

第三章 整合平板與彈簧結構實例—微力感測器

本章提出結合平板與彈簧之探針，供微力感測器元件之應用。目前微力感測器主要是以雷射加工製造平板與彈簧，並藉由組裝方式提供平板運動空間，且其探針也是透過人工組裝方式整合到平板上，除了組裝不方便外，定位精度也將受到限制。此外，位置的感測乃利用感測電容變化量或結合光槓桿原理，來推估探針的位移量或反推算作用力的大小，該兩種方式皆會有較差之解析度、儀器架設較龐大、及匹配不易之潛在問題。本章將以嶄新的製程方式製作可整合平板之微探針，且整合的方式不需透過組裝，故無定位誤差，且探針透過蝕刻選擇比及特殊保護機制成型，可不需精準控制蝕刻時間，依舊維持探針尖端的尖銳度，及其量測之解析度；而帶動平板運動之彈簧幾何尺寸由光罩設計決定，並由有機物回融(reflow)方式接合下電極板，相對應位置較易控制。而整體結構將透過壓電片驅動給予大位移，並結合光纖形式之微型感測器，量測平板接觸到物體表面之位移變化。

本製程採用體型微細加工法直接蝕刻矽基材來製作運動平板，故此可使其平板之厚度與剛性大幅增加，再透過設計使扭轉彈簧之扭轉剛性下降，而仍維持出平面(out-of-plane)剛性。如此，平板於掃描物體形貌時主要產生扭轉之剛體運動，且遠大於平板的彎曲變形，彈簧部分亦無出平面運動。亦即不論是平板本身或彈簧都足以抵抗和試片接觸後的反作用力，以避免光纖感測器受到干擾，導致造成判讀位移錯誤，或造成位移計算上及光學偵測上的誤差。以下將分別就感測系統，配合之製程規劃，以及針對該元件之理論分析與商用軟體模擬結果，說明整體設計概念及實驗結果。

3-1 設計與分析

此小節針對本章提出之新式微探針整合平板與彈簧之結構，及如何與後部大行程驅動裝置及量測位移系統結合，以應用於微力感測器上，做結構設計之尺寸分析與探討。

3-1.1 系統介紹

本文之微力感測元件如圖 3-1 所示，感測之原理如圖 3-2~3 所示，其性能與原子力顯微鏡相同，皆可應用於物體之掃描，描繪出物體表面形貌。而力量的解析上，則先由負責大行程之壓電驅動裝置移動到試片表面並施加負載，前端感測器部分之兩邊電極板均施加相同電壓使維持平衡位置，並於電極板上方嵌入光纖感測器偵測位移量變化，其嵌入位置如圖 3-4 所示，在平板對應最邊緣位置，當兩邊之位移訊號不同，控制系統將減少或增加所施加之電壓使其維持於平衡狀態，並從調整的電壓值與壓電片施加電壓值做進一步計算，求得探頭的施力大小及位移量的關係，如此可以得到在負載施加過程中，待測物件所受的力與位移之關係。同時根據測試機制的不同，可以輸入直流電壓的方式進行靜態的負載輸出，或是利用交流電的方式做週期性的應力負載。

3-1.2 彈簧剛性分析

當利用壓電片之驅動力作用，使整個微力感測器之元件貼近試片表面時，希望平板只產生扭轉剛體之運動，而不會產生撓體的彎曲形變(bending deflection)。另外，而彈簧部分則須具有足夠出平面彎曲

剛性，但其扭轉剛性則希望能夠越小越好，使平板容易被驅動且只有產生純粹之扭轉運動，因此評估彈簧之扭轉和彎曲剛性比是十分重要的。若以如圖 3-5 之兩端固定單一矩形彈簧為例，其扭轉剛性為[59-60]

$$K_t = \frac{E}{1+\gamma} \frac{\left(0.333 - 0.21 \frac{b}{h}\right) b^3 h}{L_f} \quad h > b \quad (3-1)$$

其中 E 為材料之楊氏係數， γ 為蒲松比，b 為彈簧寬度，h 為彈簧厚度， L_f 為彈簧之長度，另外彈簧之出平面彎曲剛性由材力解可知為

$$K_b = \frac{2Eb h^3}{L_f^3} \quad (3-2)$$

比較式 3-1 與式 3-2 可知，當彈簧長度 L_f 增加時，扭轉剛性呈一次方下降，彎曲剛性呈三次方下降，因此彈簧增長，其彎曲剛性將比扭轉剛性大幅減少，更容易產生彎曲形變，造成額外的出平面方向運動，但是厚度 h 增加，則可使出平面剛性驟昇，可減少不必要之出平面運動。故整體設計需考慮彈簧厚度與彈簧長度之交互影響，使平板之出平面位移可在限制力量大小下(該力量大小之限制以不傷害物體表面為原則)，達到光纖感測器所能偵測之規格。而若欲增加水平方向上彈簧之彎曲剛性，則可藉由 V 型雙彈簧設計，來抵消可能造成之同平面(in-plane)旋轉力矩，使整個平面在出平面扭轉時更穩定[61]。如 3-6 圖所示為典型之 ANSYS 模擬結果，可藉由施力觀察平板之運動狀況及各部份位移變化，以驗證彈簧的剛性設計是否合宜。

3-1.3 壓痕作用力推算

當運動平板處於平衡時，藉由靜電力原理得知壓痕作用力為

$$F = 2CV_0 \frac{\Delta V}{d} \quad (3-3)$$

式中 C 為驅動電極的電容質， d 為電極間距， V_0 為固定驅動電壓， ΔV 為回饋控制電壓，故可知壓痕作用力與電容值、控制電壓以及固定驅動電壓呈現正比，但與電極間距呈現反比的關係。而平行板電極間電容值為

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (3-4)$$

式中 A 為平行板電極面積， ε 為材料之介電常數。由式(3-3)、式(3-4)得知，藉由提高平行電極面積 A 或降低電極間距離 d ，可以加大壓痕作用力，故元件之施力偵測範圍得以提高[53]。以 $3500 \times 7000 \mu\text{m}^2$ 大小之平板為例，位於轉軸兩邊之平行板電極面積各為 $3500 \times 3500 \mu\text{m}^2$ ，若電極間距 d 為 $8 \mu\text{m}$ ，則平行板的電容值為 13.55pF 。若施加固定驅動電壓 V_0 為 40 伏特、回饋控制電壓為 10 伏特，代入式(3-4)可得壓痕作用力之感測範圍為 $1355 \mu\text{N}$ 。

3-1.4 靜電驅動分析與模擬

因平行板電極之靜電力分佈會隨著時間改變，本文採用商用軟體 Coventor ware 進行靜電力與結構位移之耦合場的模擬，希望能求得驅動電壓與位移量之關係，以尺寸為 $2500 \times 250 \mu\text{m}^2$ 大小之平板、曲折彈簧寬度 $12 \mu\text{m}$ 總長度 $500 \mu\text{m}$ 、電極板間距 $8 \mu\text{m}$ 之元件為例，如圖 3-7(a)所示，當施加電壓為 150 伏特時，其平板邊緣約有將近 $2.16 \mu\text{m}$ 的位移，而圖 3-7(b)則顯示了該元件受力時的應力分佈狀況。

3-2 製程與實驗

透過模擬分析確定各部份之尺寸後，配合現有製程機台完成製程規劃，上電極製作部分藉由超低阻值之矽晶片來成形，整體運動平板部分以及支撐框架都因低阻值而電位可視為相同，直接引出該電極，下電極則以金屬定義並製作於玻璃基板上，為簡化嘗試接合上下極板之時間以快速驗證元件特性，採取製程簡易之有機物接合(organic bonding)方式，以 Parylene 回融來達到接合之目的。該元件之示意圖如圖 3-1 及圖 3-4 所示，而完成之元件如圖 3-8 所示，包含微探針、運動平板、扭轉彈簧、支撐框架以及下電極等結構。

3-2.1 製程步驟

為了製造圖 3-1 所示之元件，本文採用低阻值 1 至 10ohm-cm 厚度 300 μ m 之<100>4 吋雙面拋光矽晶圓，以及 4 吋玻璃晶圓，由黃光微影製程、薄膜成長、乾濕式蝕刻，及有機物回融接合完成製作，總計四道光罩之步驟。矽基材之製作流程如圖 3-9 所示，可略分為九個步驟，製程步驟分述如下：

步驟一：如圖 3-9(a)所示，以低壓化學氣相沉積(LPCVD)爐管沉積約 1000Å 之氮化矽薄膜。

步驟二：如圖 3-9(b)所示，預烤和塗佈 HMDS 後，以薄光阻塗佈於晶圓上進行微影製程，將第一道光罩轉移至晶片上，並以光阻作為 RIE 之罩幕進行蝕刻氮化矽層之動作，之後該氮化矽層將作為 ICP 蝕刻矽基材之罩幕。

步驟三：如圖 3-9(c)所示，以上一步驟所定義之氮化矽層作為 ICP 時之保護，進行乾式蝕刻，此蝕刻步驟將決定元件之探針高度，在此蝕刻之深度須與運動平板深度配合。

步驟四：如圖 3-9(d)所示，於晶片另一面預烤和塗佈 HMDS 後，以薄光阻塗佈於晶圓上進行微影製程，將第二道光罩轉移至晶片上，並以光阻作為 RIE 之罩幕進行蝕刻氮化矽層之動作，之後該氮化矽層將作為 ICP 蝕刻矽基材之罩幕。

步驟五：如圖 3-9(e)所示，以上一步驟所定義之氮化矽層作為 ICP 時之保護，進行乾式蝕刻，此蝕刻步驟將決定元件之運動平板厚度，在此蝕刻之深度須與探針深度配合。

步驟六：如圖 3-9(f)~(g)所示，去除光阻後，以高溫爐管長約 $1\ \mu\text{m}$ 之二氧化矽層，作為後面濕式蝕刻結構之保護層。

步驟七：如圖 3-9(h)所示，RIE 除去定義局部氧化保護之氮化矽薄層，使矽基材本體露出，以進行後部矽基材蝕刻之動作。

步驟八：如圖 3-9(i)所示，於控溫且控制濃度之 TMAH 或 KOH 溶液中進行濕蝕刻矽晶圓之動作，並以光學顯微鏡觀察當運動平板附近一周變為透明則表示蝕刻完成。

步驟九：如圖 3-9(j)所示，以 BOE 去除殘餘之二氧化矽保護層，如此，元件以矽晶圓製作之部分即告完成。

又如圖 3-10 所示，為玻璃晶圓上製作下電極之製程步驟：

步驟一：如圖 3-10(a)所示，預烤和塗佈 HMDS 後，以厚光阻塗佈於玻璃晶圓上進行微影製程，將第三道光罩轉移至玻璃基板上，以光阻定義電子束濺鍍(E-beam)Cr/Au 之區域，後以丙酮去除光阻，完成以光阻剝除技術(lift-off)定義電極之步驟。

步驟二：如圖 3-10(b)所示，先以 CVD 的方式沉積一層 Parylene 薄膜後，預烤和塗佈 HMDS 後，以厚光阻塗佈於玻璃晶圓上進行微影製程，並以 O_2 電漿定義該高分子材料，將第四道光罩轉移至 Parylene 上，定義出進行回融接合之區域。

矽基材部分經過切割，而玻璃部分經過切割以及 CO₂ 雷射鑽孔後，進行下一步驟。

步驟三：如圖 3-10(c)所示，經對位後，加熱使 Parylene 回融並稍施壓力以確定上面之矽元件部份已黏附於下面之玻璃基板上。

3-2.2 製程結果

根據上述製程步驟，本文的光罩佈局如圖 3-11 所示，其中圖 3-11(a)顯示矽基材之佈局，圖 3-11(b)則顯示玻璃基材之佈局。整體佈局可分為一、四象限中較大尺寸之設計，及二、三象限中小尺寸之設計，除了運動平板、彈簧長度與寬度之調變外，並設計探針附於兩軸運動之平板之結構，希望應用範圍更為廣泛。

圖 3-12~13 所顯示為幾道主要製程步驟完成後之結果，圖 3-12 為製程完畢，然尚未晶圓切割之結果，圖 3-12(a)可明顯觀察到數個不同的元件設計，圖 3-12(b)可觀察到下電極位於玻璃基板上。圖 3-13(a)為經雷射鑽孔製作預留光纖感測位置之結果，圖 3-13(b)顯示大尺寸平板下電極之細部設計對照圖，包含接合有機物 Parylene 的定義區域、下電極、預留埋入光纖之鑽孔位置、減少雜散電容效應之結構及引出欲打線之電極，可與圖 3-13(a)做對照。

本製程最關鍵之步驟為探針之製造與整合，主要是利用圖 3-9(c)步驟 ICP 定義蝕刻保護深度，而經過圖 3-9(d)之步驟則形成蝕刻保護牆，如此進行蝕刻過程中，探針將可沿著保護牆而順著<111>面往下退，如圖 3-14 所示，圖中可清楚觀察到以 ICP 蝕刻後成長保護牆之

結構，以及因蝕刻選擇比中速率較差而停留之探針斜面。然而，因為保護面由高溫成長之二氧化矽構成，因此會存在殘餘熱應力[62]，該熱應力可在矽基材被掏空後釋放，有時也可能造成破裂之現象，如圖 3-15 所示，但此破壞只限於蝕刻後，已被掏空去除矽基材之部分保護牆，大致上該保護結構足以保護探針使之避免蝕刻液傷害。

3-2.3 製程問題與討論

本研究也曾嘗試如圖 3-16~17 所示之製程方式，來製作微探針，但是此製程方式，必須精準掌握蝕刻時間以及蝕刻罩幕大小，使得矽晶片可於蝕刻完成時，不但形成探針針尖，且運動平板可停止於 ICP 預定義厚度保護面，如圖 3-18 所示。因底切現象形成之錐狀探針必須與平板厚度配合，控制適當參數才能一次成型，當設計之蝕刻罩幕尺寸過小，將造成已形成之探頭被過度蝕刻，如圖 3-16 所示，無法留有適當大小之探頭甚或消失；當探針罩幕之尺寸設計過大時，造成蝕刻已達平板厚度但探針針尖卻尚未成型之現象，雖可繼續進行蝕刻將探針成型，但平板厚度將不好控制，亦有可能平板幾乎已蝕穿，卻依舊無法形成探針尖端，大幅降低探針解析度，如圖 3-17 所示。但是新設計的製程，在探針成型上則由矽基材特有晶格面控制，且由蝕刻保護牆做為角落補償之定義，如圖 3-19 所示，故不需要運動平板與探針蝕刻罩幕配合，其探針大小將隨著蝕刻時間延著 $\langle 111 \rangle$ 晶格面延伸，該探針尖端更可以保持蝕刻面所定義之夾角，不會受到破壞，故在此只需注意運動平板和彈簧結構是否已蝕刻完成，即可完成整合平板與彈簧之微探針之製作。

圖 3-20 顯示了大尺寸運動平板接合完成後之 SEM 照片，圖中可以看到運動平板、扭轉彈簧以及下部玻璃等，而圖 3-21 為扭轉彈簧之近照，可以發現運動平板與下極版中有一間距，此為由 Parylene 接合定義之間距，提供了運動平板運動之空間。圖 3-22 為尖端定義較差之探針近照，從圖中可以觀察到平板上，有許多 $\langle 111 \rangle$ 面沿著阻擋結構分佈之痕跡，在觀察濕蝕刻過程中，發現此處有許多氣泡包覆，推斷此將造成局部蝕刻速率不均勻，致使平板上有不同 $\langle 111 \rangle$ 蝕刻面，但此並不會使探針低於平板，故仍可利用，而圖 3-23 則顯示了定義完整的探針近照，從 SEM 照片可估計其尖端在 $0.5\mu\text{m}$ 以下。

除了如前述圖 3-14 所提蝕刻保護牆，因熱應力造成之殘餘應力於矽掏空後釋放，造成破壞外，圖 3-24~25 顯示另一種保護問題，既然蝕刻探針時，非掏空處保護膜不會破壞，若於保護層去除後，觀察到探針垂直側壁上有 $\langle 111 \rangle$ 蝕刻停止面成形，其原因為該氧化層厚度不均勻，有局部先遭到蝕刻液攻擊，失去保護作用所導致。而造成其厚度不均勻的原因推測為 ICP 蝕刻矽基材的過程中，參數控制尚未達到最理想導致垂直壁不平整，氧化時氧化層便無法均勻生長，故可保護時間亦長短不一，若以如圖 3-24 為探針處有 $\langle 111 \rangle$ 面之情況，此情形對針尖若無影響則尚可接受。但若在彈簧處造成 $\langle 111 \rangle$ 面之情況，如圖 3-25 所示，則影響較大，不但造成彈簧剛性的變化，更有可能使得結構從此脆弱處斷裂。

此製程中也必須考慮到 ICP 保護層之深度定義問題，該深度需與平板厚度配合，如圖 3-19 所示，亦即探針保護層由 ICP 定義之深度，與運動平板由 ICP 定義深度之和需大於晶片厚度，如圖 3-26 所示為

探針保護層定義深度不足之情況下，為了使運動平板得以懸浮，蝕刻仍舊繼續，蝕刻液將從探針底部未受保護處攻擊，若時間尚不長，則仍可得到懸浮之平板與殘留的探針，時間若過長則探針將被完全破壞，故在此必須特別注意保護層 ICP 定義之深度，應大於晶片厚度減去運動平板定義厚度之差值，避免蝕刻底切問題之發生。

此外，本文亦設計了其他探針整合之形式，圖 3-27 顯示環狀陣列之探針，扭轉運動平板為細長狀之設計，並以曲折之彈簧提供扭轉剛性。圖 3-28 則顯示了另一形式的探針，圖中可觀察到，其分別座落於懸臂邊緣的兩端，透過控制不同之蝕刻時間，以及兩旁之蝕刻保護層，而自動依 $\langle 111 \rangle$ 面形成雙探針。而圖 3-29 則為另一種設計，圖中可看到彈簧與其他定義之方形以及探針座落之三角形平板，中間的彈簧極供平板旋轉之軸向，兩邊三角型平板藉由彈簧與中間之極板相連，顯示更多樣性之整合探針、平板與彈簧的方式。

3-4 量測與實驗架設

微力感測器之實驗架設，目的在於對製造完成之元件進行結構特性探討，主要分為動態量測和靜態量測兩部分。靜態量測利用探針座於光學避震桌上進行實驗，觀察並測量 DC 驅動電壓與平板受靜電力之位移關係；動態量測則是則以雷射都普勒測振儀來驗證，測量元件之扭轉共振頻率，藉由扭轉剛性推算之公式，或 ANSYS 模擬值，以驗證該元件結構之扭轉共振模態，藉以評估其扭轉剛性。目前在靜態量測方面，可於 CCD 下觀察到平板扭轉運動，並量到運動平板在靜電驅動下之扭轉角度；動態量測方面，測得元件之自然特性，並與模

擬軟體得到估計扭轉剛性之依據，底下將分別詳細說明。

3-4.1 靜態觀測

如圖 3-30 所示為靜態觀測實驗架設，主要是將波型產生器產生之訊號，經由功率放大器放大後，藉由探針對試片施加電壓，透過顯微鏡連接 CCD 於螢幕顯示結果。透過螢幕可觀察到其微量的變化，其運動的形式是為單純的上下吸附，當電壓加大時，運動行程亦隨之加大，約在 120V 左右即可目視到其運動的情況，如圖 3-31 所示為透過 CCD 所拍攝之元件，此例中上下極板電極間距約 $8\mu\text{m}$ ，其支撐之扭轉彈簧長度約 $2000\mu\text{m}$ 寬度 $50\mu\text{m}$ ，運動平板大小為 $3500\times 7000\mu\text{m}^2$ 。圖 3-32 則為利用三次元表面干涉儀，量測平板運動在 100 伏特驅動下之相對出平面位置示意圖，圖中左上角為同平面(與紙面方向平行)之顯示圖，O 點為運動平板邊緣，A 點為運動平板之扭轉軸，OA 間的連線剖面如圖中之下方圖所示，當平板受到下電極之吸附時，測得 O 點相對位置比 A 點為低，使平板產生 0.48 度之扭轉運動。

3-4.2 動態量測與實驗架設

如圖 3-33 所示為測量共振頻率之實驗架設示意圖，所有儀器架設於光學避震桌上，先將試片黏貼於壓電片上，然後利用波型產生器給壓電片電壓以驅動微結構，再透過雷射都普勒測振儀之顯微鏡與 CCD 觀察聚焦光點位置，收集訊號接到儀器上，讀取定量量測結果。

本文首先針對如圖 3-34 所示之元件進行量測，該元件為大小

3500×7000 μm^2 、厚度 75 μm 之運動平板，藉由長 3000 μm 、寬 25 μm 之彈簧附著於框架上。當量測光點聚焦在微力感測器元件的運動平板邊緣位置時，獲得之典型量測結果如圖 3-35 所示，再 500Hz 之內有幾個峰值，經由比對壓電片之振動模態，並移動雷射光點偵測運動平板各處之位移量，可確定其扭轉之共振頻率為 324.01Hz。另一例子是對環狀之探針陣列中之單一結構進行測量，該元件為 2500×250 μm^2 厚度 75 μm 之平板，彈簧寬度為 14 μm ，當光點打在如圖 3-36 的位置，可獲得典型的量測結果如圖 3-37 所示，經過比對，確認該元件之扭轉共振頻率為 4.06KHz。兩個量測結果與模擬值對照，皆十分相近，更可以確定該頻率即為中心軸固定，平板成出平面剛體運動之扭轉模態。而圖 3-38 為典型以 ANSYS 模擬之扭轉共振模態之結果，其共振頻率為 464.20Hz。

另外，扭轉剛性亦可由結構模態分析之扭轉共振頻來推估。由[62]知帶有扭轉軸之平板之扭轉共振頻率為

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_t}{J_m}} \quad (3-5)$$

其中 K_t 為結構扭轉剛性， J_m 為旋轉慣性矩與如圖3-5所示之平板長寬高有關，關係式為 $J_m = \frac{1}{12} \rho t_m D^4$ ，其中 ρ 為密度， t_m 為平板厚度， D 為平板長度。故在此可將實驗所得之扭轉模態頻率找出後，帶入此關係式中，簡易推估該元件之扭轉剛性，將可彌補因靜態量測無法施予運動平板扭轉淨力矩，以驗證彈簧扭轉剛性的缺憾。

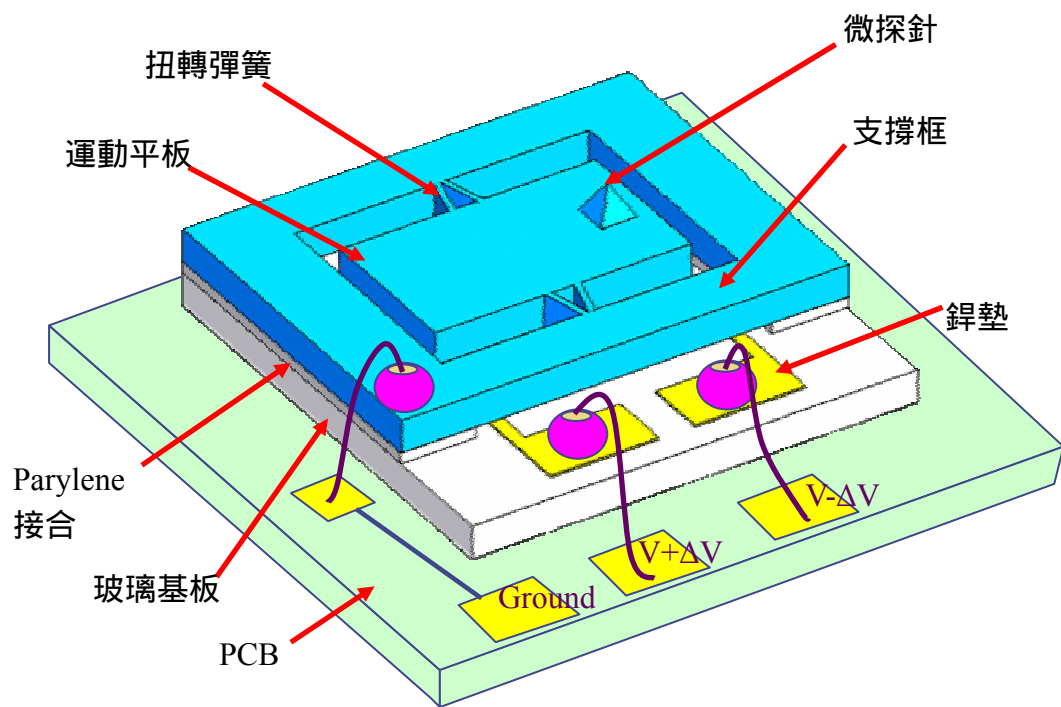


圖 3-1 整合平板之微力感測器結構示意圖

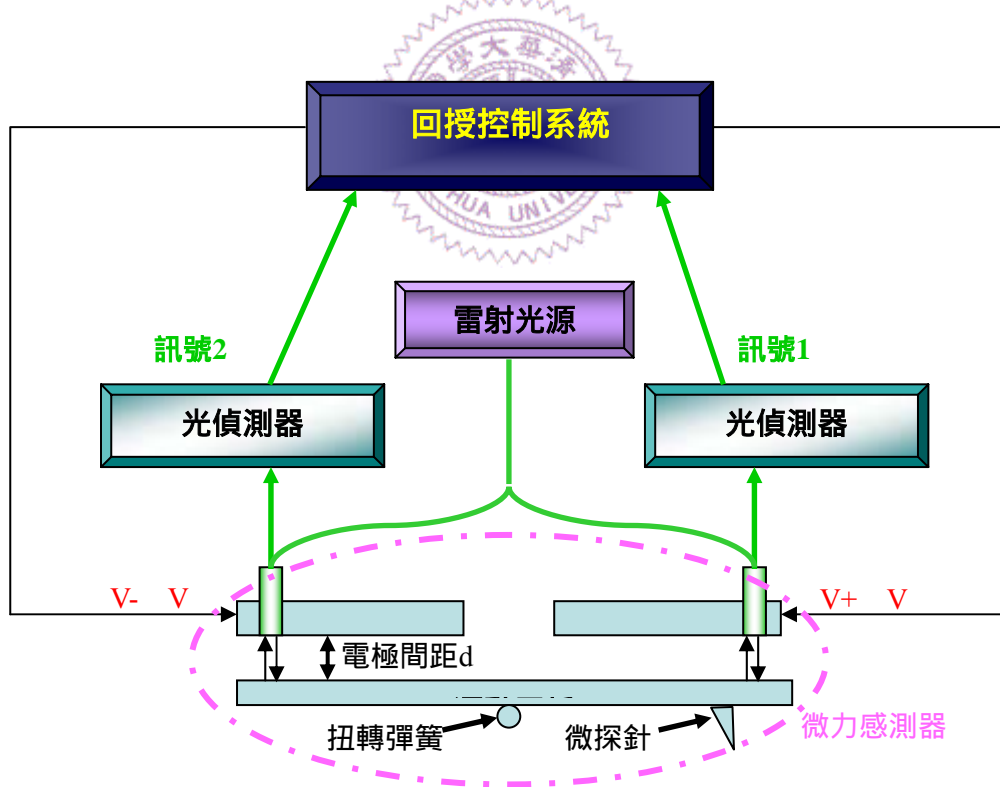


圖 3-2 高靈敏度微型化微力壓痕測試系統示意圖

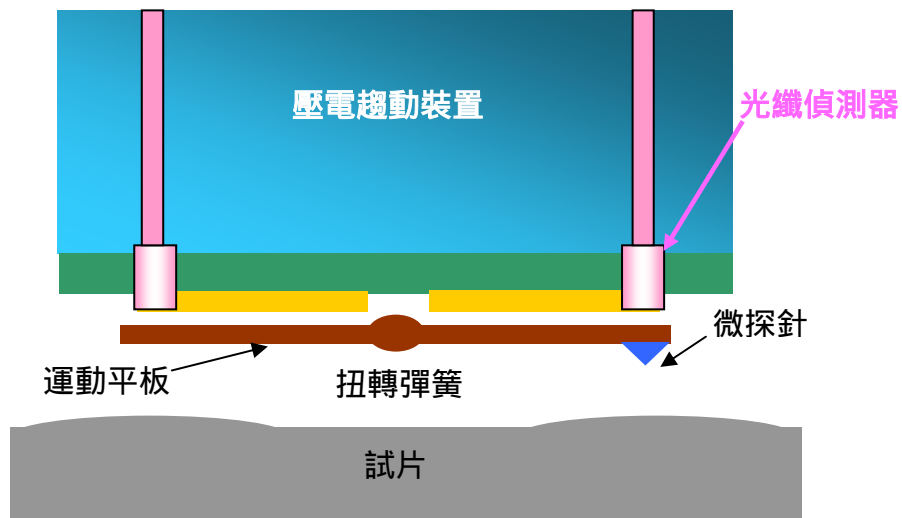


圖 3-3 感測示意圖

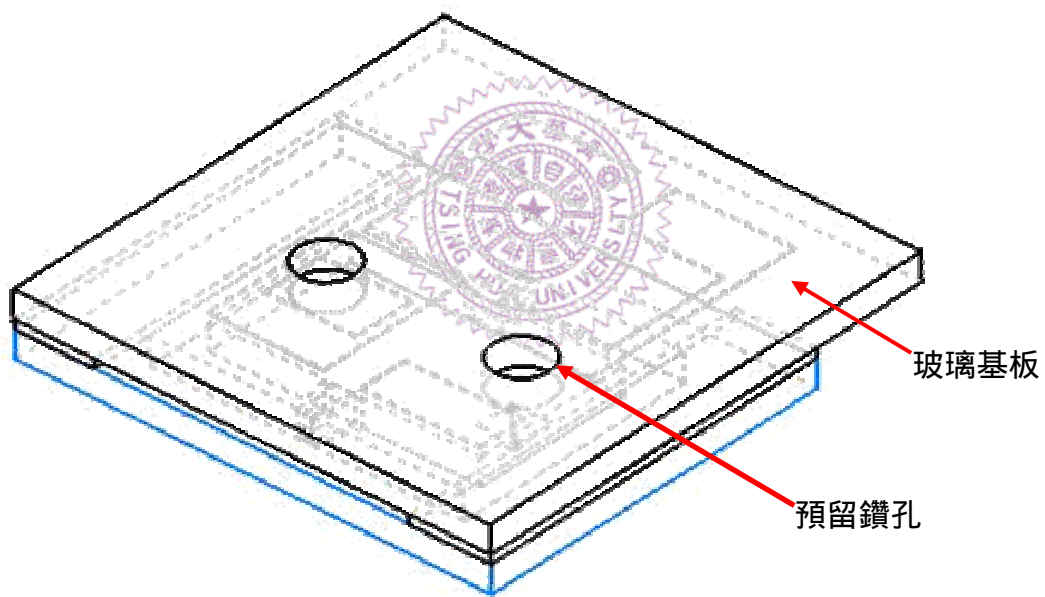


圖 3-4 整合平板之微力感測器背面預留光纖鑽孔位置示意圖

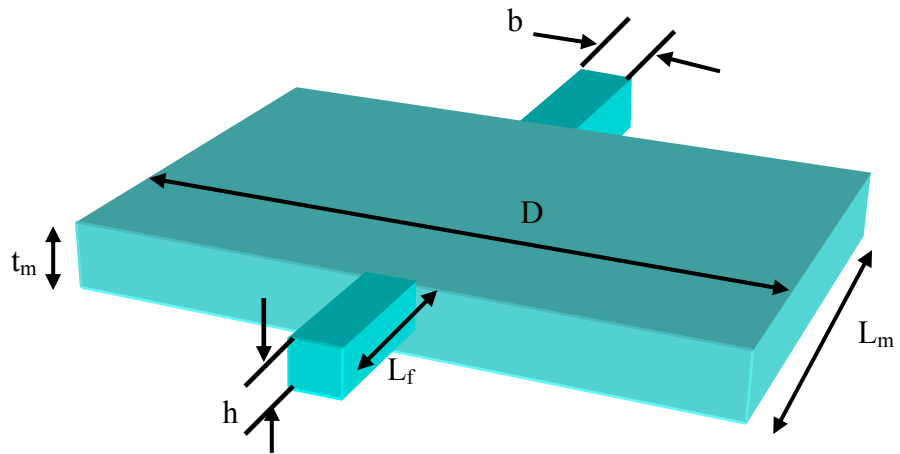


圖 3-5 雙端固定之面鏡尺寸設計之示意圖

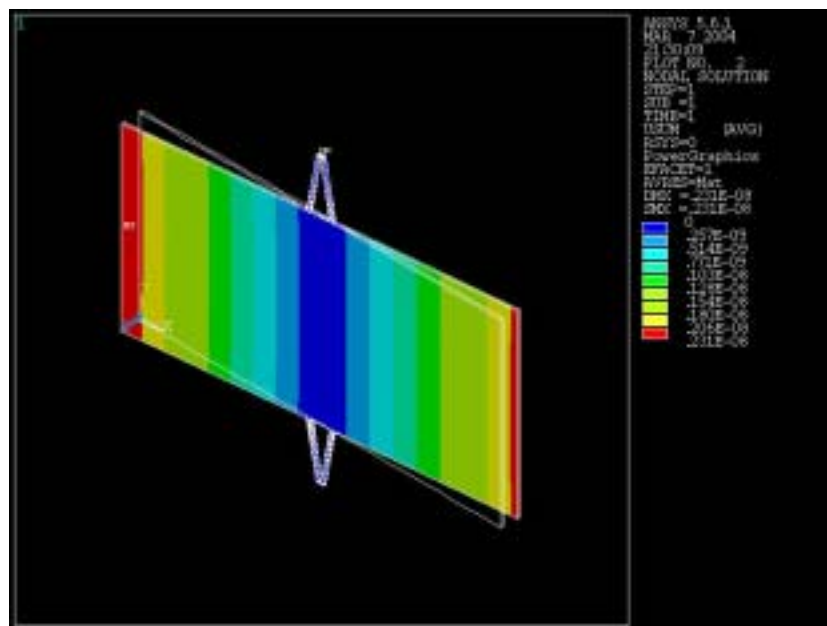


圖 3-6 ANSYS 位移變化模擬

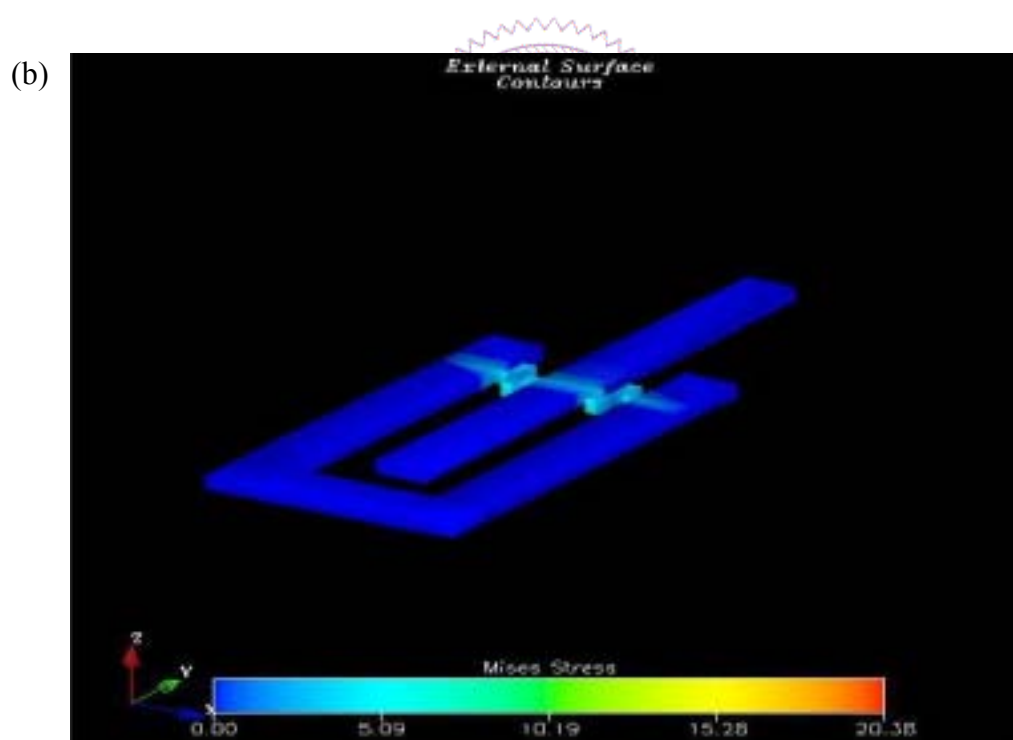
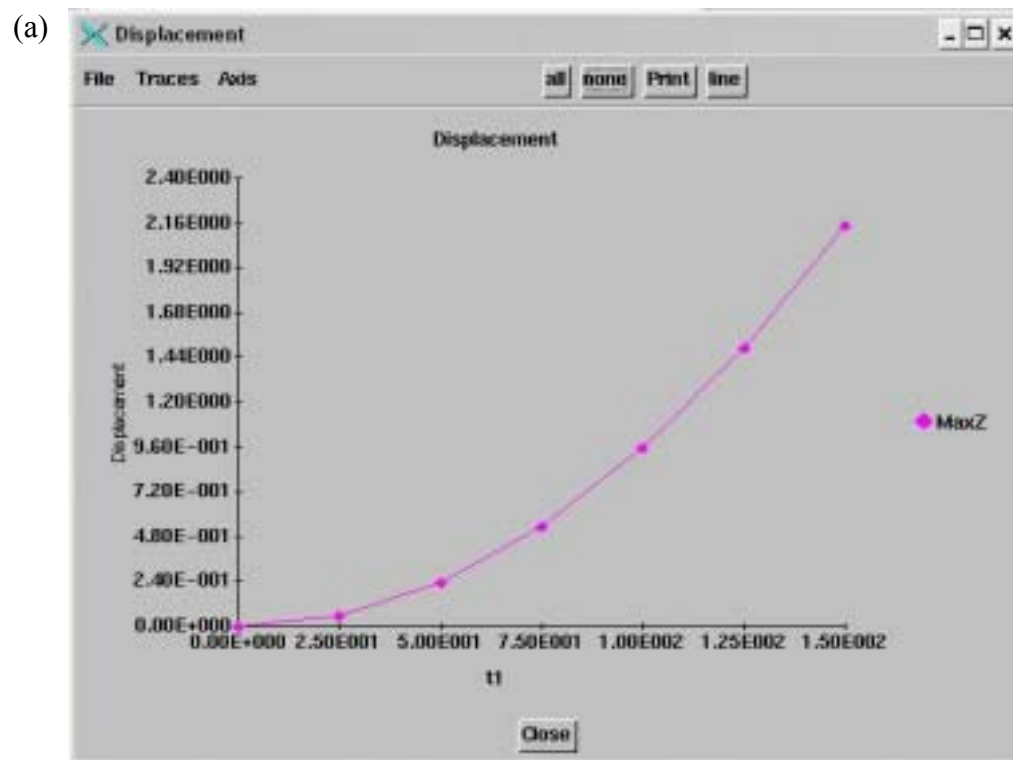


圖 3-7 Coventor 模擬施加電壓時之(a)位移變化量，(b)應力分佈

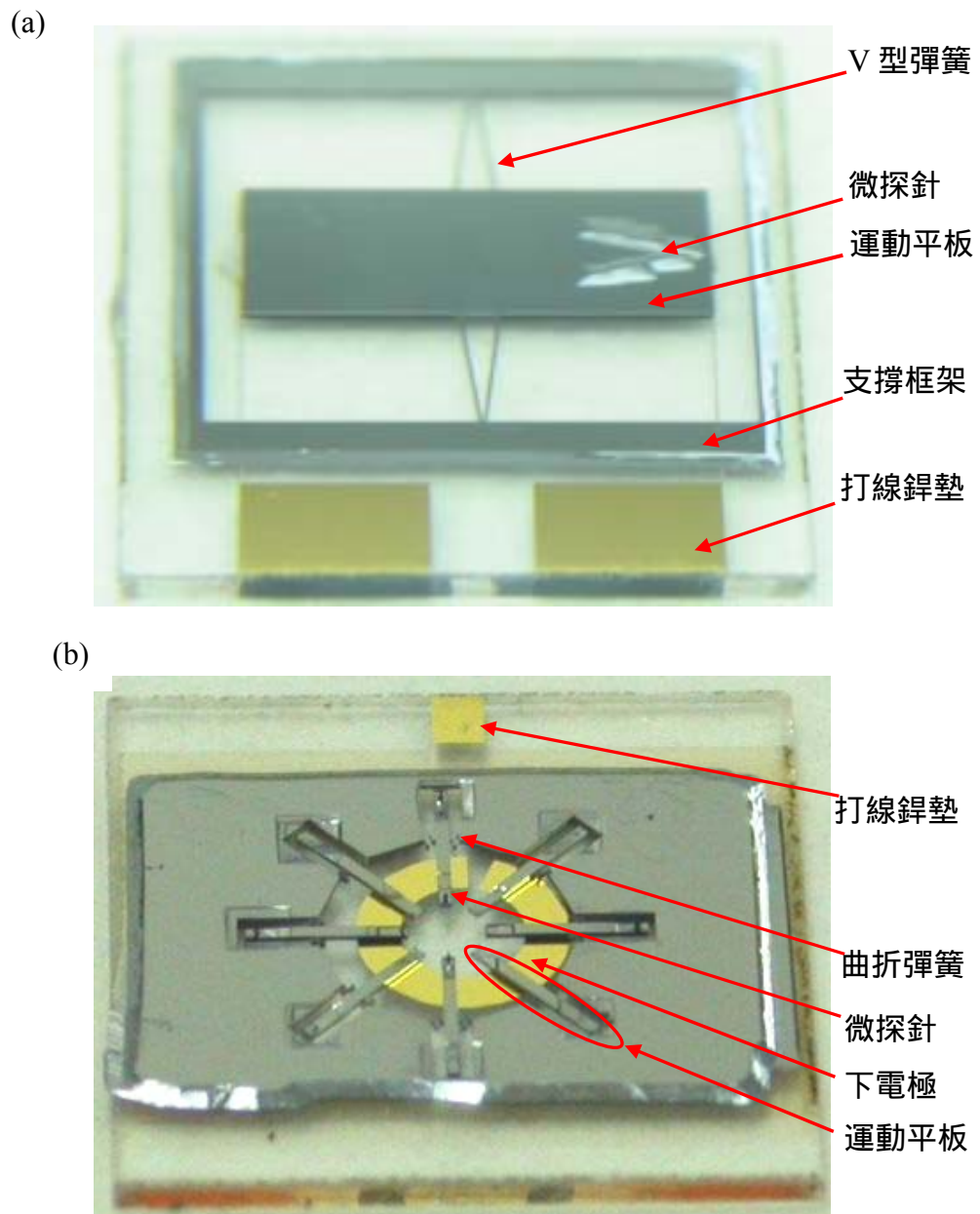


圖 3-8 完成接合之元件照片(a)探針整合運動大型平板加上 V 型彈簧，(b)探針整合細長運動平板之環狀陣列設計

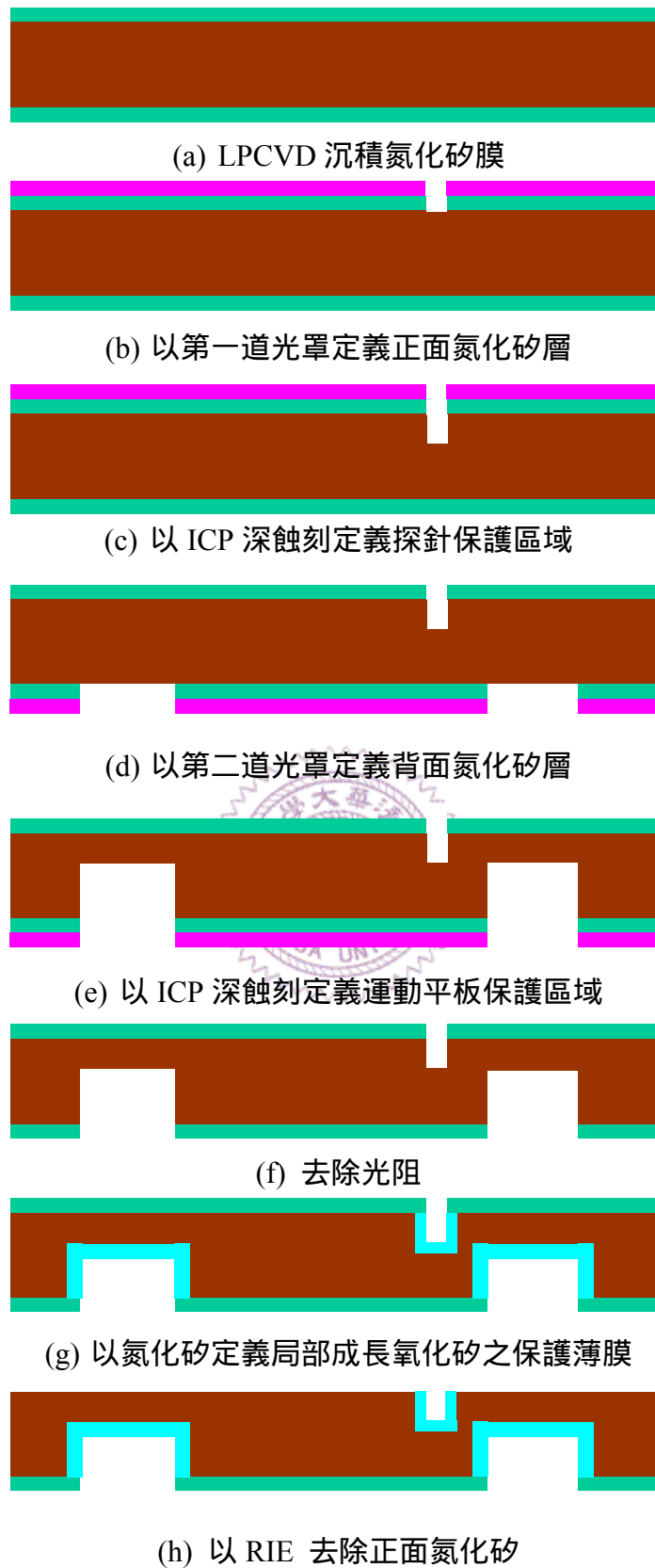


圖 3-9 矽基材部分實驗製程流程示意圖

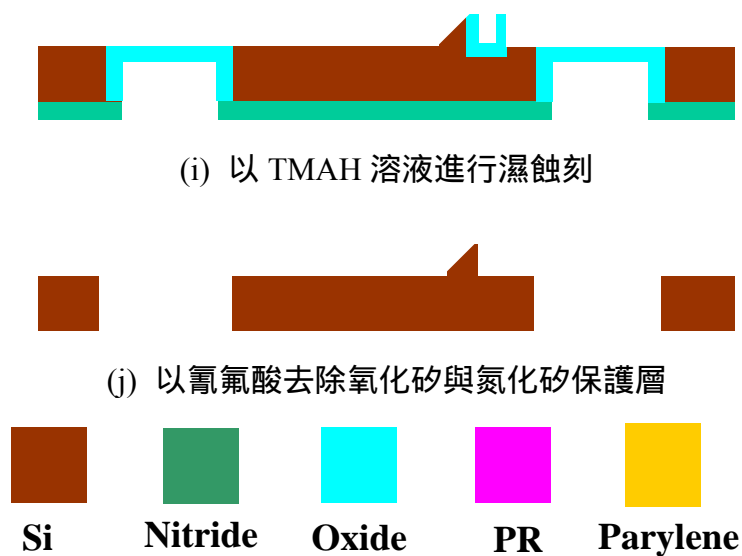


圖 3-9(續) 矽基材部分實驗製程流程示意圖

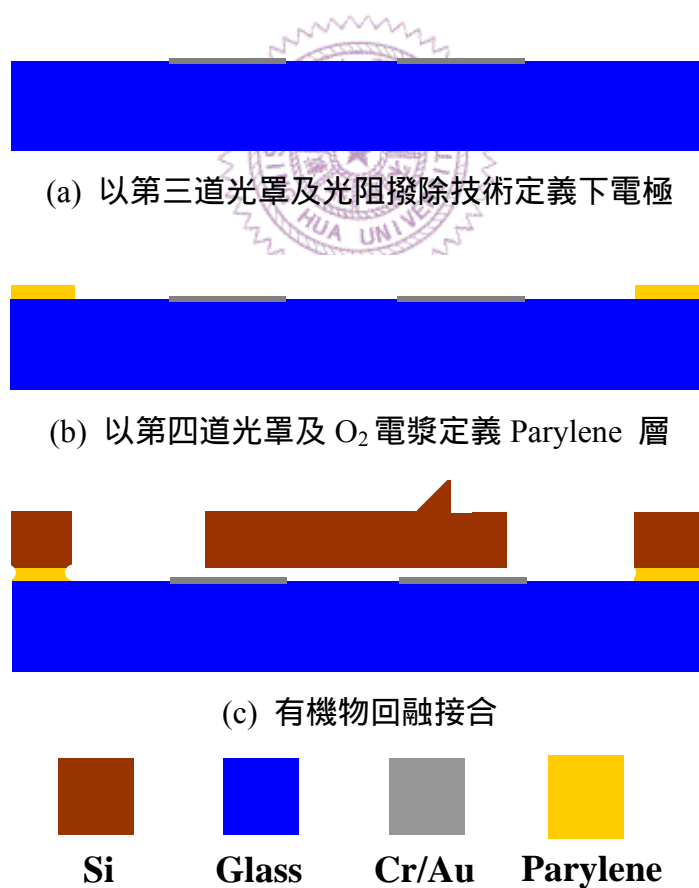


圖 3-10 玻璃基材部份實驗製程流程與接合步驟示意圖

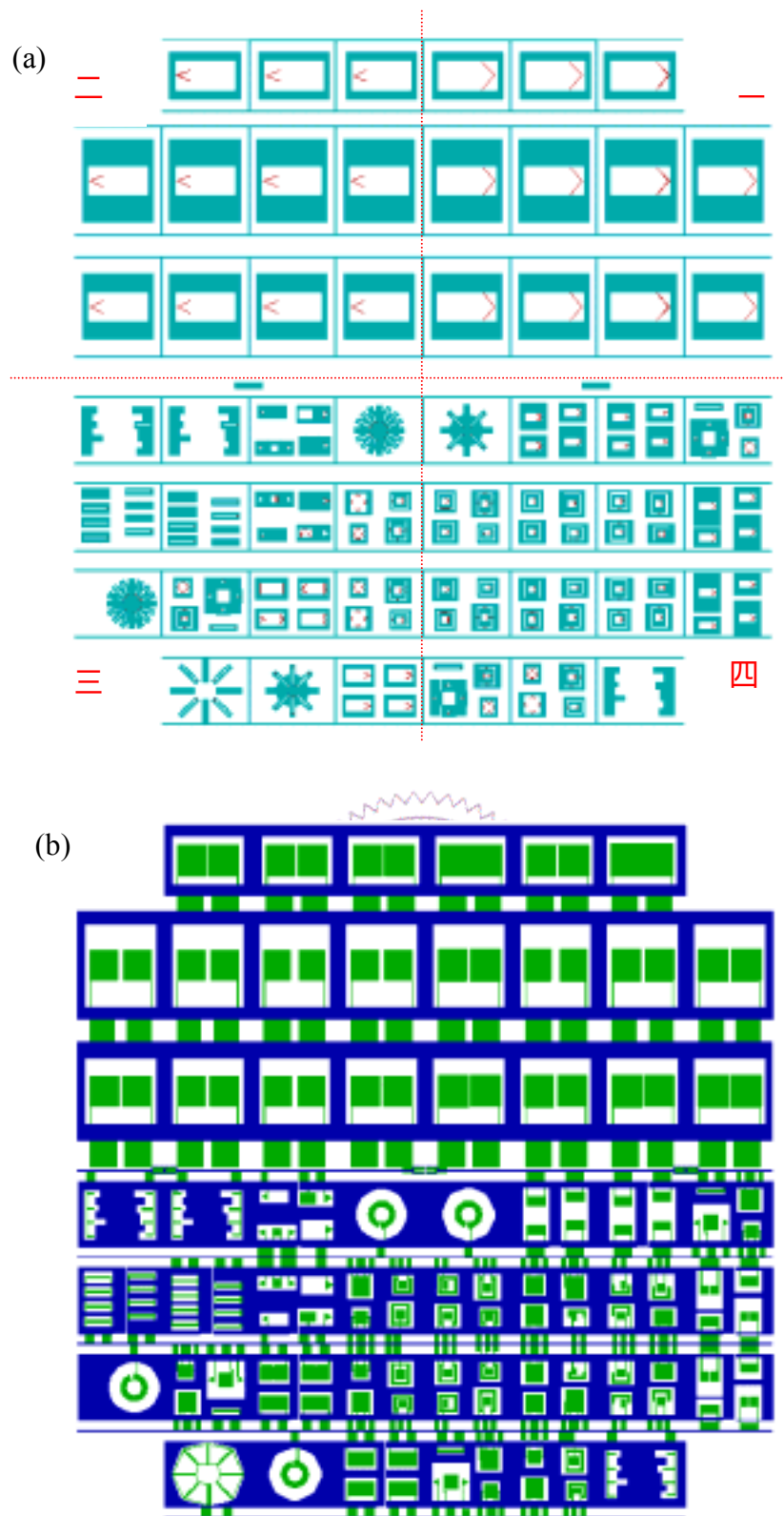


圖 3-11 (a)矽基材部分光罩佈局圖，(b)玻璃部分光罩佈局圖

(a)



(b)

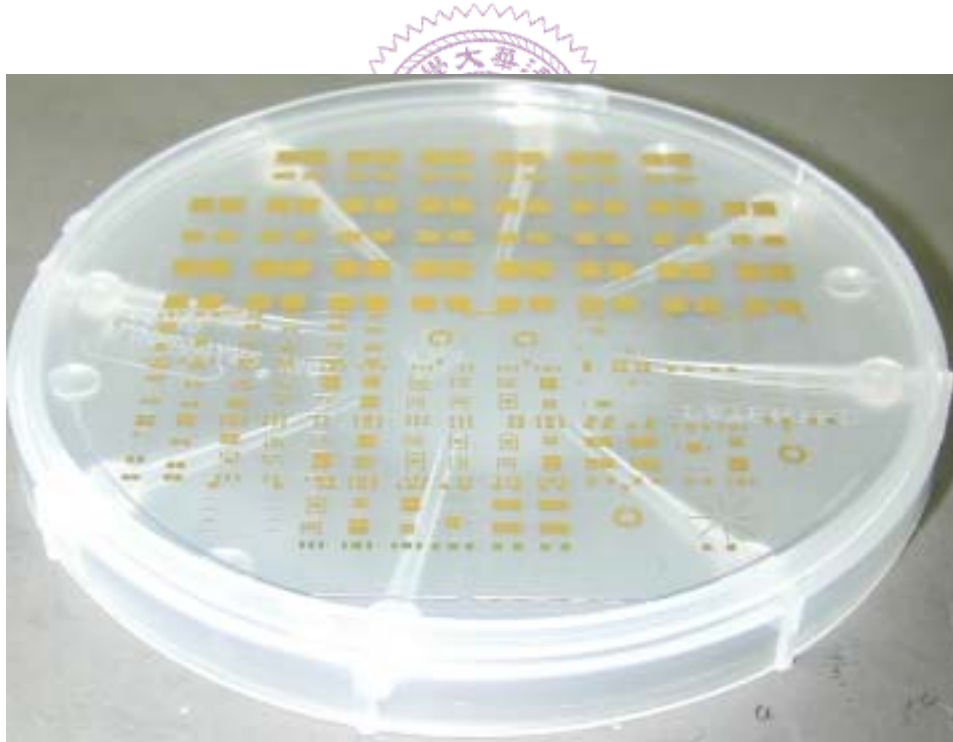
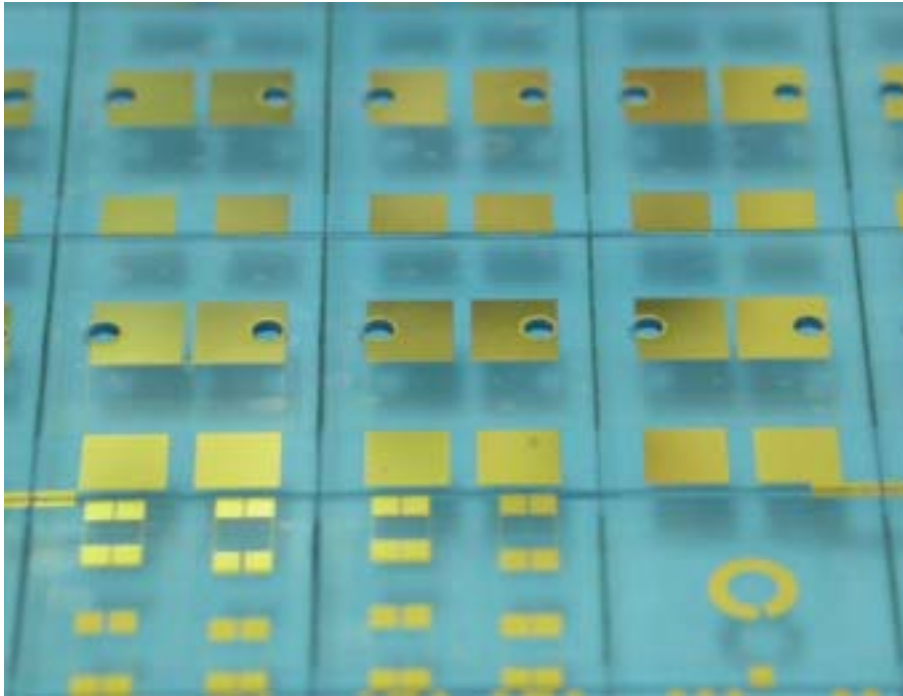


圖 3-12 (a)製作完成矽基材部分，(b)製作完成之玻璃部份

(a)



(b)

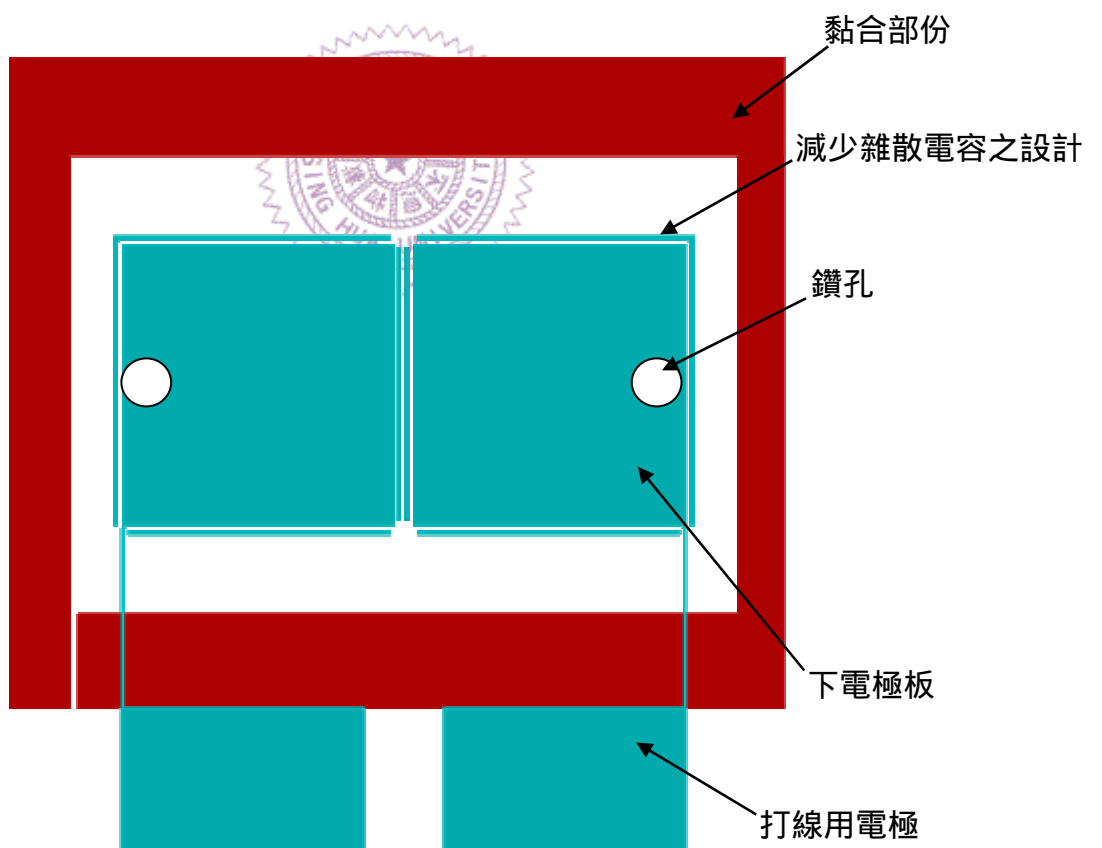


圖 3-13 (a)完成之玻璃部份鑽孔近照，(b)下極板整體佈局示意圖

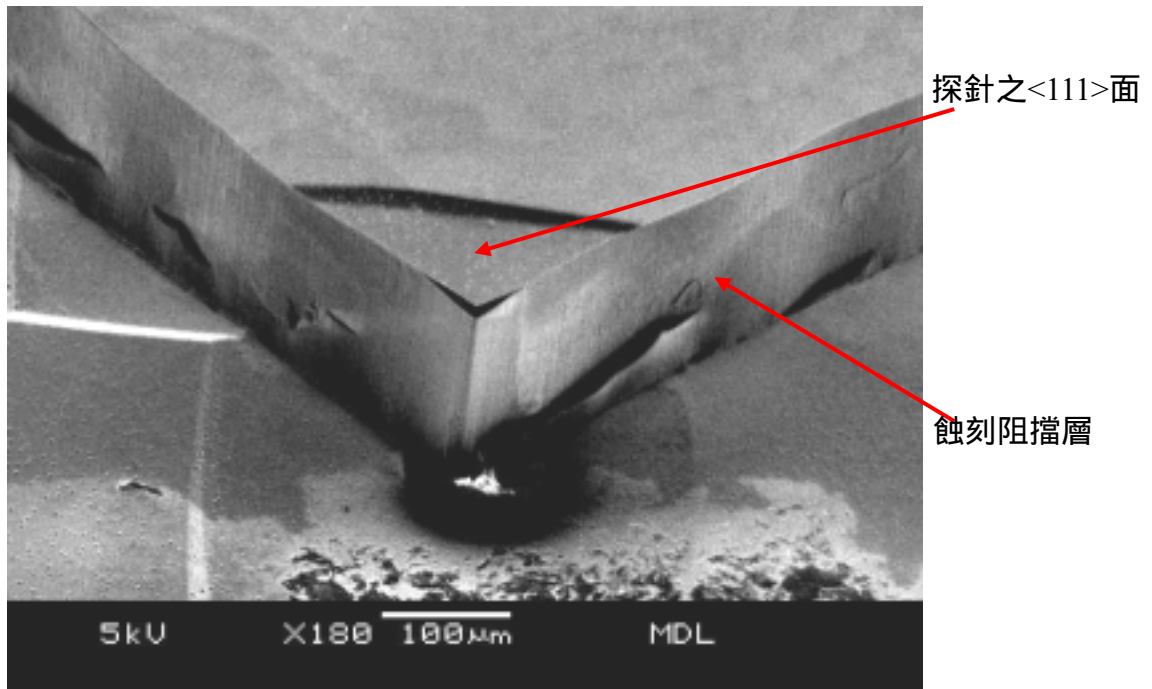


圖 3-14 蝕刻阻擋之氧化層與探針斜面 SEM 照片

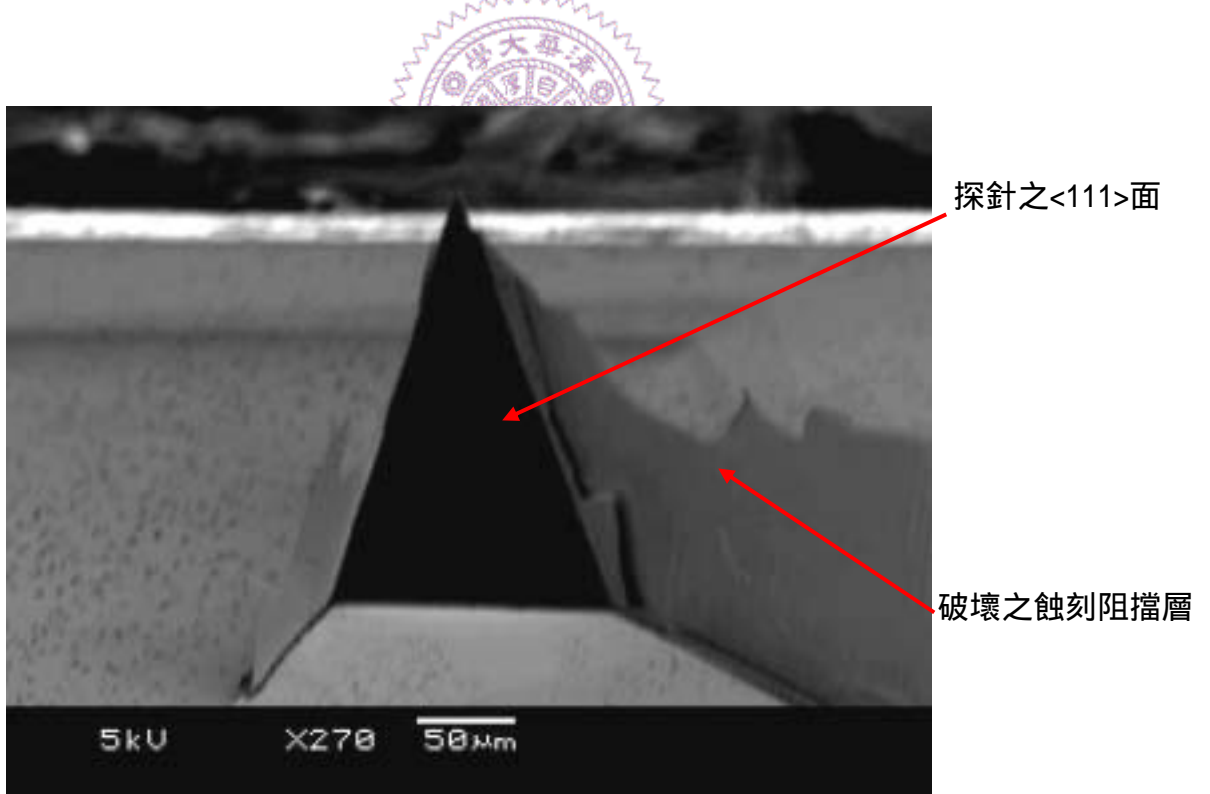


圖 3-15 蝕刻過程中阻擋之氧化層遭破壞之 SEM 照片

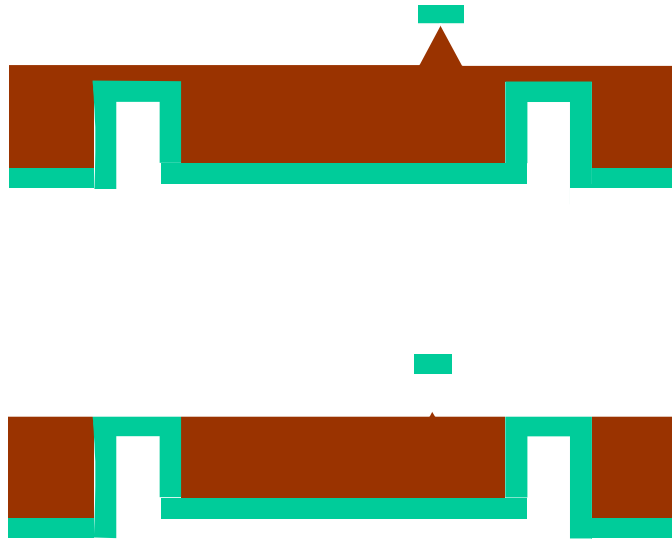


圖 3-16 舊製程缺失之一：蝕刻罩幕過小之蝕刻示意圖

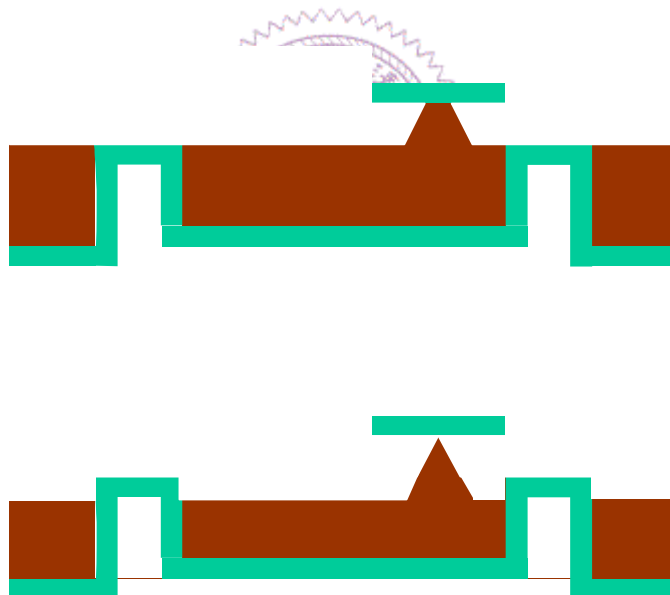


圖 3-17 舊製程缺失之二：蝕刻罩幕過大之蝕刻示意圖



圖 3-18 蝕刻罩幕大小與探針成型之關係示意圖

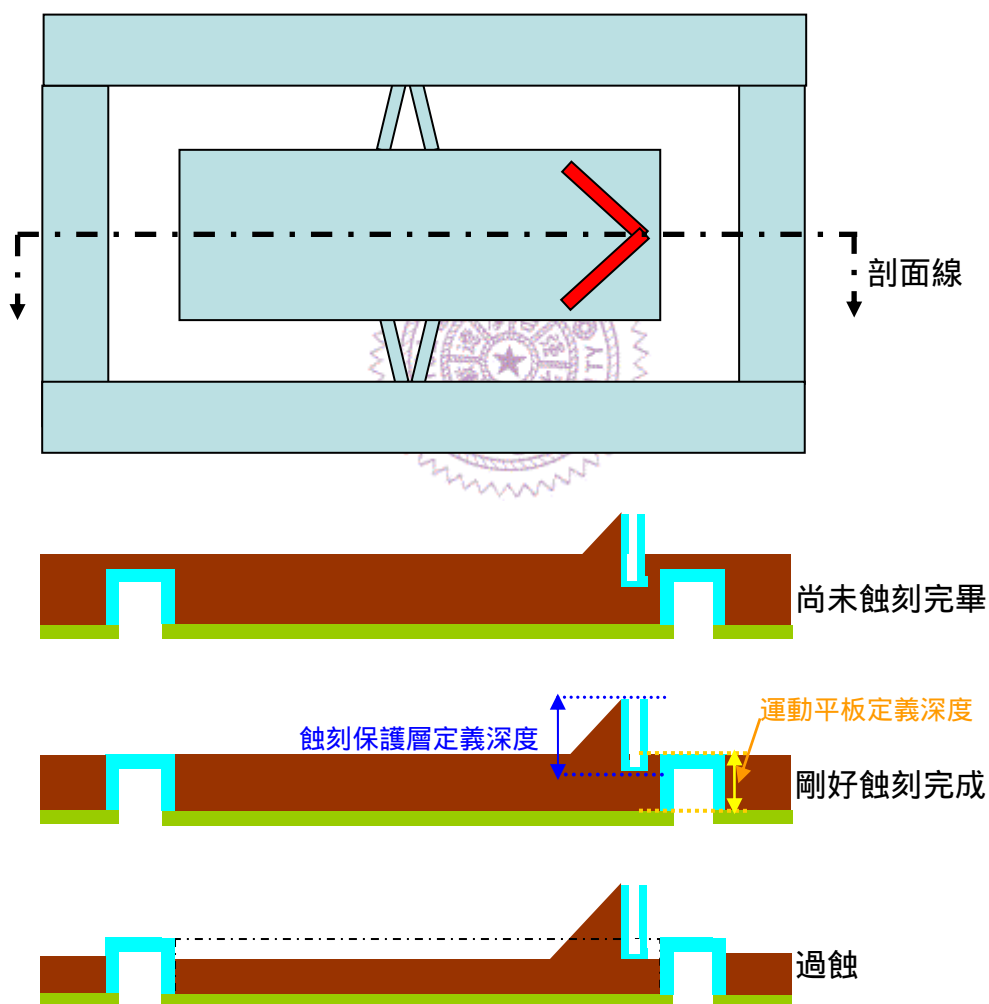


圖 3-19 改良之製程探針與平板於不同蝕刻時間下之關係示意圖

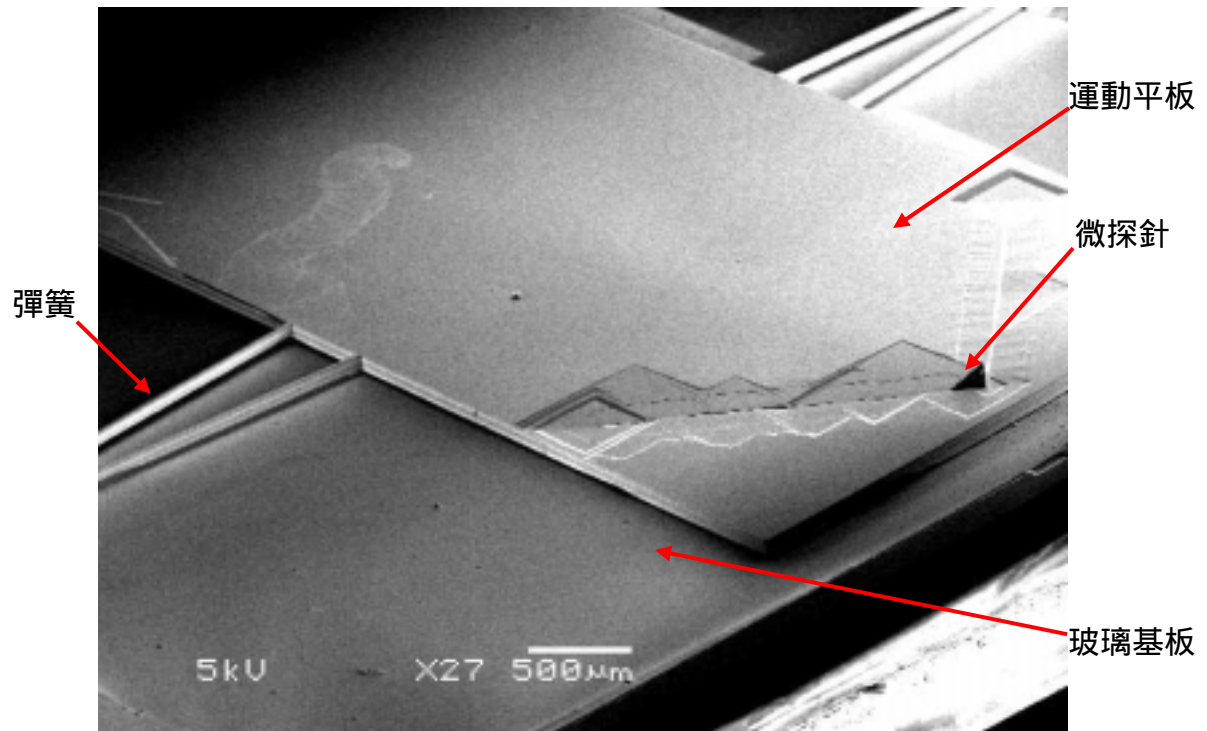


圖 3-20 大尺寸設計於封裝後整體 SEM 照片

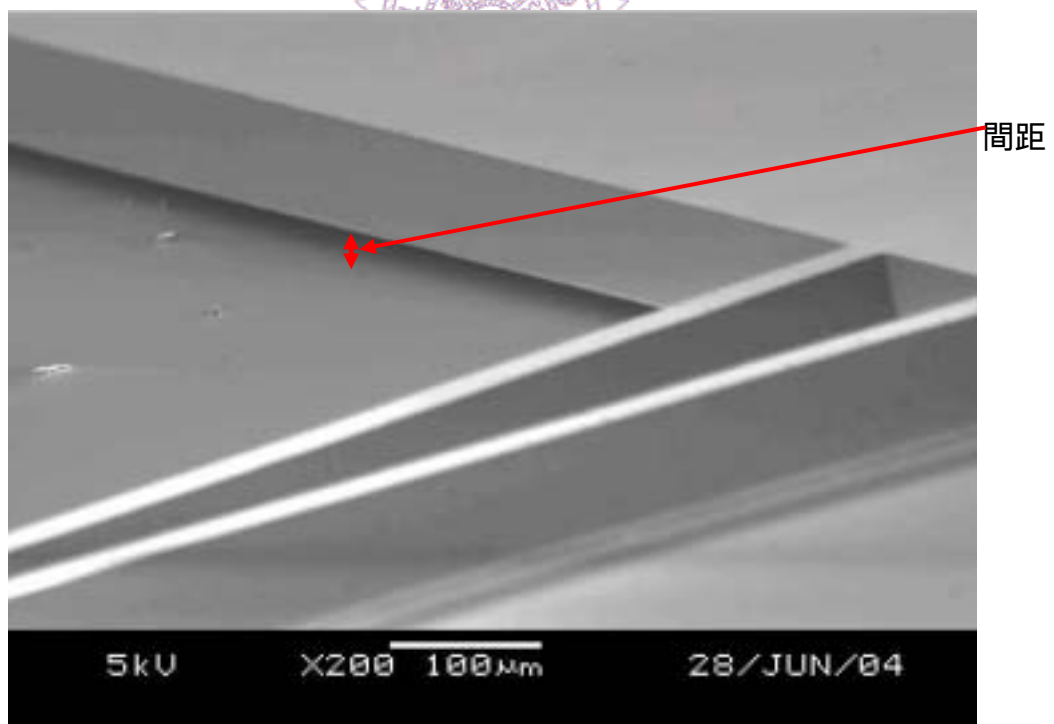


圖 3-21 運動平板、扭轉彈簧與下電極間距 SEM 近照

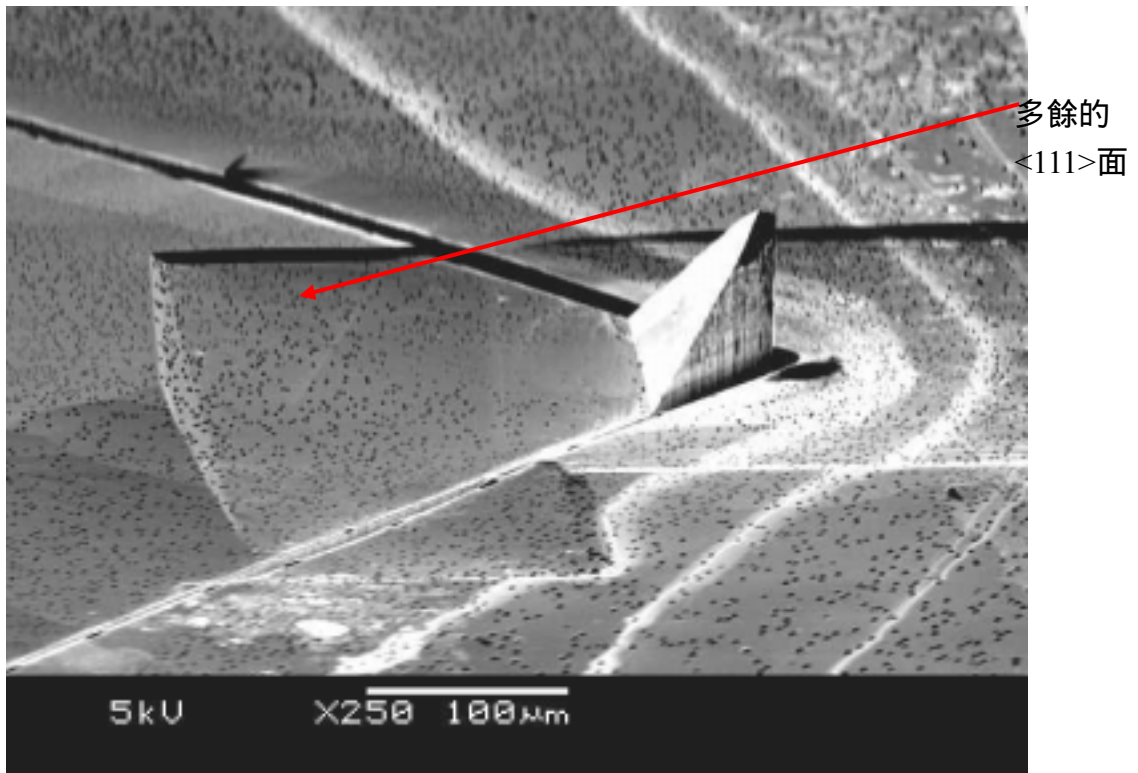


圖 3-22 運動平板上之微探針 SEM 照片

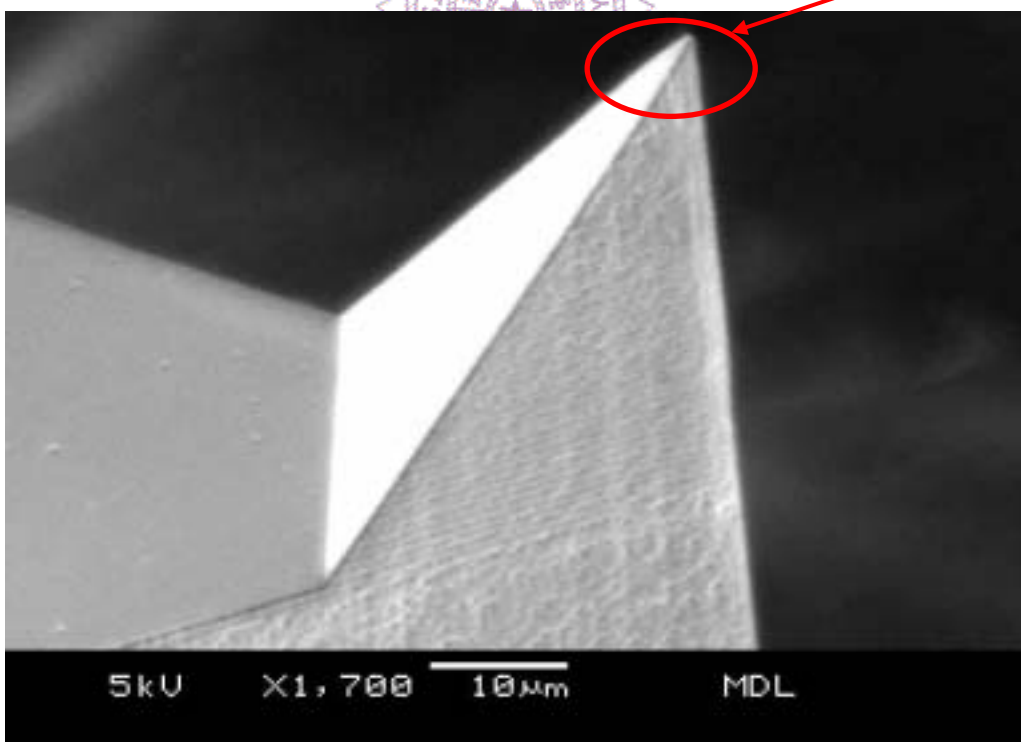


圖 3-23 完整定義之探針 SEM 近照

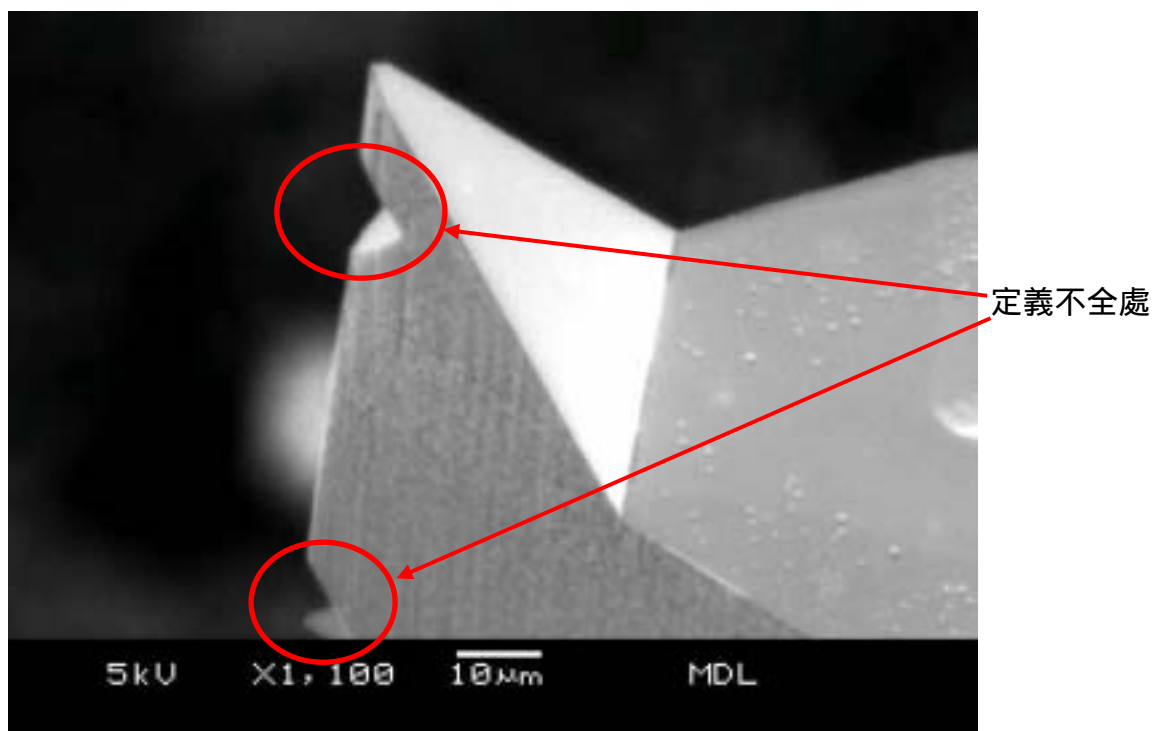


圖 3-24 側壁定義不全之探針 SEM 近照

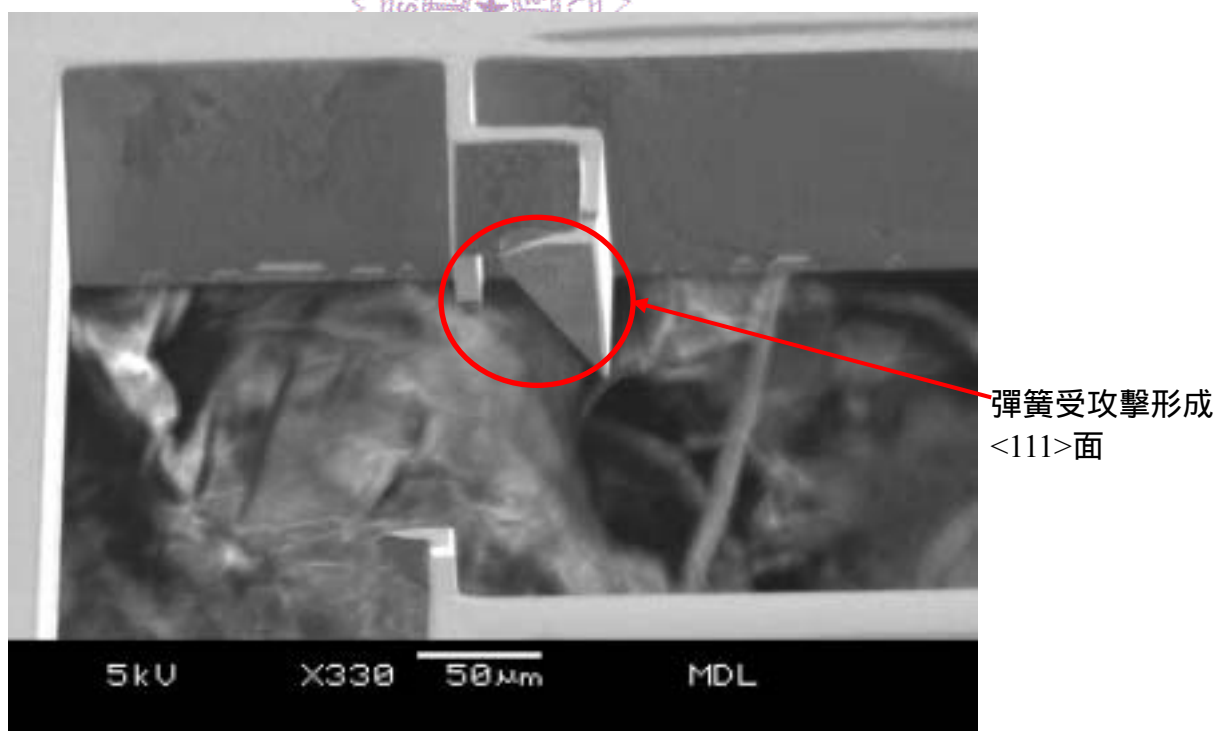


圖 3-25 側壁定義不全之彈簧結構 SEM 近照

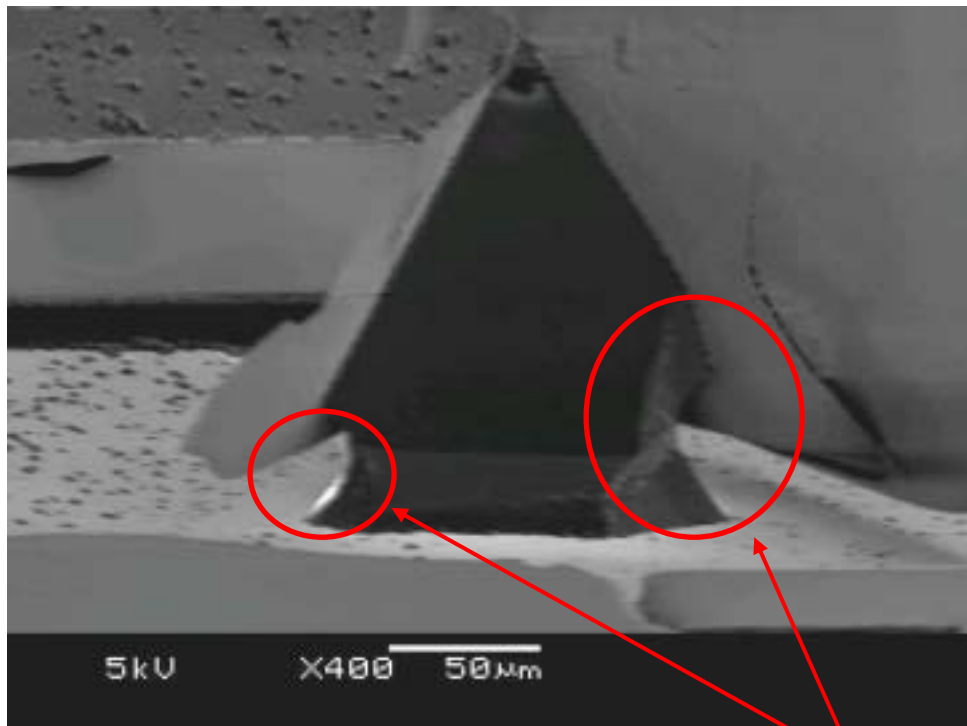


圖 3-26 ICP 定義深度不足造成探針從底部遭破壞之近照

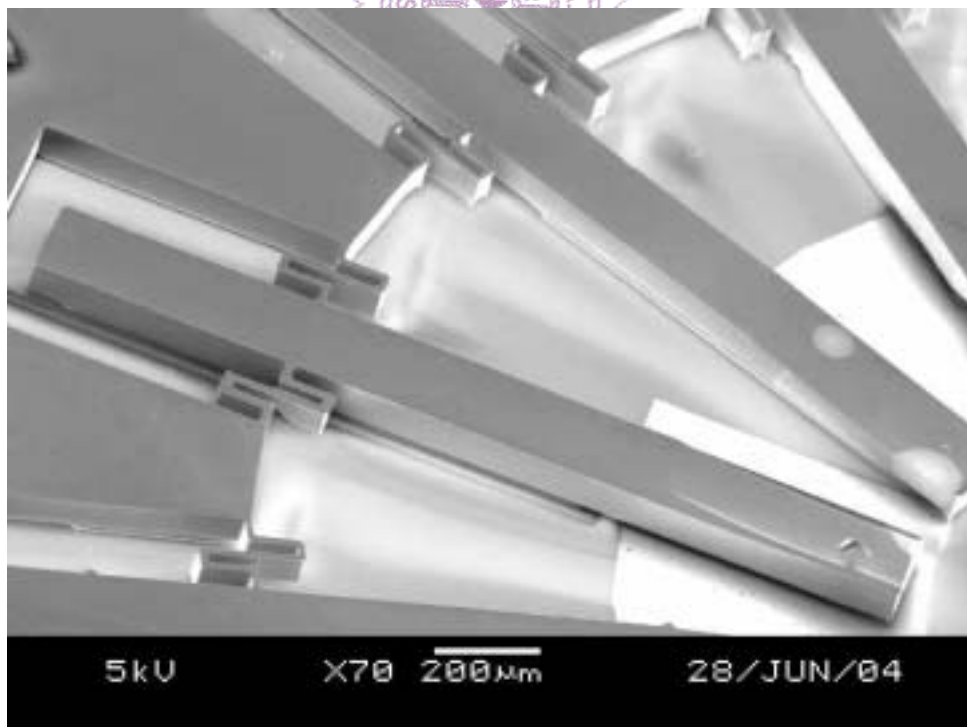


圖 3-27 環狀探針陣列結構設計 SEM 照片

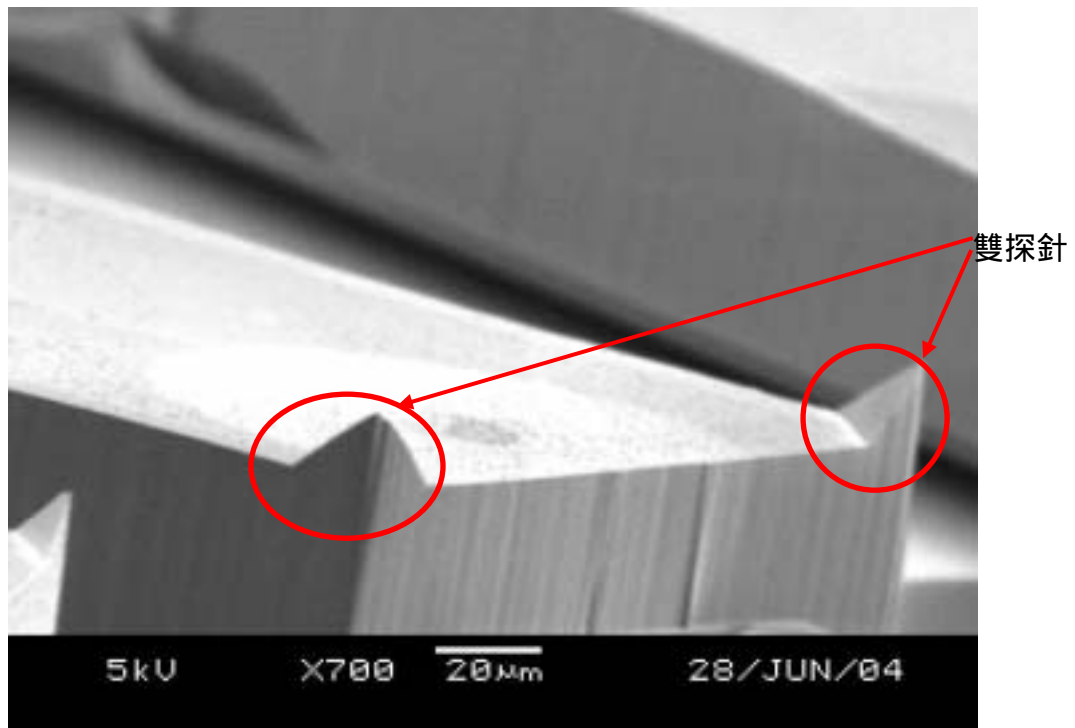


圖 3-28 雙探針型式之設計近照

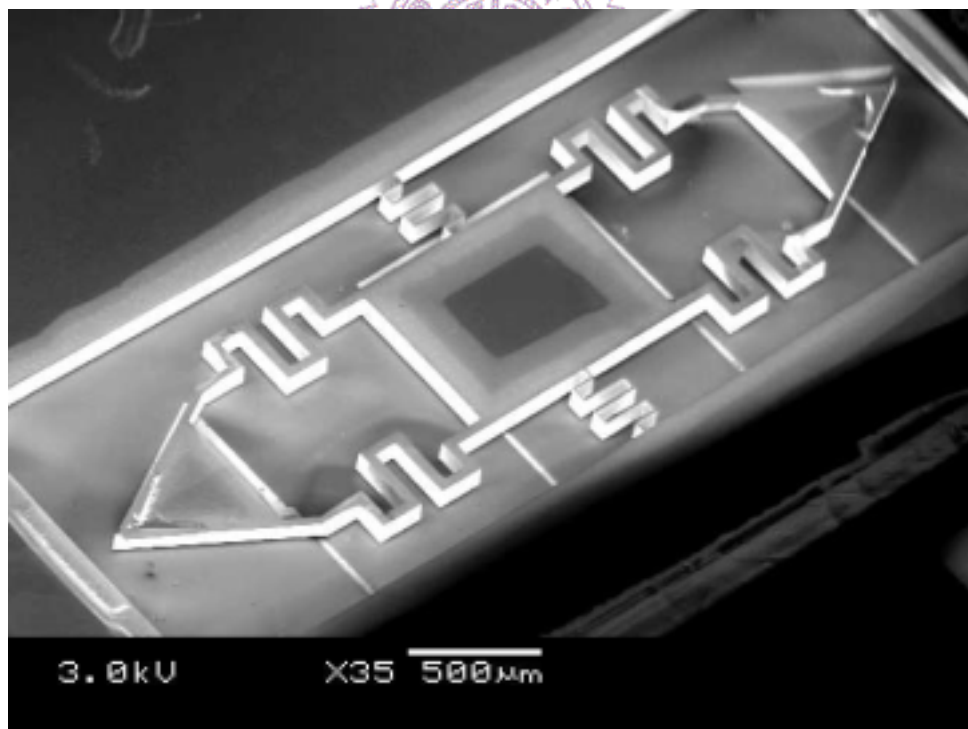


圖 3-29 另一種整合平板與彈簧設計之 SEM 照片

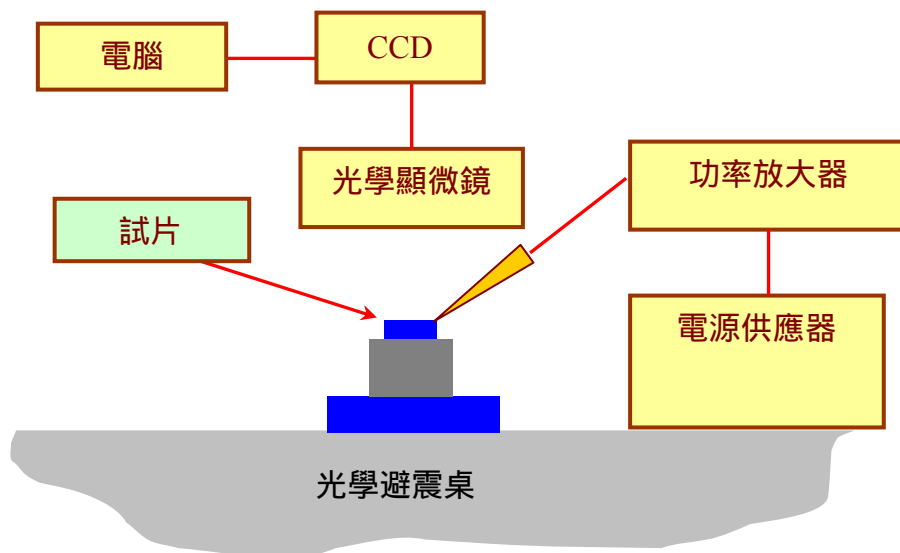


圖 3-30 靜態量測實驗架設圖

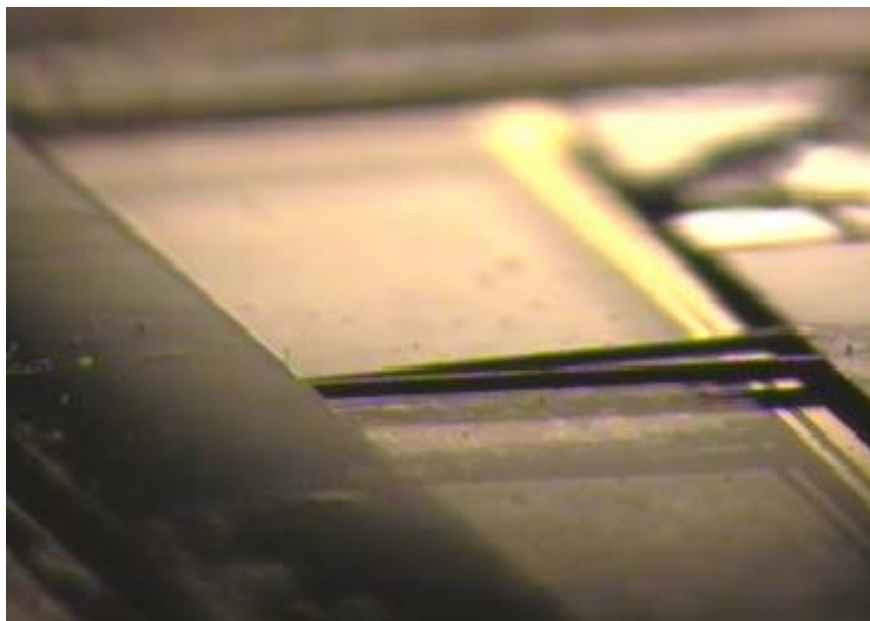


圖 3-31 利用 CCD 觀測元件於靜態測試下之照片

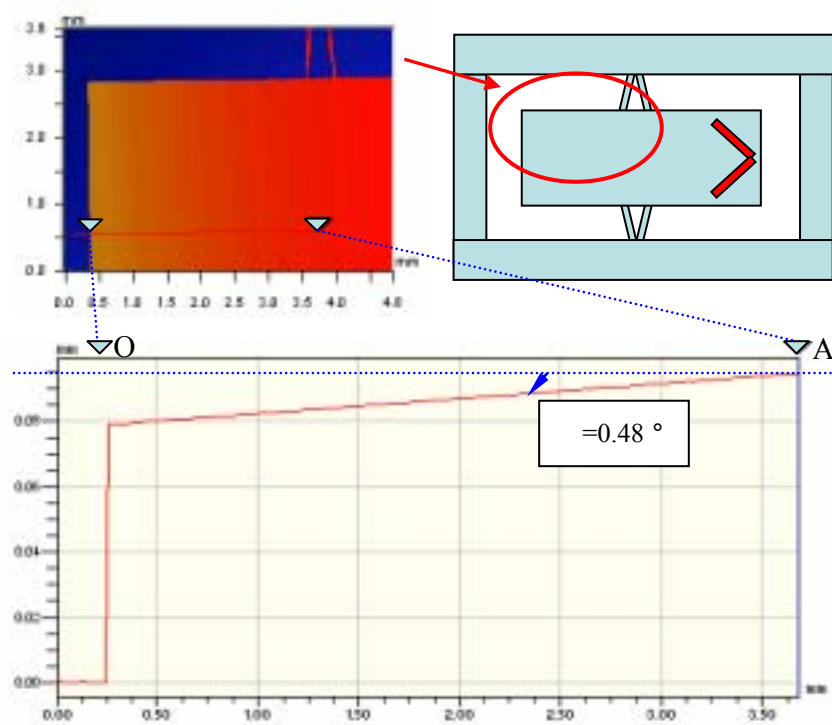


圖 3-32 靜態驅動下三次元表面干涉儀之位移量

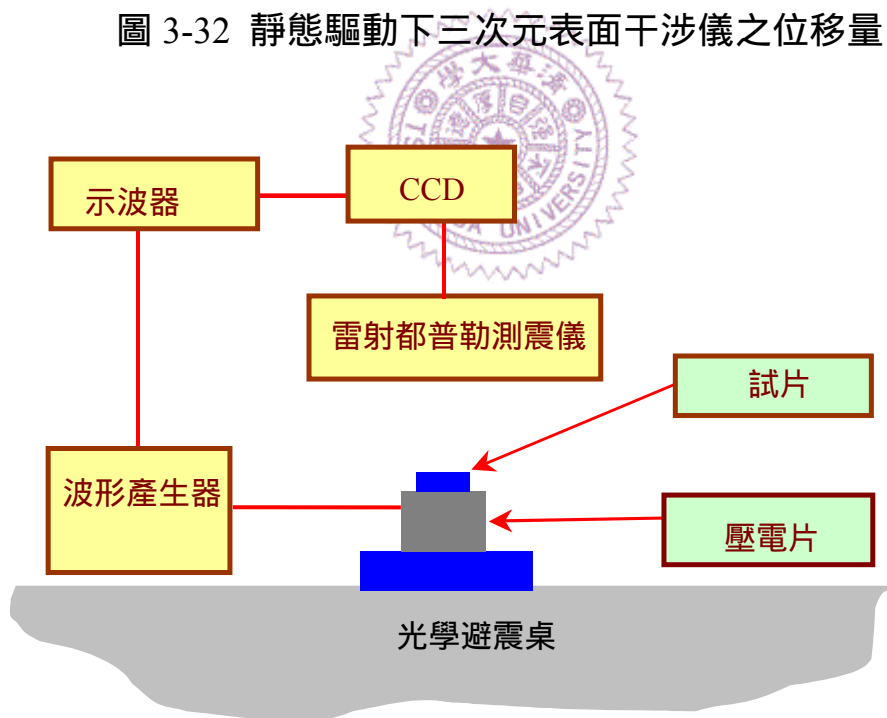


圖 3-33 以壓電片作為激振源之量測架設圖

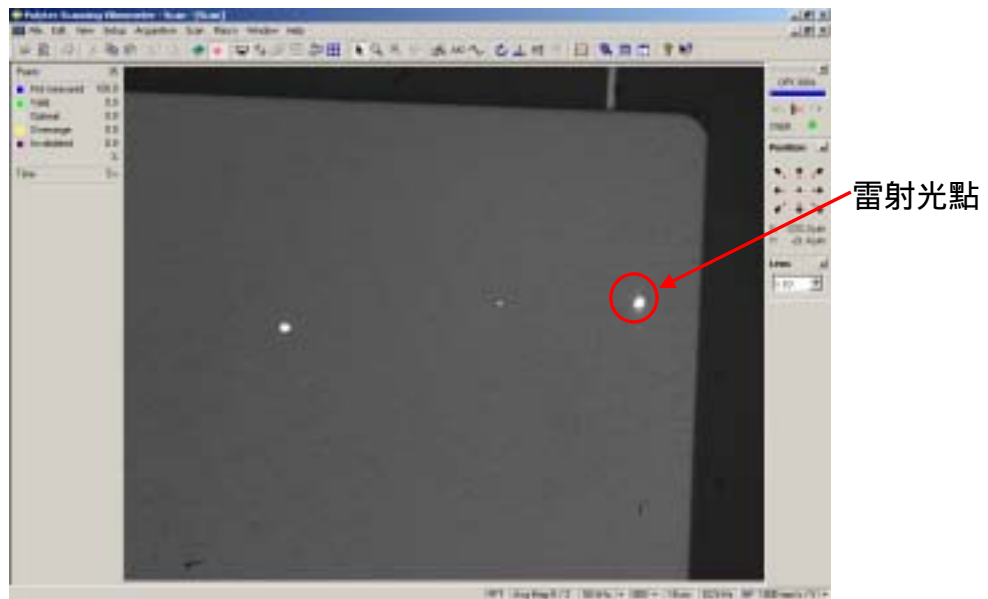


圖 3-34 大型運動平板動態量測元件之照片

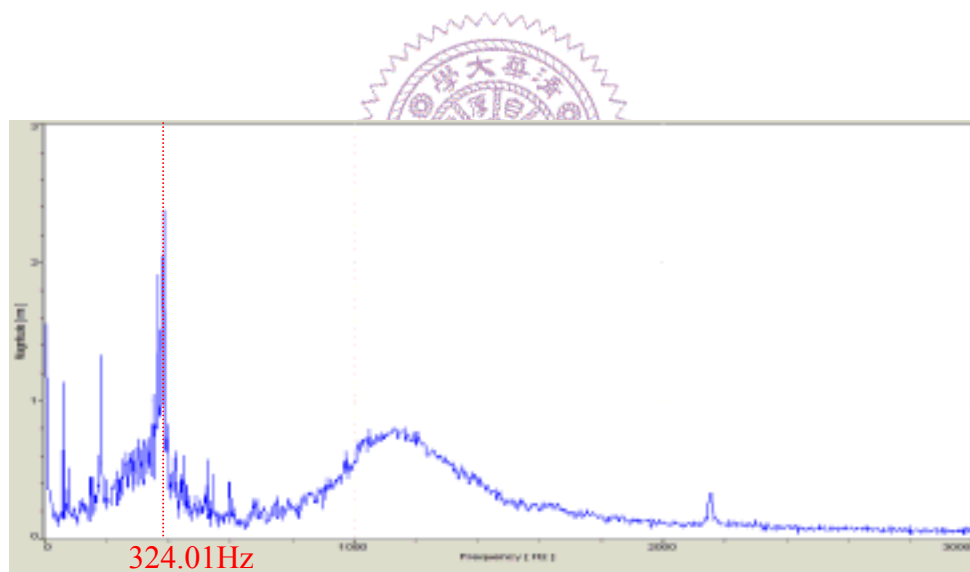


圖 3-35 動態掃描頻率獲得之頻譜響應

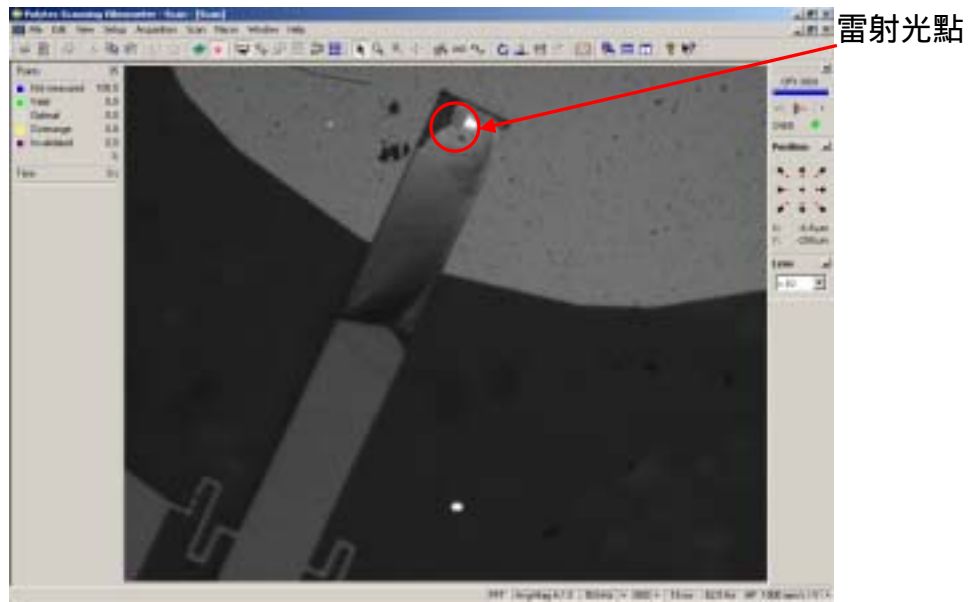


圖 3-36 細長型運動平板動態量測元件之照片

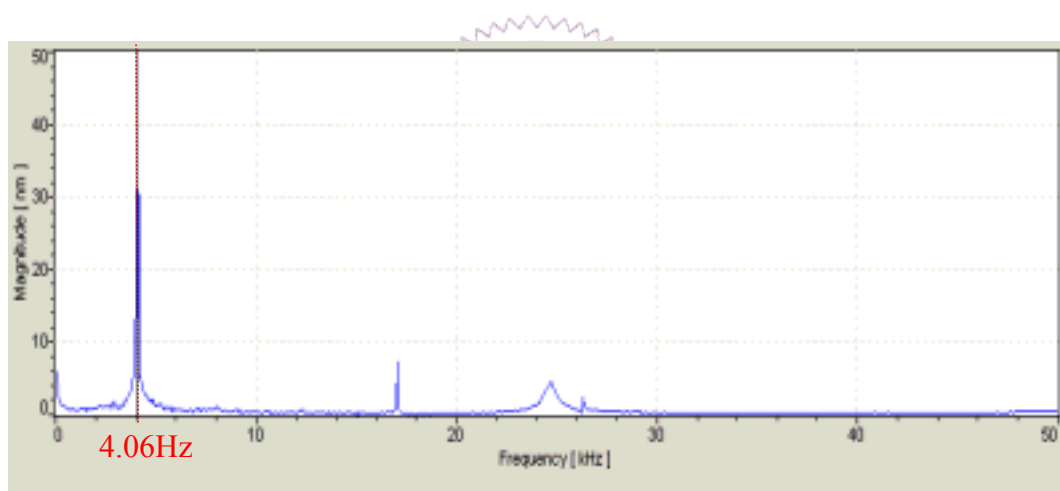


圖 3-37 動態掃描頻率獲得之頻譜響應

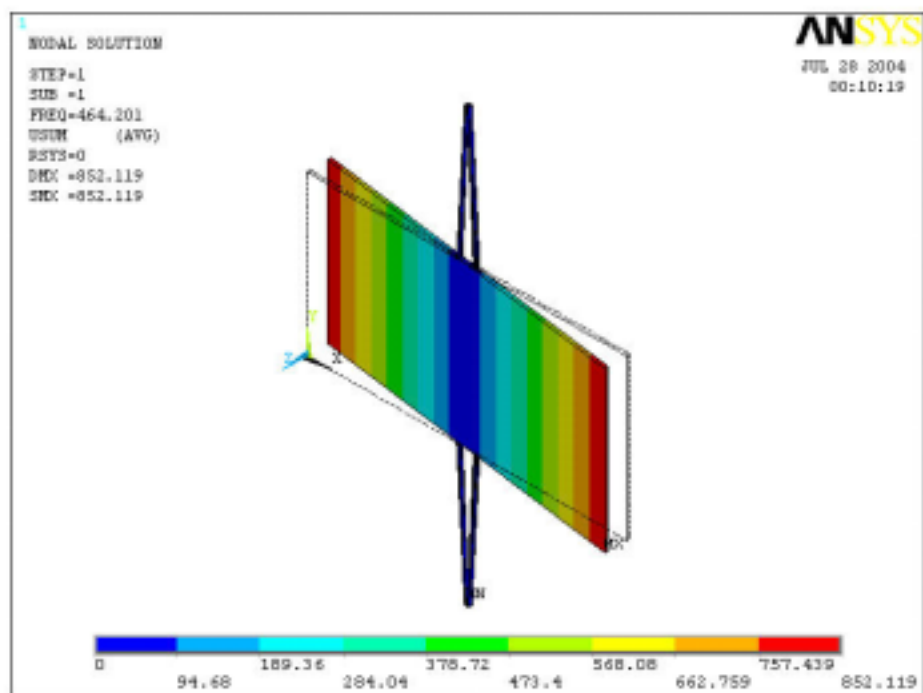


圖 3-38 ANSYS 模態分析模擬圖

