

利用矽晶片製造與整合微系統的思維與架構

方維倫，朱懷遠

國立清華大學動機系

1. 前言

微機電系統包含各種不同的微結構，例如一些不可動的探針、流道、孔穴等結構，或是一些可動的(剛體運動或是撓性形變)彈簧、連桿、齒輪等結構。將上述不同的結構和相關的電路相互整合，即可構成各種不同的應用。其中最具代表性的，就是以 MUMPs 面型微加工 (surface micromachining) 平台技術整合梳狀式致動器 (comb actuator)、面鏡、樞鈕 (hinge)、連桿等薄膜元件，構成多種不同的微光機系統 [1,2]。另一種常見的例子是，利用晶片接合的方式，整合體微加工 (bulk micromachining) 製造的微結構，構成多種不同的微流體系統 [3, 4]。簡言之，如何藉由製程，製造與整合各種不同功能的微機械結構，是評估該製程技術的關鍵指標，也是未來進一步邁向系統晶片時 (無論是單一化的 SOC，或是透過封裝的 SIP) 一項嚴峻的挑戰。因此本文將以筆者實驗室發展的實例，來說明如何利用體微加工技術，於矽晶片製造與整合微系統的思維與架構。

目前最常見的矽晶片的體蝕刻技術，主要是濕式的非等向性化學蝕刻 (anisotropic wet chemical etching) 以及乾式的深活性離子蝕刻 (Deep Reactive Ion Etching, 以下簡稱 DRIE)。前者發展迄今已有 30~40 年，該技術最主要的概念是，利用化學反應(濕蝕刻)的方式移除矽基材，其中蝕刻速率受到矽基材之結晶平面影響的非等向性蝕刻，是應用最廣泛的體矽微加工蝕刻技術。一般而言，非等向性濕式蝕刻具有兩項特色，首先是利用蝕刻速率最慢的 {111} 晶格面，來阻擋蝕刻的進行，以便在矽基材表面形成如孔洞、凹槽、甚至凸塊等結構；其次是利用凸角底切效應，來破壞 {111} 晶格面，然後製造懸浮的薄膜機械結構，如微懸臂樑或微橋式結構 [5,6]。然而，受到 (111) 晶格面的限制，利用矽晶片非等向性濕式蝕刻產生的結構，多侷限於一些特定的幾何形狀，例如：倒金字塔型，而沒辦法製造如圓形或三角形等外形之微結構。此外，由於凸角底切效應會導致許多微結構的 (111) 晶格面遭到破壞，而無法被順利製造，如方形凸塊 [7-10]。

另一方面，DRIE 則是近年來相當受到重視的非等向性體蝕刻技術 [11,12]，是其特性和濕式非等向性蝕刻有顯著的差異。簡言之，DRIE 是利用蝕刻的過程中所形成的保護層，來防止側壁被蝕刻，以達到非等向性蝕刻的目的，

因此蝕刻的結構形狀，不會受到晶格面的影響且沒有凸角底切的特性，因此可以蝕刻出任意形狀的孔洞或凸塊。另外，利用蝕刻延遲 (RIE lag) 的特性 [13,14]，還可以在基材表面製造多重高度，這點也是濕式蝕刻不易達到的。由於矽晶片的乾式深蝕刻技術日益成熟，矽晶片除了作為基材 (substrate) 外，也常被用來作為微元件的結構 [15,16]，其主要的原因有三點：(1) 使元件有較佳的材料機械性質；(2) 提供具備高深寬比的結構特性：例如具有較大的剛性 (stiffness) 及慣量 (inertia)；和 (3) 提供元件整合平台：直接蝕刻矽晶片，作為整合各種生光機電元件的平台 [17,18]，以實現系統晶片的目標。而早期較著名的有美國 Cornell 大學的 SCREAM 製程 [19,20]，以及新進的 SOI 製程 [21,22]，筆者也曾於 [23] 一文中介紹一種利用(111)晶片發展的 BELST 平台製程[24,25]，這些製程都是以乾式深蝕刻技術來定義矽結構的幾何外形。反之，因為沒有凸角底切效應，因此無法製造懸浮的薄膜微結構，且無法利用(111)晶格面來形成一些有用的結構。

綜觀上述兩種體矽微加工技術，皆僅能製造有限的微結構，然而，隨著應用的多元化，這些微結構逐漸無法滿足需求。筆者將於下文介紹一種整合前述兩種蝕刻技術的概念，從而衍生出兩種分別於適用於(100)矽晶片及 SOI 晶片的製程，並藉由製程結果來說明於矽晶片製造與整合微系統的思維與架構。首先，將探討一種新型的凸角補償結構及非{111}晶格面的濕式蝕刻屏障的設計 [26]。其次，利用上述凸角補償結構及濕式蝕刻屏障，實現一種結合濕式非等向性化學蝕刻和 DRIE 的體矽微加工製程平台 [27]。該製程平台可結合上述兩種非等向性蝕刻的特色，因此除了可製造由{111}晶格面構成之傾斜結構，及 DRIE 形成的非{111}晶格面的垂直結構外，還可以同時利用這兩種蝕刻終止面，將矽基材分割成多種不同形狀的三維結構；此外，該平台也具備屬於濕式蝕刻的凸角底切製造懸浮結構，以及屬於 DRIE 的具有多重高度之結構等特性。最後，利用相同的構想，可進一步將此二種蝕刻機制同時應用於 SOI 晶片[28]。由於此二平台可提供上述多種不同的元件，且可以在製程中整合這些元件以構成一複雜的系統或次系統，因此未來極有潛力成為一項重要的體矽微加工平台。

2. 濕式蝕刻之蝕刻屏障結構

誠如前節所述，對濕式體矽微加工技術而言，凸角底切效應和{111}晶格面蝕刻速率最慢，無疑是兩項最重要的特性。雖然此二特性，使許多微結構得以實現，然而，也由於此二特性給予濕式體矽微加工諸多限制。為了有效地克服這些限制，筆者架構出一種結合濕式非等向性化學蝕刻和乾式的深活性離子蝕刻矽基材的方式，以掌控凸角底切效應和控制非{111}晶格面的蝕刻速率。簡言之，在矽基材蝕刻的過程中，先利用不會產生凸角底切效應以及蝕刻速率不受晶格面影響的 DRIE 方式，製造各種不同的結構，如圖 1 所示，然後沉積或成長一層不易蝕刻的材料，例如二氧化矽、氮化矽、或者是硼蝕刻終止層，以便形成蝕刻的屏障。隨後再利用濕式非等向性化學蝕刻，進行矽基材的體蝕刻，如果將前述之蝕

刻屏障結構，如圖 1 所示，以柱子的形式安置在凸角附近的基材上，或是以薄膜的形式覆蓋於非{111}晶格面，則這些柱子或薄膜的蝕刻屏障結構可用來保護凸角及非{111}晶格面。如此便可以利用濕式化學蝕刻，製造出各種不同形狀如圓形或三角形的孔洞 (cavity) 或凸塊 (mesa)。此外，如果選擇性地安排圖 1 之蝕刻屏障的位置，則可以使沒有蝕刻屏障的區域，產生凸角底切，然後製造懸浮的微結構。純粹利用乾式的 DRIE 方式相較，該方法雖然可以避免凸角效應的缺點，製造各種幾何外形的孔洞或凸塊，但是，卻沒有辦法利用凸角效應的優點以及 {111}晶格面的特性，製造懸浮或具有斜面的微結構。

圖 2 所示為相關之製程示意圖，其基材為一般阻值之(100)矽晶片。如圖 2a-d 所示，首先以鍍膜、微影及 DRIE 等步驟，定義微結構以及柱子形蝕刻屏障的形狀與位置。其中，柱子形蝕刻屏障的高度，是由矽深蝕刻的深度所決定，也是未來可用來調整濕式化學蝕刻保護時間的主要參數。隨後如圖 2e 所示進行微結構以及柱子側壁之熱氧化步驟，以使非{111}面之側壁能受到二氧化矽薄膜的保護。如圖 2f-g 所示，將部分蝕刻遮罩移除後，即對晶片進行非等向性矽濕蝕刻，而欲保護的矽基材側壁，會由柱子形蝕刻屏障或是覆蓋於非{111}晶格面的抗蝕刻薄膜抵擋住，因此順利地蝕刻出圓形或三角形等多種幾何外形的孔洞或凸塊。簡言之，圖 2 的製程主要是利用矽深蝕刻的方式定義結構的平面(in-plane)尺寸，然而結構的出平面(out-of-plane)尺寸則是以非等向性矽濕蝕刻的方式定義，這點和傳統矽深蝕刻體微加工製程有一明顯的不同。另外，傳統的凸角補償方式，通常需要在凸角外部的周圍增加各種不同的平面結構，這些平面結構除了浪費空間外，其幾何外形也容易受到限制。圖 2 之柱形凸角蝕刻屏障，可成功地在凸角內部進行補償，以避免上述在凸角外部補償造成的問題。

圖 3~5 之電子顯微鏡照片顯示一些相關的製程結果。圖 3a 所示為經由圖 2 之製程所完成之 4 個具有 8 個凸角以及 4 個凹角之凸塊，除了右下方之凸塊的角落沒有任何蝕刻屏障，其餘 3 個分別在凸角內部及凸塊周邊，有各種不同設計之蝕刻屏障。製程結果顯示，在同為 4 小時的基材體蝕刻時間下，凸塊的深度約達到 50 微米，3 個具有角落蝕刻屏障的凸塊，都沒有發生凸角底切，唯有位於右下方沒有角落蝕刻屏障的凸塊，產生明顯的凸角底切。如果再比較 3 個具有凸角補償支柱的凸塊可發現，雖然 3 者之凸角補償支柱的形狀與位置都不相同，尤其是左下方之凸塊，僅在凸角及凹角處加上蝕刻屏障，然而在(111)晶格面所形成之蝕刻終止層的協助下，使得 3 者補償的效果大致相同。另一個例子是圖 3b 電子顯微鏡照片所示之圓形凸塊，同樣地，除了右下方之凸塊的角落沒有任何蝕刻屏障，其餘 3 個分別在角落及周邊有各種不同設計之蝕刻屏障。從電子顯微鏡照片可明顯觀察到，在相同的蝕刻時間下，右下方沒有蝕刻屏障的圓形凸塊，同為非 (111) 晶格面的蝕刻造成明顯的底切，另外左下方之圓形凸塊雖然在四邊也有局部之蝕刻屏障，然而仍有明顯的底切。唯有沿著圓週都受到蝕刻屏障保護的上

方兩個凸塊，才得以避免底切。當基材體蝕刻的製程完畢後，即可利用 BOE 去除表面之二氧化矽蝕刻屏障，得到如圖 4 所示之各種不同形狀之凸塊。

除了凸塊外，上述概念也可以用來協助製造各種形狀的孔洞。如圖 5 之電子顯微鏡照片所示為 4 個具有 4 個凸角以及 8 個凹角之孔洞，除了左上方之孔洞的凸角沒有任何蝕刻屏障外，其餘 3 個孔洞的凸角分別有各種不同設計之蝕刻屏障。製程結果顯示，在同為 4 小時的基材體蝕刻時間下，孔洞的深度約達到 50 微米，3 個具有角落蝕刻屏障的孔洞，都沒有發生凸角底切，唯有位於左上方沒有角落蝕刻屏障的孔洞，產生明顯的凸角底切。如果再比較 3 個具有凸角補償支柱的孔洞可發現，其結果和圖 3a 之情況相同，亦即雖然 3 者之凸角補償支柱的形狀與位置都不相同，然而在(111)晶格面所形成之蝕刻終止層的協助下，使得 3 者具有同樣的補償效果。

3. (100) 矽晶片製造與整合之微系統

根據前述之新型的柱形凸角補償結構及非{111}晶格面的濕式蝕刻屏障的設計，可進一步發展出一種結合非等向性濕式蝕刻和乾式的 DRIE，然後對(100)矽基材進行體微加工的製程平台。該製程平台可結合上述兩種非等向性蝕刻的特色，包括：(1) 凸角底切製造懸浮結構，(2) {111}晶格面構成之傾斜結構，(3) 多重高度之結構，和 (4) 可防止凸角及非{111}晶格面底切，因此得以完成如圖 6 所示之多種微結構。其中前二項屬於化學蝕刻的特性，後二項屬於深 DRIE 的特性。該製程平台主要是將前述之蝕刻屏障結構，僅安置在需要被保護的凸角附近或非{111}晶格面，以防止底切效應；反之，對於需要產生底切效應以製造懸浮結構的基材區域，或者需要由{111}晶格面構成傾斜結構的基材區域，則沒有蝕刻屏障結構的保護。此外，蝕刻屏障也可以用來分割孔洞或凸塊，而透過 DRIE 和濕式非等向性蝕刻，還可以在矽基材製造多重高度的結構。由於這些微結構都是利用相同的製程所完成，因此該製程具備製造及整合這些微結構的能力，如圖 6 所示。

3.1 製程設計與結果

圖 7 所示為該平台製程之示意圖，製程使用之基材為一般阻值之(100)矽晶片，首先仍和第二節的製程概念相同，亦即如圖 7a-d 所示，以鍍膜、微影及矽深蝕刻等步驟，定義微結構以及柱子形蝕刻屏障的形狀與位置。其中 DRIE 是用來定義後續之濕式化學蝕刻保護的側壁的深度，此平台還利用蝕刻延遲產生多重高度的變化，如圖 7d 所示。隨後則如圖 7e 所示，進行多重高度側壁之熱氧化步驟，形成選擇性的熱氧化保護層，使非{111}晶格面之側壁能受到保護。接下來以熱磷酸進行移除氮化矽，便能使第一層定義之二氧化矽和矽基材表面裸露出來，如圖 7f 所示。接著如圖 7g 所示，使用非等向性矽濕蝕刻溶液對結構以蝕刻機制釋放之，而結構欲保護的部分，會由選擇性的熱氧化保護層抵擋住。最後以

氫氟酸溶液將部分熱氧化側壁和多重高度結構之熱氧化分隔結構去除，形成各種多元的三維微結構，如圖 7h 所示。以下將由數種不同的製程結果，分別介紹這套製程平台可製造的一些基本結構，及其相對應的蝕刻屏障之設計。然後再於 3.2 節介紹如何整合這些基本結構於(100)矽晶片，以建立較複雜的次系統或系統。

- **各種形狀的厚結構與薄膜結構**

根據圖 7 之可製程可製造各種不同形狀的微結構，如圖 8 所示之圓形厚凸塊與薄膜懸臂樑。其中圖 8a 所示之圓形凸塊，是在濕式蝕刻之前，先由圖 7d-e 之步驟，於圓形凸塊之側壁產生 2 微米厚之二氧化矽蝕刻屏障，以避免圓形凸塊側壁之非{111}結晶平面，在蝕刻的過程中被破壞而造成底切。此外，對於一些擬懸浮之薄膜結構，則不需於圖 7f-g 之步驟時，在懸浮結構的側壁或凸角提供蝕刻屏障，以便利用凸角或非{111}結晶平面的底切效應來懸浮結構，如圖 8b 所示之微懸臂樑。

- **多重高度結構**

圖 7 之製程可透過 DRIE 和濕式蝕刻兩種蝕刻機制，來製造多重高度的微結構。其中，微結構多重高度的產生是由圖 7c-d 之步驟，利用 DRIE 的蝕刻延遲特性，藉由蝕刻開孔的尺寸差異，來製造不同高度的結構，而不同的蝕刻開孔是以 2 微米寬之距離作分隔，在經圖 7e 熱氧化之步驟後，將矽微結構完全轉變為二氧化矽微結構，最後在圖 7h 去除二氧化矽時，移除分隔結構形成完整的多重高度結構。如圖 9 之電子顯微鏡照片所示為 2 個具有 5 種不同高度的微結構。

- **具斜面之結構**

此製程平台除了可產生具有{111}晶格面之一般濕式蝕刻常見的 V 型槽 (V-Groove)、凸塊和孔穴外，還可以進一步利用垂直於晶片表面的蝕刻屏障，來分割傾斜於晶片表面的{111}晶格面，構成更富變化之傾斜結構。如圖 10a 之電子顯微鏡照片所示為利用一個「十」字型的蝕刻屏障，來分割{111}晶格面的例子。該結果顯示，經由分割可獲得 4 個錐形結構，這些錐形結構的垂直面是由蝕刻屏障所定義，而傾斜面則是由{111}晶格面所定義。另外圖 10b 之電子顯微鏡照片所示為利用一個「米」字型的蝕刻屏障，來分割{111}晶格面的例子。該結果顯示，經由分割可獲得 8 個錐形結構，這些錐形結構的垂直面和傾斜面同樣是由蝕刻屏障和{111}晶格面所分別定義。由於「十」字型和「米」字型相鄰的蝕刻屏障夾角分別為 90 度和 45 度，因此圖 10b 之錐形結構較圖 10a 銳利。如圖 10c 所示，錐形結構尖端的形狀，也可進一步藉由蝕刻屏障的形狀加以改變。

3.2 結構整合

圖 8-10 所示之各種元件，都是利用圖 7 之製程平台完成，因此可透過該平

台，來整合這些元件，以架構出同時具有懸浮薄膜、V 型槽、孔穴與各種形狀之凸塊的微系統晶片，以符合各種不同應用的需求。以下將列舉數個實例，來說明上述元件可能的整合方式。

- **整合懸浮薄膜、V 型槽、孔穴與凸塊之微系統**

首先如圖 11e 所示，利用前節的概念形成各種形狀之凸塊的側壁蝕刻屏障後，可於凸塊內部或者外部再定義其他懸浮結構和蝕刻區域，然後透過非等向性濕式蝕刻及其底切的特性，即可同時完成懸浮薄膜、V 型槽、孔穴與凸塊。其中，濕式蝕刻的時間將由凸塊的高度或者是懸浮結構完全底切(fully undercut)的時間決定，據此則可藉由孔穴的開口(opening)來調整其蝕刻深度。

如圖 11a 之照片所示為 V 型槽和孔穴位於一圓形的凸塊內，而圖 11b 之照片所示為 V 型槽上方還增加了懸臂樑及橋式結構。圖 11c 之照片所示則為 9 個圓形的凸塊位於一孔穴內，而圖 11d 之照片所示為 1 個方形凸塊位於一孔穴內，其中還有 4 種不同的懸浮薄膜跨接在凸塊與基材。由圖 11a-d 之孔穴及 V 型槽的側壁得知，這些具有{111}斜面結構的蝕刻阻擋層，都是由濕式蝕刻所形成，另一方面，方形和圓形凸塊的側壁則是由蝕刻屏障來保護，因此方形凸塊的四邊不需對準{110}的方向。如圖 12c 所示，則是圓形的孔穴內部分別有圓形、矩形和三角形之凸塊，這些圓形的孔穴彼此藉由 V 型槽相互聯通，圖 12a-b 是其中兩個孔穴及其內部凸塊的放大圖。

- **整合 V 型槽、孔穴與斜面結構之微系統**

此外，結合蝕刻屏障和{111}晶格面的概念，也可架構出 V 型槽、孔穴與斜面結構整合的微系統晶片。如圖 13a 所示，先以柱形蝕刻屏障保護各種形狀之孔穴的側壁，同時再利用蝕刻屏障切割孔穴內部的空間，然後透過非等向性濕式蝕刻，除了可完成 V 型槽、和孔穴外，也可藉由柱形蝕刻屏障來分割{111}晶格面，待除去蝕刻屏障後，即可在孔穴內部形成斜面結構。如圖 13b 之照片所示為 4 個錐形結構位於一圓形的孔穴內，該孔穴也分別和 4 道 V 型槽聯通，而圖 13c 則是 4 個錐形結構的放大圖。

- **整合 V 型槽與多重高度結構之微系統**

同樣地，結合蝕刻屏障、蝕刻延遲特性和{111}晶格面的概念，可架構出 V 型槽與多重高度結構整合的微系統晶片。如圖 14 所示，其中 V 型槽可由開口大小來定義固定的深度(如圖 14a 中的 d)，而多重結構高度是由蝕刻延遲特性，來達到不同的深度變化。能將這兩元件整合於晶片，便可用 V 型槽的固定深度作精確定位，又能製作出多重高度變化的微結構，如此一來，便可製作出兼具精確深度和多重高度的三維微結構。

由於上述元件皆由第二節之新型的凸角補償結構及非{111}晶格面的濕式蝕刻屏障的想法，延伸至圖 7 的(100)矽晶片製程平台所完成，因此可以同時將這些元件製造及整合在(100)矽晶片上，以構成一微系統，其結果如圖 15 所示。

4. SOI 晶片製造與整合之微系統

利用 SOI 晶片的矽微加工技術最主要的概念是，除了以前述之 DRIE 及濕式蝕刻等方式進行體矽微加工，另外還以化學蝕刻的方式，移除位於矽元件層和矽基材之間的二氧化矽絕緣層(或稱之為犧牲層)，使微結構得以懸浮。上述利用 DRIE 和蝕刻犧牲層來製造懸浮微結構，是一種非常簡便的加工方式，目前已被用來製造多種微結構。但是受限於 DRIE 的蝕刻特性，在結構的厚度方向(出平面方向)，仍然無法產生較多元的幾何外形。因此延續第三節討論之新型的凸角補償結構，及非{111}晶格面的濕式蝕刻屏障的想法，將其應用於 SOI 晶片上，架構出另一套不同於(100)矽晶片的體矽微加工製程平台。該 SOI 製程平台除了具備濕式非等向性化學蝕刻和 DRIE 兩種加工方式，所製造的多種微結構外，還可以利用 SOI 晶片上的矽元件層產生厚結構，使得微結構的外形更多元化。

利用 SOI 矽晶片作為製造與整合微結構的特色是，可同時利用矽基材和犧牲層的移除，因此得以完成如圖 16 所示之三種典型的微結構，包括：(1) 薄膜結構 – 由濕式蝕刻之凸角底切所製造，(2) 肋補強薄膜結構 – 由 DRIE 和濕式蝕刻之凸角底切所製造，和(3) 厚結構 – 由二氧化矽犧牲層之移除所製造。其中前二項屬於矽基材移除的特性，後一項屬於二氧化矽犧牲層移除的特性。該製程平台延續前述的概念，亦即在矽基材蝕刻的過程中，先利用 DRIE 方式定義結構的平面尺寸，然後沉積或成長濕式蝕刻的屏障結構，以保護凸角及非{111}晶格面，隨後再利用濕式非等向性化學蝕刻，進行矽基材的體蝕刻。如果再將 SOI 中的二氧化矽犧牲層移除，就可額外再由矽元件形成厚結構。圖 16 所示之三種結構在微元件的設計上，分別提供三種截然不同的機械特性，如薄膜結構有小的剛性和質量，厚結構則有大的剛性和質量，肋補強薄膜結構卻有大的剛性和小的質量。由於這些微結構也都是利用相同的製程所完成，因此該製程具備製造及整合這些微結構，以形成一平台技術的潛力，相信此 SOI 晶片體矽微加工技術將可製造更多變化的三維微元件與微系統。

4.1 製程與結果

圖 17 所示為 SOI 晶片體矽微加工製程平台之製程示意圖，製程使用之基材為低阻值之(100)SOI 晶片，首先以熱氧化的方式沉積二氧化矽，接著利用第一道黃光步驟進行結構定義，再以硼擴散的方式形成 P^{++} 的單晶矽蝕刻停止層；隨後去除二氧化矽後，沉積氮化矽和二氧化矽並進行第二道黃光步驟，以作為之後選擇性第二次硼擴散的遮罩；再沉積第二層的氮化矽，並以第三道黃光步驟成形出厚光阻之 DRIE 遮罩層，如圖 17a 所示。接著以此蝕刻遮罩進行第一次矽深蝕刻，

其中 DRIE 的深度為 SOI 晶片的元件層厚度，移除厚光阻後進行深度側壁之熱氧化步驟，形成選擇性的熱氧化保護層，以使非{111}面之側壁能在濕式化學蝕刻時受到保護，如圖 17b 所示。再如圖 17c 所示，移除第二層的氮化矽後，接著以第二道的蝕刻遮罩進行第二次矽深蝕刻，其中 DRIE 的深度為肋補強薄膜結構的補強厚度，再以深度側壁之硼擴散步驟，形成選擇性的硼擴散蝕刻停止層，以使在濕式化學蝕刻時能不被蝕刻。之後則如圖 17d 所示，移除第一層的氮化矽後，使用非等向性矽濕蝕刻溶液對矽元件層加以蝕刻成形，而欲保護的結構，則由選擇性的熱氧化保護層和硼擴散蝕刻停止層覆蓋住，以抵擋蝕刻液。最後如圖 17e 所示以氫氟酸溶液將部分熱氧化側壁和厚結構之二氧化矽犧牲層去除，形成各種不同剛性的三維微元件。以下將介紹由圖 17 之 SOI 製程平台所製造的一些元件，然後再介紹如何整合這些基本結構，以建立較複雜的次系統或系統。

● 各種形狀的薄膜結構與肋補強薄膜結構

首先，如圖 18 所示為一圓形凸塊，其上有許多薄膜懸臂樑和肋補強薄膜懸臂樑。形成圖 18 之結構的主要機制是在矽濕式蝕刻之前，先由圖 17b 之步驟，於圓形凸塊之非{111}結晶面側壁產生二氧化矽蝕刻屏障，以避免圓形凸塊側壁被濕式蝕刻破壞而造成底切。反之，對於一些擬懸浮之薄膜結構，則不需於側壁或凸角提供蝕刻屏障，以便利用凸角或非{111}結晶平面的底切效應來懸浮結構。而薄膜懸臂樑和肋補強薄膜懸臂樑是以硼擴散機制形成的，如此，除了可作為矽濕蝕刻停止層外，也可抵擋如圖 17e 所示之氫氟酸溶液釋放結構時的蝕刻。如圖 19 所示之肋補強薄膜彈簧，可發現原本的薄膜彈簧，經由圖 17c 之 DRIE 產生的厚度變化，將可增加薄膜結構的剛性至數個數量級。如圖 20 所示之不同剛性的微薄膜彈簧，即由上述概念，來調整 DRIE 的不同蝕刻深度(有 2 μ m、30 μ m 和 100 μ m)所產生的結果。因此，可藉由不同的 DRIE 深度，輕易地調變微結構的剛性，進而使元件產生不同的機械特性。

● 局部選擇性肋補強的微薄膜元件

除了可利用 DRIE 的深度來產生具有不同剛性之肋補強薄膜結構外，此 SOI 平台製程還可以利用微影的方式，定義肋補強結構的位置，以達到選擇性的肋補強的結構設計，使得單一元件具有局部的剛性差異，以構成更富變化且更優越之機械特性的微元件。如圖 21 所示為以二氧化矽薄膜製造的三個不同的扭轉面鏡，其主要由扭轉彈簧、支撐架、及面鏡所組成，其中圖 21a 之扭轉面鏡完全由薄膜結構所組成，沒有任何肋補強結構，圖 21b 之扭轉面鏡具有肋補強結構的扭轉彈簧和支撐架，而圖 21c 之面鏡則具有肋補強結構的扭轉彈簧和面鏡。藉此結構的局部剛性加強效果，可調變扭轉面鏡的掃描頻率，以及改良支撐架的穩定性。另外，圖 22 之電子顯微鏡照片所示，為利用硼蝕刻阻擋層構成的薄膜扭轉面鏡和薄膜雙軸面鏡，圖中顯示數種不同的肋補強結構位置的設計。在圖 22a 之薄膜扭轉面鏡上，可發現四個微扭轉面鏡分別在微面鏡、微扭轉軸和轉接處，作

局部結構的肋補強。而在圖 22b 之薄膜雙軸面鏡上，也可發現四個微雙軸面鏡在內外軸的兩組微面鏡和微扭轉軸上，分別在不同部位加上肋補強結構。因此這些微扭轉面鏡，將具有全然不同的機械特性。

4.2 結構整合

圖 18-22 所示之各種元件，都是利用圖 17 之製程平台完成，因此可透過該平台，來整合這些元件，以架構出同時具有各種不同剛性與質量之微結構的微系統晶片，以符合各種不同應用的需求。以下將列舉數個實例，來說明上述元件可能的整合方式。

● 薄膜熱致動器帶動高剛性結構的微元件

如果結合矽元件層和二氧化矽犧牲層蝕刻的技術，可同時將薄膜結構、肋補強薄膜結構與各種形狀之矽元件層厚結構整合於 SOI 晶片。如圖 23 所示，利用選擇性的熱氧化保護層的概念形成各種形狀之凸塊的側壁蝕刻屏障後，透過非等向性濕式蝕刻及其底切的特性，即可同時完成薄膜結構、肋補強薄膜結構與厚結構。如圖 23a 所示為薄膜結構所構成之同平面運動的熱致動器陣列，另外在熱致動器的一端還透過製程，和厚結構樑相結合。由此薄膜結構所構成的微熱致動器陣列，可提供大的位移輸出，而厚結構樑可提供高剛性，使得該元件可應用於微探針或微機械臂。圖 23b 所示則為薄膜結構所構成之出平面運動的熱致動器，在熱致動器的一端同樣透過製程和一肋補強薄膜面鏡或者厚結構面鏡整合，其中，薄膜熱致動器提供較大的掃描角度，肋補強薄膜面鏡或者厚結構面鏡則提供較佳的面鏡平整度等優點。

● 結合肋補強薄膜彈簧的微元件

利用濕式蝕刻之蝕刻屏障結構概念的 SOI 製程平台，也可將薄膜結構與肋補強薄膜結構結合於厚結構上。如圖 24 所示，成功地將肋補強薄膜彈簧結合在厚結構的微靜電梳狀致動器上，此微元件具有厚結構所產生的較大靜電力，又有肋補強薄膜彈簧所具備較佳的同平面和出平面剛性比。反之，薄膜彈簧的出平面剛性較差，而厚結構彈簧又有太大的同平面剛性，所以，將肋補強薄膜彈簧結合在厚結構的微靜電梳狀致動器上，會有更好的操作性能。

● 厚致動結構結合薄膜測試鍵的微機械測試元件

同樣地，利用此 SOI 製程平台，還可將厚致動結構與薄膜測試鍵整合於單一微機械測試元件，如圖 25 所示。有別於以往的微機械測試元件，將兼具大出力的微致動器和易測試的薄膜結構，相信如此結合的微機械測試元件，將更能便利地且直接地達到測試單晶矽的材料機械性質。

5. 結論

筆者於本文介紹一種整合 DRIE 與濕式非等向性蝕刻的概念，以結合此二蝕刻方式的優點，從而衍生出兩種分別於適用於(100)矽晶片及 SOI 晶片的平台製程，並藉由實驗結果來說明於矽晶片製造與整合微系統的思維與架構。簡言之，利用 DRIE 進行非等向性蝕刻，不會受到晶格面的限制，因此可以蝕刻出各種形狀的孔洞或凸塊；而利用濕式非等向性化學蝕刻，除了具有底切的特性，可以製造懸浮的薄膜外，還可以利用{111}晶格面構成斜面結構。最後，在蝕刻屏障結構的輔助下，該體矽微加工製程平台可以在(100)矽晶片上，製造及整合以下結構：(1) 任意形狀的凸塊和孔洞，(2) 懸浮結構，(3) {111}晶格面所構成的 V 型槽和孔穴，(4) {111}晶格面和蝕刻屏障所構成的斜面結構，和 (5) 多重高度結構，而 SOI 晶片則還可以額外再增加肋補強薄膜結構和厚結構，使體矽微加工的元件更多元化。由於上述製程平台只需要 2-3 道光罩，因此未來極有潛力成為重要的加工技術。

6. Reference

- [1] L.Y. Lin, S.S Lee, M.C Wu, and K.S.J. Pister, "Micromachined integrated optics for free-space interconnections," *Journal of Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 77, 1995.
- [2] E.E Hui, R.T. Howe, and M.S Rodgers," Single-step assembly of complex 3-D microstructures," *The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Miyazaki, Japan , January, 2000, pp. 602 –607.
- [3] R. Zengerle and M. Richter, "Simulation of microfluid systems," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol 4, pp 192-204, 1994.
- [4] M. Esashi, "Integrated microflow control systems," *Sensors and Actuators A21-A23*, pp. 161-167, 1990.
- [5] W. Fang and J.A. Wickert, "Post-buckling of Micromachined Beams," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol 4, pp 116-122, 1994.
- [6] W. Fang and J. A. Wickert, " Determining mean and gradient residual stresses in thin film using micromachined cantilevers," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.6, pp.301-309, 1996.
- [7] B. Puers, and W. Sansen, "Compensation structures for convex corner micromachining in silicon," *Sensors and Actuators A21-23*, pp. 1036–1042, 1990.
- [8] H. Sandmaier, H. L. Offereins, K. Kuhl, and W. Lang, "Corner compensation techniques in anisotropic etching of (100)-silicon using aqueous KOH," *Digest of Technical Papers,1991 Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*

(Transducer '91) , San Francisco, June 1991, pp. 24-27.

- [9] R. P. van Kampen, and R. F. Wolffenbuttel, "effects of (110)-oriented corner compensation structures on membrane quality and convex corner integrity in (100)-silicon using aqueous KOH," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 5, no.2, pp. 91–94, 1995.
- [10] X. Li, M. Bao, and S. Shen, "Maskless anisotropic etching-a novel micromachining technology for multilevel microstructures," 1997 Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators(Transducer '97), Chicago, IL, June 1997, pp. 699-702.
- [11] R. B. Bosch GmbH, U.S. Pat. 4855017, U.S. Pat. 4784720, and Germany Pat. 4 241 045C1, 1994.
- [12] K.-S. Chen, A.A. Ayon, X. Zhan, and S.M. Spearing, " Effect of process parameters on the surface morphology and mechanical performance of silicon structures after deep reactive ion etching (DRIE) ," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol.11, pp.264 - 275 , 2002.
- [13] 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.
- [14] 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," *Tansducers'95*, Stockholm, Sweden, June 1995, pp. 565-568.
- [15] K. E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Pro. IEEE*, vol. 70, pp. 420 –457, May 1982.
- [16] G. Kaminsky, "Micromachining of silicon mechanical structures," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B3, no. 4, pp. 1015 –1024, July/Aug. 1985.
- [17] S. S. Lee, L. S. Huang, C. J. Kim, and M. C. Wu, "Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, **1**, pp. 7 –13, 1999.
- [18] H. Toshiyoshi, D. Miyauchi and, H. Fujita, "Electromagnetic torsion mirrors for self-aligned fiber-optic crossconnectors by silicon micromachining," *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, 1, pp. 10 –17, 1999.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] J.T. Nee, Hybrid Surface-/Bulk-Micromachining Processes for Scanning Micro-Optical Components, Ph.D dissertation, U.C. Berkeley, 2001.
- [23] 方維倫, 謝哲偉, 林弘毅, 2003, 微機電系統製程平台及應用, 電子月刊, Vol 90, pp 93-114.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Huai-Yuan Chu, and W. Fang, “ A novel vertical convex corner compensation for wet anisotropic bulk micromachining , ” 17th IEEE MEMS International Conference, Maastricht, The Netherlands, January 2004.
- [27] Huai-Yuan Chu, and W. Fang, “ Bulk Micromachining Platform on (100) Silicon Using the DRIE and Wet Anisotropic Etching, ” 第七屆奈米工程暨微系統技術研討會, 台北, 九十二年十一月.
- [28] Huai-Yuan Chu, and W. Fang, “ Fabrication of 3D Microstructures and Microactuators on (100) SOI Wafer Using the DAWN Process, ” 17th IEEE MEMS International Conference, Maastricht, The Netherlands, January 2004.