

微機電系統製程平台及應用

方維倫、謝哲偉、林弘毅

國立清華大學動力機械工程學系

1 前言

1947 年電晶體的發明為 Shockly 等人贏得諾貝爾物理獎的榮耀，十多年後這項半導體特性結合 Fairchild 公司的平面工藝技術 (planar technology)，以及當時任職於德州儀器公司的 Kilby 提出的積體電路(Integrated Circuits, 以下簡稱 IC)的概念，為半導體工業奠定了基礎。相關的應用從早期的收音機、助聽器等消費性電子產品，擴大至目前的個人電腦、手機等資訊科技類的產品，也為人類的文明，無論在科技或文化的層面上，都產生了關鍵性的影響，而 Kilby 本人也在 2000 年獲得諾貝爾物理獎的殊榮。從 1947/1957 年演變至今，半導體工業已從原來簡單的 IC 元件，逐漸演變為複雜的、高密度的 Memory、Mixed-mode、RF、DSP、MCU 等元件，而其應用也由早期收音機、助聽器，擴展到現今高整合性的無線區域網路(WLAN)、個人電腦、手機、電玩、等系統產品，此外，平面工藝的產品也不只侷限於矽基板的 IC，更涵蓋了鋁基板的磁碟片，陶瓷基板的磁頭， - 族基板的 LED/VCSEL、AWG，玻璃基板的 STN、TFT-LCD 等，可謂是現今一項主流製造技術；而當前所謂高科技產業，也多半是指由平面工藝所製造的各類型產品。

在微機電系統領域裡，這種透過平面工藝來製造微米尺寸的機械元件的技術，一般稱之為微機械加工技術 (Micromachining technology)。雖然和前述的各種加工技術同樣是屬於平面工藝這個家族裡的一員，微機械加工技術所扮演最關鍵且最具特色的一點，即是提供懸浮的或者是可動的機械元件，例如樑、板、齒輪、連桿等。未來如果這一家族欲透過平面加工技術，單石化地 (monolithically)整合生、光、機、電、磁等元件於同一晶片，以開發具有多功能的系統晶片(System on chip, 或簡稱 SOC, 這裡指的是廣義的系統晶片，亦即不僅整合電路，可能還整合其他生、光、機、電、磁等元件於同一晶片)，或者是模組化地以封裝或打線的方式整合這些生、光、機、電、磁等元件來建構系統 (System in packaging, 或簡稱 SIP)，則可提供機械元件的微機械

加工技術將扮演舉足輕重的角色。

談到製程平台，許多人會直接聯想到台積電或者是聯電這些晶圓代工廠建立的 CMOS 標準製程，透過標準製程可將各家電路設計公司 (Design house) 的多種電晶體等電子元件的設計和佈局，製造與整合在矽基材，產生各種不同功能的應用。至於微機械加工的製程平台，最廣為人知的當屬於 MEMSCAP 公司 (原為 JDS Uniphase's CRONOS) 的 MUMPs (Multi-User MEMS Processes) 面型微加工技術 (surface micromachining)，然而，必須具備什麼特色才能符合微機械加工製程平台的條件，是一個見仁見智的問題。由於機械動件可說是微機電技術最具特色的部分，若從傳統機械器件的角度來探討動態系統，其主要包括驅動元件(如汽車的引擎)，動力傳輸機構(如汽車的連桿、變速箱等)，及功能性被動元件(如輪胎)；同理，微動態系統亦可粗略地區分為驅動元件、動力傳輸機構、以及被動元件。因此筆者認為，一個完整的微機械加工製程平台必須具備製造及整合驅動元件、動力傳輸機構、以及功能性從動元件的能力。

讓我們來回顧 MUMPs 面型微加工平台的發展歷程。關於面型微加工技術，其實早在 1967 和 1984 年，Nathanson 和 Howe 即已分別製造出面型微懸臂樑 [1-2]，到了 1988 Fan et.al. 開發出轉動致動器-微馬達 [3]，1989 Tang 則開發出線性運動的梳狀致動器 [4]。此時，面型微加工技術已初步展現出其製造及整合驅動元件、動力傳輸機構、以及被動元件的能力，然而元件在垂直於矽晶片表面的運動方式，嚴重地受限於薄膜厚度，也使得這套加工技術無法產生廣泛的應用。到了 1992 Pister 提出微絞鏈 (micro hinge) 的設計 [5]，使得面型微機械元件在製程完成後，得以抬高或者立於矽晶片表面，以克服運動空間受限於薄膜厚度的問題。在證實面型微加工技術可以製造懸臂樑 致動器 絞鏈等關鍵元件後，美國北卡羅來納州的微電子中心 (MCNC) 終於在 1993 建立一個以上述面型微加工技術為本的製程平台，稱之為 MUMPs [6]。由此得知，欲開發一個通用的微機電製程平台，除了製程技術外，還必須面對元件設計與開發的挑戰。

由於微機電系統最主要的特色是具備機械元件，尤其是機械動件，因此在功能與特性的要求上，可謂包羅萬象。以運動的方式為例，一般可分為(1) 運動方向和晶片

表面平行的同平面式 (in-plane) 運動，和 (2) 運動方向垂直於晶片表面的出平面式 (out-of-plane) 運動兩種類型，對於這兩種類型還可以再進一步區分為線性運動 (linear motion)或是轉動 (angular motion)。其中最廣為人知的例子，如梳狀式致動器(comb drive)即屬於同平面式線性運動 [4]，而德州儀器公司(TI, Texas Instrument)的數位面鏡 (DMD, digital mirror device) 則屬於出平面式轉動 [7]。甚至於在操作這些元件時，還可區分為三種不同的模式，其中包括：(1) 數位式(digital)，元件只有開/關兩個不同的狀態，例如光學微機器公司 (OMM, Optical Micromachine)的二微光開關 [8]；(2) 類比式(analog)，元件可藉由外界的驅動源，產生多種不同的狀態，例如朗訊公司 (Lucent) 的三微光開關可藉由驅動電壓，任意調變面鏡的轉角，以便將入射光反射至指定的位置 [9]；(3) 共振式(resonant)，元件由彈簧-質量塊所構成，藉由外界諧波的驅動使元件產生共振，例如微圖像公司 (Micro vision)的微掃描面鏡 [10]。

由此得知，微機電系統雖然是由平面工藝的加工技術所製造，但是它的元件種類卻遠較現有的 IC 或是光電元件複雜。因此筆者認為，為了滿足平面工藝產業的特色，標準製程亦或是製程平台是一個必然的趨勢，這點可以從 MUMPs 製程平台開放後，微機電系統的發展才得以大放異彩得到佐證；然而，為了因應各種不同元件的功能與特性，單一製程平台恐怕已無法滿足需求，這點也可以從近年來有許多光通訊領域的研究人員致力於利用 SOI 晶片技術，以克服 MUMPs 元件剛性不足的缺點得到證實。目前除了 MUMPs 製程平台外，還有美國 Sandia National Lab 的 SUMMIT 製程平台 [11]，Cornell University 的 SCREAM 製程平台 [12-13]，歐洲 SENSOR 的 MPW (Multi-Project Wafer) 體型微加工製程平台 [14]，以及直接利用 CMOS 製程作為製造微機械元件的製程平台，在這方面，一個很具代表性的例子是美國 Carnegie Mellon University [15]。據此，筆者實驗室致力製程平台技術的開發與整合，希望對微機電領域的發展，能產生關鍵性的影響與貢獻。以下將介紹兩種筆者實驗室已成功地開發的微加工製程平台及其應用，其中包括以薄膜元件為主的 MOSBE 製程平台 [16]，及以高深寬比 (High aspect ratio micromachining，以下簡稱 HARM) 元件為主的 BELST 製程平台 [17]。

2 MOSBE 製程平台

上述各項平台技術中，MUMPs 可提供最多種類的致動器與結構，尤其是可使元件作出平面剛體轉動的微絞鏈，更是其他技術很難突破的一項設計，因此吸引大多數的研究人員利用這套平台開發了許多優異的微致動器與精緻的組裝結構，從而衍生了各種元件及應用；而集合過去十年的發展，使得 MUMPs 這種兩層薄膜結構的組合與應用，達到爐火純青的地步，無疑是當今最受重視的微機械加工平台技術。儘管如此，由於受限於薄膜的厚度，使結構的剛性太小，且出平面運動的空間明顯不足，這項平台技術也不斷受到質疑與挑戰。本節將介紹一種以面型微砂加工技術為基礎所發展的複合式製程(MOlded Surface micromachining with Bulk Etch release, MOSBE) [16], 以期能克服現有的問題，並希望能延續過去十年所發展出的精緻面型微加工元件。

2.1 製程特性

如圖 1 所示為 MOSBE 複合製程示意圖，此複合式製程最大的特色是整合了三種基本的微砂加工技術，而具有三個等級的加工深度。如圖 1a 所示，活性離子深蝕刻(以下簡稱 DRIE，加工深度約 20 釐m)用以產生高深寬比的結構，如圖 1b 所示，面型微砂加工(加工深度約 2 釐m)用以產生高寬深比的結構，如圖 1c 所示，濕式體型微砂加工(加工深度約 200 釐m)用以產生高精準度的空穴。簡言之，MOSBE 製程整合了三種基本工藝的特色。其中，面型微砂加工能製造撓性結構及利用犧牲層產生小間距，而 DRIE 能產生高深寬比的結構，配合薄膜回填溝渠(trench refill) 的製程，能夠製造高剛性且輕量化的薄膜結構；而體型微砂加工則利用了矽基材本身的單晶特性，能夠將薄膜結構下方的矽基材掏空以產生尺寸精準的凹槽。因此 MOSBE 製程也可視為一種整合面型和體型微加工技術的複合式微加工製程 (hybrid micromachining)。

● 元件剛性

根據材料力學得知，由矩型截面所構成的樑，當結構的寬度和材料固定時，其彎曲剛性與厚度的三次方成正比，因此欲增加樑的彎曲剛性，必須增加結構(亦即薄膜)的厚度。然而受限於製程，薄膜的厚度和剛性無法毫無限制地增加，例如對於 MUMPs 製程而言，結構的厚度大約是 2 釐m。因此 MUMPs 元件主要是利用多層薄膜的堆疊(如 Poly1+Poly2, Poly+Oxide+Poly) 來增加結構的厚度，其剛性增益與單層平板相較僅約為 10 倍。然而另一方面，由材料力學也得知，如果可以改變樑的截面如圖 1b 所

示，則可以在不改變厚度的情況下，增加樑的彎曲剛性，這種技術早已廣泛應用於許多建材，例如 I 型或 C 型的鋼樑。換言之，以 MOSBE 製造的樑（文獻 [16] 稱之為肋強化結構）可在不增加薄膜厚度的前提下增加彎曲剛性。

由於 MOSBE 元件的剛性是由圖 1a 之蝕刻尺寸 w 及 D 來調整，而深度方向的變化 D 是由 DRIE 的蝕刻深度所控制的，因此結構的剛性具有很大的調整範圍，所產生的肋強化結構其剛性增益甚至可達 100 倍 [18]。與傳統的高深寬比製程相較，MOSBE 製程並不強調結構的深度而是著重結構的剛性對比，因為對多運動自由度的微機械結構而言，必須同時包含撓性結構與剛體結構。

● 運動空間

再比較 MUMPs 微加工與 MOSBE 製程在運動空間的創造方式，MUMPs 微加工利用組裝的方式，以構件的平面尺寸決定抬升與運動空間的高度，其方向為矽基板表面以上，而其高度則可在同一片晶圓上設計不同尺寸。如圖 1c 所示，MOSBE 製程的運動空間則埋於矽基板表面之下，利用矽基板單晶與異向蝕刻的特性，能夠創造出尺寸精確的空穴，然而空穴的深度基本上在同一次蝕刻過程中是一致的。總結而言，MUMPs 微加工為矽基板表面以上的建築形式，並無利用到矽基板本身優異的加工特性。而 MOSBE 製程妥善利用了矽基板能夠進行乾式高深寬比深蝕刻及單晶矽的濕式蝕刻兩種重要特性來完成表面以下的建築。

2.2 基本元件

為了證明上述構想的實用性，以下將列舉數種由 MOSBE 製程平台所完成的從動元件、傳動元件、及致動元件，以及一些相關的元件性能測試結果。

● 從動元件及傳動元件 – 樑

關於 MOSBE 的從動元件及傳動元件，首先檢視最基本的樑結構。如圖 2a 所示為利用 MOSBE 製造的肋強化微懸臂樑的 SEM 照片 [18]，該樑是由 $0.9\ \mu\text{m}$ 厚的 PECVD SiN_x 所構成，其溝渠的深度 D 為 $0.9\ \mu\text{m}$ 寬度 w 為 $12\ \mu\text{m}$ 。為了比較 MOSBE 的肋強化微懸臂樑與傳統平面懸臂樑的剛性差異，具有同一材質的傳統矩形斷面懸臂樑同時被製造出來，如圖 2b 照片所示，其平面尺寸和厚度與肋強化樑相同。文獻 [18]

利用薄膜的殘餘應力來產生一等效的彎曲力矩，使微結構彎曲變形，以便比較兩種樑的剛性。由圖 2 之照片可明顯看出，MOSBE 的肋強化微懸臂樑較為平坦。透過商用的光學干涉式量測儀，可量測樑的彎曲曲率半徑，如圖 3a 所示為一長度為 $150\mu\text{m}$ ，寬度為 $30\mu\text{m}$ 之肋強化懸臂樑彎曲形變輪廓圖，而 A 點與 B 點分別代表懸臂樑的固定端及自由端(可參考圖 2 之標示)，量測結果得知其曲率半徑為 $2890\mu\text{m}$ 。圖 3b 之量測結果得知，對於同樣材質且相同長度和寬度的微懸臂樑，在相同的梯度應力作用下，其曲率半徑為 $490\mu\text{m}$ 。由此例得知，雖然蝕刻深度 D 只有 $0.9\mu\text{m}$ ，但已明顯地將肋強化懸臂樑的剛性增加約 6 倍。

● 從動元件 – 面鏡

面鏡一直是微系統領域中很關鍵的從動元件，其應用範圍包含微顯示器 [19]，條碼讀取器[20]，雷射印表機[20]，及光開關 [21] 等。上述這些應用所需要的，主要是大尺寸大扭轉角的光學面鏡，以作為光掃描器。但是，由於薄膜結構的剛性不足，使得面鏡因為靜態負載(static loads)如殘餘應力，或是動態負載(dynamic loads)如慣性力作用而形變。對顯示用途而言，面鏡的彎曲形變會降低顯示器的解析度 [19]，在光開關的應用上，面鏡的彎曲形變則會降低光偶合效率[22]。現有的改善方法是利用單晶矽的基材作為面鏡的結構來提昇其剛性，但是此一方式會大幅增加面鏡的質量而降低面鏡的操作頻率，因此其應用將受到限制 [23-25]。利用 MOSBE 製程可以在面鏡周圍製造肋強化環，以增加薄膜微面鏡的剛性與平坦度 [26]。而此一肋強化微面鏡的特點在於，增加剛性的同時僅微量增加其質量，而具有很好的剛性/質量比，因此很適合高頻操作的應用。

圖 4a 為 MOSBE 面鏡的示意圖，其中肋強化環的深度為 D 寬度為 w ，而其外徑與面鏡的有效孔徑(clear aperture)分別為 $2R_o$ 與 $2R$ 。圖 4b 所示為一典型的微面鏡之 SEM 照片，此微面鏡的直徑為 $700\mu\text{m}$ ，而中心面鏡的平坦區域約為直徑 $600\mu\text{m}$ 。圖 5 為微面鏡受到薄膜殘餘應力的作用而彎曲形變的形變輪廓量測圖。圖 5a 為傳統平面型薄膜微面鏡的量測結果，其中心處（直徑 $435\mu\text{m}$ 內）的形變量約為 $0.55\mu\text{m}$ 其曲率半徑在 X 與 Y 方向分別為 $\rho_x = 9.3\text{ cm}$ ， $\rho_y = 4.1\text{ cm}$ 。此一結果顯示扭轉軸所造成的邊界不對稱現象，使薄膜微面鏡的曲率半徑的異向性達 56%。而圖 5b 則為肋強化環設計的微面鏡($w = 30\mu\text{m}$ and $D = 15\mu\text{m}$)的量測結果，其中心處（直徑

435 μm 內) 的形變量降低為 0.1 μm ，而曲率半徑在 X 與 Y 方向分別增加為 $r_x = 15.3 \text{ cm}$ ， $r_y = 17.9 \text{ cm}$ ，且其曲率半徑的異向性降低為 12%，此一結果顯示，肋強化環可有效降低靜態負載(薄膜殘餘應力)所造成的形變。此外，量測結果顯示肋強化環面鏡的曲率半徑在 X 與 Y 方向相當一致，因此，此一結果證實肋強化環不但可改善面鏡的平坦度，亦可隔絕扭轉軸所造成的拘束力(constraint loading)。

- **從動元件及傳動元件 – 其他**

圖 6 所示為以 MOSBE 製程製造出構形豐富的微機械結構。如圖 6a 所示之縐褶支承平板，其皺折支承提供面鏡平板在垂直運動的運動自由度，而此時面鏡平板便可視為剛體而上下平移，而在外圍部分以肋強化樑與基板連結以免除額定外的形變量。值得注意的是此一結構由單層材料所構成，而其剛性對比與運動自由度的創造乃是藉由溝渠的寬度與分佈所決定。而如圖 6b 所示之折狀彈簧支承平板，其折狀彈簧提供了絕佳的出平面撓性，以探針挑動平板時即使其出平面形變達約 100 μm ，其依然能夠回復而不至斷裂，而具肋強化環的平板結構則可相對地被視為剛體結構。而如圖 6c 所示之扭轉微面鏡則體現了

扭轉方向的運動自由度。簡言之，利用整合薄膜製程與 DRIE 技術，可創造出一個數量級以上的加工深度對比，而在出平面的剛性對比則可達到 2 個數量級。而此對比性為薄膜堆疊技術所不能及的，也代表了其運動的精確性與多自由度。

總結上述之 MOSBE 複合式製程，其能夠提供的基本結構如圖 7a 所示之矽基平台。其中，如圖 7b 所示之肋強化樑，在水平及垂直方向都能提供相當大的剛度，可作為高剛性的結構。如圖 7c 所示之 X 軸撓樑，在垂直方向(Z 軸)上有較大的剛度而在水平方向上具有相當大的撓度，因此該結構適合作水平方向上的精確運動。如圖 7d 所示之 Z 軸撓樑適合作垂直方向上的精確運動，另外此結構與基板間由犧牲層所定義的小間距，可應用於電容致動或感測。如圖 7e 所示之扭轉軸則在水平、垂直與扭轉方向都提供相當大的撓度。

- **致動元件 - 靜電平板槓桿放大致動器(EDLA)**

如圖 1c 所示 MOSBE 可以在結構下方蝕刻一孔穴，使得元件的出平面運動不再受限於犧牲層厚度，因此利用這項特性，除了一般面型微加工製造的微致動器外，

MOSBE 平台還可以提供大位移的出平面致動器。另一方面，對於 MUMPs 致動器而言，輸出位移和驅動電壓仍有待改善。利用 MOSBE 平台可將微機械槓桿與致動器結合，而開發出一新式的靜電平板槓桿放大致動器(Electrostatic Driven Lever Actuator, 簡稱 EDLA)，如圖 8 所示 [27]。此 EDLA 致動器由面型微加工中最常見的平板電極作為驅動源，這種以面型微加工所製造的小氣隙的平板電極，具有操作電壓低，與出力大的特性。然而，位移量小是小氣隙的平板電極的缺點，因此 EDLA 致動器利用 MOSBE 平台，製造高剛性的槓桿臂結構，並以撓性接點相結合，以放大其端點之輸出位移。因此面型微加工的平板電極，其小氣隙雖然只有 2 ㎛m，但是經由槓桿機構的放大，使得 EDLA 致動器之輸出可高達數十 ㎛m。

2.3 系統與應用 - 動態微矽光學平台

透過 MOSBE 平台製程，可以利用如圖 9 之架構，將上述主動和傳動/從動元件整合成一微機械系統，並產生各種不同的應用。圖 10a 所示之微扭轉面鏡，即是一個典型的利用 MOSBE 製程所完成的微光機械 [28-29]，其中元件所佔面積約為 1.5mm×1.5mm，此微扭轉面鏡包含以下三種基本元件：(1) 致動元件：4 具 EDLA 致動器，(2) 傳動元件：2 個聯結器 (coupler)，及 (3) 從動元件：1 個直徑為 700 ㎛m 的平板面鏡。由照片可明顯發現，面鏡平板下方利用 MOSBE 平台所製造的凹槽，使得面鏡具有足夠的運動空間。另外，EDLA 致動器對稱配置於圖 10a 之微面鏡的兩側，透過聯結器可將致動器的線性出平面位移輸出，轉換為純扭轉輸出。因此面鏡在掃描時，不會產生擺動(wobble motion)，使得光學品質得以改善，如圖 10b 所示。

3 BELST 製程平台

雖然 MUMPs 或者是前節介紹的 MOSBE，已經可以製造多種不同功能的元件，但是這些平台所提供的都是薄膜元件，即使 MOSBE 可以改變截面形狀來增加剛性，這些薄膜所構成的結構和致動器，仍然有許多應用上的限制。因此研究人員嘗試各種加工技術來製造所謂 HARM 元件，以克服此問題，例如 LIGA、HexSil [30]、SCREAM [13,31]、SOI [32-33] 等等；然而，該類加工技術仍會衍生一些特有的問題。舉例而言，由於製程的一些特性，例如感應耦合電漿 (以下簡稱 ICP) 的深寬比/蝕刻率相依性 (Aspect ratio depended on etching, ARDE)、或稱之為蝕刻延遲(RIE Lag)問題 [34-35]，使結構的幾何尺寸如寬度或厚度受到限制 [36]。此外，由於 HARM 製程

之結構特徵，使其較適於同平面運動，而出平面運動本質上是受到抑制的，而且出平面方向致動力或力矩之來源亦不易產生。本節將介紹一種以(111)單晶矽為主體材料之“硼蝕刻終止輔助之矽側向蝕刻製程”(Boron Etch-stop assisted Lateral Si Etching process)，簡稱 BELST 製程 [36-37]，以期能克服現有的問題。

3.1 製程特性

如圖 11 所示為 BELST 製程平台製造流程 [37]，其整合了矽深蝕刻技術、(111)單晶矽製程、以及重摻硼矽(heavily boron-doped silicon)之蝕刻終止特性，輔以防護牆(Guarding wall)設計、凸角與凹角底切應用所衍生之硼支柱角落補償法、以及單一晶片多重結構厚度製造法；這些特徵，解決了(111)矽晶片製造 HARM 元件的許多問題。首先利用三道黃光步驟，成形出包括光阻、二氧化矽、與氮化矽三種不同遮罩材料，如圖 11a 所示，隨後依序進行第一次矽深蝕刻、移除光阻、以及第二次矽深蝕刻定義出主結構與上電極深度，如圖 11b-c 所示。接著進行如圖 11d 所示之深槽硼擴散步驟及第三次矽深蝕刻，其中擴散參數須達到能造成硼蝕刻終止效果之濃度要求，以使非{111}面之側壁能受到保護，至於第三次矽深蝕刻則有三個目的，其一是去除底部摻硼矽而留下側壁摻硼矽，其二是蝕刻出犧牲層深度，其三則是擇性的削薄下固定電極以及彈簧之厚度、以製造所需之上平面高度差，而蝕刻深度則由欲削薄深度來決定。最後使用矽濕蝕刻溶液對結構以側向蝕刻機制釋放之，便完成所有結構之製造，如圖 11e 所示。

● 硼支柱 (Boron post)

如圖 11d 所示之硼支柱(Boron Post)是 BELST 製程平台非常關鍵的一個多用途結構，基本上其是由摻硼矽所形成 [36]。硼支柱之主要用途是可以在最小的面積內、達成凸角底切時之角落補償(亦即底切防制)效果。如圖 12a 所示側邊為{111}面之六邊形，在其凸角部分加上前述之硼支柱，則由於重摻硼矽蝕刻速率很低、能使其處經歷較長時間不被側蝕，六邊形便不存在起始底切之凸角(convex corner)，而側邊又在{111}面上而無從被底切，於是該六邊形便可在最小的面積內達成角落補償之效果。由於擬釋放結構之寬度不再需要遷就地基之寬度，也不需考慮一般延伸角落長度之角落補償方式[38]，使得結構設計時，能避免(111)晶片製程之平面寬度限制問題。圖 12b 則為非六角平台之角落補償，可知即使平台之邊未對準到{111}面，仍能經由硼支柱位置

的適當定義，作出良好的底切抑制效果。

- **防護牆 (Guarding wall)**

為解決 HARM 元件所面臨的 ICP 加工深度誤差問題，BELST 平台提出防護牆 (Guarding wall) 之設計，此概念近似於 [39] 之深度控制方法，但實施上更為簡易且有效。如圖 13 所示，主體結構設計時仍盡量保持使其為等線距設計，但在其邊界上則設計加上一些各自獨立之防護牆，使其與外部空間隔開。如此一來，防護牆雖仍會受 ICP 蝕刻延遲影響而左右深度不均、但其保證了牆內主體結構之一致深度；由於防護牆各自獨立、且設計使不與地基處相連接，故其將在側蝕釋放過程中被移除掉，使得外部空間全部能夠淨空，如此不但解除了平面上運動空間之限制，並能減少等線距設計時所引入之寄生電容。另外值得一提的是，防護牆亦可設計使釋放後仍不脫離移除，視元件之需求而定。

- **多重厚度結構之加工**

相較於其他種類晶片，(111)矽晶片最大的特色是具有多重深度加工之彈性與側向蝕刻釋放之機制。BELST 製程巧妙地利用了此特點，實現了多重結構厚度結構之加工、以及製造上表面和下表面各具高度差的梳狀結構之能力。基本上其是利用包括光阻(對矽選擇性約 60)、二氧化矽(選擇性約 150)、氮化矽(選擇性約 30)等三種遮罩材料，以及摻硼矽之蝕刻終止特性，經由加工不同深度、不同厚度，而逐步建構出所需之上表面和下表面高度差。此使 BELST 製程不但能實現不同上表面高度之設計、如選擇性地改變彈簧結構剛性外，亦可達成垂直梳狀致動器之設計目標，如圖 11e 所示。

3.2 基本元件

以下同樣將列舉數種由 BELST 製程平台所完成的從動元件、傳動元件、及致動元件，以及一些相關的量測結果。

- **從動元件及傳動元件 – 樑、彈簧、軸承**

經由上述製造結果之說明，可證明關於地基尺寸限制與 ICP 蝕刻延遲現象可得到顯著之改善，故現有 HARM 製程之結構寬度與厚度限制可獲得大幅的釋放；基於上述結果，被動元件與主動元件之設計與製造將更容易實現。圖 14 所示之被動製造元

件結果中、包含了平移與扭轉兩種平面彈簧及其支撐的主體結構，其中在未設計任何蝕刻窗下，結構寬度雖已達 50 μm 以上，但仍可輕易釋放；而利用防護牆設計，使得平移彈簧不但結構厚而均勻，且在長等效長度下、仍未發現任一出現黏滯(sticking)或明顯出平面形變之製造結果。其次，由於礮支柱使得地基之小型化成為可能，而促成許多需要小地基之應用，例如圖 15a 應用於旋轉運動之軸承與可做位移控制之限幅器；另外，根據支柱內不同的形狀開口設計，其將產生如圖 15a 所示之扭轉自由度垂直彈簧，該結構乃是利用蝕刻延遲效應，僅用一道光罩便可完成之結構。圖 15b 所示之彈簧和結構之厚度有顯著的差異不同，藉此可以選擇性地改變彈簧的剛性。

● 致動元件

主動元件之典型的製造結果分別如圖 16a 所示之同平面線性運動梳狀式致動器，此致動電極具有斜梳狀之幾何外形，以增加靜電驅動力並維持所需之位移空間；圖 16b 所示則為同平面轉動梳狀式致動器，其致動電極具有圓弧狀之幾何外形，以便在轉動時維持電極間距。由圖中可見諸多 BELST 製程之特徵，包含礮支柱、小尺寸地基、厚而均勻結構、大的犧牲層間隙、以及無須設計為格狀之寬主體結構等；另外 BELST 製程設計因防護牆之故，主結構外之空間可如圖所示完全釋放，而能解除運動空間之限制及寄生電容等問題。除了同平面運動致動器外，BELST 製程也成功地完成出平面運動致動器；利用製造厚度差異的結構的製程特性，可完成如圖 17a 所示之梳狀電極，由於電極的高度差，造成垂直方向上之電場及靜電力，以產生出平面方向的驅動力。如果將這類型梳狀電極搭配扭轉軸，即可產生出平面扭轉運動如圖 17b-c 所示。

3.3 系統與應用 - 雙質塊共振器

● 微光學元件

如圖 17b 所示，將出平面扭轉運動致動器和面鏡結合，即可使面鏡依扭轉軸旋轉，然後作為光束掃描之應用。如圖 17c 所示，將出平面扭轉運動致動器和槓桿結合，透過致動器可調變槓桿臂的垂直位置，另外如圖示之光纖定位槽可用來進行光纖定位對準用。藉由槓桿臂垂直位置的改變，可調整定位槽之光纖傳遞的光強度，因此整個系統可作為光衰減器之應用。

● 雙質塊共振器

雙質塊共振器本質上是一個雙自由度之振動系統，在小電壓、大振幅之要求下，近年來常見其應用於微致動器的設計中 [40-41]。雙自由度系統相當於在原來之單自由度系統(primary system)中，再耦合一組彈簧-質塊次系統 (secondary system)、使兩質塊之動態產生相互影響。應用雙自由度系統於致動系統設計中，最重要的想法是能以原系統之小振動量，帶動次系統使產生更為放大之振動輸出量，如此將可獲得兩種好處，其一是若在一些致動器之位移行程受限的場合，其仍能利用致動器之小振動量來產生大振動輸出量；其二是放大率愈大者代表其需要之致動器振動量不需太大，故能使用較大出力之靜電致動器、如氣隙閉合型致動器來驅動，而可進一步降低驅動電壓。利用 BELST 製程平台，結合斜齒型梳狀致動器與雙自由度振動系統之雙質塊共振器之製造結果如圖 18a 所示。利用光學顯微鏡觀察雙質塊共振器之運動特性，其影像擷取結果如圖 18b 所示，各自由度上的振幅可以共振時產生之模糊區域 (blur area) 來概估，其放大率在 2~3。

4 結論

從這些年微機電系統發展的趨勢來研判，製程平台應該是一項加速微機電系統發展的利器。德州儀器公司雖然耗費了近二十年的時間，利用金屬結構層和高分子犧牲層所構成的面型微加工技術，成功地開發了由數十萬個微面鏡組成的數位光學處理技術(Digital Light Processing, 或簡稱 DLP)，並應用在已量產的投影機 [7]；然而，這套製程卻未能如 MUMPs 製程般，為微機電的發展，引領出一波風潮，其主要的原因是德州儀器公司並未將該微加工技術開放，並建構成製程平台。

由於機械的複雜特性，單一的製程平台很難滿足微機電系統操作時各種不同的要求。因此多元化的微機械加工製程平台，是一個很有可能的發展趨勢。為了滿足各種機械元件特性的需求，即使已有近十年歷史的 MUMPs 製程，仍具備很大的改善空間。以筆者實驗室最近的研究為例：對於 MUMPs 元件而言，為了克服犧牲層對活動空間的限制，一個強韌可靠的高度抬升及定位機構是相當重要的，Lucent 公司已提出一套利用殘餘應力抬升臂搭配高度定位機構，來抬升掃描面鏡以作為光開關之應用 [9]。然而，根據測試結果發現，該抬升機構會產生可靠度不佳及操作時面鏡擺動的問題 [42]；為了解決上述問題，筆者實驗室嘗試修改 MUMPs 製程，並成功地利用低應力氮化矽和多晶矽組成的雙層膜應力抬升臂，來仿製 Lucent 公司的三維光開關如圖

19a 所示，實驗證實該應力抬升臂提供較佳的可靠度，使面鏡維持一特定高度 [42]。另外，為了避免面鏡操作時擺動，也同時提出如圖 19b 所示之支撐架的設計，由於剛性大幅提昇，因此順利地解決了擺動的問題 [43]。

未來，除了希望微機電領域的研究人員，能夠利用現有之製程平台開發更多關鍵的元件，例如當初 MUMPs 製程的微絞鏈，為微機電領域的技術帶來關鍵性的突破外；也希望有更具特色，關鍵元件更完備及整合能力更強的製程平台被開發出來；更希望業界能協助建立並提供可靠的製程平台之服務，使得微機電系統的發展，在多種製程平台的帶動下得以加速地向前邁進。

5 參考文獻

- [1] H.C. Nathanson, W.E. Newell, R.A. Wickstrom, and J.R. Davis, Jr., “The Resonant Gate Transistor,” IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-14, pp.117, 1967.
- [2] R.T. Howe, and R.S. Muller, “Polycrystalline Silicon Micromechanical Beams,” Proc. Electrochemical Society Spring Meeting, Montreal, Canada, May 1982, pp. 184-185.
- [3] L.S. Fan, Y.C. Tai, and R.S. Muller, “IC-processes Electrostatic Micro-motor,” IEEE IEDM, San Francisco, CA, 1988, pp. 666-669.
- [4] W.C. Tang, T.C.H. Nguyen, and R.T. Howe, “Laterally Driven Polysilicon Resonators,” Sensors and Actuators A, vol.21, pp.328-331, 1990.
- [5] K.S.J. Pister, M.W. Judy, S.R. Burgett, and R.S. Fearing, “Microfabricated Hinges,” Sensors and Actuators A, vol.A33, pp.249-256, 1999.
- [6] <http://www.memsrus.com/cronos/svcsmumps.html>.
- [7] <http://www.dlp.com>.
- [8] <http://www.omminc.com/home.html>.
- [9] <http://www.bell-labs.com/org/physicalsciences/projects/mems/mems3.html>.
- [10] <http://www.microvision.com/home.htm>.
- [11] <http://www.sandia.gov/mstc/micromachine/overview.html>.
- [12] Z. Lisa Zhang and Noel C. MacDonald, “An RIE Process for Submicron, Silicon Electromechanical Structures,” J. Micromech. Microeng., Vol. 2, pp. 31-38, 1992.
- [13] K. A. Shaw, Z. L. Zhang and N. C. MacDonald, “SCREAM I: A Single Mask, Single-Crystal Silicon, Reactive Ion Etching Process for MicroElectroMechanical Structures,” Sensors and Actuators A, Vol. 40, pp. 63-70, 1994.

- [14] <http://www.sensor.com/>.
- [15] <http://www.ece.cmu.edu/~mems/projects/cmos-mems.shtml>
- [16] 林弘毅, “複合式微矽光學平台之研究與應用,” 國立清華大學博士論文, 2002.
- [17] 謝哲偉, “BELST 高深寬比微加工製程平台及其應用,” 國立清華大學博士論文, 2002.
- [18] H.-Y. Lin, and W. Fang, “ Rib-reinforced micromachined beam and it applications , ” J. Micromech. Microeng, vol.10, pp.93-99, 2000.
- [19] P. M. Hagelin, and O. Solgaard, “Optical Raster-Scanning Displays Based on Surface-Micromachined Polysilicon Mirrors,” IEEE Selected Topics in Quantum Electronics, vol.5, pp. 67–74, 1999.
- [20] M.-H. Kiang, O. Solgaard, R. S. Muller, and K. Y. Lau, “Electrostatic Comdrive-Actuated Micromirrors for Laser-Beam Scanning and Positioning,” J. of MEMS., vol.7, pp. 27–37, 1998.
- [21] L.Y. Lin, S.S. Lee, K.S.J. Pister, and M.C. Wu, “Micro-machined three-dimensional micro-optics for integrated free-space optical system, ” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 6, pp. 1445-1447, 1994.
- [22] V. A. Aksyuk, F. Pardo, and D. J. Bishop, “Stress-induced Curvature Engineering in Surface Micromachining Devices,” Proceedings of SPIE, Paris, France, March, 1999, pp. 984-993.
- [23] P.R. Patterson, G.-D.J. Su, H. Toshiyoshi, and M.C. Wu, “A MEMS 2-D Scanner with Bonded Single-crystallined Honeycomb Micromirror,” Proc. Solid-state Sensor and Actuator Workshop, Hilton head, SC, June 2000, pp. 17-18.
- [24] S.S. lee, R.P. Reid, and R.M. White, “Piezoelectric Cantilever Microphone and Microspeaker,” J. of MEMS, vol. 5, pp. 238-242, 1996.
- [25] J.T. Nee, R.A. Conant, M.R. Hart, R.S. Muller, and K.Y. Lau, “Streched-film Micromirrors for Improved Optical Flatness,” Proc. IEEE MEMS’00, Miyazaki, Japan, January 2000, pp. 704-709.
- [26] H.-Y. Lin, and W. Fang, “The Improvement of the Micro Torsional Mirror by a Reinforced Folded Frame,” ASME Proceedings of the 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exhibition (IMECE) , Orlando, FL, Nov. 2000.
- [27] H.-Y. Lin, H.-H. Hu, W. Fang, and R.-S. Huang, “Electrostatically-driven-leverage actuator as an engine for out-of-plane motion,” International Conference on Solid-State Sensors and Actuators - Transducer’01, Munich, Germany, 2001.

- [28] H.-Y. Lin, and W. Fang, "Torsional Mirror with an Electrostatically Driven Lever-Mechanism," IEEE Optical MEMS 2000 , Kauai, Hawaii, August 2000, pp. 113-114.
- [29] H.-Y. Lin and W. Fang, 2002, "A Reinforced Micro-torsional-mirror Driven by Electrostatic Torque Generators," Sensors and Actuators A, (accepted).
- [30] C.G. Keller and R.T. Howe, "HexSil Tweezers for Teleoperated Micro-Assembly," MEMS'97, Nagoya, Japan, Jan. 1997, pp.72-77.
- [31] T.D. Kudrle, H.P. Neves, D.C. Rodger, and N.C. MacDonald, "A Microactuated Millimeter Wave Phase Shifter," Transducers'99, Sendai, Japan, June 1999, pp.1276-1279.
- [32] M.E. McNie, D.O. King, and M.C.L. Ward, "Micromachining in SOI," Recent Advances in Micromachining Techniques (Digest No: 1997/081), IEE Colloquium, 20, Nov. 1997, pp. 5/1 -5/4.
- [33] J.T. Nee, Hybrid Surface-/Bulk-Micromachining Processes for Scanning Micro-Optical Components, Ph.D dissertation, U.C. Berkeley, 2001.
- [34] H. Jansen, M. de Boer, and M. Elwenspoek, "Black silicon method VI: High aspect ratio trench etching for MEMS applications," MEMS'96, San Diego, CA, Feb. 1996, pp. 250-257.
- [35] M. de Boer, H. Jansen, and M. Elwenspoek, "The Black Silicon Method V: A Study of The Fabricating of Movable Structures for Micro Electromechanical Systems," Transducers'95, Stockholm, Sweden, June 1995, pp. 565-568.
- [36] J. Hsieh, and W. Fang, "BELST Process for Improved High-aspect-ratio Silicon Micromachining and Its Applications," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 12, pp. 574-581, 2002.
- [37] J. Hsieh, C.C. Chu, J.M. Tsai, and W. Fang, "Using Extended BELST Process in Fabricating Vertical Comb Actuator for Optical Applications," IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS, Lugano, Switzerland, August 2002, pp. 133-134.
- [38] S. Lee, S.Park, and D. Cho, "The Surface/Bulk Micromachining (SBM) process: A New Method for Fabricating Released MEMS in Single Crystal Silicon," J. Microelectromech. Syst., vol.8, pp.409-416, 1999.
- [39] J. Kiihamaki, H. Kattelus, and S. Franssila, "Depth and Profile Control in Plasma Etched MEMS Structures," Transducers'99, Sendai, Japan, June 1999, pp. 858-861.
- [40] X. Li, R. Lin, and K. W. Leow, "Performance-enhanced Micro-machined Resonant

Systems with Two-degrees-of-freedom Resonators,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, pp. 534-539, 2000.

[41] H.-Y. Lin, H.-H. Hu, W. Fang, and R. S. Huang, “High Resolution Micromachined Scanner Mirror,” *Transducers'01*, Munich, Germany, June 2001, pp.1310-1313.

[42] 何亦平, “微結構自組裝技術之研究,” 國立清華大學碩士論文, 2002

[43] Y.-P. Ho, M. Wu, H.-Y. Lin, and W. Fang, “A Robust and Reliable Stress-induced Self-assembly Mechanism for Optical Devices,” *the IEEE Optical MEMS 2002*, Lugano, Switzerland, August 2002, pp. 131-132.