刻液將未被光阻覆蓋的鍍鉻層溶解。

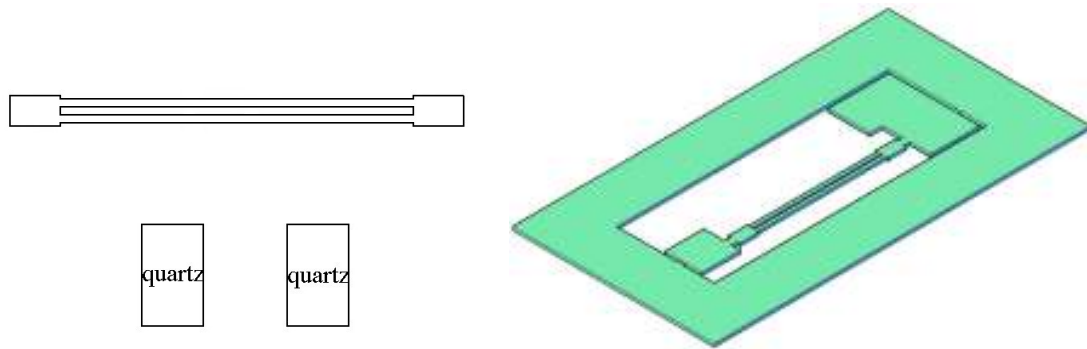


III. 將 49.5wt% 的氫氟酸 (HF) 與 40wt% 的氟化銨 (NH_4F) 以 2:3 的比例，並以加熱平板加熱至 55°C ，調配蝕刻石英溶液。將石英晶圓置入蝕刻溶液中蝕刻，以得到想要的石英振盪器外型；取出石英晶圓後，以去離子水沖洗，確保晶圓上沒有殘留的蝕刻溶液。



IV. 將晶圓置入丙酮中，清除晶圓表面的光阻，再以去離子水沖淨。

V. 將硝酸 (HNO_3) 與鹽酸 (HCl) 以 1:3 的比例，調配王水溶液，將晶圓置於王水中 30 秒鐘，直到鍍金層完全溶解後取出，再利用鉻蝕刻液將未被光阻覆蓋的鍍鉻層溶解。以去離子水沖洗晶圓，以避免化學藥劑殘留。利用氮氣槍吹乾晶圓，完成石英振盪器外型。



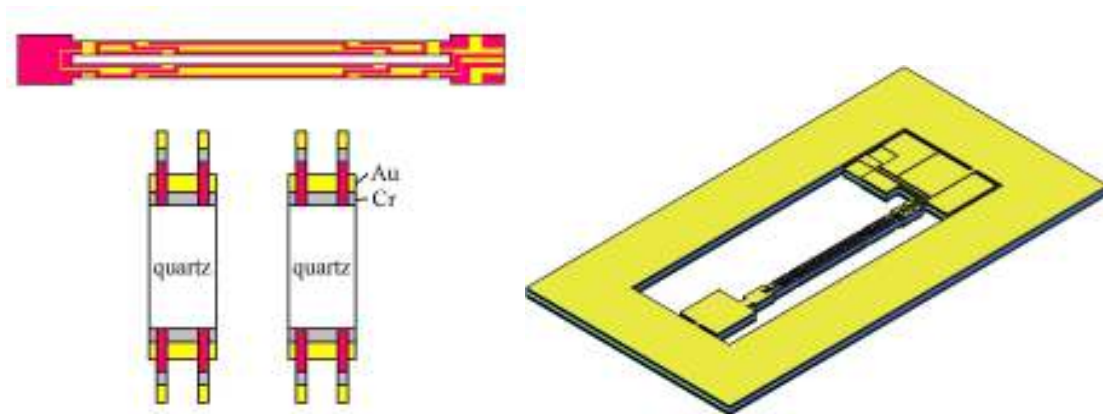
6.1.2 製作石英振盪器驅動電極

1. 製作正反面電極

- I. 利用旋轉塗佈機，在石英晶圓正面塗佈 AZ4620 厚膜光阻。
- II. 將塗佈光阻後的晶圓置於 90°C 加熱平板上，加熱 90 秒鐘，進行軟烤。
- III. 在石英晶圓的正面曝光。將曝光後的晶圓置入顯影液進行顯影。
- IV. 利用旋轉塗佈機，在石英晶圓反面塗佈 AZ4620 厚膜光阻。在石英晶圓的背面用光罩二做背對準及曝光。將曝光後的晶圓置入顯影液進行顯影。再將晶圓以去離子水沖洗。
- V. 將晶圓放置於 120°C 加熱板中，加熱 20 分鐘，進行硬烤。

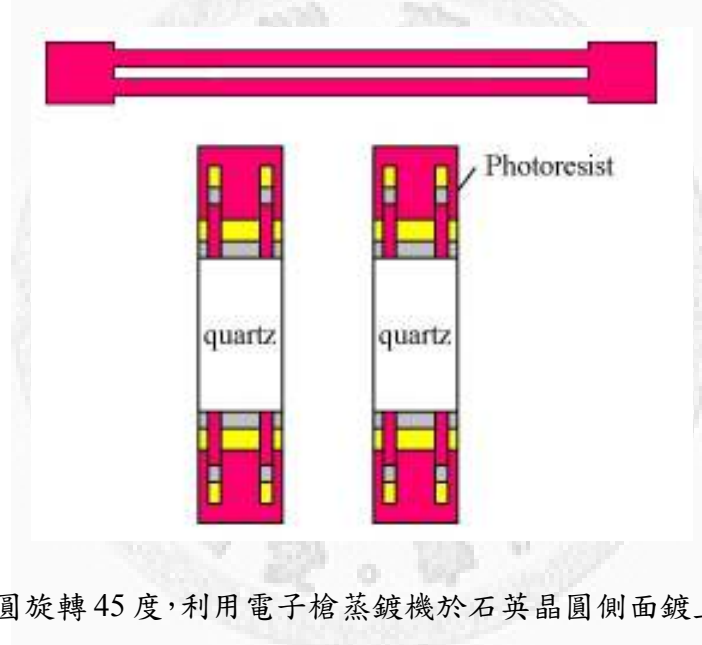


- VI. 利用電子槍蒸鍍機於石英晶圓正反面鍍上 600 Å 的鉻(Cr)做為黏著層。再於正反面再鍍上 2000 Å 的金(Au)。

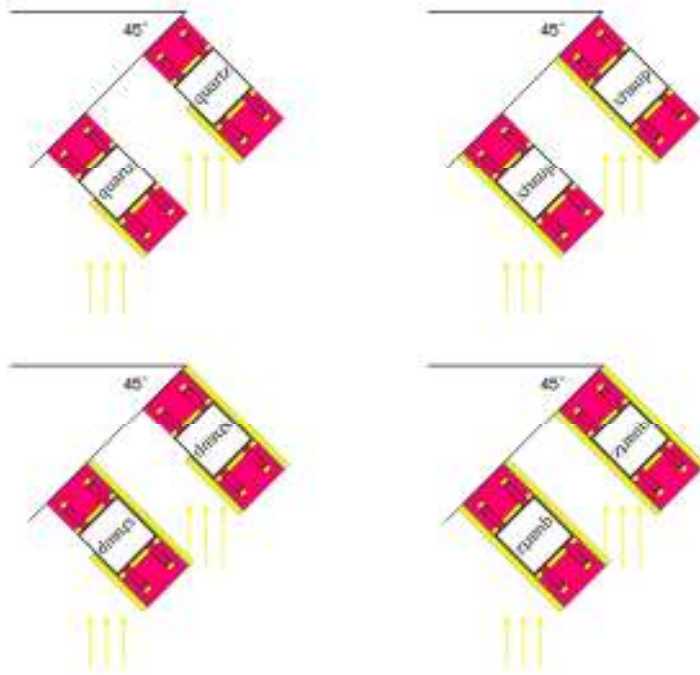


2. 製作側面電極

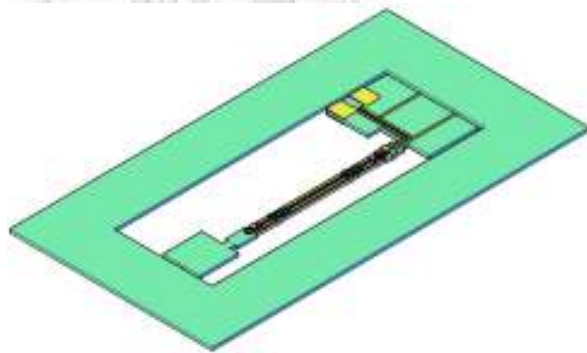
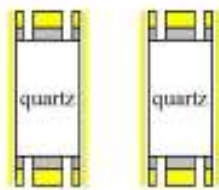
- I. 利用旋轉塗佈機，在晶圓正反面再塗佈 AZ4620 厚膜光阻，覆蓋整個振盪器部分，。再將晶圓置於 90°C 加熱平板上，加熱五分鐘，進行硬烤。



- II. 將晶圓旋轉 45 度，利用電子槍蒸鍍機於石英晶圓側面鍍上 600 Å 的鉻(Cr)與 2000 Å 的金(Au)。
- III. 將晶圓對 z 軸翻轉 180 度，同樣蒸鍍 600 Å 的鉻(Cr)與 2000 Å 的金(Au)。
- IV. 將晶圓對 x 軸翻轉 180 度，重複前兩步驟。



V. 將晶圓置入丙酮中，清除晶圓表面的光阻，再以去離子水沖淨，即可得到石英振盪器。



6.2 石英振盪器光罩設計與分析

6.2.1 設計石英振盪器外型光罩

根據表 5-6，可以發現當石英振盪器厚度 $h=90\mu m$ 、細樑寬度為 $b_2=83\mu m$ 及厚度 $h=100\mu m$ 、細樑寬度 $b_2=82.5\mu m$ 時，可以使振盪器第一彎曲模態自然頻率最接近 35kHz；由表 5-1，可以知道此旋轉方向之蝕刻面蝕刻速率分別為 $R_A=0.041\mu m/min$ 、 $R_B=0.495\mu m/min$ 、 $R_C=0.057\mu m/min$ 、 $R_D=0.348\mu m/min$ 利用此結果來設計石英振盪器外型光罩。

由於石英濕式蝕刻時會有側向蝕刻，因此設計石英振盪器外型光罩時需針對側向蝕刻進行補償；而在外凸角隅的部份，石英表面並沒有明顯底切面出現，而仍然維持 90° 如圖 5-36 至 5-39，因此不另外進行補償。

由於側向蝕刻會與蝕刻時間相關，因此補償時須先確定蝕刻時間參數；將整個蝕刻過程分為三個不同階段討論，蝕刻初始的形狀如圖 6-1，其中晶面 A 與晶面 B 法線夾角為 63.473° 、晶面 C 與 D 法線夾角為 38.966° 、晶面 B 與 C 法線夾角為 83.169° 、晶面 B 與 D 法線夾角為 123.53° ，如圖 6-2。

第一階段是從濕式蝕刻開始，直到石英由兩邊蝕刻至貫穿，此時振盪器剖面如圖 6-3，由於上下兩端的接點誤差很小，因此將圖形減化為圖 6-4。根據實驗結果計算，垂直晶圓方向的蝕刻速率 $R_z=\frac{h}{t}=0.758\mu m/min$ ；若決定使用 $100\mu m$ 厚度的石英晶圓，則依照其底面蝕刻速率，同時從晶圓上下兩面蝕刻，可以計算出第一階段的蝕刻時間為：

$$t = \frac{h}{2R_z} = \frac{100}{2 \times 0.758} = 65.963 \text{ (min)}$$

利用內凹角隅蝕刻速率理論，可以計算出此時的晶面 B、D 長度變化率與長度：

$$\begin{aligned} \frac{dL_B}{dt} &= \frac{R_A}{\sin(180-\theta_{ab})} - \frac{R_B}{\tan(180-\theta_{ab})} + \frac{R_Z}{\sin(180-\theta_{bz})} - \frac{R_B}{\tan(180-\theta_{bz})} \\ &= \left(\frac{0.041}{\sin(63.473)} - \frac{0.495}{\tan(63.473)} + \frac{0.758}{\sin(25.51)} - \frac{0.495}{\tan(25.51)} \right) \\ &= 0.521 \mu\text{m}/\text{min} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow L_B = \frac{dL_B}{dt} \times t = 0.521 \times 65.963 = 34.367 (\mu\text{m})$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_D}{dt} &= \frac{R_C}{\sin(180-\theta_{cd})} - \frac{R_D}{\tan(180-\theta_{cd})} + \frac{R_Z}{\sin(180-\theta_{dz})} - \frac{R_D}{\tan(180-\theta_{dz})} \\ &= \left(\frac{0.057}{\sin(38.966)} - \frac{0.348}{\tan(38.966)} + \frac{0.758}{\sin(30.96)} - \frac{0.348}{\tan(30.96)} \right) \\ &= 0.554 \mu\text{m}/\text{min} \end{aligned}$$

$$L_D = \frac{dL_D}{dt} \times t = 0.554 \times 65.963 = 36.544 (\mu\text{m})$$

此時兩邊的側向蝕刻長度分別為：

$$L_L = \frac{0.041}{\sin(90-3.2)} \times 65.963 = \frac{0.041}{\cos(3.2)} \times 65.963 = 2.709$$

$$L_R = \frac{0.057}{\sin(90-18.7)} \times 65.963 = \frac{0.041}{\cos(18.7)} \times 65.963 = 3.969$$

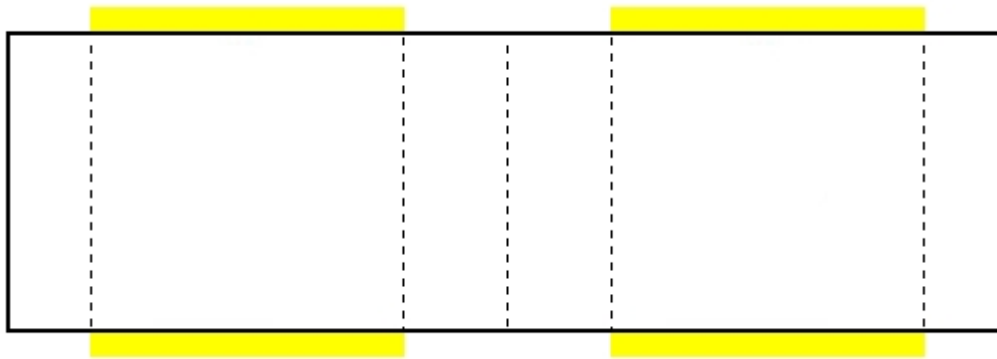


圖 6-1 未蝕刻前金屬層位置示意圖

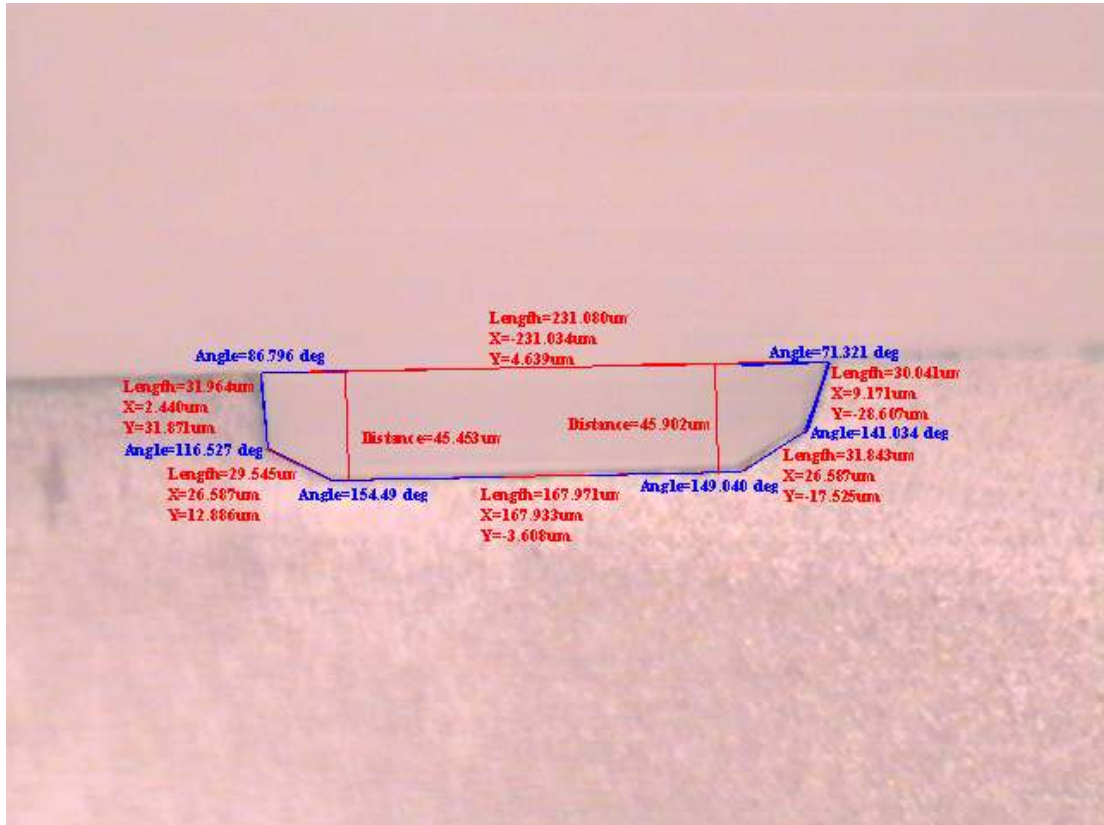


圖 6-2 $\phi=90^\circ$ 之量測剖面圖

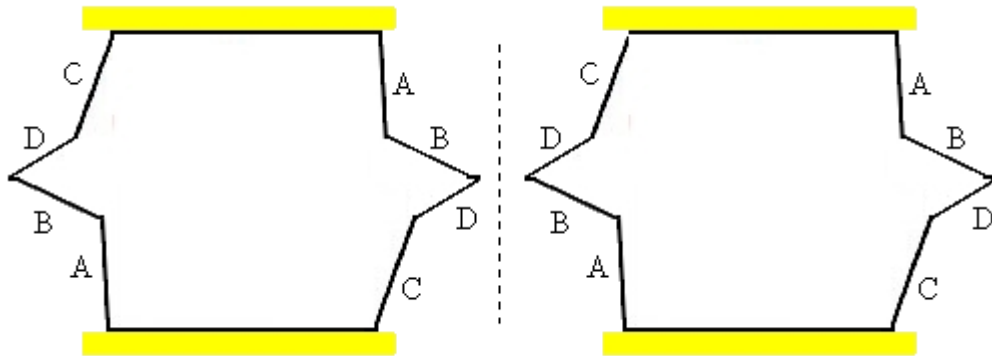


圖 6-3 第一階段蝕刻後剖面示意圖

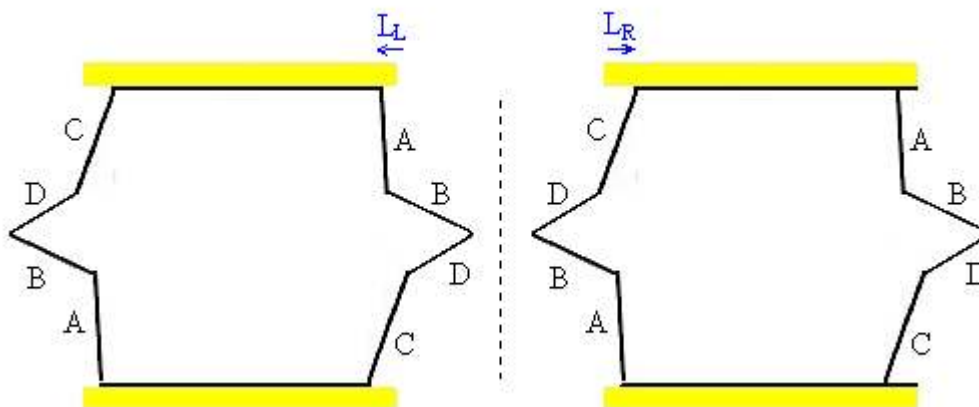


圖 6-4 第一階段蝕刻後減化圖形

第二階段是為了使晶面 B、D 消失，需要更長的蝕刻時間。使用蝕刻速率計算方式，求出分別讓晶面 B、D 消失的時間為：

$$\begin{aligned} \frac{dL_B}{dt_B} &= \frac{R_A}{\sin(63.473)} - \frac{R_B}{\tan(63.473)} + \frac{R_B}{\tan(123.53)} - \frac{R_D}{\sin(123.53)} \\ &= \frac{0.041}{\sin(63.473)} - \frac{0.495}{\tan(63.473)} + \frac{0.495}{\tan(123.53)} - \frac{0.348}{\sin(123.53)} \\ &= -0.947 \mu\text{m} / \text{min} \end{aligned}$$

$$t_B = \frac{34.397}{0.947} = 36.332 \text{ (min)}$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_D}{dt_D} &= \frac{R_C}{\sin(38.966)} - \frac{R_D}{\tan(38.966)} + \frac{R_D}{\tan(123.53)} - \frac{R_B}{\sin(123.53)} \\ &= \frac{0.057}{\sin(38.966)} - \frac{0.348}{\tan(38.966)} + \frac{0.348}{\tan(123.53)} - \frac{0.495}{\sin(123.53)} \\ &= -1.164 \mu\text{m} / \text{min} \end{aligned}$$

$$t_D = \frac{36.526}{1.164} = 31.379 \text{ (min)}$$

從上面計算得知，D 面先被蝕刻掉(先消失)，當時間為 $t_2 = 31.379 \text{ (min)}$ 時，記為第二階段蝕刻時間，此時振盪器剖面如圖 6-5，晶面 D 消失但晶面 B 仍存在，再藉由蝕刻速率公式求出品面 A、B、C 長度變化率與長度分別為：

$$\begin{aligned} \frac{dL_A}{dt} &= \frac{R_B}{\sin(63.473)} - \frac{R_A}{\tan(63.473)} + \frac{metal}{\sin(93.2)} - \frac{R_A}{\tan(93.2)} \\ &= \frac{R_B}{\sin(63.473)} - \frac{R_A}{\tan(63.473)} - \frac{R_A}{\tan(93.2)} = 0.535(\mu m / \min) \end{aligned}$$

$$L_A = \frac{dL_A}{dt} \times t = 0.535 \times (97.342) = 52.078(\mu m)$$

$$L_B = 34.397 - 0.947 \times (31.379) = 4.681(\mu m)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_C}{dt} &= \frac{R_D}{\sin(38.966)} - \frac{R_C}{\tan(38.966)} + \frac{metal}{\sin(108.7)} - \frac{R_C}{\tan(108.7)} \\ &= \frac{R_D}{\sin(38.966)} - \frac{R_C}{\tan(38.966)} - \frac{R_C}{\tan(108.7)} \\ &= 0.502(\mu m / \min) \end{aligned}$$

$$L_C = \frac{dL_C}{dt} \times t = 0.502 \times (97.342) = 48.866(\mu m)$$

此時兩邊的側向蝕刻長度分別為：

$$L_L = \frac{0.041}{\sin(90-3.2)} \times (65.963+31.379) = \frac{0.041}{\cos(3.2)} \times (65.963+31.379) = 3.997(\mu m)$$

$$L_R = \frac{0.057}{\sin(90-18.7)} \times (65.963+31.379) = \frac{0.057}{\cos(18.7)} \times (65.963+31.379) = 5.858(\mu m)$$

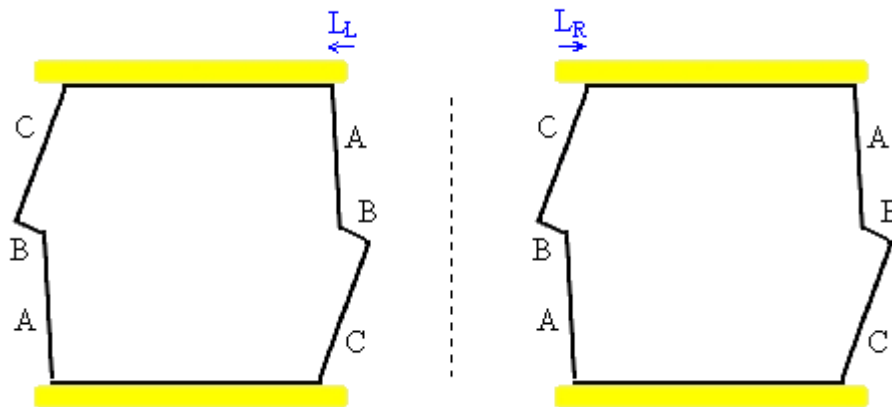


圖 6-5 第二階段蝕刻後剖面示意圖

第三階段蝕刻是蝕刻至晶面 B 完全消失為止，如圖 6-6，將剩下的晶面 B 蝕刻至消失所需的時間為：

$$\begin{aligned}\frac{dL_B}{dt} &= \frac{R_A}{\sin(63.473)} - \frac{R_B}{\tan(63.473)} + \frac{R_B}{\tan(83.169)} - \frac{R_C}{\sin(83.169)} \\ &= \frac{0.041}{\sin(63.473)} - \frac{0.495}{\tan(63.473)} + \frac{0.495}{\tan(83.169)} - \frac{0.057}{\sin(83.169)} \\ &= -0.199 (\mu\text{m} / \text{min}) \\ t_3 &= \frac{4.681}{0.199} = 23.523 (\text{min})\end{aligned}$$

再蝕刻 23.523 分鐘時，B 面會被蝕刻掉(B 面消失)，此階段蝕刻 A 晶面增長，C

晶面減少，A、C 晶面長度變化率與長度分別為：

$$\begin{aligned}\frac{dL_A}{dt} &= \frac{R_B}{\sin(63.473)} - \frac{R_A}{\tan(63.473)} + \frac{\text{metal}}{\sin(93.2)} - \frac{R_A}{\tan(93.2)} \\ &= \left(\frac{0.495}{\sin(63.473)} - \frac{0.041}{\tan(63.473)} - \frac{0.041}{\tan(93.2)} \right) \\ &= 0.535(\mu\text{m} / \text{min}) \\ L_A &= \frac{dL_A}{dt} \times t = 0.535 \times (97.342) = 64.639(\mu\text{m})\end{aligned}$$

此階段蝕刻 A 晶面長度變化率還維持不變，但 C 晶面長度變化率已改變

$$\begin{aligned}\frac{dL_{c3}}{dt} &= \frac{R_C}{\tan(83.169)} - \frac{R_B}{\sin(83.169)} + \frac{\text{metal}}{\sin(108.7)} - \frac{R_C}{\tan(108.7)} \\ &= \left(\frac{0.057}{\tan(83.169)} - \frac{0.495}{\sin(83.169)} - \frac{0.057}{\tan(108.7)} \right) \\ &= -0.472(\mu\text{m} / \text{min})\end{aligned}$$

此階段蝕刻 C 晶面長度減少為

$$L_{c3} = \frac{dL_{c3}}{dt} \times t = -0.472 \times 23.523 = -11.103 (\mu\text{m})$$

所以當 C 晶面長度總長度

$$L_c = 48.885 - 11.103 = 37.782(\mu\text{m})$$

此時兩邊的側向蝕刻長度分別為：

$$\begin{aligned}L_L &= \frac{0.041}{\cos(3.2)} \times (65.963 + 31.379 + 23.523) = 4.963(\mu\text{m}) \\ L_R &= \frac{0.057}{\cos(18.7)} \times (65.963 + 31.379 + 23.523) = 7.273(\mu\text{m})\end{aligned}$$

因為側向蝕刻長度不相同，起始曝光位置上下是相同時如圖 6-1，蝕刻後會造成上下圖案偏移。

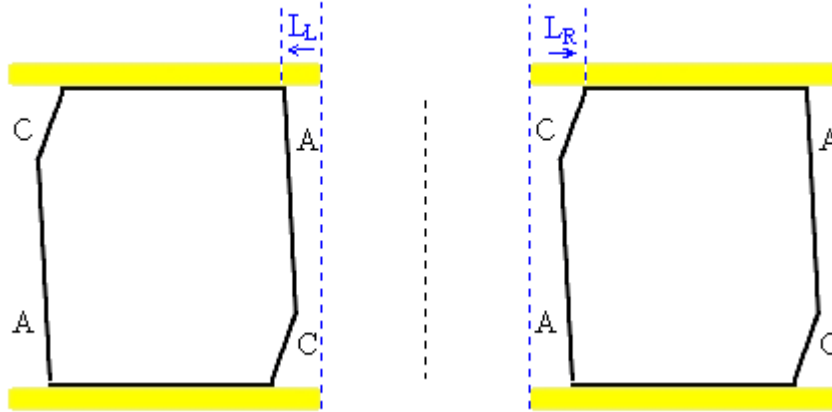


圖 6-6 第三階段蝕刻後剖面示意圖

將三個階段的時間相加，可以得到總蝕刻時間：

$t = 65.963 + 31.379 + 23.523 = 120.865(\text{min})$ ，此時兩邊的側向蝕刻分別為

$4.963(\mu\text{m})$ 、 $7.273(\mu\text{m})$ ，為了避免蝕刻時的實驗誤差，選擇 130 分鐘做為蝕刻

參數，則側向蝕刻會增加為 $L_L = \frac{0.041}{\cos(3.2)} \times 130 = 5.338(\mu\text{m})$ 與

$L_R = \frac{0.057}{\cos(18.7)} \times 130 = 7.823(\mu\text{m})$ ，此側向蝕刻需在光罩上做補償，由於選用的振

盪器厚度 $h = 100\mu\text{m}$ ，石英振盪器的第一彎曲模態頻率最接近 35kHz 的細樑寬度

為 $76\mu\text{m}$ ；考慮側向蝕刻的影響，設計光罩圖形的細樑寬度為

$82.5\mu\text{m} + 5.338\mu\text{m} + 7.823\mu\text{m} = 95.661\mu\text{m}$ ，而可做出蝕刻後細樑寬度為 $82.5\mu\text{m}$ 、

第一彎曲模態頻率為 35kHz 之石英振盪器，石英震盪器各尺寸如圖 6-7。

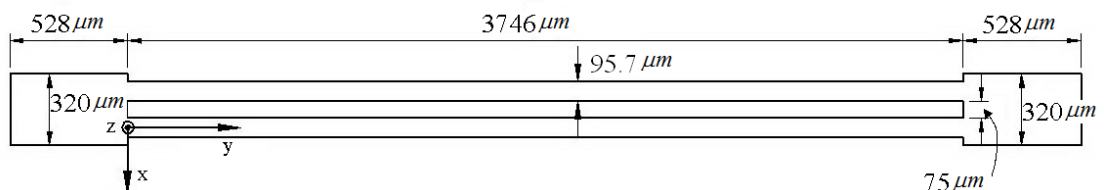


圖 6-7 石英振盪器光罩尺寸圖

如圖 6-6，濕式蝕刻後上下圖案會有部分偏移。為了不讓上下圖案偏移，在

製作阻檔金屬層時先做出偏移補償，如圖 6-8，補償偏移距離為

$|L_R - L_L| = 2.485(\mu m)$ ，則蝕刻圖形就不會上下偏移，如圖 6-9。

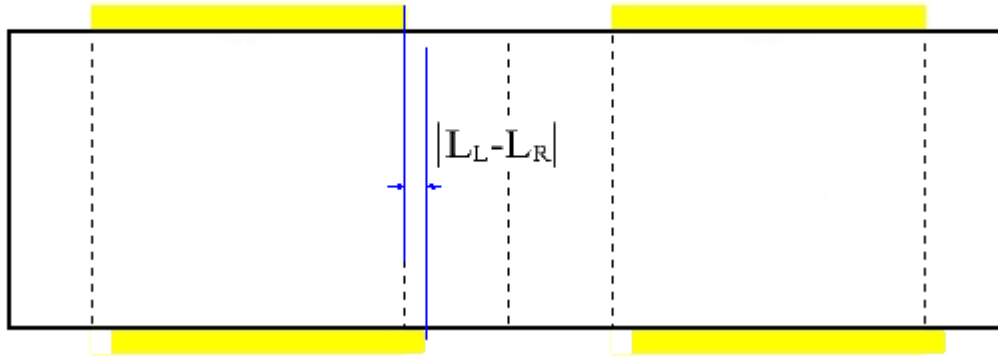


圖 6-8 偏移補償金屬位置示意圖

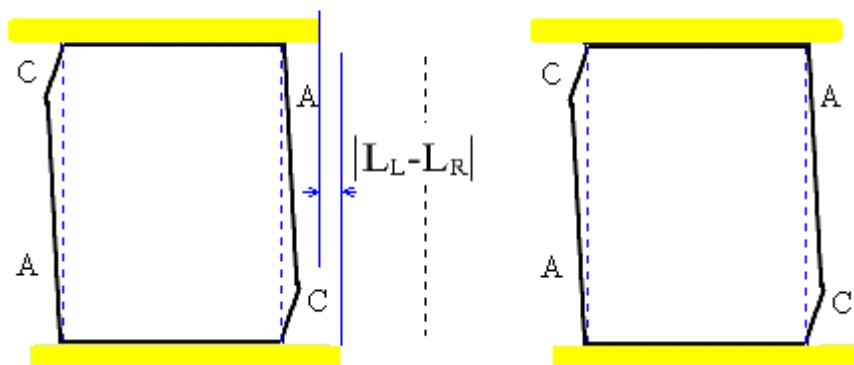


圖 6-9 偏移補償後蝕刻剖面示意圖

若將使用的石英晶圓切角改為 Z-cut 石英，則利用同樣的方法可以求出所需濕式蝕刻時間以及蝕刻後截面圖形。圖 6-10 為 Z-cut 石英在 $\varphi = 90^\circ$ 的蝕刻結果，利用此結果計算出各晶面蝕刻速率以及各晶面夾角為： $R_A = 0.082 \mu m / \text{min}$ 、 $R_B = 0.308 \mu m / \text{min}$ 、 $R_C = 0.078 \mu m / \text{min}$ 、 $R_D = 0.422 \mu m / \text{min}$ 、晶面 A 與晶面 B 法線夾角為 48.294° 、晶面 C 與 D 法線夾角為 62.814° 、晶面 B 與 C 法線夾角為 60.557° 、晶面 B 與 D 法線夾角為 123.184° 、晶面 A 與晶面 D 法線夾角為 108.33° ，再利用此結果製作外型光罩。

使用 Z-cut 石英製作石英振盪器時，同樣將濕式蝕刻過程分為三個部份，第一階段是從濕式蝕刻開始，直到石英由兩邊蝕刻至貫穿，此時振盪器剖面如圖 6-11，根據實驗結果計算，垂直晶圓方向的蝕刻速率為：

$$R_z = \frac{h}{t} = \frac{35.545}{60} = 0.592 \mu\text{m} / \text{min}$$

若決定使用 $100 \mu\text{m}$ 厚度的石英晶圓，則依照其底面蝕刻速率，同時從晶圓上下兩面蝕刻，可以計算出第一階段的蝕刻時間為：

$$t_1 = \frac{h}{2R_z} = \frac{100}{2 \times 0.592} = 84.459 \text{ (min)}$$

利用內凹角隅蝕刻速率理論，可以計算出此時的各晶面的長度變化率分別為：

$$\begin{aligned} \frac{dL_A}{dt} &= \frac{R_B}{\sin(48.294)} - \frac{R_A}{\tan(48.294)} + \frac{\text{metal}}{\sin(98.193)} - \frac{R_A}{\tan(98.193)} \\ &= \frac{0.308}{\sin(48.294)} - \frac{0.082}{\tan(48.294)} - \frac{0.082}{\tan(98.193)} = 0.352 (\mu\text{m} / \text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_B}{dt} &= \frac{R_A}{\sin(180 - \theta_{ab})} - \frac{R_B}{\tan(180 - \theta_{ab})} + \frac{R_z}{\sin(180 - \theta_{bz})} - \frac{R_B}{\tan(180 - \theta_{bz})} \\ &= \frac{0.082}{\sin(48.294)} - \frac{0.308}{\tan(48.294)} + \frac{0.592}{\sin(30.293)} - \frac{0.308}{\tan(30.293)} \\ &= 0.482 \mu\text{m} / \text{min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_C}{dt} &= \frac{R_D}{\sin(62.814)} - \frac{R_C}{\tan(62.814)} + \frac{\text{metal}}{\sin(90.85)} - \frac{R_C}{\tan(90.85)} \\ &= \frac{0.422}{\sin(62.814)} - \frac{0.078}{\tan(62.814)} - \frac{0.078}{\tan(90.85)} \\ &= 0.436 (\mu\text{m} / \text{min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_D}{dt} &= \frac{R_C}{\sin(180 - \theta_{cd})} - \frac{R_D}{\tan(180 - \theta_{cd})} + \frac{R_z}{\sin(180 - \theta_{dz})} - \frac{R_D}{\tan(180 - \theta_{dz})} \\ &= \frac{0.078}{\sin(62.814)} - \frac{0.422}{\tan(62.814)} + \frac{0.592}{\sin(26.523)} - \frac{0.422}{\tan(26.523)} \\ &= 0.351 \mu\text{m} / \text{min} \end{aligned}$$

當蝕刻時間為 $t_1 = 84.459$ (min) ，則可利用晶面長度變化率計算出各晶面長度為(參考圖 6-13)：

$$L_A = \frac{dL_A}{dt} \times t = 0.352 \times 84.459 = 29.730 (\mu m)$$

$$L_B = \frac{dL_B}{dt} \times t = 0.482 \times 84.459 = 40.709 (\mu m)$$

$$L_C = \frac{dL_C}{dt} \times t = 0.436 \times 84.459 = 36.824 (\mu m)$$

$$L_D = \frac{dL_D}{dt} \times t = 0.351 \times 84.459 = 29.645 (\mu m)$$

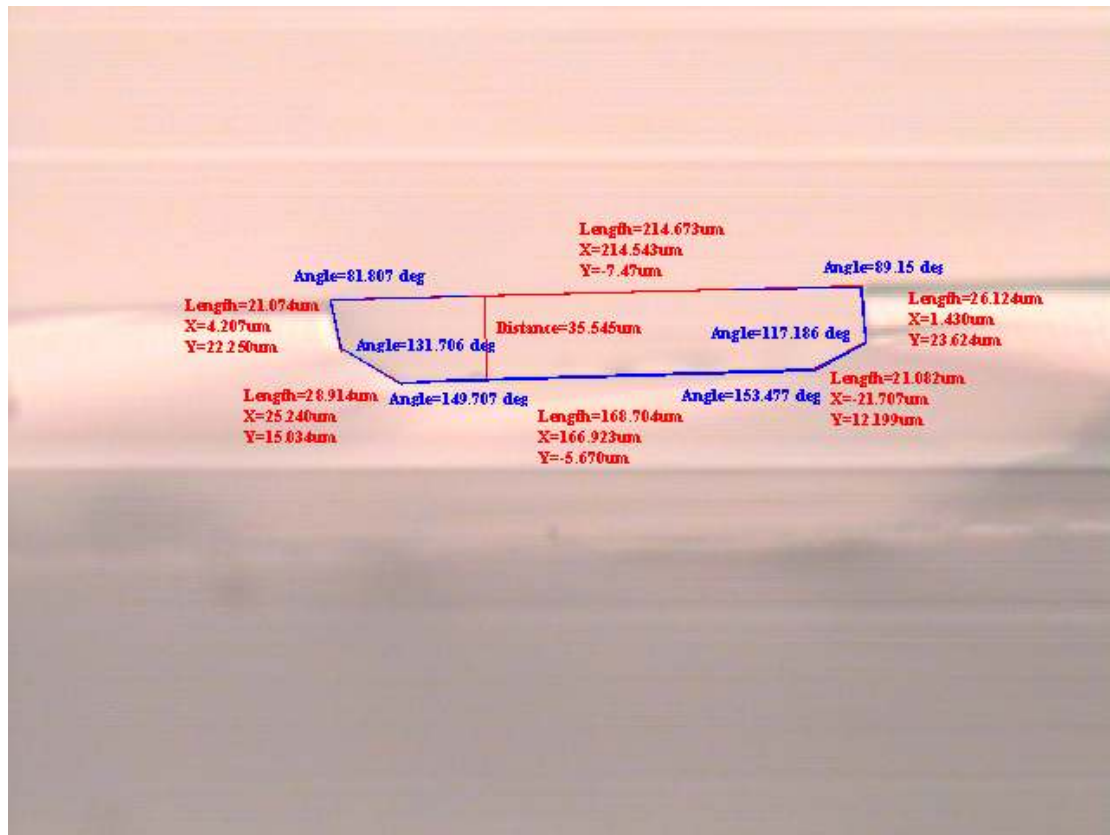


圖 6-10 Z-cut 石英在 $\phi = 90^\circ$ 的蝕刻結果

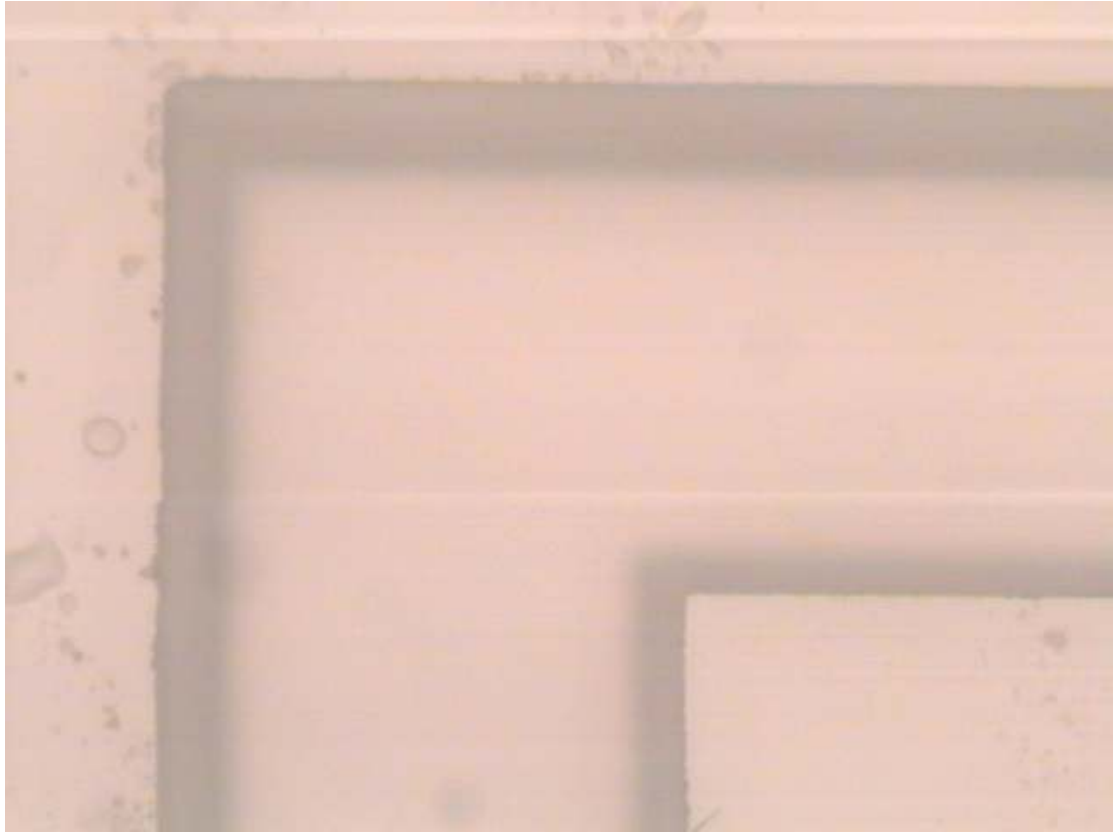


圖 6-11 Z-cut $\varphi=90^\circ$ 之左邊外凸角隅



圖 6-12 Z-cut $\varphi=90^\circ$ 之右邊外凸角隅

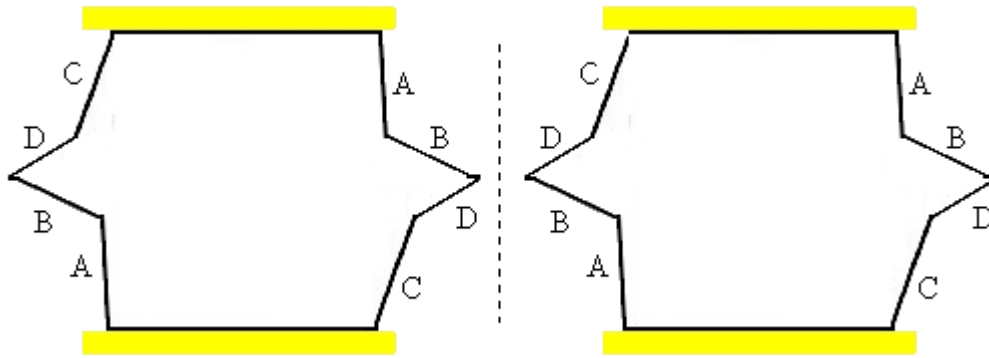


圖 6-13 Z-cut 石英第一階段蝕刻後剖面示意圖

第二階段是為了使晶面 B、D 消失，需要更長的蝕刻時間。使用蝕刻速率計算方式，計算晶面 B、D 的長度變化率，而求出分別讓晶面 B、D 消失的時間為：

$$\begin{aligned} \frac{dL_B}{dt} &= \frac{0.082}{\sin(48.294)} - \frac{0.308}{\tan(48.294)} - \frac{0.422}{\sin(123.184)} + \frac{0.308}{\tan(123.184)} \\ &= -0.871 \mu\text{m}/\text{min} \\ \frac{dL_D}{dt} &= \frac{0.422}{\sin(62.814)} - \frac{0.078}{\tan(62.814)} - \frac{0.308}{\sin(123.184)} + \frac{0.422}{\tan(123.184)} \\ &= -0.210 \mu\text{m}/\text{min} \\ t_B &= \frac{40.709}{0.871} = 46.738 \text{ (min)} \\ t_D &= \frac{29.645}{0.210} = 141.167 \text{ (min)} \end{aligned}$$

從計算得知，B 晶面先被蝕刻掉(先消失)，當時間為 $t_2 = 46.738$ (min) 時，記為第二階段蝕刻時間，此時石英剖面如圖 6-14。藉由蝕刻速率公式求出此時晶面

A、C、D 長度分別為：

$$\begin{aligned} L_A &= \frac{dL_A}{dt} \times t = 0.352 \times (84.459 + 46.738) = 46.181 (\mu\text{m}) \\ L_C &= \frac{dL_C}{dt} \times t = 0.436 \times (84.459 + 46.738) = 57.202 (\mu\text{m}) \\ L_D &= 29.645 - 0.210 \times 46.738 = 19.830 (\mu\text{m}) \end{aligned}$$

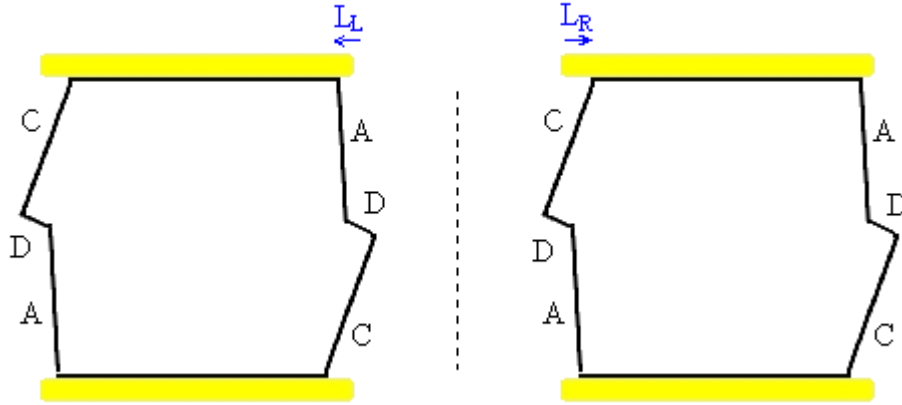


圖 6-14 Z-cut 石英第二階段蝕刻後剖面示意圖

第三階段蝕刻是蝕刻至晶面 D 完全消失為止，如圖 6-15，此時各晶面蝕刻速率分

別為：

$$\frac{dL_A}{dt} = \frac{0.082}{\tan(108.33)} - \frac{0.422}{\sin(108.33)} - \frac{0.082}{\tan(98.193)} = -0.460(\mu\text{m} / \text{min})$$

$$\frac{dL_C}{dt} = \frac{0.422}{\sin(62.814)} - \frac{0.078}{\tan(62.814)} - \frac{0.078}{\tan(90.85)} = 0.436(\mu\text{m} / \text{min})$$

$$\frac{dL_D}{dt} = \frac{0.422}{\tan(108.33)} - \frac{0.085}{\sin(108.33)} + \frac{0.078}{\sin(62.814)} - \frac{0.422}{\tan(62.814)} = -0.358(\mu\text{m} / \text{min})$$

因此可以求得晶面 D 被蝕刻至消失所需時間為：

$$t_3 = \frac{19.830}{0.358} = 55.391 \text{ (min)}$$

第三階段再蝕刻 55.391 分鐘後，則總蝕刻時間為

$t = 84.459 + 46.738 + 55.391 = 186.588 \text{ (min)}$ 最終的 A、C 長度與側向蝕刻距離分別為：

$$\begin{aligned} L_C &= \frac{dL_C}{dt} \times t = 0.436 \times (84.459 + 46.738 + 55.391) \\ &= 0.436 \times 186.588 = 81.352(\mu\text{m}) \end{aligned}$$

$$L_A = 46.181 - 0.460 \times 55.391 = 20.701(\mu\text{m})$$

$$L_R = \frac{R_c \times t}{\sin(89.15)} = \frac{0.078 \times 186.558}{\sin(89.15)} = 14.555(\mu\text{m})$$

$$L_L = \frac{R_A \times t}{\sin(89.15)} = \frac{0.082 \times 186.558}{\sin(81.807)} = 15.455(\mu\text{m})$$

為避免實驗誤差，因此增加蝕刻時間至 $t = 190 \text{ (min)}$ ，則側向蝕刻分別為

$L_R = 14.821(\mu m)$ 、 $L_L = 15.741(\mu m)$ 此側向蝕刻需在光罩上做補償；根據表 5-7，選用的振盪器厚度 $h = 100\mu m$ ，石英振盪器的第一彎曲模態頻率最接近 35kHz 的細樑寬度為 $87.5\mu m$ ；考慮側向蝕刻的影響，設計光罩圖形的細樑寬度為 $87.5\mu m + 14.821\mu m + 15.741\mu m = 118.062\mu m$ ，而可做出蝕刻後細樑寬度為 $87.5\mu m$ 、第一彎曲模態頻率為 35kHz 之石英振盪器，石英震盪器各尺寸如圖 6-16。

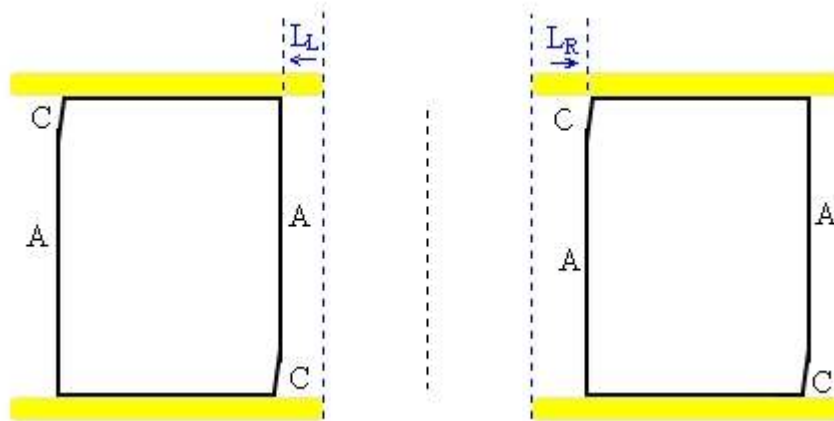


圖 6-15 Z-cut 石英第三階段蝕刻後剖面示意圖

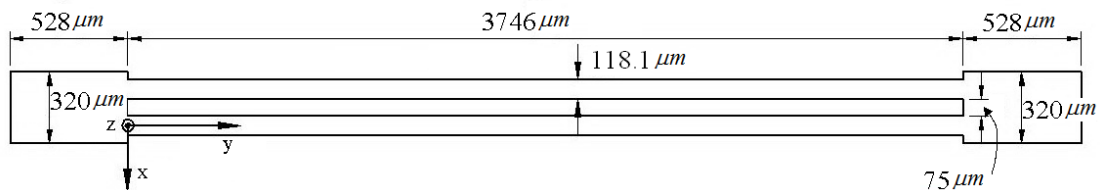


圖 6-16 使用 Z-cut 石英振盪器光罩尺寸圖

與之前相同，濕式蝕刻後上下圖案會有部分偏移。為了不讓上下圖案偏移，在製作阻檔金屬層時先做出偏移補償，補償偏移距離為 $|L_R - L_L| = 0.92(\mu m)$ ，選取 $1\mu m$ 作為製作時之偏移量。

6.2.2 設計石英振盪器電極光罩

本文所探討的石英振盪器為雙端固定音叉式石英振盪器，其電極圖形如圖 6-17、圖 6-18，電極分為上下電極與側向電極，其中橙色與藍色的電極剛好為相反電位。電極的區塊間分別以細線連接，再與側向電極連接。

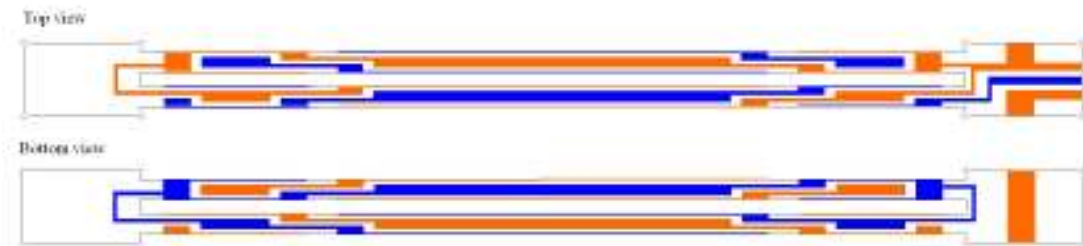


圖 6-17 石英振盪器上下電極圖

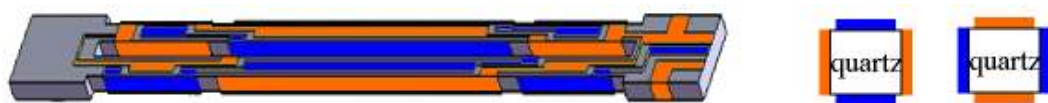


圖 6-18 石英振盪器電極圖，左圖為立體電極圖，右圖為細樑截面電極圖

如圖 6-17、圖 6-18，石英振盪器電極可以分成左、中、右三個區塊，然而在蒸鍍側向電極時，因為細樑的側向沒有辦法使用光阻作為蒸鍍的阻擋層，因此需另外製作一影子光罩(shadow mask)，以避免蒸鍍時側向電極相互連接，製作完成之影子光罩如圖 6-19。



圖 6-19 影子光罩實體

第柒章、 結論

1. 本文利用冂字形圖案，濕蝕刻 $(ZYw)+2^\circ$ 石英，量測底切之晶格面的長度與夾角，內凹角隅蝕刻速率理論，成功計算出底切之晶格面的蝕刻速率。
2. 同時實驗量測得到的濕蝕刻晶格面角度，可以計算出各晶格面的米勒-布拉法斯指標。
3. 藉由實驗所得晶格面方向與蝕刻速率，設計石英振盪器尺寸，使其達到預定的自然頻率。本文討論雙端固定音叉式石英振盪器，在基本尺寸固定的狀態下改變細樑寬度及厚度，設計石英振盪器第一彎曲模態自然頻率為35kHz。
4. 利用計算出的石英振盪器細樑寬度以及實驗的蝕刻速率，設計出石英振盪器的製程以及所需用到的光罩尺寸，以確保所製作出的石英振盪器頻率為預定的第一彎曲模態頻率。



參考文獻

1. Klass Hjort, Greger Thornell, Reimar Spohr, and Jan-A ke Schweitz, “Heavy ion induced etch anisotropy in single crystalline quartz”, Proc. IEEE, MENS Workshop, San Diego, pp.267-271, 1996
2. Greger Thornell, Klass Hjort, Bruno Studer, and Jan-A ke Schweitz, “Anisotropy- Independent Through Micromachining of Quartz Resonators by Ion Track Etching”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 44, No.4, pp.829-838, 1997
3. Greger Thornell, Håkan Rapp, and Klas Hjort, “X-cut Miniature Tuning Forks Realized by Ion Track Lithography”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47, No.1 , pp.8-15, January , 2000
4. Christer Hedlund, Ulf Lindberg, Urban Bucht, and Jan Soderkvist, “Anisotropic etching of Z-cut quartz”, J. Micromech. Microeng. Vol. 3, pp.65-73, 1993
5. Sungkyu LEE, “Photolithography and Selective Eetching of an Aarray of Quartz Tuning fork Resonators with Improved Impact Resistance Characteristics”, The Japan Society of Applied Physics, Vol. 40, Part. 1, No.8, pp.5164-5167, 2001
6. Sungkyu LEE, “Photolithography and Selective Etching of an Array of Surface Mount Device 32.768kHz Quartz Tuning fork Resonators: Definition of Side-Wall Electrodes and Interconnections Using Stencil Mask”, The Japan Society of Applied Physics, Vol. 40, Part. 1, No.9A, pp.5480-5484, 2001
7. Sungkyu LEE, “Frbrication of an Array of Surface Mount Device 32.768kHz Quartz Tuning Fork-Type Crystal: Photolithography and Selective Eetching of an Aarray of Quartz Tuning fork Resonators with Subsequent Photoresist Spray coating”, Elsevier, Vacuum, Vol. 65, pp.161-168, 2002
8. R. M. Langdon, “Resonator Sensors- a review”, J. Phys. E: Sci. Instrum. , Vol. 18,

pp.103-115, 1985

9. E. D. Reedy, JR., W. J. Kass, "Finite-element Analysis of a Quartz Digital Accelerometer," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.37, No. 5, pp.464-474, 1990
10. John W. Anthony, Richard A. Bideaux, Kenneth W. Bladh, and Monte C. Nichols, "Handbook of Mineralogy" Mineral Data Publishing, 2001
11. "IEEE Standard on Piezoelectricity (1987)," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
12. 述本正美, 廖詩文, "高頻通訊用晶體振盪器的技術及發展," 電子與材料雜誌, 第 13 期, pp.126-131, 2002
13. Takuro Ikeda, "Fundamentals of piezoelectricity", Oxford University Press Inc., New York, 1996
14. 張簡文添, 「單晶體濕式蝕刻理論」, 國立台灣大學博士論文, 2000
15. 陳明澤, 「單晶石英加速規之自然頻率理論分析」, 國立台灣大學碩士論文, 2009

附錄 A 實驗材料與儀器

| 晶片 | | | | | |
|---------|------------------------------|-----------|---------|-------------|------------|
| 編號 | 名稱與描述 | | | | |
| 1 | (YXI)-88° 石英晶圓，厚度 350μm，雙面拋光 | | | | |
| 化學藥劑與耗材 | | | | | |
| 編號 | 名稱與描述 | 編號 | 名稱與描述 | 編號 | 名稱與描述 |
| 1 | 去離子水 | 2 | 丙酮，100% | 3 | 甲醇，100% |
| 4 | 硫酸，96% | 5 | 雙氧水，30% | 6 | 鹽酸，37% |
| 7 | 硝酸，70% | 8 | 氨水，29% | 9 | 氫氟酸，49.5% |
| 10 | 氟化銨，40% | 11 | 鉻蝕刻液 | 12 | AZ4620 正光阻 |
| 13 | MP-450 顯影劑 | | | | |
| 儀器 | | | | | |
| 編號 | 名稱 | 廠牌 | | 型號 | |
| 1 | 超音波振洗機 | Branson | | 5510 | |
| 2 | 光阻旋轉塗佈機 | Laurell | | | |
| 3 | 單面對準曝光機 | Karl Suss | | EVG 620 | |
| 4 | 加熱平板 | Corning | | PC-420 | |
| 5 | 烘箱 | Deng Yng | | DS45 | |
| 6 | 電子槍蒸鍍機 | ULVAC | | 北部微機電中心組裝設計 | |
| 7 | 探針式表面分析儀 | KOSAKA | | ET-4000A | |
| 8 | 晶圓精密切割機 | 禾宇科技 | | DS-150 II | |
| 9 | 顯微鏡 | Olympus | | MX40 | |

附錄 B 實驗各項參數

| 蒸鍍參數 | | |
|--------|---|---------|
| 鉻層蒸鍍參數 | 厚度 600 Å，蒸鍍速率平均為每秒 0.3 Å | |
| 金層蒸鍍參數 | 厚度 1200 Å，蒸鍍速率平均為每秒 0.4 Å | |
| 旋轉塗佈參數 | | |
| 步驟 | 轉速(rpm) | 旋轉時間(秒) |
| 1 | 500 | 5 |
| 2 | 1500 | 5 |
| 3 | 3000 | 30 |
| 軟硬烤參數 | | |
| 軟烤參數 | 在 90°C 加熱平板上，加熱 90 秒鐘 | |
| 硬烤參數 | 在 120°C 的加熱平板上，20 分鐘 | |
| 曝光顯影參數 | | |
| 曝光時間 | 15 秒 | |
| 對準間隙 | 30 μm | |
| 曝光方式 | 軟接觸(Soft Contact) | |
| 顯影時間 | 20 秒 | |
| 濕式蝕刻參數 | | |
| 蝕刻鉻層 | 鉻蝕刻液，常溫，30 秒鐘 | |
| 蝕刻金層 | HNO ₃ : HCl = 1:3，常溫，30 秒鐘 | |
| 蝕刻石英 | HF(49.5%) : NH ₄ F(40%) = 2 : 3，55°C ± 2°C，60 分鐘 | |