

# 新型微拉伸測試儀之開發及其於薄膜材料機械性質量測之應用

## Development of Novel Micro Tensile Testing Instruments and Application in Characterizing Thin Films Mechanical Properties

劉源棟、張佐吉、方維倫

Yung-Dong Lau, Tso-Chi Chang, Weileun Fang

對於設計與應用微機電元件，薄膜材料的機械性質是相當重要的依據，其中拉伸測試可以透過簡單的力學行為萃取薄膜材料的機械性質。筆者以國立清華大學微機電實驗室所開發之新型微拉伸測試儀為例，說明微拉伸測試儀元件設計、製造與測試的流程。同時亦提出一嶄新的概念，使用高分子材料—聚對二甲苯整合於製程之中，其優越的抗酸鹼能力，可作為保護待測材料之保護層，以避免製程中乾、濕蝕刻的攻擊，達成可多樣化待測材料的微拉伸測試儀之製程平台。透過黃光微影製程將待測材料與測試儀器整合，亦可降低組裝與對準的誤差。文中將介紹設計原理、機械結構、致動模組及感測模組等，亦針對該儀器之特性進行校正，最後利用此儀器對待測材料進行拉伸測試，量測薄膜機械性質。

The mechanical properties of thin film is very important information to design and apply MEMS devices. Tensile testing can extract the mechanical properties by simply mechanical behavior. There are even more on-going researches involving in the mechanical properties testing related fields. In the article, the authors research group in the Micro-Device Lab., National Tsing Hua University would like to introduce the design and fabrication of the tensile testing instrument. It's not easy to integrate the test specimen with the testing instrument due to etch selectivity. This research will provide a brand-new concept, using parylene passivation technique to protect the test specimen during etching processes. Parylene is a very inert chemically to the various etching test. The parylene passivation technique allows the user to change the test sample easily using the same fabrication process. Furthermore, the problems and difficulties resulting from the alignment and assembly of a thin film test specimen with the testing instrument can be prevented. The MEMS instrument consists of a thermal actuator, differential capacitance sensor, and supporting spring. Moreover, the load and displacement relationship can be calibrated by commercial instruments. In application, this study can be determining the mechanical properties.

## 一、前言

微機電系統 (microelectromechanical system, MEMS) 技術是結合半導體製程及其他微機械加工 (micromachining) 的製造技術，其可製造與整合各式光、機、電等元件於晶片上。在目前的微機械加工技術中，薄膜 (thin films) 是一種應用相當廣泛的機械結構，其應用範圍包括超大型積體電路 (VLSI)、微感測器 (micro sensor)、微致動器 (micro actuator)、薄膜電晶體液晶顯示器 (TFT-LCD)、微機光電元件 (MEMOS)，以及目前熱門的 CMOS-MEMS 等領域。一般而言，薄膜與塊材 (bulk materials) 的物理性質通常是不一樣的。由於薄膜的面積與厚度的比例遠比塊材大，因此表面效應 (surface effect) 與介面效應 (interface effect) 在薄膜上所扮演的角色遠比塊材重要。例如不同材料的接合會因為熱膨脹係數 (CTE) 的差異而產生殘留應力 (residual stress)，導致結構因為預應力而產生形變、裂縫及脫層等。微小尺寸會因為晶粒尺寸、晶粒外形、結晶組織缺陷與分布不同等因素而影響機械性質 (mechanical properties)，因而造成薄膜與塊材之間的性質有更多的分歧。

要製造出應用於工程上的可靠薄膜，就必須了解應用在各元件上的材料彈、塑性限範圍內的機械性質。也只有靠著這些機械性質，才有可能正確地預測元件在力學上的可靠性。因此有能力去描述與了解薄膜的力學行為，對於製作出可靠的薄膜元件或微結構是相當重要的。但在最近的應用，目前已知的材料特性已經無法滿足尺寸微小化設計的考量，尤其是目前的製程已由微米尺寸慢慢邁入奈米尺寸，因此，在微小尺寸上的力學性能成為工程設計人員強烈的需求。目前應用於薄膜結構的材料相當多，其中半導體的材料，例如多晶矽 (polysilicon)、二氧化矽 (silicon dioxide)、氮化矽 (silicon nitride) 與金屬 (metal) 的薄膜，已經廣泛地被微機電元件所採用。微機電元件大部分皆以微感測器與微致動器的形式被成功的發展與商品化，但仍需有關薄膜材料力學性能上大量的知識。這些知識對於商品化之微機電元件極為重要，因為結構的機械性質會影響整體元件的運作狀況與使用壽命。需要發展出一些能夠正確地量測或得知薄膜機械性

質的技術，才能讓設計者於設計元件時有強而有力的參考依據。

一般來說，機械性質試驗都是基於量測材料應力與應變之間的關係。傳統的機械性質測試法，在塊材上的試驗都已經標準化，但卻無法完全適用於薄膜的機械性質測試。原因來自於薄膜的微小厚度尺寸、校準與夾持固定等因素而無法適用。其中可以用來量測薄膜楊氏係數的測試方法主要為拉伸測試法 (tensile test)<sup>(1)</sup>、彎曲樑測試法 (cantilever beam bending test)<sup>(2)</sup>、壓痕測試法 (indentation test)<sup>(3)</sup>、吹氣測試法 (bulge test)<sup>(4)</sup> 與頻率響應法 (frequency resonant method)<sup>(5)</sup>，但都必須製作特殊形式的試片加以測試，而且試片外形與尺寸的精確程度會大幅度的影響測試結果。

本文主要透過筆者在國立清華大學微機電實驗室所開發之微彎曲樑測試儀器為架構<sup>(6)</sup>，其包含機械結構、致動模組、感測模組及待測材料等元件整合於單一 SOI 晶片之技術，加以修改其模組成為微拉伸測試儀器，並導入聚對二甲苯保護技術於製程中，避免待測材料於製程中受不同乾、溼蝕刻攻擊，可使待測材料種類多樣化。

## 二、微拉伸測試法

Sharpe 於 1997 年所提出的微拉伸試驗法<sup>(1)</sup>，利用 MUMPs 面型微加工製程製作尺寸約為毫米等級的微拉伸試片，然後將此試片置於拉伸試驗機之夾治具上，並施予拉應力負載，負荷元 (load cell) 紀錄負載值，試片的變形量由雷射干涉儀量測，藉由直接量測試片之應力-應變關係，萃取薄膜之機械性質。雖然此方法具有直接萃取及理論分析完整等優點，但試片的準備需要經過背片蝕刻晶片以及晶粒切割的步驟，因此試片的準備並非十分容易，且夾持具與試片容易有夾持穩定度、對準上之誤差，造成軸向拉伸力的偏移與摩擦力等因素影響量測之準確性與重現性。

微拉伸測試法的概念除了經由修改夾治具來達到微小試片夾持外，另外也可直接藉由微結構彼此間的靜電力吸引方式來達到夾持的目的，同時進行微小試片的拉伸試驗，如 Tabata 所提出的靜電力微拉伸機<sup>(7)</sup>。此種方式雖可簡化試片製作的複雜

性，但是因靜電力夾持僅能針對導體材料，所以此種方式的應用層面不若機械夾持式微試片拉伸機來得寬廣。

針對使用傳統的拉伸測試法在對準上容易有誤差而產生額外的力矩，Sato 則設計一個拉伸測試的微小晶片，是由試片固定台、負載施加平行板、二根扭轉軸、待測試片所組成，利用外部的探針將外力施加於平行板上，透過扭轉軸將此力轉換成拉伸力，對待測試片進行拉伸形變，萃取出單晶矽、二氧化矽和氮化矽等薄膜之機械性質<sup>(8)</sup>。此種測試方法雖然可以有效減少對準上的誤差對量測結果所造成的影響，但仍然有需要製作特殊之微小晶片製作不同薄膜之待測試片，以及需要更改製程等缺點。

Saif 使用靜電致動器所提供的靜電力當作外力負載來量測鋁薄膜之機械性質。致動器末端為使用微機電技術製作的微型夾治具，配合特殊的試片設計，即可對試片進行拉伸測試，其優點為不需要額外的假設條件，即可量測到應力－應變之關係，而得到鋁薄膜之張應力<sup>(9)</sup>，但會有對準上的誤差，而產生額外力矩，以及所需要的拉伸外力對於靜電驅動而言較大之缺點。

綜觀上述研究，大都是將待測材料試片先以 MEMS 製程製作完畢，再把待測材料試片組裝於大型商用套裝拉伸測試儀之中。如此容易因為組裝對準不良而導致測試結果發生誤差。Zhu 於 2003 年利用 MUMPs 製程，於黃光微影階段即可將微致動器、微感測器與待測材料整合為一晶片級拉伸測試儀<sup>(10)</sup>。雖然可以避免組裝對準的問題，但其缺點為受限於使用 MUMPs 製程，微致動器、微感測器與待測材料的材料皆只能為多晶矽 (poly-Si) 材料，故侷限其可測試材料的應用範圍。

### 三、聚對二甲苯之特性

本文利用保護材料的塗佈，包覆待測材料與其固定端的所有結構，使得蝕刻溶液或氣體不會滲透該保護層，而蝕刻待測材料。希望透過這種方法讓待測材料可與微元件在黃光微影蝕刻製程下一同被製作完成，並且欲更改待測材料之種類時，亦無需更改製作流程。

基於上述的概念，在不影響微元件原有的操作特性之前提下，以下列出所需要的保護層特性：

- (1) 良好的蝕刻選擇比：作為保護層的材料必須與蝕刻溶液與氣體有良好的蝕刻選擇比，如此才可實現單一製程下待測材料之多樣性。
- (2) 均勻性塗佈：由於保護層要包覆住所有的結構，以防止各方向蝕刻溶液與氣體的攻擊，因此需要覆蓋均勻的沉積方式。
- (3) 製程溫度低：為了把待測材料整合在矽晶圓上，並且符合舉離 (lift-off) 製程之低溫環境，所以保護層製程溫度必須低於 100 °C。
- (4) 低剛性：為了使保護層免於微機械結構特性的影響，所以必須選用低剛性的材料，避免保護層加大了結構的剛性，造成非預期的結構特性。
- (5) 防水性：塗佈保護層最主要的目的是讓待測材料可以避免乾、溼蝕刻的攻擊，所以除了上述的特性要求外，最主要還須有良好的防水性。

針對上述需求，尋找符合所有要求的材料。最後選擇了聚對二甲苯高分子 (poly-para-xylylene) 作為保護層，其特性符合了上述所有的條件，對於設計概念的實現有極大的幫助<sup>(11)</sup>。

聚對二甲苯 (簡稱 parylene) 是一種具有多種優良特性的高分子材料。Parylene 的塗佈方式是利用低壓氣相沉積 (LPCVD)，與一般低壓沉積的薄膜同樣具有極佳的均佈性。和其他低壓沉積方式條件不同的是：parylene 是在常溫下 (25 °C) 沉積到所要披覆的表面上，所以不會有任何熱應力殘留在薄膜中。

Parylene 主要有三種類型，分別是 parylene N、parylene C 及 parylene D。後兩者分別是在 parylene N 的苯環上置換了一個氟原子以及兩個氟原子。由於分子主體結構相同，所以都有上述共通的特性，但是由於所置換的氟原子關係，三者各自有特長。Parylene N 有最好的電性和耐熱性，parylene C 有良好的電性和對水氣的阻絕。parylene D 有最好的熱穩定性<sup>(12)</sup>。

本文採用 parylene N 作為包覆待測材料之保護層。Parylene N 除了有優越的蝕刻選擇比之外，亦可承受高達 410 °C 的高溫，因此可相容於其他環

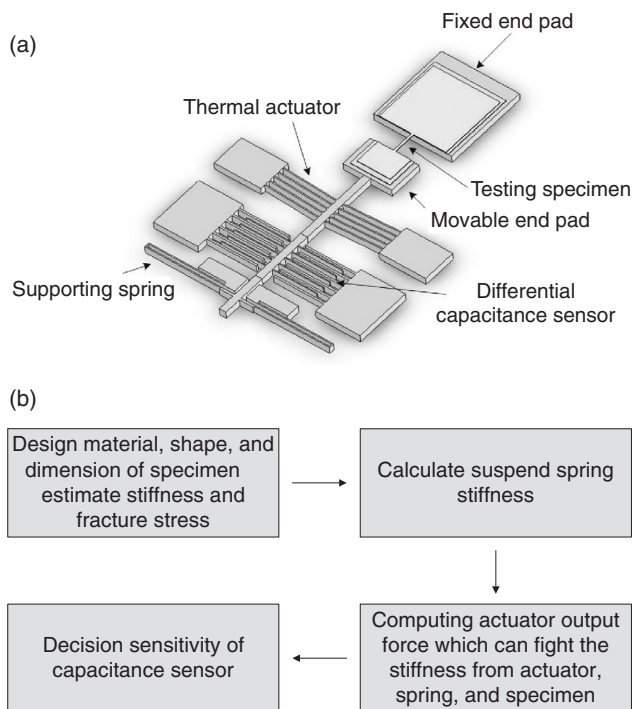


圖 1. 微拉伸測試儀各元件。(a) 配置示意圖，(b) 設計流程圖。

境溫度 410 °C 以下的製程，可增加製程環境的彈性。此外，parylene 是生物相容且穩定性佳的材料，所以和生物醫學的應用有良好的結合。透過其良好的均佈特性，包覆非生物相容的材料，使一般的材料也可應用在生物細胞上。

## 四、微拉伸測試儀設計與分析

### 1. 設計概念

本文之新型微拉伸測試儀的架構示意圖如圖 1(a) 所示，其包含致動元件、感測元件、支撐彈簧與待測材料共四個部分。其操作原理為透過輸入之電壓控制熱挫曲式致動器的力量輸出，此致動器推動元件對待測試片進行拉伸測試，透過差分電容式感測器感測的同平面 (in-plane) 位移量，以及利用三維表面干涉儀量測出平面 (out-of-plane) 變形量。計算致動器施加於待測材料之力量與位移關係圖，即可獲得薄膜材料之機械性質。微拉伸測試儀元件設計步驟如圖 1(b) 所示，其設計與操作原理如下說明。

## 2. 元件設計

### (1) 待測材料之設計

根據材料力學的基本理論<sup>(13)</sup>，待測材料受拉伸負載  $F$  作用時的伸長量  $\delta$ ，若負載作用通過待測材料橫剖面的形心，則遠離兩端橫剖面處之均勻正應力為  $\sigma = F/A$ ，其中  $A$  為橫剖面面積。此外，若待測材料是以均質材料做成，則軸向應變為  $\epsilon = \delta/L$ ，其中  $L$  為待測材料長度。另外，又假設待測材料具有線彈性，意即遵守虎克定律，則縱向應力與應變之關係為  $\sigma = E\epsilon$ ，其中  $E$  為彈性模數。將這些基本關係式合併，則可得到待測材料的伸長方程式：

$$\delta = \frac{FL}{AE} \quad (1)$$

此方程式顯示伸長量與負載  $F$  及長度  $L$  成正比，而與彈性模數  $E$  及橫剖面面積  $A$  成反比。另外，待測材料的勁度 (stiffness,  $k$ ) 為造成一單位伸長量所需要的力或  $F/\delta$ ，可表示為

$$k = \frac{EA}{L} \quad (2)$$

因此在設計待測材料的幾何尺寸上，可依據文獻之降伏應力 (yield stress) 與極限應力 (ultimate stress)，作為材料剛性與強度設計上的依據<sup>(14)</sup>。如圖 2 所示，本文設計之待測材料尺寸皆統一為長度 200  $\mu\text{m}$ 、寬度 20  $\mu\text{m}$ 、厚度 0.4  $\mu\text{m}$ 。再透過公式

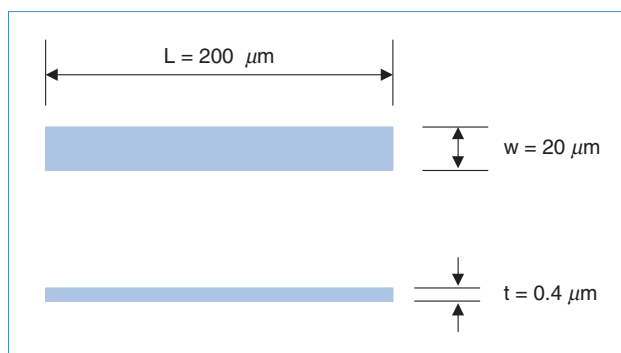


圖 2. 待測材料尺寸示意圖。

(2) 可計算出待測材料之剛性，以及利用文獻之降伏應力與極限應力可歸納出所需之拉伸力量。

## (2) 支撐彈簧之設計

支撐彈簧的設計有三個重要的考量點。第一，支撐彈簧剛性大小必須合適，若其剛性太大，則致動器不易使其位移，間接使得電容感測器因位移量過小，而感測不到電容的變化。反之，若其剛性太小，雖然在相同外力的驅動下，其位移量較大，但剛性太小的彈簧在製程中卻不容易實現。第二，支撐彈簧的剛性在操作範圍內必須為定值，換言之，其剛性大小不能隨著位移的增加而改變。第三，支撐彈簧於致動及致動正交兩方向的剛性比值要大，才能在致動方向得到穩定的直線運動行為。根據文獻記載摺合型彈簧 (folded beam) 在位移行程中剛性較能維持一定值<sup>(6)</sup>，故本文採用摺合型彈簧作為微拉伸測試儀之支撐彈簧，如圖 3 所示。本文亦透過模擬分析軟體驗證，彈簧結構長度分別為 500  $\mu\text{m}$ 、1000  $\mu\text{m}$  與 1500  $\mu\text{m}$ ，寬度固定為 50  $\mu\text{m}$ ，厚度則固定為 8  $\mu\text{m}$ 。如圖 4 所示，摺合型彈簧在 8  $\mu\text{m}$  的形變量內，其彈簧剛性維持一定值。

## (3) 致動元件之設計

本文所使用之微致動元件設計希望能夠有大位移且較為線性的同平面致動，所以選擇 V 型彎曲臂 (V-beam) 熱致動器作為同平面的拉伸致動元件。一般而言，電熱式微致動器的出力大、位移量大，但是能量損耗較大、操作溫度較高。如圖 5 所示，V 型電熱式微致動器結構是一個 V 型對稱懸臂樑，當通予 V 型懸臂樑電流之後，結構將會產生焦耳熱，此時 V 型角度等同於預擾動的方向，V 型懸臂樑會往 V 型尖端膨脹變形產生致動。通常

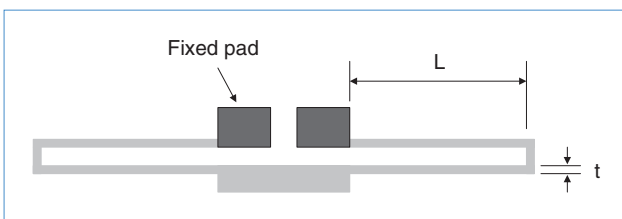


圖 3. 折合型彈簧示意圖。

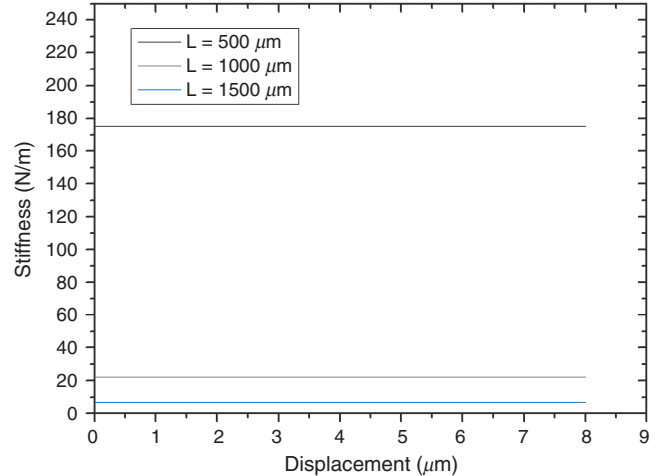


圖 4. 摺合型彈簧不同長度之位移量和彈簧剛性關係圖。

應用於同平面致動，可用面型加工或體型加工製作，剛性等級可隨需求而有不同選擇。

基本上，其原理是利用熱膨脹的方式產生位移致動，簡單的熱膨脹變形公式如下：

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (3)$$

其中， $\Delta L$  為結構變形量、 $\alpha$  為材料熱膨脹係數、 $L$  為材料原始長度、 $\Delta T$  為溫度差異量。

當通予 V 型彎曲臂熱致動器端點電壓時，V 型彎曲臂結構會因為電流通過，而使得溫度提升產生變形，由於結構是 V 型對稱設計，所以在 V 型的尖端會得到一個變形量的位移與輸出力，可以推算出 V 型端點的位移量  $y$  如下<sup>(15,16)</sup>：

$$y = 2 \frac{\tan \theta_a}{k} \tan \left( \frac{kL}{4} \right) \quad (4)$$

$$k = \sqrt{\frac{F}{EI}} \quad (5)$$

其中， $F$  為 V 型端點受力、 $I$  為 V 型彎曲臂慣性矩、 $E$  為材料楊氏係數。利用公式便能夠大致推算出元件受力後往前推進的位移量大小。

如圖 5 所示，在 V 型彎曲臂熱致動器的幾何外形上可以調變三種不同的幾何參數，分別是  $L$ 、

$d$  與  $\theta$ ；其中  $L$  為 V 型彎曲臂熱致動器長度， $d$  為 V 型彎曲臂熱致動器寬度， $\theta$  為 V 型彎曲臂熱致動器初始設計角度。

由於 V 型彎曲臂熱致動器致動的過程複雜，包括了電熱的轉換以及結構的變形，加上元件設計 V 型彎曲臂不但是致動器本身也是彈簧，所以本文利用有限元素計算軟體 ANSYS 來輔助設計，模擬可以直接施加電壓訊號於 V 型彎曲臂熱致動器端點，經由計算之後便能夠得知，考慮了電熱轉換與彈簧效應之後元件之最終致動位移。圖 6 為調變 V 型彎曲臂熱致動器三種不同設計長度之後的模擬結果，長度分別為  $1000\ \mu\text{m}$ 、 $2000\ \mu\text{m}$  與  $3000\ \mu\text{m}$ ，寬度固定為  $50\ \mu\text{m}$ ，厚度則固定為  $10\ \mu\text{m}$ 。經過了模擬的整理之後，可以發現當 V 型彎曲臂熱致動器長度變長，可以提升元件致動方向的位移量。

再者，由於本文的微拉伸致動器必須要能拉動待測材料導致變形，因此在提供大位移的同時，也須考慮致動器在出平面方向的剛性，才能確保有足夠的拉伸力量。為了解決此問題，本文設計多對的 V 型彎曲臂作為拉伸致動器，此設計能夠大幅提升出平面的剛性，所以能夠解決 V 型彎曲臂剛性不足的問題。雖然多對的 V 型彎曲臂可將剛性提升，但多對的 V 型彎曲臂致動輸出力量也增加，並且整體元件的位移量並不會因而受到影響。

#### (4) 感測元件之設計

電容感測器具有低功率、低雜訊、高靈敏度，以及對環境溫度的影響較不靈敏等優點<sup>(17)</sup>，因此適合作為本文之位移感測元件。一般而言，電容感測器可分為氣隙閉合 (gap closing)<sup>(18)</sup>、平移平行板

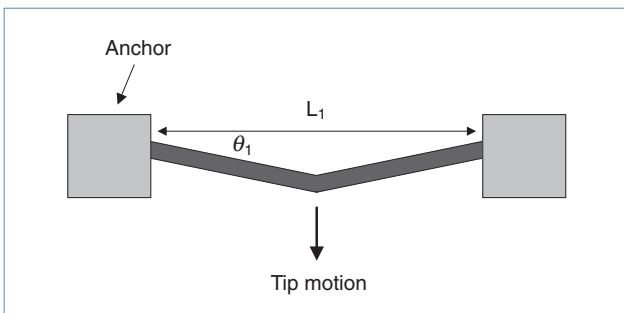


圖 5. V 型彎曲臂熱致動器示意圖。

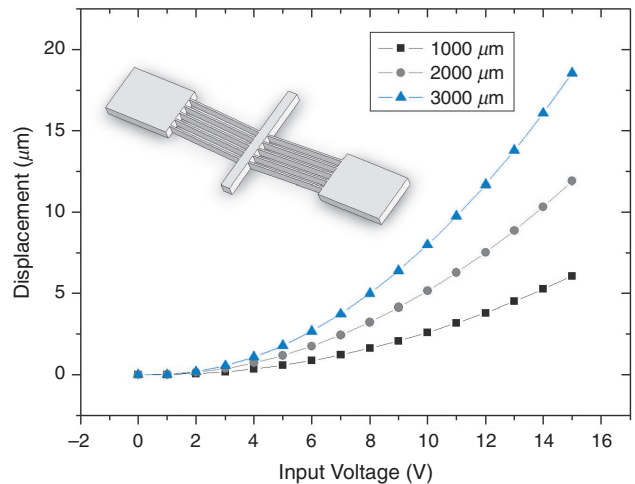


圖 6. V 型彎曲臂熱致動器不同設計長度之模擬結果。

(lateral comb)<sup>(19)</sup>、差分感測 (differential)<sup>(20)</sup>。根據文獻所述差分感測的方式具有較佳的位移靈敏度及較好的線性度，因此本文選用差分式電容作為位移感測元件。

如圖 7 所示為差分電容代號示意圖，當微測試儀器未受到電壓驅動前，差分式電容二端的動子和定子之間的電容值分別為  $C_1$  ( $R_1$  與  $S_1$ ) 及  $C_2$  ( $R_2$  與  $S_2$ )，二端的電容值差異為零：

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 0 \quad (6)$$

其中  $C_1 = n \left( \epsilon \frac{A}{d} + \epsilon \frac{A}{d_1} \right)$ ， $C_2 = n \left( \epsilon \frac{A}{d} + \epsilon \frac{A}{d_1} \right)$ ， $n$  為二平行板之對數， $A$  為動子與定子之平行板的重疊面積， $d$  及  $d_1$  依序為動子平行板與定子平行板較小及較大之間距。當平板移動  $y$  時  $C_1$  和  $C_2$  將變為：

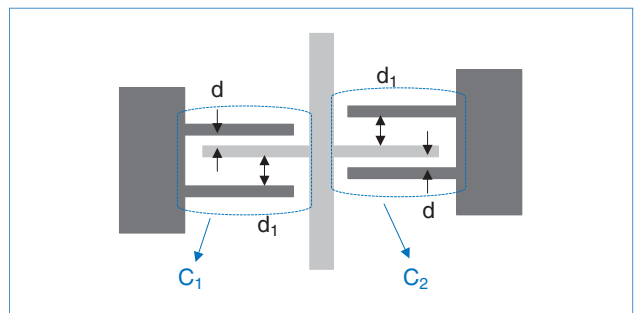


圖 7. 差分電容感測示意圖。

$$C_1 = n \left( \epsilon \frac{A}{d-y} + \epsilon \frac{A}{d_1+y} \right) \quad (7)$$

$$C_2 = n \left( \epsilon \frac{A}{d+y} + \epsilon \frac{A}{d_1-y} \right) \quad (8)$$

因此差分式電容二端的電容差異量 (以下稱為電容變化量)  $\Delta C$  變為：

$$\Delta C = C_1 - C_2 = n\epsilon A \left( \frac{2y}{d^2 - y^2} - \frac{2y}{d_1^2 - y^2} \right) \quad (9)$$

本文以初始間距為  $6 \mu\text{m}$ ，重合面積為  $834 \times 50 \mu\text{m}^2$  及 16 對的平行電容板為例，初始電容值約有 735 fF，若有  $1 \mu\text{m}$  的位移量，估算約會有 245 fF 的輸出電容變化。

## 五、製程與結果

### 1. 製程步驟

圖 8 說明微拉伸測試儀的製程流程，此製程一共使用四道光罩，晶片則是採用  $\langle 100 \rangle$  的 SOI 晶片，元件層 (device layer) 厚度為  $50 \mu\text{m}$ ，氧化層 (oxide layer) 為  $2 \mu\text{m}$ 。

(1) 沉積第一層 parylene 作為待測材料的下保護

層，再藉由第一道黃光定義待測材料試片形狀，接著使用 E-gun 或 sputter 沉積待測材料，並使用舉離製程保留待測材料與其形狀。若重複此步驟，則可在同一片矽晶片上定義多種類的待測材料，本文沉積之待測材料為鋁 (Al)、金 (Au)、銅 (Cu)、鉻 (Cr) 與銀 (Ag)。

(2) 沉積第二層 parylene 作為待測材料的上保護層，如此便可以將待測材料試片完全包覆。接著使用第二道光罩定義保護層形狀，再利用氧電漿 ( $\text{O}_2$  plasma) 蝕刻移除多餘的 parylene。

(3) 沉積二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ )，並且用第三道光罩定義微拉伸測試儀中微機械結構、微致動元件、微感測元件的幾何尺寸，利用 RIE 移除未受光阻保護之二氧化矽，經過 RIE 蝕刻後留下之二氧化矽亦成為 ICP 蝕刻的硬遮罩層。

(4) 沉積氮化矽 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )，並且用第四道光罩定義懸浮待測材料之濕蝕刻 KOH 蝕刻遮罩層，利用 RIE 移除未受光阻保護之氮化矽，經過 RIE 蝕刻後留下之氮化矽亦成為 KOH 蝕刻的硬遮罩層。KOH 蝕刻之後，待測材料試片便可懸浮。

(5) 移除氮化矽之後，裸露出預先定義的二氧化矽硬遮罩層，利用 ICP 定義微拉伸測試儀結構層。

(6) 使用氫氟酸 (HF) 將二氧化矽硬遮罩層與 SOI 晶

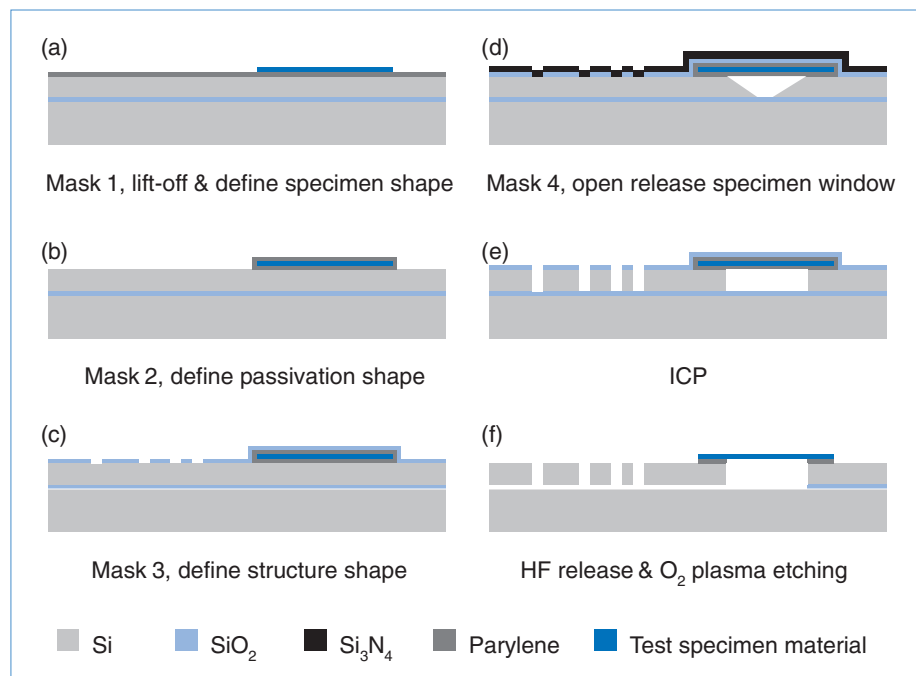
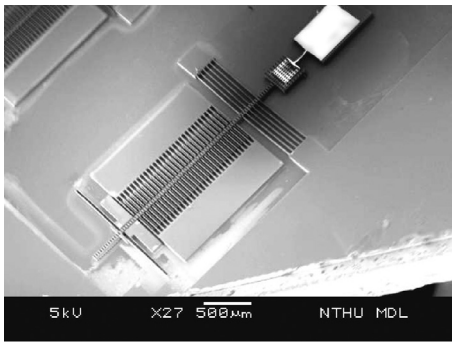
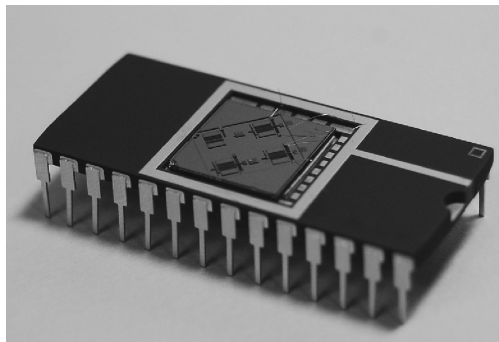


圖 8 .  
微拉伸測試儀的製程流程示意圖。



(a)



(b)

圖 9.

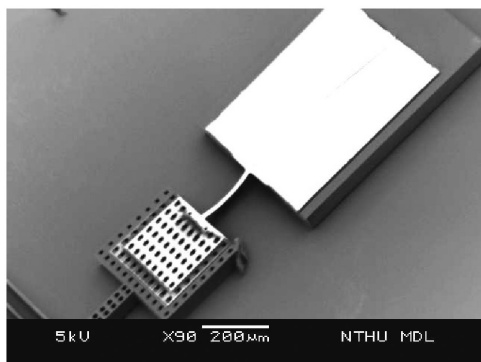
微拉伸測試儀製作完成後的 (a) 電子顯微鏡照片，(b) 使用 IC 封裝後之照片。

片的二氧化矽犧牲層移除，進而釋放元件的結構層，最後再以氧電漿移除保護待測材料試片的 parylene。

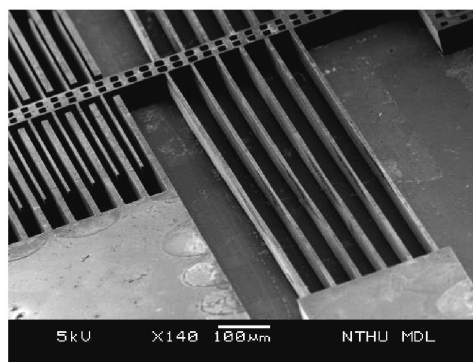
## 2. 製程結果

圖 9(a) 為微拉伸測試儀製作完成後的電子顯微鏡照片。如圖 9(b) 所示為微拉伸測試儀晶片使用 IC 封裝後之照片，此封裝可保護微拉伸測試儀晶片，並且作為即時檢測 (on-line test) 之用。圖 10 為局部放大各元件之電子顯微鏡照片，圖 10(a) 為待測材料與其試片載座 (specimen holder)，待測材

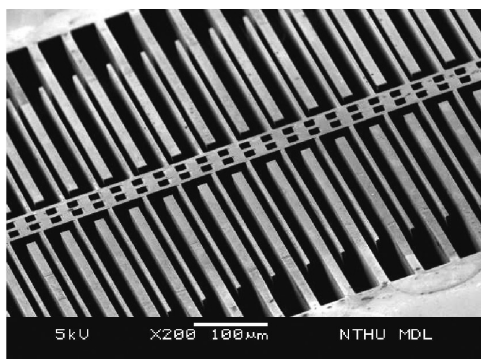
料尺寸皆統一為長度  $200\ \mu\text{m}$ 、寬度  $20\ \mu\text{m}$ 、厚度  $0.4\ \mu\text{m}$ 。試片載座固定端 (fixed end pad) 長度  $500\ \mu\text{m}$ 、寬度  $500\ \mu\text{m}$ 、厚度  $50\ \mu\text{m}$ 。試片載座可動端 (movable end pad) 長度  $300\ \mu\text{m}$ 、寬度  $300\ \mu\text{m}$ 、厚度  $50\ \mu\text{m}$ ，試片載座可動端上亦包含輔助減少氫氟酸蝕刻時間的蝕刻孔 (etching hole)。圖 10(b) 為 V 型彎曲臂熱致動元件，V 型彎曲臂長度為  $2000\ \mu\text{m}$ 、寬度  $50\ \mu\text{m}$ 、厚度  $10\ \mu\text{m}$ ，初始設計角度  $1.5$  度。V 型彎曲臂對數有 4–6 對，作為不同剛性與出力之設計。圖 10(c) 為差分電容感測元件，重合長度  $300\ \mu\text{m}$ ，位移行程  $10\ \mu\text{m}$ 。圖 10(d) 為摺合型



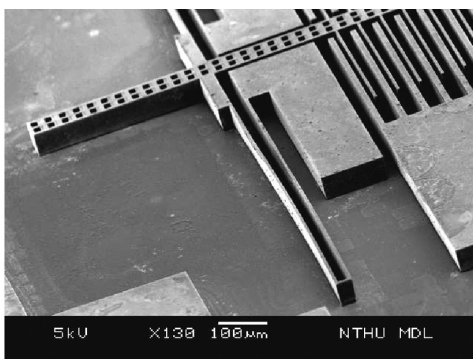
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 10.

微拉伸測試儀局部放大各元件之電子顯微鏡照片。(a) 待測試片與載具，(b) V 型彎曲臂熱致動元件，(c) 差分式電容感測元件及 (d) 摺合型支撐彈簧。

支撐彈簧，長度為 1000  $\mu\text{m}$ 、寬度 50  $\mu\text{m}$ 、厚度 8  $\mu\text{m}$ 。

如圖 11 所示，利用 parylene 保護技術，定義多種待測材料種類於單一製程下完成，包含鋁、金、銅、鉻、銀五種材料。如圖 12 所示，亦可利用黃光微影製程之優點，定義出有缺陷 (crack) 形狀之待測材料，其缺陷形式亦參照文件規範所設計，以便估算實驗後應力集中因子 (stress-concentration factor) 是否與理論相同<sup>(13)</sup>。圖 12(a) 為中空圓孔形狀之缺陷，本文所設計之圓孔的半徑為 3  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$  與 5  $\mu\text{m}$ 。圖 12(b) 為兩側半圓孔形狀之缺陷，本文所設計之半圓孔之半徑為 3  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$ 、5  $\mu\text{m}$ 。

## 六、儀器校正與實驗量測

在前文中探討微拉伸測試儀器各元件的設計考量，例如希望其支撐彈簧為線性彈簧、致動元件之位移與外力輸出值須能拉斷待測材料、電容感測器之電容變化和位移變化為線性關係等。本節以實際的量測實驗來驗證微拉伸測試儀器是否達到預期之要求，量測實驗共分成三個部分，其內容簡述如下。

第一部分，微拉伸測試儀器之外力校正，在驅動過程中使用奈米壓痕試驗機直接量測 V 型彎曲臂熱致動元件與支撐彈簧的剛性值，得到輸入電壓與相對應剛性之關係。此外，使用商用微機電元件運動分析儀 (MEMS motion analyzer, MMA) 來量測驅動過程中 V 型彎曲臂熱致動元件的位移值，得到輸入電壓與相對應位移之關係。因此藉由輸入電壓分別對應剛性與位移，來校正 V 型彎曲臂熱致動元件的力量輸出。

第二部分，電容感測器之電容變化和位移關係之校正，使用 MS3110 電容解調電路，讀取電容感測器的電容變化，再透過 MMA 量測微測試儀器之位移量，以達到校正位移的目的。

最後，使用筆者實驗室所開發之微拉伸測試儀器對待測材料進行測試，並探討其測試結果。

### 1. 微拉伸測試儀致動元件之校正

本文採用 V 型彎曲臂熱致動元件作為力量的輸出，雖然可藉由理論公式或數值分析的方法來求得輸出的位移與力量，但由公式 (3) 與公式 (4) 可知，此位移與力量和 V 型彎曲臂結構的尺寸及輸入電壓產生的焦耳熱有關。然而 V 型彎曲臂結構的尺寸容易受到製程因素的影響，間接造成 V 型

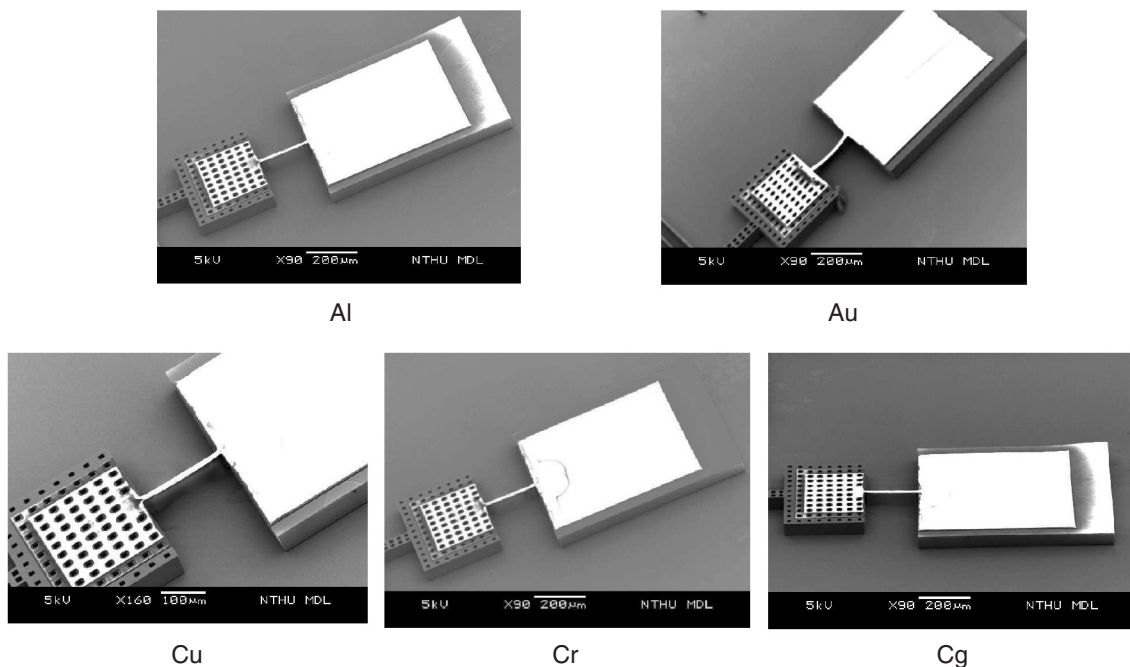


圖 11. 不同種類待測材料之電子顯微鏡照片。

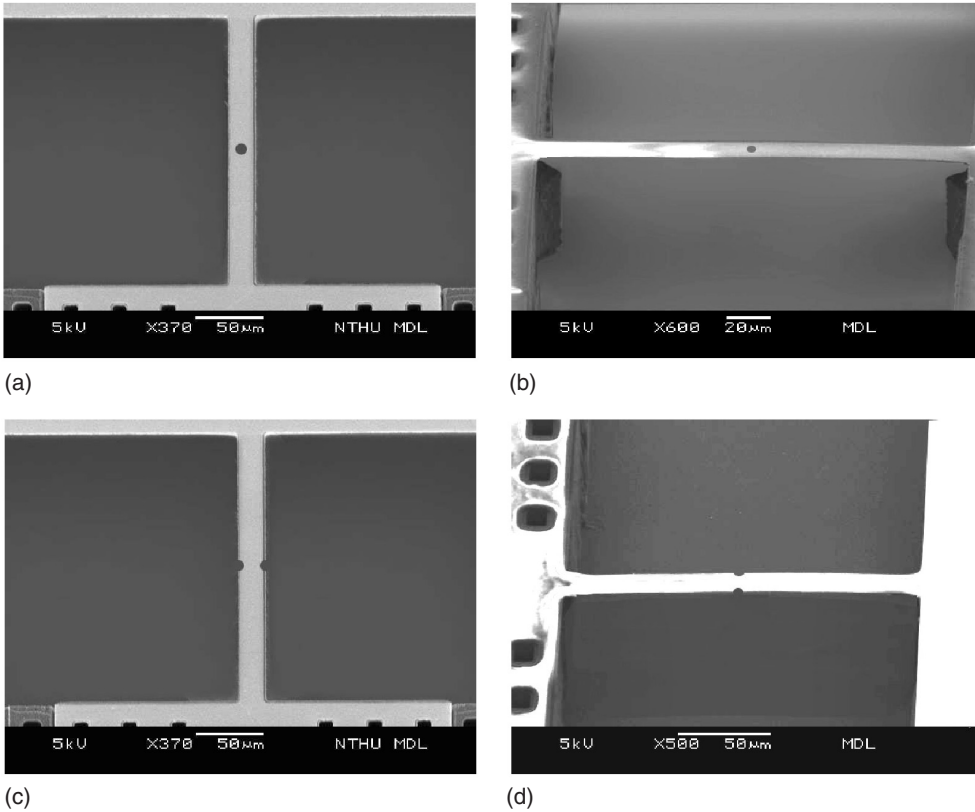


圖 12.  
不同缺陷形式之電子顯微鏡照片。(a) 中間圓孔形式，(b) 兩邊半圓孔形式。

彎曲臂熱致動元件的輸出力量計算錯誤。因此本文利用奈米壓痕試驗機量測到的電壓和剛性之關係，配合 MMA 量測到的電壓和位移之關係，校正 V 型彎曲臂熱致動元件的驅動力。

### (1) 儀器之剛性校正

本文利用商用奈米壓痕試驗機，直接量測支撐彈簧的剛性值，作為微拉伸測試儀器剛性的校正方法。該商用儀器奈米壓痕試驗機主要包含了電磁驅動的負載裝置、電容式的位移感測計、探頭及支撐彈簧。由於本文的 V 型彎曲臂熱致動元件與支撐彈簧主要是具備同平面方向的撓性，如圖 9(a) 所示，而探頭的施力方向與支撐彈簧同平面方向的撓性互相垂直，為了能讓支撐彈簧的撓性方向能符合奈米壓痕試驗機的施力方向，因此使用一個角度為九十度之 L 型式夾治具，藉此夾治具使 V 型彎曲臂熱致動元件與支撐彈簧的撓性方向與探頭的施力方向相互平行，以利於奈米壓痕試驗機之量測。如圖 13(a) 所示為藉由 L 型夾治具改變 V 型彎曲臂熱致動元件和支撐彈簧撓性方向與探頭施力方向關係

之示意圖。圖 13(b) 為試片置於 L 型夾治具的照片。藉此，本文測得不同設計的 V 型彎曲臂熱致動元件和支撐彈簧之剛性與輸入電壓的關係，如圖 14 所示。

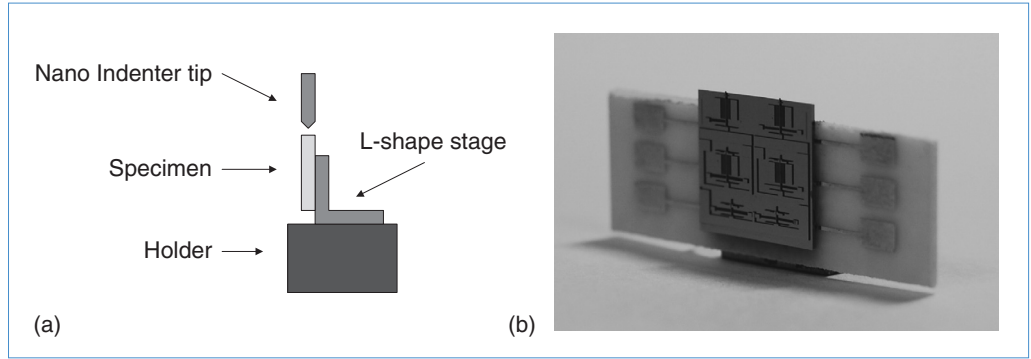
### (2) 儀器之位移校正

本文使用 MMA 量測微測試儀器的平面運動，此儀器的原理為利用 CCD (charged-coupled device) 配合 LED 閃頻的方式，擷取不同時刻的影像，再經由影像處理軟體分析不同影像之差異，即可計算出同平面之位移量，其位移量的解析度最高為 10 nm。而本文乃透過準靜態 (quasi-static) 之低頻 1 Hz 驅動的方式，量測元件之靜態特性。

用電壓驅動此微拉伸測試儀器，透過 MMA 量測到電壓對應位移之關係圖，如圖 15(a) 所示，量測到的位移量再乘上已校正之剛性，即可得到校正後之拉伸力，如圖 15(b) 所示。在特定電壓驅動之下，其拉伸力大小為一定值。未來除了能透過上述方法來校正致動元件外力的輸出值，也期望能藉此修正理論公式 (4) 之 V 型彎曲臂熱致動元件外力的

圖 13.

(a) 藉由 L 型夾治具改變 V 型彎曲臂熱致動元件和支撐彈簧撓性方向與探頭施力方向關係之示意圖，  
(b) 試片置於 L 型夾治具之照片。



一些重要參數，更準確地預估微拉伸測試儀器的力量輸出值。

## 2. 微拉伸測試儀之感測元件校正

本文使用微拉伸測試儀器內建之平行板電容感測器，感測因位移而產生的電容輸出，並且使用商用的電容解調電路，讀取微測試儀器的電容變化。最後，再透過 MMA 測得的位移來校正電容感測器感測之位移量。

### (1) 位移感測系統架設

本文採用的電容解調電路是美國 Microsensors 公司所生產的 Universal Capacitive Readout™ IC，型號為 MS3110，其規格包括起始電容的要求為 250 fF，解析度為  $4 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，頻寬範圍為 0.5 kHz–8 kHz，可對二個變化的電容作差分感測<sup>(21)</sup>，亦可感

測單獨的電容變化<sup>(22)</sup>，其中  $V_o$  為電容解調電路的輸出電壓，Gain 為增益值，可將輸出訊號放大二至四倍，V2P25 為運算放大器的工作電壓，CS1 及 CS2 分別代表差分式電容兩端所感測到之電容值，CF 可用來調變可感測電容的範圍，經由簡單的電路分析，可得到電容解調電路的電壓–電容轉換公式<sup>(23)</sup>：

$$\Delta C = C_1 - C_2 = n\epsilon A \left( \frac{2y}{d^2 - y^2} - \frac{2y}{d_1^2 - y^2} \right) \quad (10)$$

為了驗證微測試儀器電容感測器之可行性，本文採用電路的原始設定值來量測電容變化，其參數如下：Gain = 2，V2P25 = 2.25V，CF = 5.13 pF，其中 CF = 5.13 pF 時，輸出電壓值的解析度為 1 V/pF。

微測試儀器經由致動器驅動而產生位移變化時，該儀器之電容感測器會因為位移的變化而產生電容變化，再藉由 MS3110 電容解調電路將電容變化轉換成電壓的輸出，透過示波器觀察，並記錄輸出電壓值的變化，而 MMA 則用來量測此時微測試儀器之位移量。

### (2) 位移感測系統之校正

致動元件輸入電壓後，會使微拉伸測試儀器包括電容感測器作同平面的運動，使得二平行板的間距改變，而產生電容值的變化，再透過 MS3110 電容解調電路，將電容變化轉換成電壓訊號，圖 16(a) 為微拉伸測試儀器驅動電壓的平方與量測到的電訊號之關係圖。另外，藉由 MMA 來校正微拉伸測試儀器之位移量，可得到如圖 16(b) 之驅動電

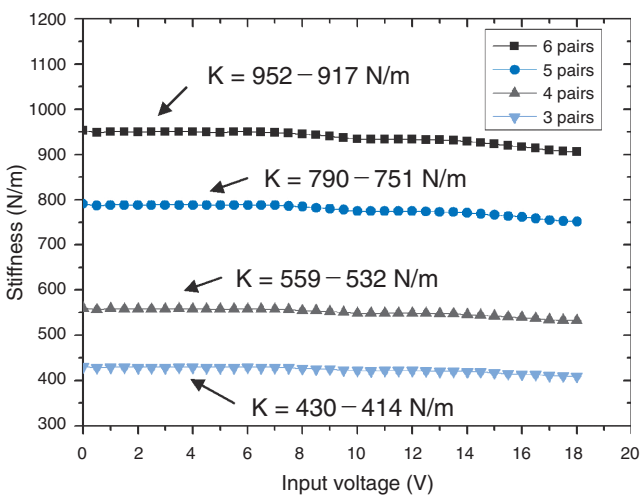
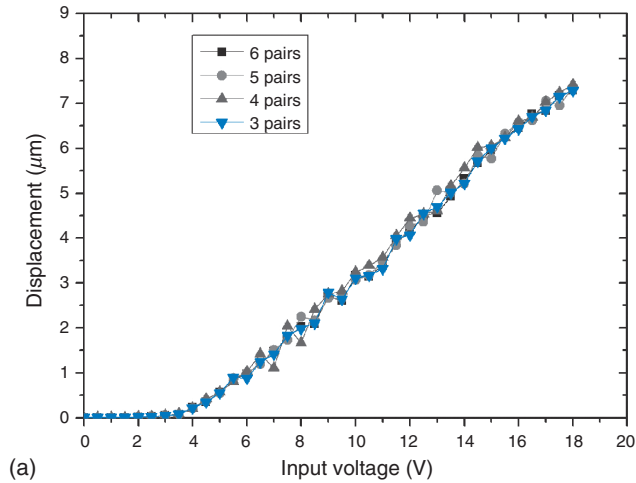
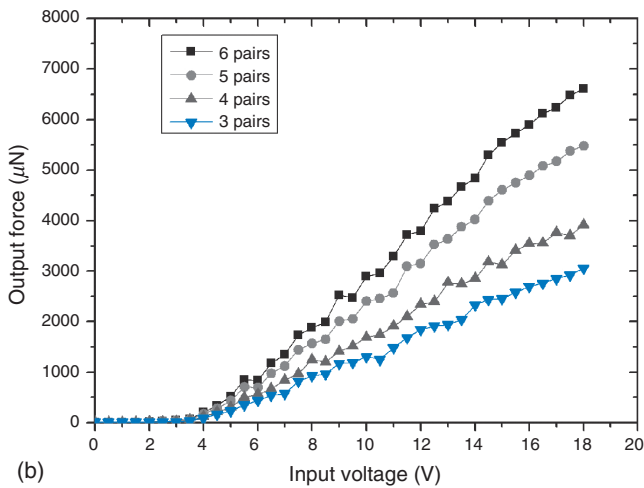


圖 14. 不同設計的 V 型彎曲臂熱致動元件和支撐彈簧之剛性與輸入電壓之關係。



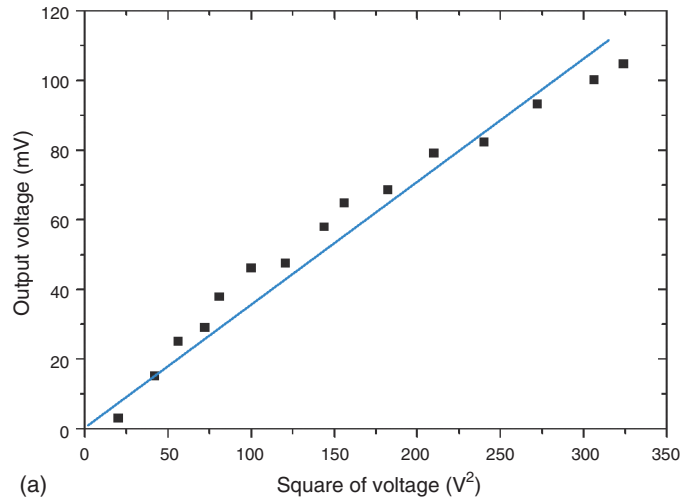
(a)



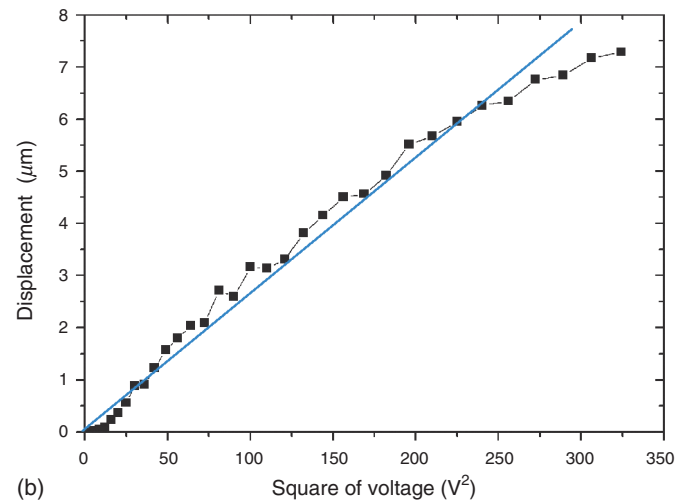
(b)

圖 15. 不同設計的 V 型彎曲臂熱致動元件和支撐彈簧之 (a) 剛性與輸入電壓之關係, (b) 輸入電壓對應輸出力量之關係圖。

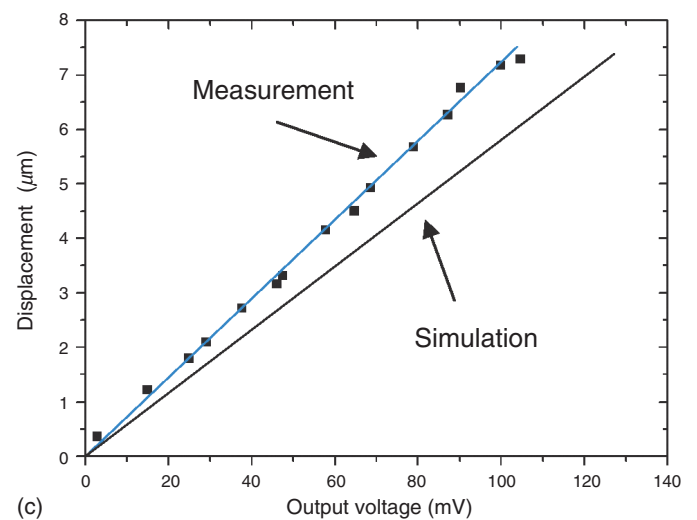
壓的平方與位移之關係圖。而在相同的驅動電壓之下，每個輸出的電壓訊號都會對應一個位移量。因此藉由圖 16(a) 及 16(b) 的比對，可以繪出微拉伸測試儀器之位移量和輸出電壓的關係圖如圖 16(c) 所示，其中紅線的位移量是經由 MMA 校正後之量測值，而黑線的位移量則是透過 Coventorware 分析得到的模擬值。依據電容解調電路的電壓-電容轉換公式，可求得輸出電壓所對應的電容變化 ( $CS_2-CS_1$ )，再將此電容變化代入經由數值分析軟體得到之電容變化-位移關係，即可經由模擬得知微拉伸測試儀器之位移量。未來主要是以黑線，也就是 MMA 校正過後之輸出電壓和位移的關係，推算微拉伸測試儀器的位移量。



(a)



(b)



(c)

圖 16. 位移校正機制, (a) 經由電容解調電路量測到之電壓訊號輸出, (b) 經由 MMA 量測到之位移量, (c) 量測值與模擬值之輸出電壓與位移的關係。

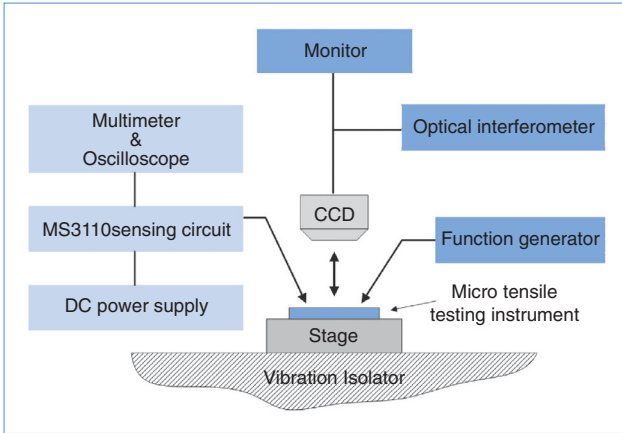


圖 17. 拉伸試驗架設示意圖。

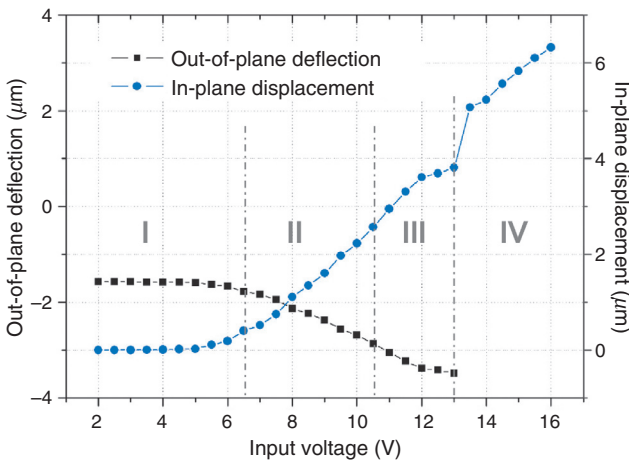


圖 18. 微拉伸測試儀所量測之典型拉伸結果。

### 3. 拉伸試驗之量測

實驗架設示意圖如圖 17 所示，分別利用差分電容式感測器感測同平面位移量，以及利用三維表面干涉儀量測出平面變形量。如圖 18 所示，為利用本文所開發之微拉伸測試儀所量測之典型拉伸結果，分別表示於不同操作電壓之下所對應同平面位移量與出平面變形量之關係，以下利用分段加以詳述。

第一區，預拉伸區：輸入電壓從 0 V 至 5 V，熱致動元件尚未達到熱挫曲之熱量與溫度，故無法拉動待測試片。輸入電壓從 5 V 至 6.5 V，熱致動元件已產生熱挫曲，並且已開始進行拉伸，但這一段的變形量為非線性變化。因為致動元件本身熱挫曲產生的瞬間位移量即為非線性，所以會影響剛性耦合其中的待測試片，故該變形區段不列入計算範圍。

第二區，彈性拉伸區：輸入電壓從 6.5 V 至 10.5 V，為輸入電壓與待測試片變形關係較為線性之區段，因此使用該區段之數值代入拉伸公式計算楊氏係數與殘留應力。

第三區，塑性拉伸區：輸入電壓從 10.5 V 至 13 V，又進入非線性區段，因為拉伸試片已經開始產生塑變，故不列入求取楊氏係數與殘留應力之計算，直到超過 13 V，待測試片便無法承受拉伸力量而斷裂，可使用該區段計算破壞應力。

第四區，破壞區：輸入電壓從 13 V 之後，同平面位移急速上升，因為待測試片已經斷裂，此時只剩下致動元件與支撐彈簧之剛性，減輕熱挫曲所抵抗的剛性，故位移量會有一跳躍現象。

此外，亦利用前小節所校正之儀器特性，可將拉伸試驗之結果表示為拉伸力量與位移之關係。拉

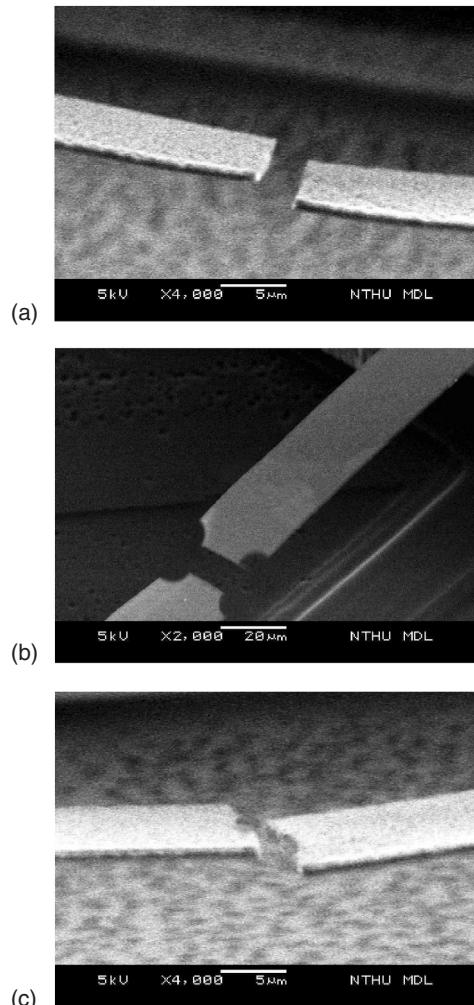


圖 19. 不同形式待測材料破斷後之電子顯微鏡照片。

伸試驗結束後，斷裂試片之 SEM 照片如圖 19 所示，分別為圖 19(a) 沒有設計缺陷之測試樑、圖 19(b) 具有兩邊半圓形缺陷之測試樑，以及圖 19(c) 具有中空圓孔缺陷之測試樑。

## 七、結論

本文成功地設計、製造與測試以微加工製程所製造的微拉伸測試儀，並利用此微測試儀器對微橋式結構之待測材料進行拉伸測試，驗證此微測試儀器之可行性，亦同時驗證使用高分子材料—聚對二甲苯優越的抗酸鹼能力，整合於黃光微影製程之中，作為保護待測材料之保護層，以避免製程中乾濕蝕刻的攻擊，達成可任意更換待測材料的微拉伸測試儀之製程平台。本文利用微加工製程所開發之微拉伸測試儀是由數種模組所構成，在設計上具有彈性及製程容易實現等優點。再者，在測試方面，本文使用 MMA 搭配 MS3110 電容解調電路校正，並量測微測試儀器之位移量。此外，使用商用儀器奈米壓痕試驗機搭配 MMA 對微測試儀器進行力量之校正，以作為微測試儀器之力量和位移校正機制，提升其量測可信度。最後，再針對待測材料進行拉伸試驗，以驗證本儀器應用之可行性。

## 參考文獻

1. K. M. Jackson, J. Dunning, C. A. Zorman, and W. N. Sharpe, *Journal of Microelectromechanical System*, **14** (4), 664 (2005).
2. G. L. Pearson, W. T. Read, and W. L. Feldmann, *Acta. Metall.*, **5**, 181 (1957).
3. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *Journal of Materials Research*, **7**, 1564 (1992).
4. M. S. Dieter, J. Maibach, and O. Ernst, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **4** (4), 238 (1995).
5. S. B. Brown, G. Povirk, and J. Connally, *IEEE MEMS '93*, Fort Lauderdale, 99 (1993).
6. 張佐吉, 朱懷遠, 劉源棟, 方維倫, 第九屆奈米工程暨微系統技術研討會, 41 (2005).
7. T. Tsuchiya, O. Tabata, J. Sakata, and Y. Taga, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **7** (1), 106 (1998).
8. T. Yoshioka, T. Ando, M. Shikida, and K. Sato, *Sensors and Actuators A*, **82**, 291 (2000).
9. M. A. Haque and M. T. A. Saif, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **10** (1), 146 (2001).
10. Y. Zhu, F. Barthelat, P. E. Labossiere, N. Moldovan, and H. D. Espinosa, *2004 SEM Annual Conference*, 155 (2004).
11. K. R. Williams, Kishan Gupta, and Matthew Wasilik, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **12** (6), 761 (2003).
12. <http://www.parylene.com/technology/specifications-properties.html>
13. J. M. Gere, *Mechanics of Materials*, 6th Ed, California, Books/Cole (2004).
14. [http://en.wikipedia.org/wiki/Yield\\_\(engineering\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering))
15. Y. B. Gianchandani and K. Najafi, *Journal of Microelectromechanical System*, **5** (1), 52 (1996).
16. L. Que, J.-S. Park, and Y.-B. Gianchandani, *IEEE MEMS '99*, 31 (1999).
17. Y. Sun, S. N. Fry, D. P. Potasek, and B. J. Nelson, *Journal of Micromechanical and Microengineering*, **14** (1), 4 (2005).
18. Y. Sun, B. J. Nelson, D. P. Potasek, and E. Enikov, *Journal of Micromechanical and Microengineering*, **12** (6), 832 (2002).
19. W. C. Tang, T. H. Nguyen, M. W. Judy, and R. T. Howe, *Sensors and Actuators A*, **21**, 328 (1990).
20. Goodenough, *Electron Design*, **39**, 145 (1991).
21. Y. Suzuki and Y.-C. Tai, *IEEE MEMS'03*, Kyoto, Japan, 486 (2003).
22. Y. Sun, B. J. Nelson, D. P. Potasek, and E. Enikov, *Journal of Micromechanical and Microengineering*, **12** (6), 832 (2002).
23. <http://www.irvine-sensors.com>

- 
- 劉源棟先生為國立清華大學動力機械工程研究所博士生。
  - 張佐吉先生為國立清華大學動力機械工程碩士。
  - 方維倫教授為美國卡內基美隆大學機械工程博士，現任國立清華大學動力機械工程學系及奈米工程與微系統研究所教授。
  - Yung-Dong Lau is currently a Ph.D. student in the Institute of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.
  - Tso-Chi Chang received his M.S. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University.
  - Weileun Fang received his Ph.D. in mechanical engineering from Carnegie Mellon University, USA. He is currently a professor in the Department of Power Mechanical Engineering and in the Institute of NanoEngineering and MicroSystems at National Tsing Hua University.