

第一章 緒論

1.1 研究動機

微機電系統(Micro-Electro-Mechanical System；MEMS)泛指體積或動作範圍在微米等級的元件或系統。微機電系統利用與半導體相容製程來製作微機械元件與微結構。如微壓力計(Pressure Micro Sensor)、微馬達(Micro Motor)、微開關(Micro Switch)等，在製作過程中無論結構層或犧牲層通常會使用濺鍍、化學氣相沉積、電鍍等方式將薄膜材料鍍在基材上形成多層薄膜結構，之後再進行結構釋放製程來完成微機械元件與微結構的製作。微機電系統無論在作動或是承受外力負荷時都必須達成我們所設定的功能，在設計之初必須針對薄膜材料的機械特性(Mechanical Properties)進行掌握，下述例子說明了機械特性對微機電系統製造技術的影響。

以靜電力驅動的微開關(Micro Switch) [1]為例，如圖1.1所示，閘極(Gate)位於鎳微懸臂樑的正下方形成一電容，閘極通電時靜電力驅動鎳微懸臂樑向下撓曲進而連結源極和汲極而導通電路，此結構中使鎳微懸臂樑向下撓曲的閘極通電電壓和鎳微懸臂樑的楊氏係數成正比關係。

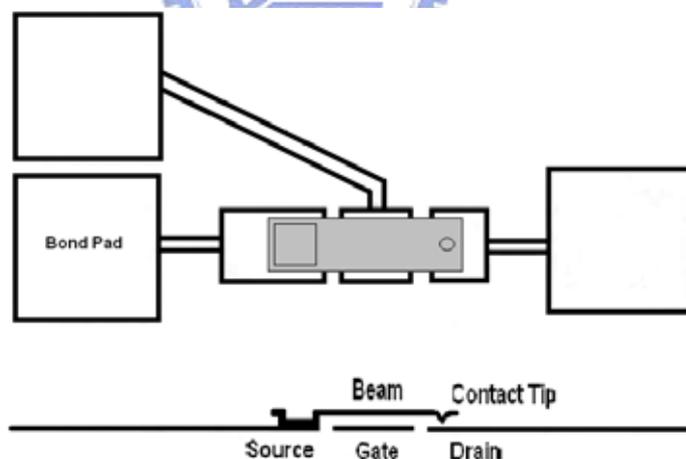


圖 1.1 靜電力驅動微開關結構示意圖[1]。

以電熱驅動的射頻微開關(RF Micro Switch)[2]為例，微開關示意圖如圖1.2所示，利用薄膜材料的熱膨脹現象來製作 MEMS 微機械元件，微開關通電後產生熱膨脹向前驅動進而連接 RF in 及 RF out 兩端，元件斷電則熱膨脹現象消失，微開關回歸原點。微開關通電後產生熱膨脹向前驅動的位移量和薄膜材料的熱膨脹係數成正比關係，在設計射頻微開關時，若能事先測出薄膜材料的熱膨脹係數配合上有限元素分析模擬，必能收事半功倍之效。

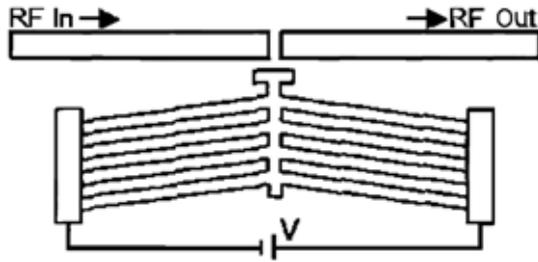


圖 1.2 電熱驅動射頻微開關結構示意圖[2]。

就製程的角度來看，薄膜材料的機械特性受薄膜沉積製程參數的影響相當的大，例如電漿輔助化學氣相沉積氮化矽(PECVD SiN)薄膜[3]，此薄膜材料的機械特性(楊氏係數)受到成膜溫度的影響而呈現出不同的機械特性。如圖 1.3 所示。此外，電鍍製程參數也會影響薄膜材料的機械特性[4]，鎳電鍍製程參數中的平均電流密度(Mean Current Density)對薄膜材料的楊氏係數、硬度產生影響，如圖 1.4、1.5、1.6 所示。低平均電流密度所鍍出的鎳電鍍薄膜其機械特性(硬度、楊氏係數)均高於高平均電流密度所鍍出的鎳電鍍薄膜，在可移動的微機電結構的設計上，因考量其耐磨耗性，低平均電流密度所鍍出的鎳電鍍薄膜硬度高、楊氏係數高應是較佳的選擇。

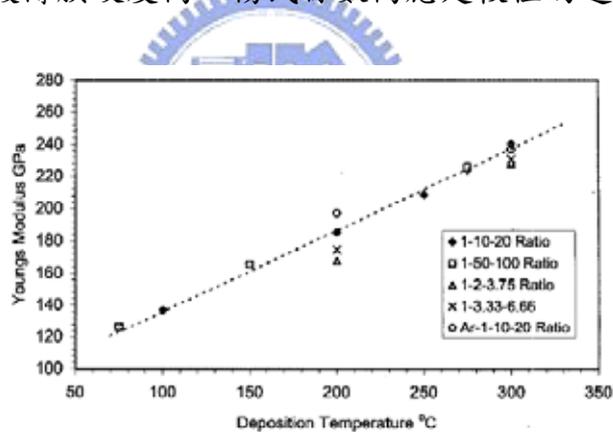


圖 1.3 氮化矽薄膜楊氏係數受成膜溫度影響[3]。

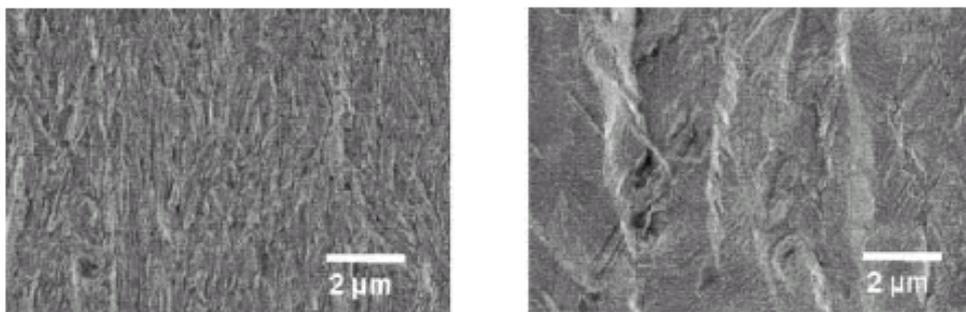
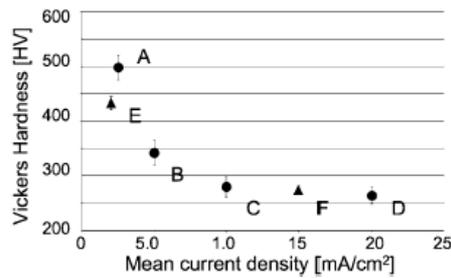
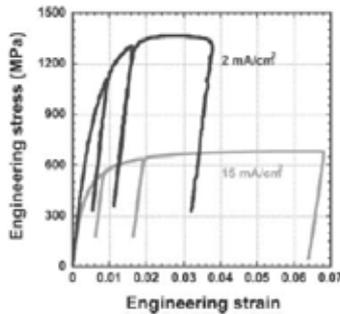


圖 1.4 平均電流密度為 2 mA/cm^2 (左圖)及 15 mA/cm^2 (右圖)的掃描式電子顯微鏡 (SEM)剖面影像(厚度同為 $140 \mu\text{m}$) [4]。



Sample	d [μm]	j [mA/cm^2]
A	15	2.5
B	15	5.0
C	15	10.0
D	15	20.0
E	140	2.0
F	140	15.0

圖 1.5 電流密度對硬度產生影響。右表為試片電鍍條件， d 為鍍層厚度， j 為平均電流[4]。



Sample	E	F
	2.0 mA/cm^2	15.0 mA/cm^2
Indentation hardness (Vickers)	433 HV0.5	274 HV0.5
Yield strength (MPa)	995	450
Ultimate tensile strength (MPa)	1385	670
Young's modulus (GPa)	204 ± 4	171 ± 4

圖 1.6 試片 E、F 的“應力-應變圖”，右表為機械特性測試資料[4]。

微機電系統結構層材料或犧牲層材料通常都使用濺鍍、化學氣相沉積、電鍍等方式來製作，而這些成膜方式所製作出的薄膜，其微結構形態為粒狀(Granular)或為多孔狀(Porous)，和塊材(Bulk Material)有所不同，由上述論文可知，因結晶平面方向的(Orientations of Crystallographic Planes)不同、微結構形態(Morphology of The Microstructure)的不同，使得薄膜材料的機械特性和塊材是不同的。

上述例子說明了機械特性中楊氏係數(Young's modulus)及熱膨脹係數(Coefficient of Thermal Expansion)對微機電系統的影響。由此可知在進行微機電的設計步驟之時，能夠事先知道各項薄膜材料的機械特性有助於縮短設計時間及增加設計精確性，可大幅減少重新設計、修正、試產及測試的時間，有效降低製作成本。

鎳金屬層電鍍泛見於各類型微機電系統製程中，其電鍍製程可利用各種不同型式的電鍍系統來完成，一般的論文中可見對電鍍操作參數進行簡略的探討，但未見其深究電鍍操作參數對機械特性的影響，為針對此問題進行研究，擬透過鎳電鍍實驗，研究電鍍操作參數（電流密度）對鎳電鍍層機械特性（楊氏係數、硬度及熱膨脹係數）的影響，找出電鍍操作參數（電流密度）和鎳電鍍層機械特性（楊氏係數、硬度及熱膨脹係數）的關係並建立鎳電鍍製程操作參數與機械特性資料庫。

1.2 相關研究

以下為電鍍薄膜材料製程(電鍍薄膜微結構形態、電鍍薄膜製程參數影響)及薄膜材料機械特性量測技術(薄膜材料楊氏係數/硬度量測技術、薄膜材料熱膨脹係數量測技術)相關研究論文整理。

1.2.1 電鍍薄膜材料製程相關文獻

1.電鍍薄膜微結構形態相關研究

電鍍層結晶晶粒尺寸的大小由電鍍時結晶核的發生速度以及結晶生長速度的相對關係來決定[5]。若晶核的發生速度大，而結晶的生長速度慢，則結晶緻密且微細。鍍層的結晶生長，一般與電流的方向一致，沿著電鍍面的垂直方向生長，隨著鍍層的生長，具有較困難的結晶面的結晶將逐漸減少，則鍍層結晶會成纖維狀、柱狀生長，鍍層若形成纖維組織，其機械性質和一般金屬塊材有顯著的不同。再者，鍍層愈厚，結晶粗大且表面粗糙。電鍍薄膜與普通的塊材金屬比較，其結晶方位不同且為多結晶方式，其晶粒尺寸很細小。

2.電鍍薄膜製程參數影響相關研究

Fritz研究電鍍鎳薄膜材料特性[4]，發現受電鍍操作參數平均電流密度所影響，在不同的電鍍平均電流密度操作參數下會產生不同的結晶組織，進而有不同的機械特性，如圖 1.4、1.5、1.6 所示，在低平均電流密度(2 mA/cm^2)的電鍍操作參數下，結晶組織的晶粒尺寸小，薄膜材料特性為脆性、高楊氏係數、高強度和高硬度。在高平均電流密度(15 mA/cm^2)的電鍍操作參數下，結晶組織的晶粒尺寸大，薄膜材料特性為延性、低楊氏係數、低強度和低硬度。

1.2.2 薄膜材料機械特性量測技術相關文獻

薄膜材料機械特性量測技術將分成楊氏係數/硬度量測技術及熱膨脹係數量測技術兩部分來討論。

1.薄膜材料楊氏係數量測技術相關研究

歸納薄膜材料楊氏係數量測技術，量測方法可分成結構振動法、薄膜膨脹法、突衝壓電法、微拉伸法及微壓痕器量測法。

(1).結構振動法：

1979 年 Petersen 與 Guarnieri 製作一微懸臂樑[6]，使其受靜電力驅動而產生撓曲變形，經由量測該懸臂樑的機械共振頻率進而推算出薄膜材料的楊氏係數。該楊氏係數量測機制如圖 1.7 所示，由一可變頻率的靜電力來驅動懸臂樑產生撓曲變形，氦氖雷射(He-Ne Laser)光源射至產生撓曲變形的懸臂樑上，另有光強度偵測器接收從懸臂樑反射的氦氖雷射光。可變頻率靜電驅動配合上偵測器接收雷射光強度的變化再配合微懸臂樑幾何尺

寸可推算出懸臂梁薄膜材料楊氏係數。該論文中以此法量測楊氏係數之薄膜材料有 SiO_2 、 Si_3N_4 、 Nb_2O_5 及 $\alpha\text{-SiC}$ 等材料。

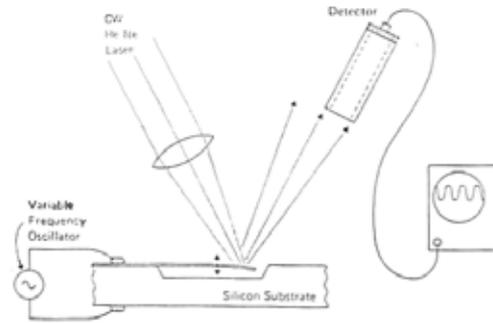


圖 1.7 Petersen 與 Guarnieri 楊氏係數量測機制示意圖[6]。

1991 年Zhang等人以單晶矽為材料製成微共振器(微橋式樑)[7]，如圖 1.8 所示，為了得到更大的振動幅度，將微共振器(微橋式樑)置於一真空反應室內，以雷射二極體光源為驅動力，同樣使用光學系統量測出該微共振器(微橋式樑)的共振頻率進而推算薄膜材料的楊氏係數，如圖 1.9 所示，推算出單晶矽的楊氏係數為 1.31×10^{11} Pa，相當接近於純矽的楊氏係數 1.30×10^{11} Pa。

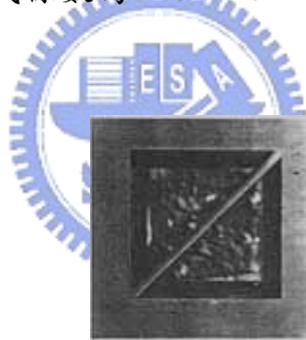


圖 1.8 Zhang 以單晶矽為材料所製成的微共振器(微橋式樑) [7]。

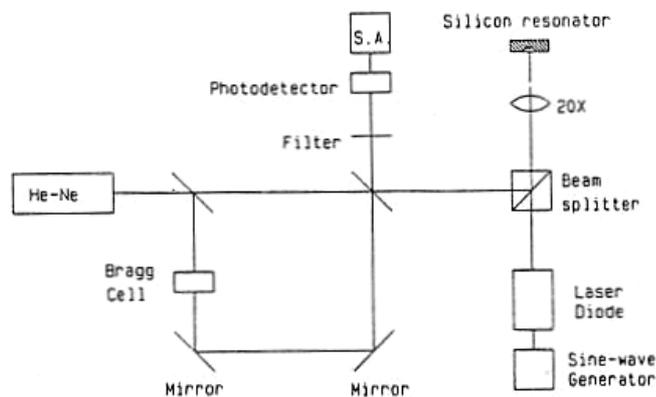


圖 1.9 雷射光源為驅動力，光學系統量測微共振器的共振頻率[7]。

1992年Kiesewetter等人以Silicon Rich LPCVD Si_xN_y 為材料製成微懸臂樑[8]，分別以熱(雷射光)、音波(揚聲器)及機械(壓電材料)等方式來驅動微懸臂樑，如圖 1.10 所示，此 3 種驅動方式皆以光學系統量測出微懸臂樑的共振頻率進而推算LPCVD Si_xN_y 薄膜材料的楊氏係數，如圖 1.11 所示，三種不同的驅動方式所測量出的楊氏係數分別為 99GPa、99GPa及 97GPa。

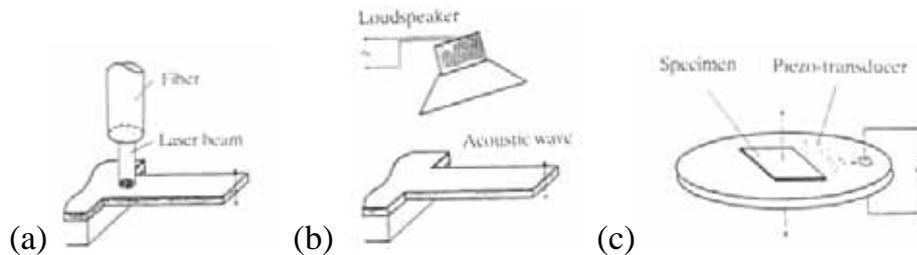


圖 1.10 不同的驅動方式：(a).熱(雷射光)、(b).音波(揚聲器)及(c).機械(壓電材料)[8]。

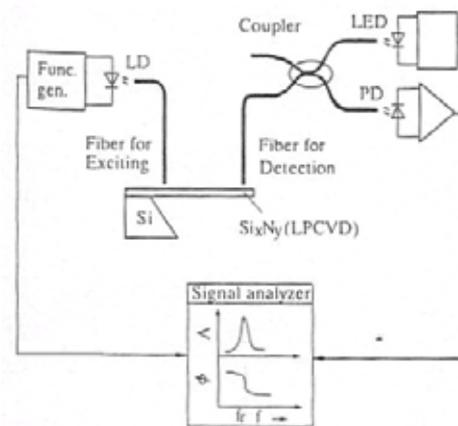


圖 1.11 以光學系統量測出微懸臂樑共振頻率[8]。

結構振動法的驅動方式有多種(靜電力、熱(雷射光)、音波(揚聲器)及機械(壓電材料))，但都使用光學系統量測出目標物共振頻率，配合已知幾何尺寸推算薄膜材料楊氏係數，量測目標為微懸臂樑或微橋式樑，此法必須特別製作試片，製作流程複雜度不高且可整合於微機電製程中，熱(雷射光)、音波(揚聲器)驅動方式的可整合性高，但將機械(壓電材料)或靜電力驅動方式整合於微機電製程中，則使得問題複雜化了。

(2). 薄膜膨脹法：

1992年 Vlassak 和 Nix 提出以薄膜膨脹法[9]來測試薄膜材料楊氏係數，試片先將氮化矽薄膜沉積於矽晶片上，薄膜沉積完畢後再進行矽晶片晶背蝕刻製程將氮化矽薄膜製成鼓膜形式，之後將此試片以黏膠安裝於測試設備上，設備中有以水為介質的加壓系統對此薄膜鼓膜施加壓力，薄膜

鼓膜受壓力影響後會產生凸起變形，如圖 1.12 所示，設備裝有雷射干涉儀可量測出薄膜鼓膜膨脹凸起變形量，如圖 1.13 所示，在已知薄膜鼓膜尺寸及預設浦松比條件下，可計算出薄膜材料的楊氏係數，該論文測試出以低壓化學氣相沉積氮化矽薄膜的楊氏係數為 219~225 GPa，該論文同時另以微壓痕器進行測試，測試出之楊氏係數為 206~226 GPa。

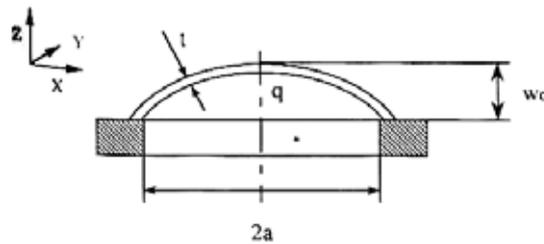


圖 1.12 對氮化矽薄膜鼓膜加壓後產生凸起變形[9]。

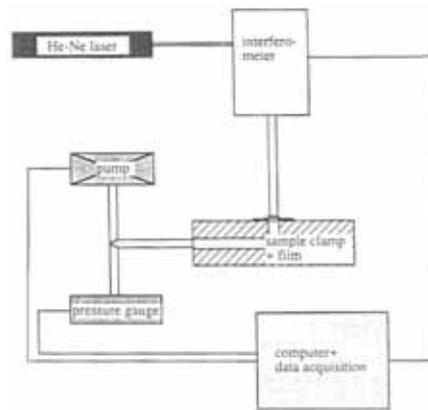


圖 1.13 測試設備示意圖，雷射干涉儀量測鼓膜凸起變形量[9]。

膨脹測試法優點為設備裝有雷射干涉儀可精密量測出凸起變形量，缺點為試片製作過程中的晶背蝕刻製程和試片切割步驟使得整合性大幅地降低。此法須先知道薄膜材料的浦松比，若假設不知其浦松比，則必須分別針對正方形和長寬比大的長方形薄膜鼓膜進行量測來得到薄膜材料的浦松比，進而推算出楊氏係數。

(3).突衝壓電法:

1989 年Najafi及Suzuki [10]建構一微橋式樑，如圖 1.14 所示，在樑中間及基材對應位置上設置一電容結構，利用電容通電加壓產生靜電力使微橋式樑受力而向下產生撓曲，樑的撓曲變形量和電容通電電壓呈正比關係。通電電壓到達一極限值 V_{PI} 時，樑會產生崩潰現象且電容的電容值會突然大幅上昇，此一現象稱為突衝效應(Pull-In)，如圖 1.15 所示，而此一極限電壓值 V_{PI} 也被稱為突衝電壓，在已知微橋式樑幾何尺寸的情形下，對電容通電測試出的電壓極限值 V_{PI} 可供推算薄膜材料的楊氏係數，論文中對摻雜硼的矽薄膜微橋式樑進行測試，測出楊氏係數為 220 GPa。

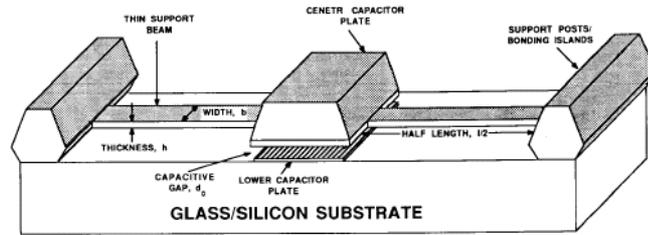


圖 1.14 在微橋式樑中間部份設置電容，供突衝壓電法測試使用[10]。

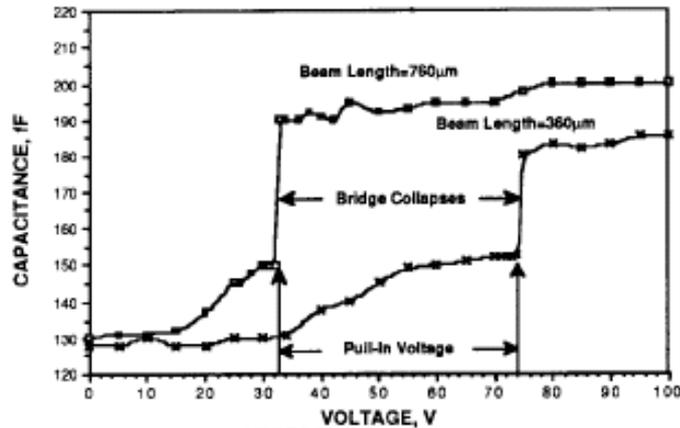


圖1.15 突衝壓電法測試的“電壓-電容圖” [10]。

1995年Zou等人[11]也是引用上述Najafi及Suzuki論文中突衝效應來量測薄膜材料的楊氏係數。1997年Osterberg與Senturia提出M-test量測方法[12]，該法引用上述Najafi及Suzuki論文中突衝壓電法來量測薄膜材料的楊氏係數，突衝壓電法的極限電壓值 V_{PI} 的大小和微結構的幾何尺寸及材料特性有關，也就是說在已知微結構幾何尺寸的前提下，只要量測出微結構的極限電壓值 V_{PI} 即可推算出薄膜材料的殘餘應力及楊氏係數。

此方法的優點為不需複雜且昂貴的測試設備只須在測試過程中求出“電壓-電容圖”即可求出極限電壓值 V_{PI} ，求出 V_{PI} 即可推算薄膜材料的楊氏係數，此法之缺點為只適用於導體薄膜材料，若要測試非導體薄膜材料則必須加鍍一層導體薄膜材料。

(4).微拉伸法:

此法沿用傳統的材料拉伸實驗原理，對薄膜材料所製成的微試片進行微拉伸實驗取得“應力-應變圖”(Stress-Strain Diagram)，即可求出薄膜材料楊氏係數，微拉伸實驗試片尺寸大小約為毫米(mm)等級到微米(μm)等級，利用微機電製程來進行試片製作，試片製作完畢即置於特殊設計的微拉伸試驗機上，對試片施加拉應力並同時量測試片之應變量，取得“應力-應變圖”後即完成微拉伸實驗。此法之優點為沿用傳統的方式，從“應力-應變圖”中即可計算出試片之楊氏係數，理論原理完備，其缺點為需特殊微拉伸試驗設備、試片製作不易且未必完全能整合於微機電製程中，另在

Hirasawa 等人的論文[13]中特別指出針對試片製作過程中必須將試片進行蝕刻製程將欲測試之薄膜材料獨立來，此一蝕刻動作會對薄膜材料造成影響，使得之後的微拉伸實驗量測出的楊氏係數有所誤差。

1997年 Shapre 等人[14]使用微拉伸試驗機來進行低壓化學氣相沉積多晶矽薄膜材料楊氏係數的量測，使用的微拉伸實驗器是以壓電材料對試片施加拉應力，如圖 1.16 所示，配合鍍在多晶矽試片上的黃金線可使用電射干涉儀來量測試片應變，如圖 1.17、圖 1.18 及圖 1.19 所示，經實驗得到“應力-應變圖”，如圖 1.20 所示，論文測得的楊氏係數為 169 ± 6.15 GPa。

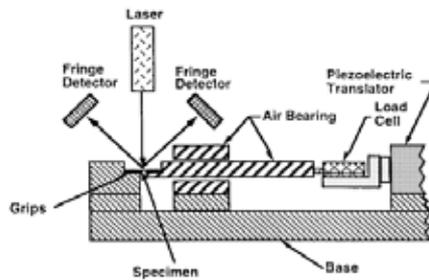


圖 1.16 微拉伸試驗機示意圖[14]。

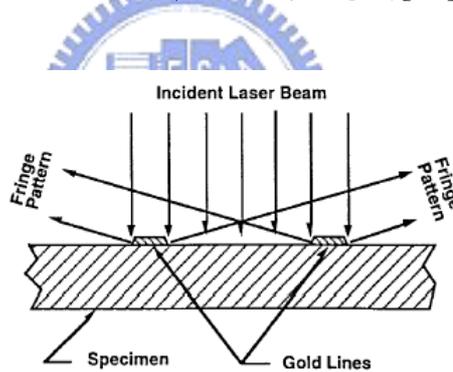


圖 1.17 電射干涉儀量測試片上黃金線距離的變化來求出應變[14]。

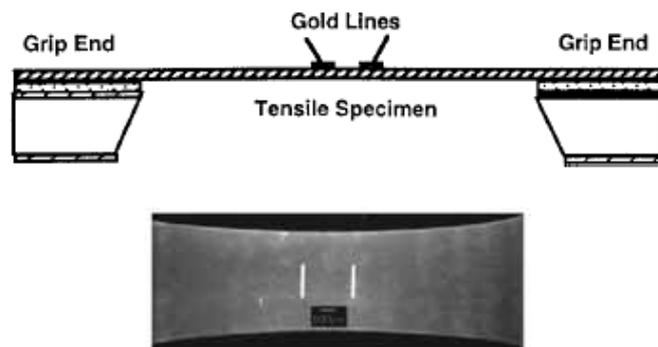


圖 1.18 微拉伸實驗試片上黃金線的位置[14]。



圖 1.19 左圖為微拉伸實驗試片掃描式電子顯微鏡(SEM)影像圖，右圖為試片尺寸圖[14]。

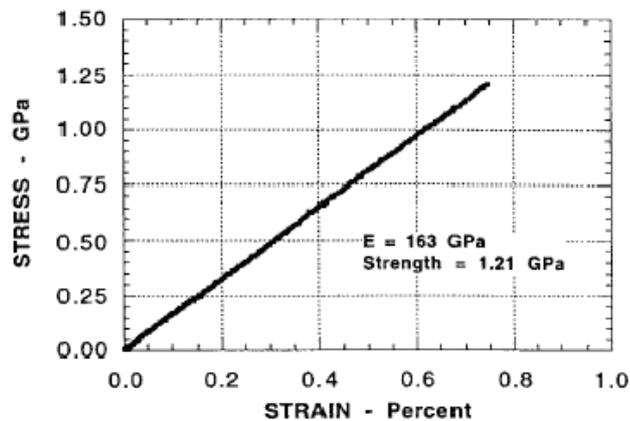


圖 1.20 多晶矽試片經微拉伸實驗得到的“應力-應變圖” [14]。

1999年 Hirasawa 等人[13]利用微拉伸試驗機來進行薄膜材料楊氏係數的量測，一般微拉伸試驗試片製程為了將薄膜材料獨立起來，必須對試片進行蝕刻製程，此一動作會對薄膜材料造成影響造成量測誤差，如上述論文 Shapre 使用的試片即是使用此種製程，為排除試片因蝕刻製程所引起的誤差問題，在試片的製作上特別先製作單晶矽試片基座，如圖 1.21 所示，待試片基座完成後才將欲量測楊氏係數的薄膜材料鍍上，如圖 1.22 所示，再以微拉伸試驗機分別對試片基座及鍍有薄膜的試片基座進行測試，最後再將量測值進行計算即可得欲量測薄膜的楊氏係數，文中測得的基座楊氏係數為 129.7 GPa，鍍有薄膜的試片基座楊氏係數為 132.7GPa，推算出濺鍍在試片基座上鎢薄膜材料楊氏係數為 246 GPa，比起塊材鎢的楊氏係數 352 GPa 少了約 30%。另論文也針對濺鍍鎢薄膜材料在不同厚度的情形下其晶粒尺寸和表面粗糙度的關係進行研究，其結果顯示隨著厚度的增加，其晶粒尺寸和表面粗糙度也跟著增加，在論文中濺鍍鎢的 AFM 表面影像也顯示出其晶粒間的孔隙，如圖 1.23 所示，此點也說明了濺鍍鎢的楊氏係數為何比起鎢塊材的楊氏係數 352 GPa 少了約 30%。

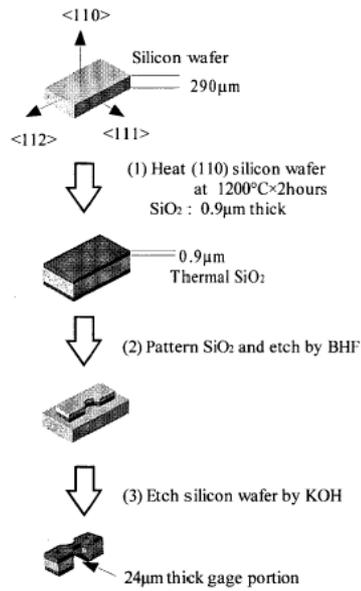


圖 1.21 單晶矽試片基座製作流程[13]。

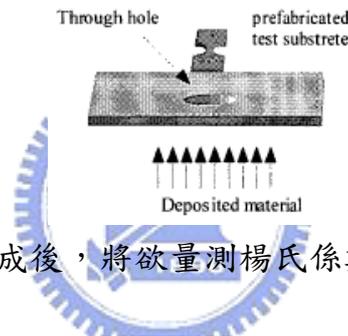


圖 1.22 試片基座完成後，將欲量測楊氏係數的薄膜材料鍍上[13]。

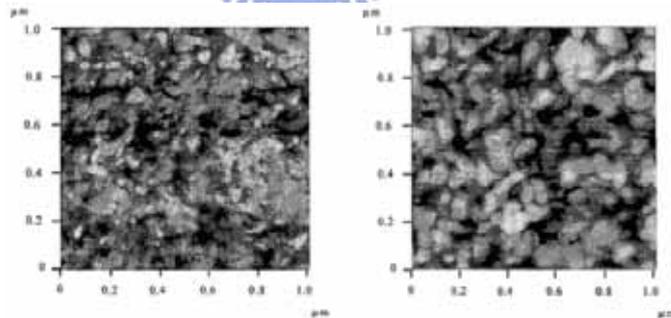


圖 1.23 濺鍍鎢薄膜原子力顯微鏡(AFM)影像，顯示出晶粒間的孔隙，左圖為厚度 0.3 μm，右圖為厚度 0.6 μm[13]。

1998 年 Tsuchiya 等人[15] 利用 SEM 設備加裝探針感測系統，利用探針當成微拉伸器的抓取端進行微拉伸實驗，如圖 1.24 所示，對探針和微懸臂樑施加電壓產生靜電力，使探針對微懸臂樑的自由端產生靜電吸著力，之後探針對微懸臂樑施加拉伸應力，如圖 1.25 所示，進行微拉伸實驗來求得多晶矽和磷摻雜多晶矽薄膜材料的楊氏係數，量測出的楊氏係數分別為 163 GPa 和 167 GPa。此法的優點為微拉伸試片不須切割，只需晶片上有

測試材料所製成的微懸臂樑即可直接上機進行量測，但其量測操作程序複雜度恐怕不低、另因儀器配備 SEM 裝置，設備相對昂貴且只適用於導體薄膜材料，進而限制了該法的應用範圍。

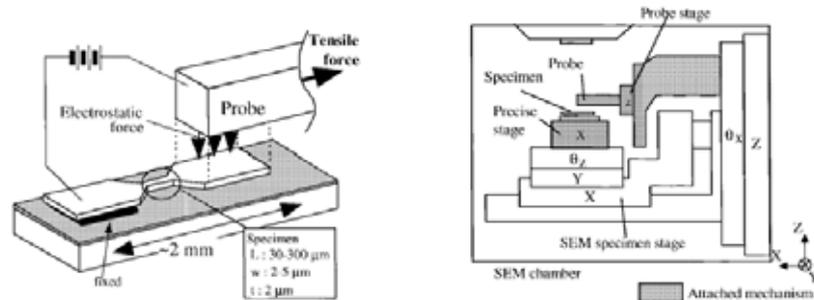


圖 1.24 利用掃瞄式電子顯微鏡(SEM)設備加裝探針，將探針當成微拉伸器的抓取端進行微拉伸實驗[15]。

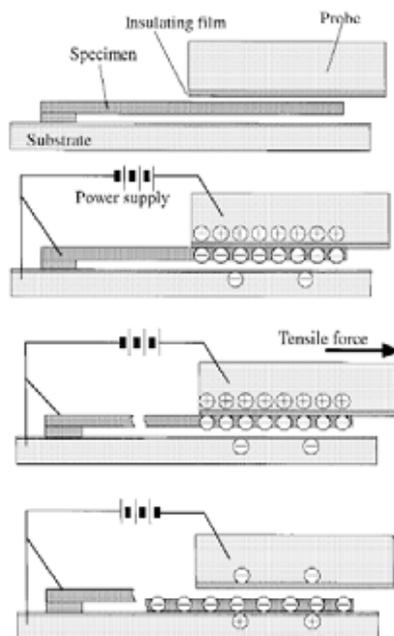


圖 1.25 對探針和微懸臂樑施加電壓產生靜電力，使探針對懸臂樑自由端產生靜電吸著力，之後探針再對微懸臂樑施加拉伸應力，進行微拉伸實驗[15]。

(5).微壓痕器量測法：

若要量測薄膜材料和微小體積材料的機械性質，微壓痕器(Nanoindenter)是適合的量測工具，如圖 1.26 所示，微壓痕實驗造成的變形很小，故可應用於薄膜材料機械性質方面的量測。微壓痕器[16]有壓痕器負荷加壓系統、壓痕深度感應系統加上圓形或錐形的微壓痕器尖端，此儀器可以量測出測試樣本的硬度和楊氏係數。微壓痕器的尖端通常由鑽石

所製成，在已知的下壓負荷下，對測試樣本進行微壓痕測試，負荷在持續一段時間後移除，在測試樣本上會留下殘留壓痕，在知道最大負荷及壓痕表面積的前提下，可推算出測試樣本的硬度。微壓痕器配備壓痕深度感測系統能在微壓痕測試過程中獲得“負荷-壓痕深度圖”(Load-Displacement Diagram)，如圖 1.27 所示，可供推測出測試樣本的硬度、楊氏係數及其他機械性質。微壓痕實驗(Nanoindentation)有廣泛的應用。因其實驗的結果可提供彈性模數(Elastic Modulus)、硬度(Hardness)、應變硬化(Strain-Hardening)、裂痕(Cracking)、相變化(Phase Transformations)、潛變(Creep)、破壞強度(Fracture Toughness)、能量吸收(Energy Absorption)等各種資訊。

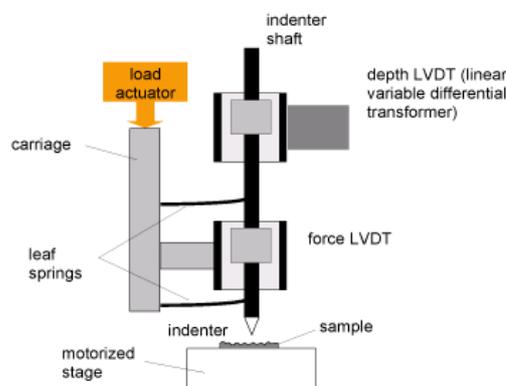


圖 1.26 微壓痕器示意圖(UMIS 型)[16]。

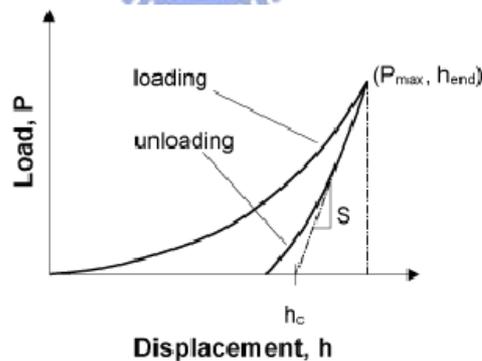


圖 1.27 微壓痕測試的“負荷-壓痕深度圖” [16]。

2000 年 Winchester 和 Dell [3] 利用微壓痕器來研究電漿輔助化學氣相沉積氮化矽薄膜(PECVD Silicon Nitride Film)的楊氏係數和成膜參數(成膜溫度和成膜製程氣體流量比例)的關係，由於微壓痕器操作的便捷性，可迅速直接地進行氮化矽薄膜楊氏係數量測工作，在成膜溫度 75°C 至 300°C 時，楊氏係數的變動範圍由 125 GPa 至 245 GPa，如圖 1.3 所示。論文中微壓痕器是使用 Berkovich 的三角錐型微壓痕器。

針對以上的薄膜材料楊氏係數量測技術，蔡欣昌在其博士論文[17]中提及上述各種薄膜材料的楊氏係數測試法可分成靜態和動態測試法二大類別，如薄膜膨脹法、突衝壓電法、微拉伸測試法及微壓痕器量測法等屬於靜態量測法，量測出的楊氏係數都是屬於靜態楊氏係數，而結構振動法則屬於動態量測法，其量測結果便屬於動態楊氏係數，同樣的鎳鐵薄膜材料分別以結構振動法(動態量測)和微壓痕器量測法(靜態量測)進行量測，測出的楊氏係數分別為 58.7 GPa 和 82.3 GPa，結果差異約 30%。因此在微機電元件尚在設計步驟時，便要考量元件使用特性來選擇適當種類的楊氏係數量測方法。

2. 薄膜材料熱膨脹係數量測技術相關研究

不同的材料有不同的熱膨脹係數(Coefficient of Thermal Expansion)，在製作微機電用薄膜材料時都會碰到熱應力問題，原因是在進行電鍍、化學氣相沉積或物理氣相沉積時，晶片和欲鍍薄膜材料在高溫沉積，待製程完畢取出後，晶片和欲鍍薄膜材料同時降至室溫，在有溫度差的情形下，晶片和欲鍍薄膜材料產生的縮小量不同，兩者間的介面將產生熱應力 σ_{Th} ，如欲鍍薄膜材料的熱膨脹係數 α_{film} 高於晶片，此薄膜承受拉伸應力(Tensile Stress)；反之欲鍍薄膜材料的熱膨脹係數 α_{film} 低於晶片，則冷卻後欲鍍薄膜材料承受是壓縮應力(Compressive Stress)。欲鍍薄膜材料和晶片因熱膨脹係數不同所產生的熱應力，熱應力計算公式如式(1.1)所示。

$$\sigma_{Th} = E_y \times \Delta t \times (\alpha_{film} - \alpha_{sub}) \quad (1.1)$$

α_{film} 與 α_{sub} 分別代表欲鍍薄膜材料和晶片的熱膨脹係數。

Δt 為製程溫度和室溫之間的溫度差； E_y 為欲鍍薄膜材料的楊氏係數。

熱應力在製作微結構時會對薄膜的外觀造成影響。在 MEMS 元件製作過程中必須注意熱應力的問題，熱應力會使得薄膜累積過多的能量而出現異常，譬如局部性或者全面性的薄膜剝離。

歸納薄膜材料熱膨脹係數的量測技術可分成二大種類，分別 X 光繞射量測法及光學量測法，以下為薄膜材料熱膨脹係數量測技術相關研究論文整理。

(1). X 光繞射法：

利用 X 光繞射(X-Ray Diffraction)設備量測受熱試片晶格常數(Lattice Constant)膨脹的變化量來求出試片材料的熱膨脹係數[18][19]，X 光繞射法只能使用於單結晶材料，無法應用於一般的多結晶材料及非結晶材料，因此限制了此法的應用範圍。

(2).光學量測法：

Fang和Tsai [20]等人發現二氧化矽微懸臂樑結構在不同的溫度環境下有不同的轉動角 θ 的現象，如圖 1.28 所示，微懸臂樑升溫後因二氧化矽和矽晶片不同的熱膨脹係數而產生轉動角 θ 的介面旋轉現象，微懸臂樑轉動角 θ 的大小和環境溫度及薄膜熱膨脹係數成正比關係，如圖 1.29、1.30 所示，使用光學干涉儀配合上溫控系統來量測微懸臂樑在不同溫度環境下轉動角 θ 大小，如圖 1.31、1.32 所示，以轉動角 θ 的變化量來推測薄膜材料的熱膨脹係數，量測出熱膨脹係數為 $0.25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，而塊材二氧化矽熱膨脹係數為 $0.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [21]或是 $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [22]。

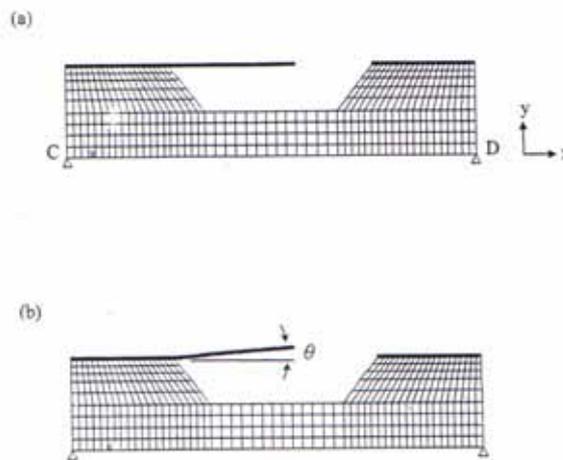


圖 1.28 微懸臂樑熱膨脹係數的有限元素分析圖(a).為升溫前(b).為升溫後， θ 為轉動角[20]。

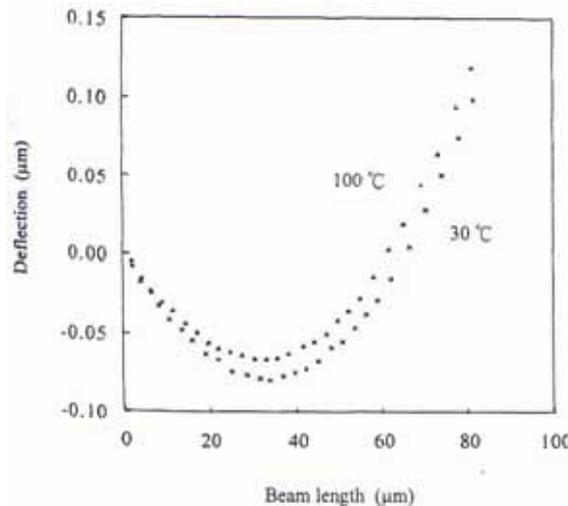


圖 1.29 微懸臂樑在不同溫度環境下的撓曲變形圖[20]。

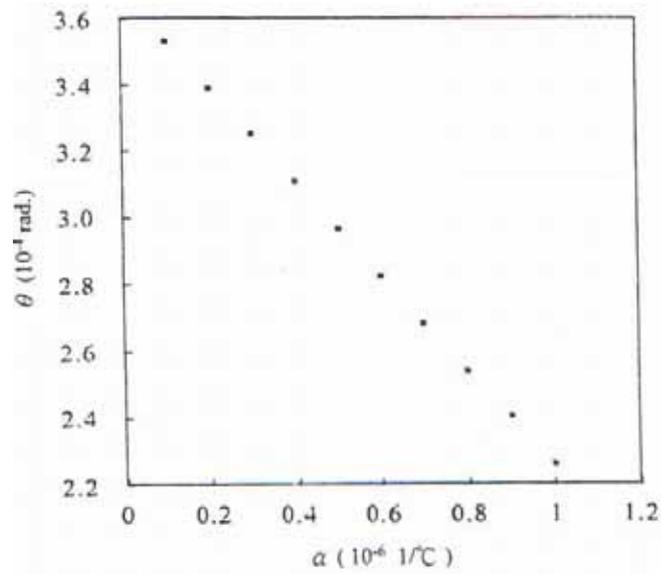


圖 1.30 薄膜材料熱膨脹係數和微懸臂樑轉動角大小的關係圖[20]。

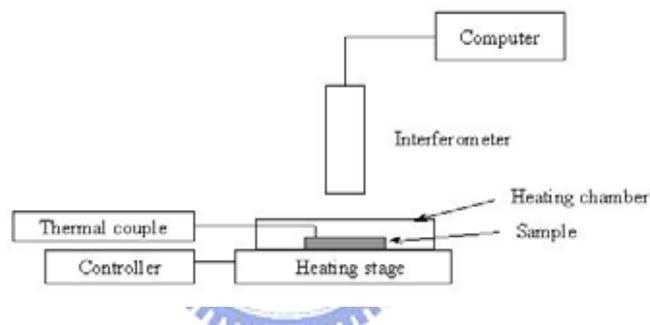


圖 1.31 光學干涉儀示意圖[20]。

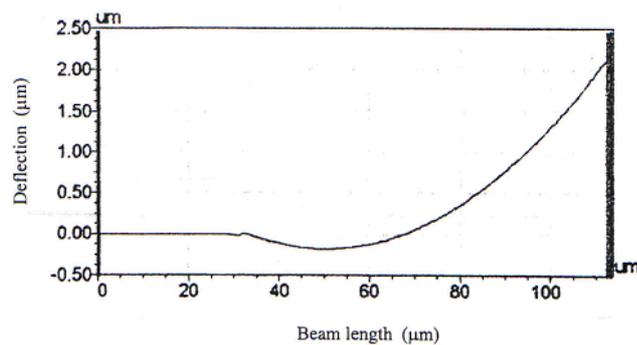


圖 1.32 利用光學干涉儀來量測微懸臂樑撓曲變形量[20]。

Pan [23]則是使用光學影像量測平臺，如圖 1.33 所示，量測磷摻雜 LPCVD 多晶矽結構在受熱後長度的變化量來推算熱膨脹係數，量測出熱膨脹係數為 $2.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。光學量測法所使用的量測設備較便宜、設備使用方便簡單、不限材料種類，量測結果準確且不論是使用 Fang 或是 Pan 的方法，

都不需製作複雜的微結構來配合量測，只需製作微懸臂樑作為測試結構即可。

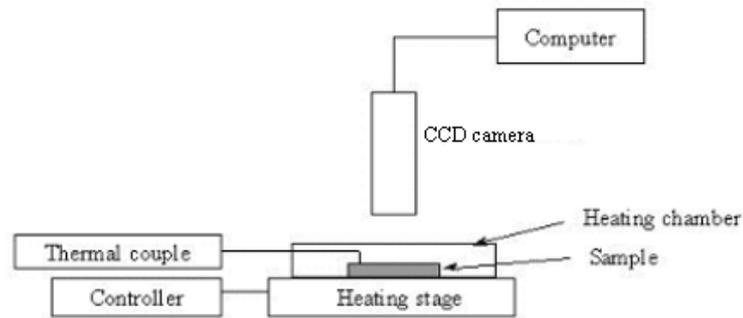


圖 1.33 光學影像量測平臺量示意圖[23]。

1.3 研究目標

本實驗擬在晶片上製作微懸臂樑，在光罩繪製完成後，配合微機電製程結合電鍍系統進行鍍金屬層的電鍍。利用微懸臂樑結構來進行薄膜材料的機械特性(楊氏係數、硬度及熱膨脹係數)量測工作。

- 1.研究電鍍薄膜材料在不同的電鍍電流密度及在不同的厚度時，其機械特性(楊氏係數、硬度及熱膨脹係數)的變化趨勢。
- 2.建立電鍍操作參數與機械特性的資料庫。