

微機電系統

技術處 詹前疆

摘要：

微機電系統技術，為跨電子、機械、材料、光電等專業領域，產品應用廣泛，如軍事航太、生物醫學、光纖通訊、乃至工業用與消費之各式檢測、控制器等。根據市場調查，2002年全球市場規模有可能達300億美元以上，市場規模頗大。其生產方法主要是利用半導體製造技術，擴及精密機械加工技術、高能雷射加工技術、基體微加工技術(bulk micromachining)及表面微加工技術(surface micromachining)等，已為各國政府重視並投入大量經費研發。我國過去20多年半導體的發展，已經建立一定的設計、模擬及半導體製程、封裝測試之技術，對發展微機電系統有很大的幫助，工研院綜合產官學專家意見，歸納出具發展潛力的產品有微冷卻器、微晶片連接器、微質流控制器、噴墨印表頭、微光學讀取頭、電子鼻、基因晶片、血糖劑、DNA探針、微生化分析儀等。但願我國發展半導體技術及後續之光電技術能開花結果，當於全球取得一席之地之後，能再創一個新興產業，提昇現有產業之競爭力，以實現科技島目標。

一、前言

90年代半導體產業傲視所有高科技產業，紅透半天邊，所帶來的經濟效益有目共睹。人們追求高品質的生活水準，由於攜帶方便、輕、薄、短、小的產品，變成產品發展的趨勢。產品越做越小，精密度也越來越高，微機電技術(Micro Electro-Mechanical System, MEMS)乃應運而生，其特色在於整合各項相關技術，開發嶄新的產品，例如微小馬達、體內用藥裝置、微小發電機、微小實驗室等等，以造福人類。

二、微機電系統的意義

微機電系統(Micro-Electro-Mechanics-System, MEMS)係整合電子、機械、材料、光學等工程技術於一微小元件，使其具有一特殊功能的系統元件，我們亦稱之為微系統(Microsystem)。稱之微小是因為此一系統元件的尺寸非常小，內部結構以微米(μ , micro)計(一微米等於百萬分之一公尺)，外觀上亦很微小，例如：溫度感測器 $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ ，噴墨印表機之噴墨頭小於5mm，微小馬達小於一元硬幣，一片 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 大小的生物晶片上含有10個以上”生物實驗室”等等。近年來由於光學科技的進步與應用的廣泛，而整合至微機電系統內，稱之微光機電系統(Micro-Optic-Electro-Mechanics-System, MOEMS)。微機電系統元件整合電子電路、機械動力、光學元件等，提供完整功能，可說是麻雀雖小，五臟俱全。

國際上有人直接以MEMS稱之，亦有人以微系統(microsystem, MST)稱呼，主要是因微系統範圍較大，MEMS早期發展是以半導體技術應用在機械上，最近數年MEMS的發展已經擴展至微光電、醫學上，因此國際上漸有人以微系統稱呼之，如日本。本文採用一般稱呼，稱之為微機電系統。

歐盟為推動MEMS或MST技術的研發與商業化應用，於1992成立NEXUS(Network of Excellence in Multifunctional Microsystem)，其對MEMS的定義為：具有微米級的結構，及微結構所提供技術功能。微系統結合多個微元件成為一完整系統，而能提供一或多個特殊功能。

微機電系統不只包括傳遞電訊之信號，亦需製作電訊來源與/或用途之特殊功能結構，使具有回饋(feedback)系統的功能。如馬達(即致動器，將電能轉換為動能)、感測器(感測溫度、壓力、濃度、氣體等，將變化情形傳遞出去)等，因此，MEMS是三維結構，電子電路是二維結構。

MEMS的製造主要是使用積體電路製作技術，如應用沉積技術，在矽基板上覆蓋所需材料，利用微影技術將設計之圖案形狀先成形於矽基板，再利用蝕刻技術將所成形圖案顯現出來。重複這些步驟可完成所需結構。其與積體電路並存，均以矽為基板，相同利用成熟之化學沉積、離子植入、擴散蝕刻、微影等技術，兩者技術相通，應用不同。MEMS結構較複雜，含光學、機械功能，其設計、製造依產品應用不同而差異較大，需具想像力以解決各種用途、功能設計及製造等問題。

以物理現象來看，微電子是處理電子流動(flow)，而MEMS則處理流量(fluids)、加速度(acceleration)、光學(optical)以及電磁波。微電子可說是MEMS的大腦，MEMS內部的光機電結構是眼睛(sensor)、手臂(actuator)。積體電路與微機電系統比較如表1：

表1. 積體電路與微機電系統比較表

項目	積體電路	微機電
基板	矽基板	
元件	電晶體	感測元件 致動器 流質通道、閥、泵 光學鏡面
結構	二維	三維
物理現象	電子訊號	電子訊號 機械動作 化學反應 光學作用
製造	I.C.(沉積、微影、蝕刻)	I.C. LIGA(電鑄成型) Surface微加工 Bulk 微加工
封裝	TSOP QFP BGA Flip-chip	Flip-Chip 特殊加工

資料來源：交銀技術處_

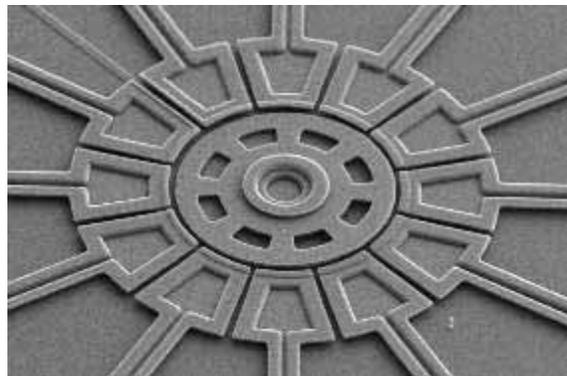


Figure 1. electrically-driven motors smaller than the diameter of a human hair

三、MEMS之應用產品

MEMS為跨專業領域的整合技術，可整合電子、機械、材料、資訊、光學、生醫等技術，使產品微小化、低成本化，達輕、薄、短、小的世界潮流。早期的應用以軍事、太空為主，商業化應用侷限在各式感測器、噴墨印表機噴墨頭、硬式磁碟機讀寫頭，近來擴及通訊電子、消費性電子、工業生產、儀錶、國防工業、生醫保健等，市場規模甚為廣大。

其應用領域大略可分成流質類(Fluidic MEMS)、機械類、及光電類。

1. 流質類：如氣壓閥(Valves)、薄膜泵(Pumps)、化學反應器(Reactors)、及流質、壓力感測器等；應用領域包括醫療、生化、藥用、化學等用途，因其微小化可增加可攜性與精度，降低成本，減少化學品或生物樣本之使用量，減少檢測時間。名稱及用途如下：
 - (1) 壓電微泵：德國 Insitutur für Festkörpertechnik(IFT)所發展，大小為7mm*7mm*1mm，能每分鐘打氣3ml或打水1ml，希望用於醫學用藥(drug delivery)裝置上。其主要結構是將壓電材料貼附在矽薄片上，形成泵結構，微泵的流量控制可由頻率與控制信號來達成。
 - (2) 微通道用藥器(micro-channel dosing)：其結構包括微流控制器、藥物儲存室、擠壓閥、溫度偵測器及微電子控制器。可用來可攜式用藥裝置，具極佳的重複使用性、微小性，可大量製造與精確的用藥量等特性。
 - (3) 阻抗生物晶片(Impedimetric Bio-Sensor)：用於衡量阻抗以偵測生物分子結構的鍵結親合力。DNA順序或抗體/抗原的存在與否，可經由檢視這些分子與所挑選的探針(Probe)之鍵結情形而得知。例如當抗體鍵結到抗原，電性改變會引起阻抗改變，故可由電子信號偵測出來。此方法之優點是不須標記或反應。
 - (4) 微壓縮閥(micro pneumatic valve)：此微閥含恆開矽微閥(normally-open silicon microvalves)與靜電致動器，為乾燥空氣方面之應用，大小為6mm*6mm*1mm。
 - (5) 矽微反應器：主要應用於分析儀器，其內含有固態反應劑(reagent)，例如抗體、抗原。反應劑物質是鍍在反應器週邊上，反應結果是在反應器內被偵測(on column)，或在反應器外被偵測(post-column)。微小化可減短擴散路徑，得到較高的表面/體積比率而加速反應速度，減少反應劑用量即易於控制流動性質。
 - (6) 微分析系統(micro total analysis system)：此係利用毛細管電泳(capillary electrophoresis)技術，以分離及分析溶液成份，在毛細管或微通道加上高電場，使溶液的成份分離，藉以分析其成份。此分析系統是在玻璃基板上形成微通道，使用深離子蝕刻(DRIE, Deep Reactive Ion Etching)、絕緣膜沉積、矽背面蝕刻等技術。

2. **機械類**：主要分成三個領域：**第一類**，是以物理機構(physical mechanisms) 直接感測如距離、拉力等，**第二類**，是針對無法直接由感測器偵測的應用(如加速度)，設計微結構(microsystems)使機械感測器能執行偵測，**第三類**，為致動動器，將電能轉為機械能，提供機械動作。機械類的應用產品主要是各式感測器，名稱及用途如下：

- (1) **低電流加速度感測器**：主要用於使用電池電力之監控與警報系統，如可用於休克的自動偵測紀錄、病人監視系統、震動現象、GPS系統、及鑽孔設備的傾斜控制等，由三片矽晶圓製作而成。其工作原理為 $F=ma$ ，(F為力，m為質量，a為加速度)，當加速(a)時，將產生一力(F)，使得元件內的懸棒(beam)受力而彎曲，懸棒上的焦電電阻觸及底下的支撐物，加速度即被感測出來。
- (2) **壓力感測器**：有兩種方法製作，其一是在SOI(Silicon On Insulator)上以基體微加工(bulk micromachining)製作。元件約6mm*6mm，在無溫度補償下，具很好的線性，也可在-20度至160度攝氏溫度下工作，應用範圍為地球物理、航太、工業程序控制等。其二在SOI晶圓以表層微加工(surface micromachining)技術加工，此技術所製作之元件約1mm*1mm，操作溫度為攝氏 -40度至125度，應用於醫療用途。
- (3) **壓電電阻器**：此乃利用壓電效應(加一應力於某一物質，此物質的電阻會改變的現象)。壓電電阻器很容易在矽晶圓上製作出來，只要在矽晶圓上doped一層不純物質形成p-type或n-type即可。
- (4) **壓電電阻感測器**：於壓電材料上施以外力，將使壓電材料之表面產生電流，藉著壓電材料晶體上電動勢的量測，可以推算出所加外力的大小。一般是用氧化鋅與PZT($PbZrTiO_3$ ，鉛、銻與氧化銻之化合物)作為壓電材料。
- (5) **電容感測器**：兩片導電片間之電容(C)，與其面積成正比，而與兩片之間隔距離(d)成反比，即 $C=eA/d$ ，(e為係數，如兩平面間無其他物質，其值為 $8.9E-12$ F/m)。利用此原理可製作出很小的間隔距離變化所產生的電容變化。
- (6) **聲納感測器**：製作一個在共振頻率下會產生震動的棒子(beam)或橋(bridge)，因共振頻率造成之變形，將可由所植入的壓電電阻感測器或光學元件偵測出來。
- (7) **微致動器(microactuator)**：

微致動器主要用於：驅動聲納感測器；移動微鏡面以掃描雷射光束；轉換光束從一光纖至另一光纖；驅動手術工具之切削元件；驅動微流質、微分析儀器之微泵及閥；或用於神經手術上微電子元件，以激發神經組織。

微致動器大致可分為靜電(electrostatic)、磁性(magnetic)、壓電(piezoelectric)、液壓(hydraulic)、及熱敏(thermal)等，其中壓電類與液壓類較被看好；靜電類最普遍，發展性較佳，但面臨磨耗與黏性(stick)問題；磁性類須較大的電流；熱敏類須大電力，同時所產生之熱量須排放出去，是其缺點。

製作上，若元件表面光滑時，將不易用黏貼(sticking)或冷焊(cold welding)方式將部分元件製作到另一元件上，因會產生摩擦力；另外從濕蝕刻槽取

出元件時，液體表面張力可能大到將元件黏住，這些問題都須克服。

3. 光電類，目前已有的產品名稱及用途如下：

- (1)光碟機讀寫頭
- (2)高密度波長分波多工器(DWDM系統，如：thin-film-filter(TFF) 薄膜濾波器、Arrayed waveguide grating(AWG) 陣列波導光柵、Filter bragg gratings(FBGs) 等
- (3)微鏡片(Digital Micromirror Device，DMD)
- (4)衰減器(Attenuator)
- (5)等化器(Equalizer)
- (6)多工器(Multiplexers)
- (7)微鏡交換器(Micromirror switch)
- (8)微流質交換器(Microfluidic switch)

四、MEMS的製造技術

微機電所使用之技術統稱之為微工程(micro-engineering)，意即以3D製成微米級結構與元件，包括微電子(micro-electronics)，微機械(micro-machinery)，微電子是在矽晶片上製作電路，是已經很成熟的技術，微機械是製作微工程結構與可移動元件之技術，目前尚開發中。微工程技術主要目標是將微電子電路整合至微機械結構中，產生完全整合系統，此系統具備如同矽晶片之低成本，高可靠性及小尺寸優點，有關所需製造技術種類如下：

(一)Excimer Laser(準分子雷射)：是一種ultra-violet雷射，可在各種材料下用來製作微元件，其特色是使用時不會對材料產生過熱造成材料的燃燒或蒸發，因此適用於有機材料如薄膜(polymer)的切削。如圖2，最簡單的方式是以雷射光直接照射在含鉻的光罩上，俾便製作所需結構(a)，較複雜結構則需於光罩下加裝鏡片以放大影像(b)。

圖 2

(二)LIGA：為德文Lithographie，Galvanoformung，Abformung之縮寫。使用X光曝光，再將曝光部分蝕刻去除，利用鑄模方式製作出金屬元件。簡言之，它用來製作模型(mold)，以方便大量生產。LIGA之應用主要係因MEMS結構中，為了加強結構強度或增加元件的電致動性或磁致動性，結構必須朝高深寬比(aspect ratio)，複雜的3D形狀發展，LIGA可以提供較高的深寬比。LIGA製程(圖3)，主要應用為光纖之高精度定位結構、微小馬達、齒輪、導波元件、

光纖連接器、微光電元件、微流質元件，閥、pumps、熱交換元件、微反應器、及光電感測器等。

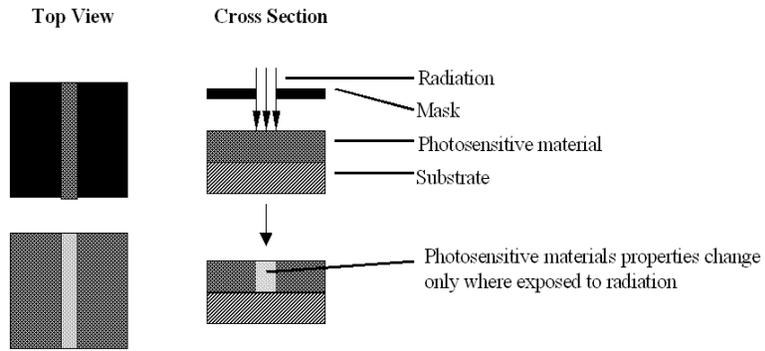


Figure 3-1: Transfer of a pattern to a photosensitive material.

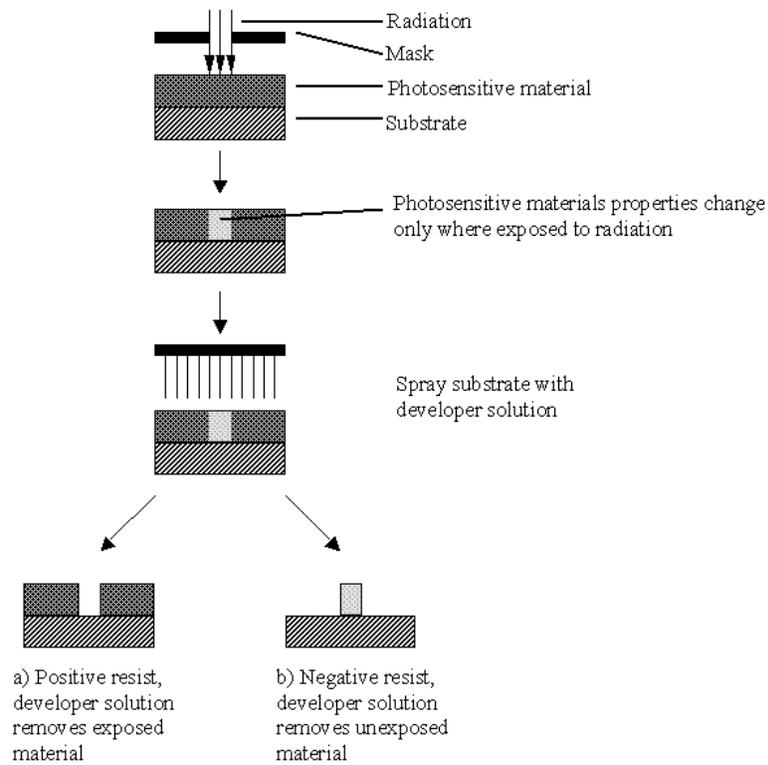


Figure 3-2: (a) Pattern definition in positive resist,
(b) Pattern definition in negative resist.

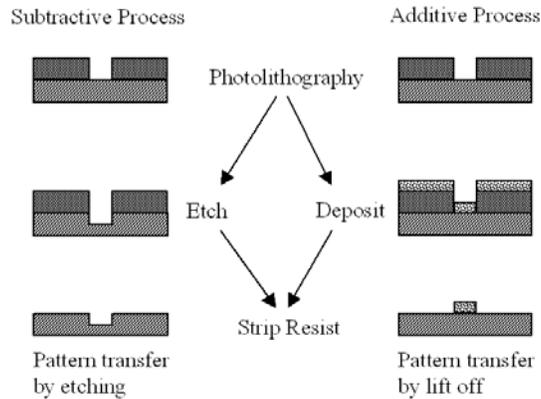


Figure 3-3: (a) Pattern transfer from patterned photoresist to underlying layer by etching, (b) Pattern transfer from patterned photoresist to overlying layer by lift-off.

圖 3

(三) 基體微加工 (Bulk Micromachining) :

指去除基體(bulk)之材料 (substrate material) 以製作坑、洞、齒狀，使用濕蝕刻或乾蝕刻方式進行。

1. 濕蝕刻(wet etching) :

可用 Anisotropic (異向性) 或 isotropic (同向性) 蝕刻，Anisotropic 蝕刻 之方向是依照材料結晶結構進行，也就是不同的材料或純度會產生不同的蝕刻速率；isotropic 蝕刻 的方向則對各種方向均以相同蝕刻速率進行。

使用 KOH 蝕刻液 做 Anisotropic 蝕刻可以很容易的在晶圓上形成 V 形溝槽或製成具尖狀 (tapered walls) 的坑洞，如圖 4

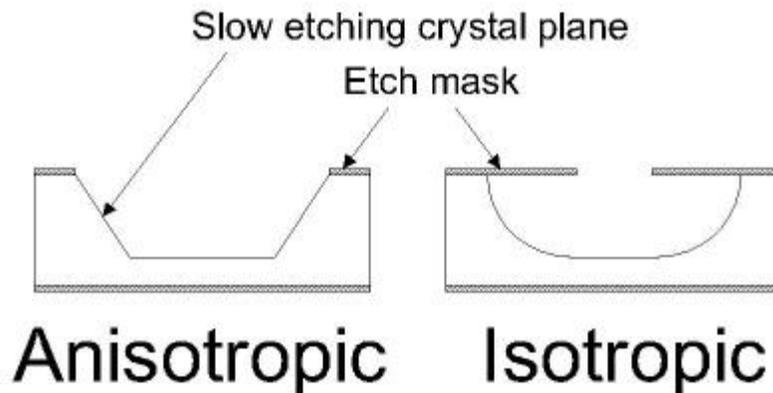


Figure 4: Difference between anisotropic and isotropic wet etching.

KOH液也可製作上面平坦，兩邊斜角(mesa)的結構，如 。如想製作直角，須另在各角落製作補償結構，待形成mesa結構後再蝕刻去除之，而成90度直角，如圖5。

圖 5

用KOH液也可在整片晶圓上做出厚度50微米之矽橫隔膜(silicon diaphragms)，厚度可以用蝕刻時間來控制。較薄的橫隔膜(20微米)，可用硼(boron)擴散至矽上，改變矽之純度，以阻止KOH液的蝕刻，此方法可以得到很精確的厚度。矽橫隔膜是壓力感測器、加速度感測器之基本結構。

此種依照濃度改變蝕刻速率的方法也可製作窄橋、懸樑，如圖6，左邊是一窄橋，右邊則是懸樑(一邊騰空之窄橋)。橋或懸樑是架在對角以方便KOH液的蝕刻。橋或懸壁之應用之一是聲納感測器。

圖 6

2. 乾蝕刻：最普通的方法是用反應式離子蝕刻(Reactive Ion Etching, RIE)，離子往被蝕刻的材料方向加速，產生化學反應而達蝕刻目的。不同材料如矽、氧化矽、氮化矽等都可蝕刻出深溝槽與洞穴(達數十微米)，不同於anisotropic 濕蝕刻方式，RIE不須在矽晶圓上生長單晶層，如圖7。

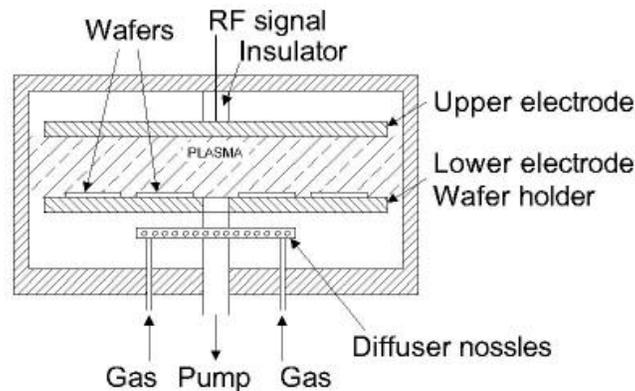


圖 7

3. 結合乾蝕刻與isotropic濕蝕刻可以用來製作尖點，首先用RIE形成垂直柱，然後用濕蝕刻將蝕刻光罩(etch mask)下物質蝕刻之，以形成尖點，如圖8。

圖 8

4. 乾蝕刻與濕蝕刻之比較：濕蝕刻與乾蝕刻各有優缺點，其所使用之設備大異其趣，濕蝕刻之蝕刻深度較易控制，也較均勻，但設備較貴；乾蝕刻則在整合電子電路、二維之元件圖案及設備費用上較具優勢。如表2

表 2

5. 蝕刻之特性：

- (1) **isotropic etching(同向性蝕刻)**：isotropic 蝕刻的方向則對各種方向均以相同 蝕刻速率進行。光罩未覆蓋處將自表面進行蝕刻，但光罩底下亦受波及，此叫邊蝕刻或底部蝕刻(side etching or undercutting)，如果控制得當，邊蝕刻的數量大約等於蝕刻深度，此方式叫isotropic etching。如圖9：

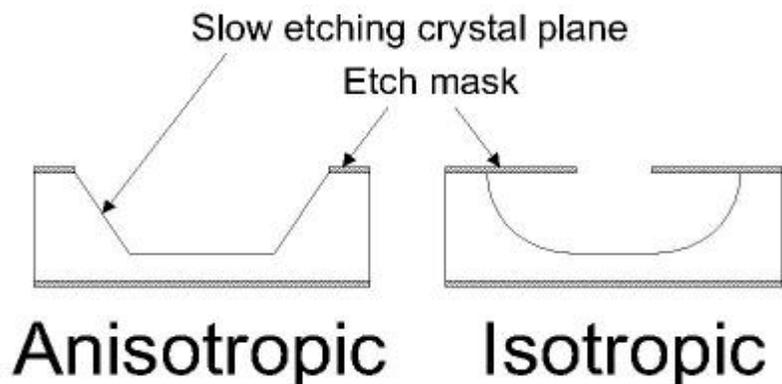


圖 9

- (2) **anisotropic etching(異向性蝕刻)**：，Anisotropic 蝕刻之方向是依照材料結晶 結構進行，也就是不同的材料或純度會產生不同的蝕刻速率；蝕刻僅朝向光罩未覆蓋處進行，而不會做side etching。一搬來說，此法可以做到深加工，故適用於製作微機械元件。如圖10。

圖 10

(四) · Surface Micromachining

指在矽晶圓基板上以蝕刻或沉積方式製作元件。例如要做一個微馬達，如圖11，有一星狀旋翼(rotor，直徑小於0.1mm)被向外延伸的stator所包圍，在旋翼中心做一支撐軸(shaft)以固定rotor位置並固定於基板上。此三個零件(rotor、stator、shaft)均是多晶矽薄膜，厚度約1微米(0.001mm)。當加以壓力，rotor與stator間會產生電磁吸引力，rotor邊緣離開stator，產生circumferential component of force(旋力)，使rotor旋轉。

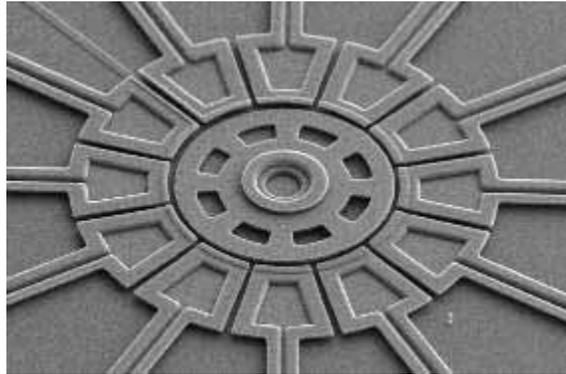


圖11 微馬達

然而此種馬達商業價值低，因其旋力低、高速rotor不易利用、及軸承(bearings)很容易即可應用在此系統。但美國Analog Device 公司應用此技術於車用加速度感測器上，如圖12，製作H形塊，掛在基板上方約1微米處，僅4隻腳連到基板上。當加速度加在基板上左右兩邊，4隻角偏斜，中心棒位移斜至一邊，此位移造成梳狀電極發生差異，而可偵測出來。另外，經由加一靜電至梳狀電極，可以避免位移而達到伺服控制目的。目前已經可以整合電路、伺服控制、放大器及機械結構於一單晶片。

圖 12

Surface micromachining 亦可用於金屬基板，Texas instrument 的 DLP(Digital Light Processing) 即是。TI 之 DLP 是在一片 DLP 元件上有上百萬個微反射鏡片，每一鏡片都由彈簧支撐，並可做約 10 度的轉角。鏡片與彈簧由鋁薄膜製成，而犧牲層則是高分子(polymer) 物質，鏡片轉變角度是由靜電驅動，每一鏡片的動作都個別由矽基板上的電晶體控制，光經鏡片反射投影至牆壁上。此元件已經廣泛使用於投影機上。

Surface micromachining 之優缺點：

優點：

- 機械結構可與電子電路整合
- 使用 surface micromachining 技術製作之結構，其元件數量可以較少

缺點：

- 薄膜的物理特性較難控制
- 當去除犧牲層時，薄膜結構往往會黏住基板
- 薄膜之強度較差。

(五) 其他加工技術：例如切削、研磨、拋光、放電加工、及電子束製程等精密加工技術，傳統上即用於製作 3D 結構，目前的技術已經可達微米級的精密度。

五、國內發展：

(一) 政府及研究單位：

國內 MEMS 技術的研發，過去主要以政府資金所支持的學術單位與研究單位為主，1990 年-1996 年共投入新台幣約 5 億元，執行 350 人年的研究計劃；1997 年至 2000 年再投入 25 億元，1550 人年，由國科會與經濟部負責經費的編列，國科會針對大學等學術單位，經濟部則對政府與研究單位，分頭進行。為推動 MEMS 技術的發展，國科會於 1998 年成立北、中、南各成立區域性研究中心，北區研究中心設於台大，中區設於清大，南區設於雲林科技大學。而經濟部則主要支援工研院。

台大：開發電容式微加速度感測器、微共振迴轉儀(micro resonator gyroscope)

清大：主要研究微流質，開發微閥(micro valves)、微泵(micro pumps)、及微流質感測器等

交大：開發各型熱驅動機構、壓電薄膜致動器

同步輻射研究中心：與清大共同研究 LIGA 技術及其應用

雲林科技大學：微放電加工、3D 結構射出成型、及 MEMS 之 CAD/CAM 研發

成大：開發人工義肢

台北科大：開發微波元件

中山科學院：開發 IR 感測器，微磁場感測器、微流質系統、微氣相層析儀

工研院：設有三個次實驗室，分別為 surface silicon micromachining、bulk silicon micromachining、及 electroforming & micro-molding，以開發濕/乾蝕刻技術、沉積技術、微影技術、氧化/擴散/回火技術、封裝/測試技術、各種 surface micromachining 技術、電鑄液/製程控制技術、電鑄設備設

計、電鑄去模技術，精密模具設計技術、及設計模擬技術等，主要的載具(driver)有血糖測試器、不須冷卻之熱像感測器、壓力感測器、氣體感測器等

(二)民間企業：

- 微邦科技：微結構、LIGA
- 全磊微機電：微系統封裝、測試
- 希華晶體：微構裝
- 晶宇生技：生物晶片
- 國際聯合科技：噴墨印表頭
- 科強精密：微流質控制器
- 華新麗華：各式感測器
- 環隆電氣與勝華科技公司合資：微機電製程代工
- 興隆發電子公司：光學鏡面結構

六、結語

微機電系統技術為跨專業領域之整合技術，包括設計與模擬技術、半導體製程技術、微結構/微感測/微致動等技術。[國內過去20多年半導體的發展](#)，已經建立一定的設計、模擬及半導體製程、封裝測試之技術，[對發展微機電系統有很大的幫助](#)。根據工研院分析，我國發展微機電系統具很大的機會與優勢，[工研院亦綜合產官學專家意見，歸納出具發展潛力的產品有微冷卻器、微晶片連接器、微質流控制器、噴墨印表頭、微光學讀取頭、電子鼻、基因晶片，血糖劑、DNA探針、微生化分析儀等，值得國人投入](#)。但願我國發展半導體技術及後續之光電技術開花結果，於全球取得一席之地之後，能再創一個新興產業，提昇現有產業之競爭力，以實現科技島目標。

參考資料：

- 1.”我國微機電系統技術發展現況與展望”，電子月刊，1999/7月
- 2.”微感測器及其應用”，電子月刊，1999/7月
- 3.”MEMS Development in Taiwan”，ATIP98.007
- 4.<http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/>
- 5.http://itri.loyola.edu/mcc/mems_eu/
- 6.”美國MEMS市場分析”，工研院機械所 1999/01/06
- 7.<http://dvrak.mse.vt.edu/faculty/hendricks/mse4206/projects98/group09>
- 8.http://www.imm-manz.de/english/sk_a_tec/basic_te/
- 9.<http://www.itri.org.tw/mems/english/commonlab/>
- 10.<http://home.earthlink.net/~trimmerw/mems/>
- 11.”MEMS programs at DARPA” by William C. Tang, Ph.D.
- 12.<http://www2.ece.uiuc.edu/~ece371c1/handout1/handout1.html>
- 13.<http://www.imsas.uni-bremen.de/service/>
14. Micromachine, No.31,32,33
15. MicroOptoElectro Mechanical System At DARPA, Overview Briefing, by Dr. Elias Towe