

第十四章 奈米機電系統技術

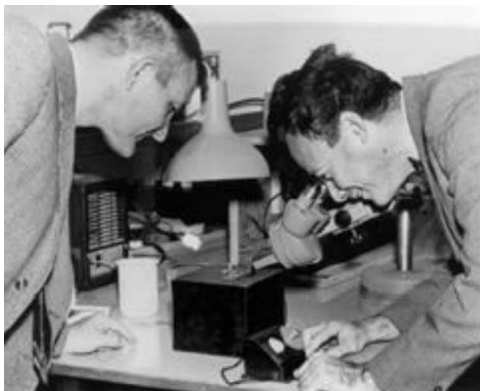
14.1 前言

當微機電系統縮小至奈米境界時，一連串新奇的應用技術與嶄新的物理世界正展現在我們眼前⁽¹⁾。

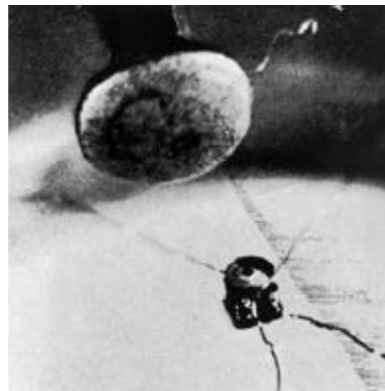
14.1.1 回顧與演進

在 1950 年代後期，一位有遠見的科學家理查·費曼 (Richard Feynman) 向世人丟出一個議題，懸賞美金 1000 元看誰能先做出比 1/64 英吋還小的電動馬達。當時有一位年輕人 William McLellan，以手工使用鑷子和顯微鏡成功地研發出一微小型電動馬達⁽²⁾，如圖 14.1 所示。

McLellan 的馬達現仍存放在加州理工學院 (California Institute of Technology) 展示，而當時費曼激起世人研究超微小領域的想法，也一直在許多大學、實驗室甚至在工業界持續



(a)



(b)

圖 14.1 (a) 理查·費曼 (Richard Feynman) 以顯微鏡觀看由 William McLellan 所製作小於 1/64 英吋的微馬達。(b) 此 0.39 mm 寬的馬達在光學顯微鏡下的照片，上方的巨大物體是針頭⁽²⁾。

著。於 1980 年代中期建立了穩固基礎的微機電系統 (MEMS)，時至今日已經可以量產出比當時 McLellan 的原型還要小的馬達 (如圖 14.2)。回顧微機電的技術，已經陸續研發出一系列的產品應用在真實生活中，例如從單槍投影機中包含著數以百萬計的靜電式微鏡片 (micro-mirrors) (圖 14.3)，到汽車裡啟動安全氣囊的感測器。



圖 14.2 以微機電技術製作的靜電力微馬達⁽²⁾。

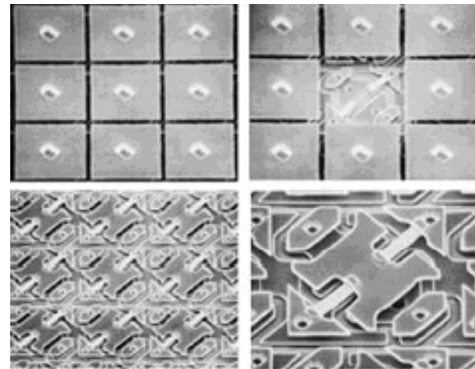


圖 14.3 靜電式微鏡片，目前存放於德州儀器 (Texas Instruments) 的 Digital Light Processor 中心⁽²⁾。

微機電系統代表著半導體製程與機械工程在尺寸上非常精微等級的結合，且過去十年來這個領域正以極驚人的速度成長著。現今晶片已達到線寬 $0.09 \mu\text{m}$ 的程度。美國半導體公司的司庫智囊團—半導體製造技術產業聯盟 (Semiconductor Manufacturing Consortium, SEMATECH) 預言晶片在 2010 年時的特徵尺寸可下降至 70 nm。

面對如此的要求與進步，將現今主流的電子技術從微米尺度提升到奈米 (nanometer) 等級的時刻已逐漸成熟，奈米機電系統 (nanoelectromechanical systems, NEMS) 的研究在全球正逐步地展開。這項研究可使包含醫學、生化科技到量子力學等諸多不同領域的基礎大大地獲益。

從微機電技術演進到奈米機電技術及奈米科技 (nanotechnology)，再進步到分子電子 (molecular electronics) 科技，其過程請參見圖 14.4 所示。圖中的小插圖所代表的是在該領域之技術指標，若干小插圖是經過長達十年的研究才完成的。從圖 14.4 左下角的微機電技術 (MEMS) 開始，從下方順時鐘方向算起的第一張圖是一個靜電馬達，這個指標是戴聿昌博士 (現任教於加州理工學院) 所完成的，從此微機電的領域就擴大展開。接著第二張小插圖是一個齒輪組，由美國 Sandia 國家實驗室所製造。此一研發成果顯示，在大世界裡的機器，從引擎到連桿傳動元件，幾乎都可以用微機電技術來完成。圖 14.4 中第三張小圖為台灣大學微機電中心張培仁教授所完成的電感，再來就進入了奈米機電技術。圖 14.4 中

MEMS 上面第一圖是微機電製造之探針陣列，第二圖是一個矽材料的樑結構，高度及寬度大約是一微米。圖 14.4 中 **MEMS** 上面的第三張圖是費時超過十年的研究成果，係利用奈米機電技術所製成。當微結構的尺寸從微米到奈米階段就有很多不同的物理、電子以及化學現象，這些不同的現象以前只能透過量子力學及統計力學加以評估，如今可利用奈米機電技術製造出這樣的實驗結構並進行量測，才證實了熱傳導量子化現象，這也是一個具有歷史指標的現象。再往圖 14.4 右看是從奈米機電走向奈米科技時出現的許多新科技，像原子力顯微鏡及掃描探針顯微鏡的發明，使得奈米科技又向前大幅躍進。圖 14.4 **NEMS** 之右圖是 **IBM** 的掃描探針顯微鏡將原子的結構排列出來。**NEMS** 右邊第二張圖，同樣利用掃描探針顯微鏡把鐵原子排放在銅板上，發現電子在此會發生駐波的現象，這又是可以證明質點具有粒子及波動行為的一個重大實驗。**NEMS** 右邊順時針第三張圖表示可用掃描探針技術進行顆粒的移動甚至疊層等。「Nanotechnology」下方第一圖為奈米碳管被折彎的量測圖，接著就要朝分子電子的方向走，「Nanotechnology」下方第二圖是奈米碳管構成的單電子元件，再下方的小圖則為奈米碳管之 2×2 開關。

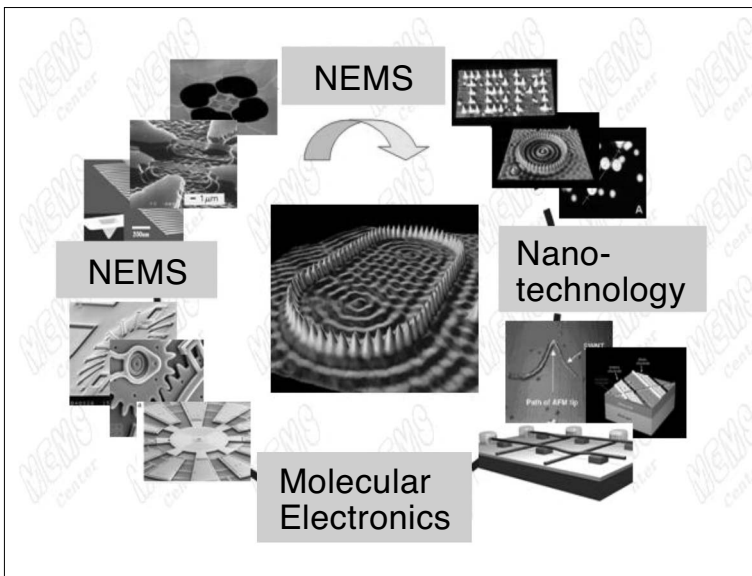


圖 14.4

微機電技術演進至奈米機電技術、奈米科技，以至分子電子技術。

14.1.2 微／奈米機電系統

當機械元件受一外力作用時，其反應不是變形就是振動。要量測這種「類靜力 (quasi-static forces)」時，量測器通常須具備非常小的彈性係數，以致於一個微小的外力即可造成其很大的變形量。而隨時間變化的力最好是以低耗損的機械式共振器 (low-loss mechanical resonator) 來量測，因為此共振器對於小振幅的振盪訊號會產生較大的響應。

多種機械元件可以用來量測靜力或隨時間變化的力，這些元件包含了扭矩平衡、用在掃描式探針顯微鏡的懸臂樑 (cantilever)，和兩端都固定的樑。為了追求相當高的靈敏度，有時會使用更複雜的儀器，例如複合式共振結構 (compound resonant structure) 可以用來擷取橫向的、扭矩式的及縱向式的振動模式。

在微機電或奈米機電系統中所使用的感測器，可以將機械能轉換成電子或光學訊號，反之亦然。然而在某些狀況下，輸入感測器只是簡單地將機械元件的振動保持穩定，而當系統受到干擾時將其特徵顯示在螢幕上。在這樣的狀況下，不同於輸入訊號的干擾正是我們想要量測的，這些干擾可能包含了會影響儀器機械阻尼的壓力變化、會影響奈米級共振器質量的化學吸附物，或是會影響彈性係數及內應變的溫度變化，後面這兩個狀況對系統的淨影響是改變振動的頻率。

通常微機電系統元件的輸出可以是機械元件的移動，以下是兩個主要響應的形式：元件只能在受外力的情況下偏移，或是元件振盪的振幅可以改變。今日機械元件中使用的感測器是以一連串物理機制作為基礎，包含了壓電及磁效應的影響 (magnetomotive effect)、奈米磁力 (nano-magnet) 和電子穿隧 (electron tunneling)、靜電學和光學⁽²⁾ 等。

14.1.3 奈米機電系統的特點

奈米機電元件對於極小位移和極小的力，特別是針對分子等級的量測，有著革命性的改革。奈米技術已經可以製作出百億分之一克 (10^{-18} g) 且截面積為 10 nm 的微小元件，這樣的製造技術對於基礎量測及特殊技術的應用有著重大的貢獻。

機械系統依自然角頻率 (natural angular frequency, ω_0) 振動，其自然角頻率可以下式表示：

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m_{\text{eff}}}} \quad (14.1)$$

其中 k_{eff} 是有效彈簧常數 (effective spring constant)， m_{eff} 是有效質量 (effective mass)。假如等比例地縮減元件的尺寸，自然角頻率會隨著線尺度 (linear dimension, l) 的減小而增加，因有效質量 (m_{eff}) 正比於 l^3 ，由以上的敘述可以推論：有效彈簧常數 (k_{eff}) 正比於 1 。以上推論直接說明了高響應頻率與響應時間和外力的關係，亦說明了欲達成快速響應不需要剛性很好的結構。奈米機電元件的特點分述如下⁽²⁾。

1. 以最進步的 10 nm 級奈米微影技術 (nano-lithography) 可製造出基礎頻率高於 10 GHz 的共振器，這樣高頻的元件是空前的，包括了微波頻率的低耗能機械式訊號及新型式的快速掃描探針技術，可應用於基礎研究，或甚至可做為機械式電腦研發的基礎。
2. 奈米機電系統的能量逸散非常低，而此特徵與系統的品質因子 (Q factor) 有關。因此，

NEMS 對於外部阻尼機制非常靈敏，而此機制對於許多感測器的製作亦非常重要。除此之外，類比於電阻之強生雜訊 (Johnson noise) 的熱機雜訊 (thermo-mechanical noise) 反比於 Q ，因此高 Q 值對於共振性的和偏移性的感測器以及抑制隨機機構上的變動有著極高的貢獻，而使得這些 NEMS 元件對外力的靈敏度提高。

3. 超小的有效質量及轉動慣量的變化對於 NEMS 的影響亦是很重要的，這使得 NEMS 對於外加的質量有著驚人的靈敏度，世人所可以做出的最靈敏儀器，可被附著於儀器表面上數個原子的質量所影響。
4. NEMS 的小體積對於空間上的要求相當嚴格，而且 NEMS 的幾何外形可被修飾成只對某一特定方向上的外力有所反應，此種彈性特性非常適合新型掃描式顯微鏡探針 (scanning probe microscope probe) 之設計。NEMS 元件本質上是低耗能的元件，這項度量可由熱量除以響應時間 (response time) 來決定，而響應時間為 Q/ω_0 。舉例來說，當溫度在 300 K 時，在 10^{-18} W 等級使用的 NEMS 只會被溫度擾動所影響。因此在 10^{-12} W 級下驅動的 NEMS 其訊雜比 (signal-to-noise ratio) 會達到 10^6 。即使有一百萬個這類型的儀器同時在 NEMS 訊號產生器上操作，整個系統的總能量逸失不過是百萬之一瓦。以上說明了 NEMS 在能量上低耗損的特性與傳統上藉由電子來回穿梭的電子微處理器的不同，基本上來說，NEMS 的能量耗損是遠低於後者的。
5. NEMS 或 MEMS 的元件可從矽鎵砷化物或銻砷化物中製造，而這些物質與其他物質的相容性正是電子工業的基礎。因此，一些輔助性的 NEMS 元件，例如感測器，均可與這些電子元件製作於同一個晶片上，意味著晶片將更趨複雜並具有更多的功能。

14.2 奈米機電系統的元素

MEMS 或 NEMS 製程與半導體製程具有許多相似性及相容性，其製程技術皆是先以一結構材料當作基材，經過薄膜沉積、光罩、微影、蝕刻封裝及測試等製程，製造出微/奈米尺寸的結構。若結合電子束微影 (electron beam lithography) 技術及微機電加工製程，可製作完成次微米至奈米尺寸的單晶矽結構，因尺寸微小，使得材質本身的晶體結構接近完美狀態。以共振頻率在微波範圍而言，此類次微米結構具有極高的品質因子與機械強度。

這些製程可重複好幾次並結合不同的沉積步驟，以製造出更複雜的微/奈米結構。此種彈性的製程可使異質結構的層數達到幾十層，因此若包含控制和量測技術的元件在內，微/奈米結構將更趨複雜化及高功能化。

14.2.1 奈米機電機械共振器

圖 14.5 為利用電子束微影製成的矽材料奈米懸臂樑結構，長 $7.7 \mu\text{m}$ 、寬 $0.33 \mu\text{m}$ 及高 $0.8 \mu\text{m}$ 。圖中四周較大的結構是它的電極或是用來固定的部位，可看到下面蝕刻後所產生

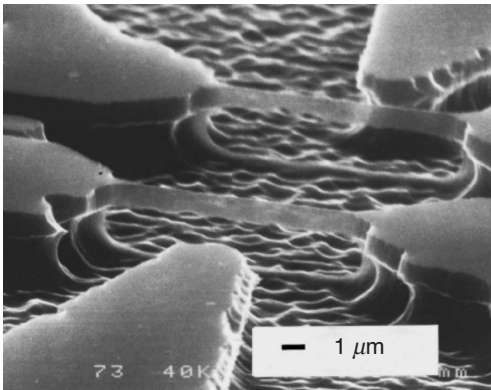


圖 14.5 持續地改善微奈米製程可以進一步地達成更理想的奈米結構⁽³⁾。

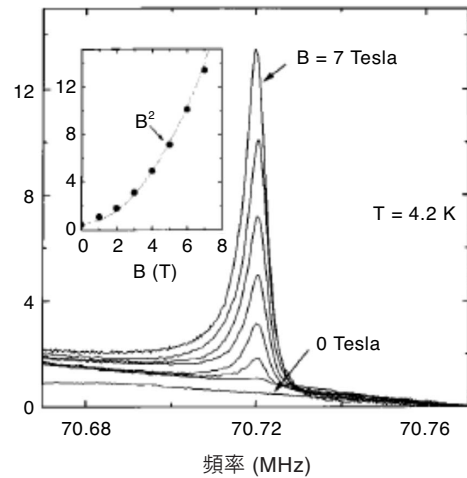


圖 14.6 溫度 4.2 K、磁場強度範圍 0—7 T、驅動振幅 10 mV 時，圖 14.5 所示之結構被誘導出之電磁力為驅動頻率的函數。(註：在共振頻率時，被誘導出之電磁力為磁場強度的函數；附圖之縱軸坐標與主圖相同。)⁽³⁾

的波浪粗糙面。其中困難的地方不只是在於它的寬度只有 $0.33 \mu\text{m}$ ，在進行直樑的蝕刻步驟時，須要在樑的兩側面及上面加上保護層，蝕刻後會剩下高度 $0.8 \mu\text{m}$ 的部分。以此為例，其共振頻率是 70 MHz，而品質因子非常高，為 20,000。高品質因子代表共振的時候會有極大的振幅。在奈米機電的應用上，可以利用它的超高頻率及可量測極小力量的能力。此外還有一個優點，就是阻尼 (damping) 值非常小，因此在共振時可以彈跳很高。

利用上述的技術，即能製作出矽材料的樑。在 4.2 K 的溫度下量測這些結構的共振特性，首先將樑置於真空中，用超導線圈外加一垂直長軸方向的磁場。使用金為電極，將之連接到一載具晶片，再經由短的銅線連接到不鏽鋼同軸電纜，將訊號傳至室溫下的分析系統。分析系統驅動一交流電，軸向通過待測的樑，交流電通過方向垂直的磁場即會產生勞倫茲力 (Lorentz force)，使得樑在垂直電流和磁場的方向振動，而樑的運動在磁場中會產生電動勢 (EMF)，量測系統便可量測此電動勢而得到樑的共振特性。圖 14.6 為此一實驗的量測結果。樑的機械共振頻率 (mechanical resonance frequency) 可由下式得到：

$$f = 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{L} \quad (14.2)$$

其中 E 為楊氏係數， ρ 為密度， t 為振動方向之樑寬， L 為樑之長度。

量測了數個不同幾何形狀之樑的基頻，其響應頻率在 400 kHz 至 120 MHz 的範圍之間，品質因子則在 10^3 – 10^4 之間。圖 14.5 中的樑在 0 至 7 T 磁場中的響應顯示於圖 14.6，其中響應頻率為 70.72 MHz，品質因子以 Lorentzian 曲線來作響應形狀的逼近計算後，約為 1.8×10^4 。圖 14.6 中的小插圖顯示磁場所感應的響應峰值是一磁場的函數，而且正如所預期的，被激發所產生的電動勢大小為磁場的平方倍。

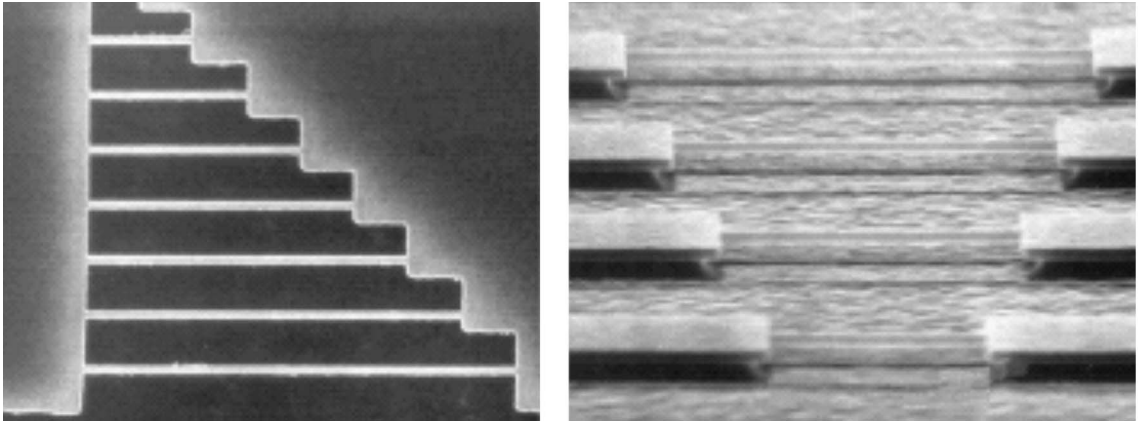
14.2.2 奈米機電撓性共振器

撓性共振器 (flexural resonator) 的製作需要結合光學蝕刻微影術和電子束微影術，目前在奈米的研究領域中，電子束微影術的重要性之所以提高，是因為光學微影術的解析度受限於光的繞射極限，而電子束微影術以高能電子直接穿透到樣品內，擁有焦距深度大、可高度自動化與精確控制操作，且不需經由光罩即可直接於晶片上雕刻出圖形等優點，使它製作出奈米的光阻幾何圖形。雖然電子束微影術的解析度不受限於繞射 (因為相對應 keV 能量電子的波長小於 1 Å)，但卻受限於電子散射。當電子穿透光阻層及基板時發生碰撞，而使能量散失並改變途徑，是故電子束曝光點的周圍亦引發輻射 (散射結果)，此現象稱為「近接效應 (proximity effect)」。近接效應決定了兩柱型圖樣相隔的最小空間。光學蝕刻微影術適用於較大面積的圖形定義，電子束微影術則可製作共振器的金屬電極。

碳化矽 (SiC) 是非常重要的半導體與機械元件材料，在頻率要求相當高的奈米裝置中，也是很好的材料，因為它可以同時兼顧很高的振動頻率與靈敏度，相較於其他材質，也具有較好的化學穩定度。微米級的 SiC 可使用體型微加工 (bulk micro-machining) 與面型微加工 (surface micro-machining) 製作。

奈米級的 3C-SiC 則採用另一種新的製程，並不使用濕蝕刻。圖 14.7 所示的懸臂樑特別採用了乾蝕刻，可以避免濕蝕刻所引起之表面張力的潛在瑕疵，更可以免去適應臨界點的溫度限制。該製程首先在 1330 °C 下利用常壓化學氣相沉積 (atmospheric pressure chemical vapor deposition, APCVD) 法在 100 mm 直徑的 Si (100) 上附著 259 nm 的單晶 3C-SiC 膜，其中矽甲烷 (silane) 和丙烷 (propane) 是製程氣體 (process gases)，氫氣為載流氣體 (carrier gas)，接著進行大面積接觸的光學蝕刻，然後將 Cr 蒸鍍在 Si 上，再進行標準的剝離 (lift-off) 製程，接著在 Cr 樣品鋪上兩層 PMMA，再用光學微影蝕刻進行平面圖形之定義 (patterning)，經過曝光顯影後將 30–60 nm 的 Cr 蒸鍍上去，再用丙酮進行標準剝離，最後利用非等向性電子迴旋共振電漿蝕刻 (anisotropic electron cyclotron resonance (ECR) plasma etching) 將 Cr 光罩圖案轉移至 3C-SiC 下面 (使用的電漿流量及氣體為 10 sccm NF_3 、5 sccm O_2 、10 sccm Ar，在 3 mTorr 的壓力下，蝕刻的速率大約為 65 nm/min)。

垂直蝕刻裝置的部分則利用等向性 ECR (electron cyclotron resonance) 對 Si 進行選擇性局部蝕刻 (使用的電漿流量及氣體為 25 sccm NF_3 、25 sccm Ar，在 3 mTorr 下，偏壓 100 dc)，而且發現單獨的 NF_3 或是單獨的 Ar 並無法對 SiC 進行蝕刻，用此種蝕刻可以讓懸空結構和基底的距離在 100 nm 之內。



(a)

(b)

圖 14.7 兩端固定的碳化矽 (SiC) 懸臂樑，(a) 寬 150 nm、長 2–8 μm ，(b) 厚 600 nm、長 8–17 μm ⁽⁴⁾。

將 Cr 光罩用 ECR 蝕刻移除後，將剩下的裝置金屬化，接著上電極，熱蒸鍍上 5 nm Cr 和 40 nm Au，在大面積接觸的地方則蒸鍍上 5 nm Cr 和 200 nm Au。裝置完成後在 4.2–295 K 的低溫恆溫器中進行超導體螺旋管的磁場量測，其頻率大約分布在 6.8–134 MHz， Q 值則介於 1000 和 10000 之間，而研究發現，在室溫下所得之 Q 值只比低溫下量測的低 4–5。由 SiC、Si 或 GaAs 材料所製成之相似結構樑 (長 L ，寬 t) 的振動，樑內部本身的應力對頻率的影響並不顯著，圖 14.8 顯示長度 8 μm 、寬度 600 nm、厚度 259 nm 的樑在溫度 20 K 下的量測反應，亦即共振頻率隨有效幾何尺寸因子 (effective geometric factor, t/L^2) 變化的情形。

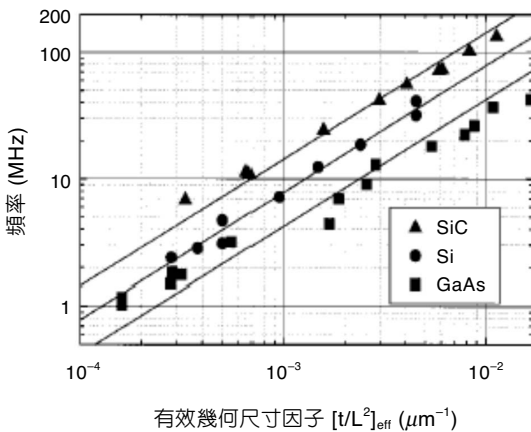


圖 14.8

SiC、Si 及 GaAs 三種材料之共振頻率對有效幾何因子的關係圖，所有裝置的圖形所定義的軸都沿著 $\langle 100 \rangle$ 面，實線是利用最小方歸法所畫出之近似線⁽⁴⁾。

當撓性共振器共振元件外接一些電路，將元件置於一交叉電場內，再讓電流通過共振器上金屬薄膜，由於勞倫茲力 (Lorentz force) 會引起位移變形，可再以感測器量測出共振器之位移變形量。

由於共振器最好具有較高的振動頻率，所以須慎選材料，其中氮化鋁 (AlN) 對於半導體工業有相當大的助益，因氮化鋁薄膜具有許多優異的特性，例如高超音波速率、具壓電性、高溫穩定性、高電阻率、熱傳導係數高、高硬度、高能隙及高機電耦合因子等。且 AlN 材質非常的輕，它的密度 3255 kg/m³、楊氏係數 345 GPa、C 軸聲速 22.4 m/s，壓電係數 1.5 c/m，比起 Si、SiC、GaAs 都有更良好的性質。現在得知 AlN 可以達到高於 80 MHz 的振動頻率， Q 值大於 20,000，因為它具有高超音波速率與大的壓電耦合因子，所以最主要的應用是作為高頻率表面聲波元件的壓電基板材料。

AlN 是以矽為基底，並利用有機金屬化學氣相沉積法 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 合成之材料。MOCVD 是經由氣流傳輸反應物到沉積基板上，以氣閥控制氣流量，藉由氣體管路系統的特殊設計，去除管路的暗空間，並降低成長速率，達到超晶格結構的成長需求。MOCVD 技術有利於大量生產，但對於厚度的控制卻較為不易。一般而言，MOCVD 適合生產異質界面雙載電晶體元件。欲成長 AlN 薄膜於 Si (111) 晶片上，可在低壓的環境下使用 MOCVD 法，接著利用電子束蝕刻和金屬薄膜蒸鍍，電極部分再用氯基底反應離子蝕刻，最後將矽基座移除後即可完成。上述為製程的大綱，下面將詳談製程中的重要細節。

在 AlN 的製造過程中，三乙基鋁 (triethylaluminum, TEA) 和 ammonia 是用來與 Al 和 N 反應的中間產物進行反應，以氫氣為反應中的懸浮氣體，低壓環境是為了使 TEA 的氣態能均勻調和且減少前置反應 (pre-reaction)。Si 薄膜則需要在濃度 10% 的氫氟酸中進行蝕刻 20 秒，接著在 900 °C 的氫氣中加熱 10 分鐘，在基底表面溫度維持約 550 °C、TEA 的劑量為 0.6 $\mu\text{m}\cdot\text{mole}/\text{min}$ 且 NH₃ 的流量為 1.1 mole/min 的環境中，讓 AlN 晶核層到達 25 nm，接著 AlN 在 1000 °C 下會以 0.15 $\mu\text{m}/\text{h}$ 的速率附著成長，此時 TEA 劑量為 0.9 $\mu\text{m}\cdot\text{mole}/\text{min}$ ，使得三五族比例 (V/III ratio) 為 12000。

電極部分包含了 3 nm 厚的 Ti、35 nm 厚的 Au 及 60 nm 厚的 Ni，其中 Ni 作為光罩。電極經過非等向性氯基底反應離子蝕刻 (RIE)，反應離子蝕刻乃是結合電漿態中反應物種的化學活性，以及引起離子撞擊的物理影響，以達成蝕刻的一項技術。再以透過加速獲得能量的正離子來撞擊試片，在放置試片的極板上加一負偏壓，且操作壓力為僅在 10–200 mTorr 之間的低壓狀態，屬於非等向性蝕刻程序 (anisotropic etching process)，再附加於 AlN 薄膜上，其中氯氣流量為 10 sccm，而反應室內壓力為 5 mTorr，此時 AlN 蝕刻速率約為 150 nm/min。接著使用蝕刻劑將 Ni 去除，再將 Si 基底以等向性蝕刻去除，最後以甲醇清洗整個物體並放置空氣中風乾，則製程結束，完成之電極如圖 14.9 所示。在溫度 4.2 K 和橫向磁場 8 T 的作用下，由上述量測技術可得如圖 14.10 的結果⁽³⁾。

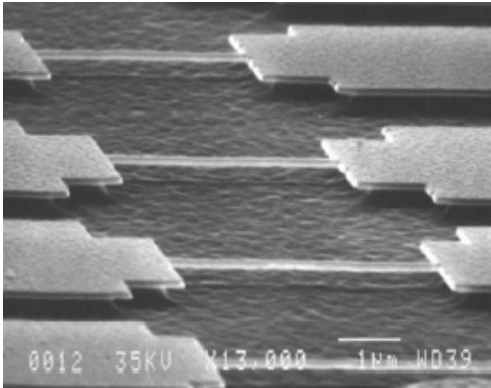


圖 14.9

四支氮化鋁 (AlN) 樑的電子顯微鏡照片，中段最細的樑其長度大約分布在 3.9 到 $5.6 \mu\text{m}$ ，樑厚 $0.17 \mu\text{m}$ 、寬 $0.2 \mu\text{m}$ ，樑兩端的寬度加到 $2.4 \mu\text{m}$ ⁽⁵⁾。

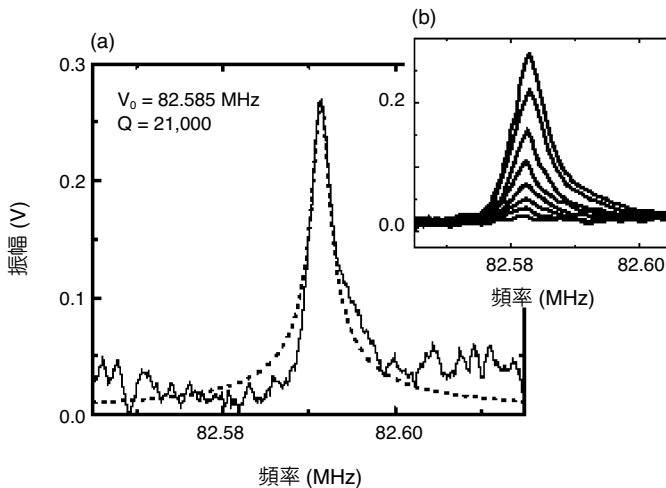


圖 14.10

(a) 在溫度 4.2 K 和橫向磁場 8 T 的作用下，施以 -85 dBm 功率對長度 $3.9 \mu\text{m}$ 的樑進行位移量測，(b) 在溫度 4.2 K 、磁場由 $1-8 \text{ T}$ 變化下，功率為 -75 dBm ，對長度 $3.9 \mu\text{m}$ 的樑進行位移量測⁽⁵⁾。

14.2.3 槳形振盪器

由微／奈米機電製程所完成的槳形振盪器 (paddle oscillator) 如圖 14.11 所示，為三層結構⁽⁶⁾。其製程為先在單晶矽上長出 400 nm 之氧化層，再於單晶矽上利用電子束微影 (e-beam lithography)、熱蒸鍍 (thermal evaporation) 及光阻剝離 (lift-off) 等 NEMS 製程加工完成，最後再將微結構接合於另一矽基上，如此槳形振盪器便懸空於矽基 400 nm 之上。此槳形振盪器的尺寸為 $a = 200 \text{ nm}$ 、 $b = 175 \text{ nm}$ 、 $w = 2 \mu\text{m}$ 、 $h = 400 \text{ nm}$ 、 $L = 2.5 \mu\text{m}$ ，其將操作於 10^{-4} Torr 的小型真空腔內，並以氦氖雷射及光感測器作為檢測系統。

在實驗中，將會在 $1-10 \text{ Hz}$ 之間觀測到兩組不同模態及共振頻率。此兩組共振頻率如圖 14.12 所示，分別由平移及扭轉之模態主控支配。平移及扭轉之振形如圖 14.13 所示。將所得實驗數據代入 $f = K \cdot db$ ，可以得到平移模態之共振頻率指數係數 $b_1 = -0.5 \pm 0.1$ ，扭轉模態之共振頻率指數係數 $b_2 = -1.6 \pm 0.15$ 。其中 f 為共振頻率， d 為振盪器翼寬， b 為指數

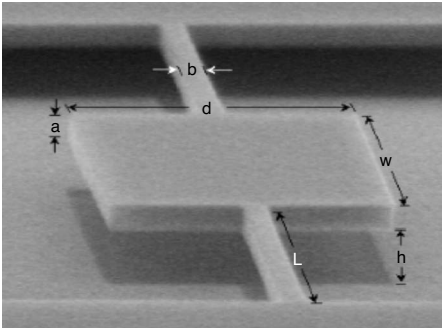


圖 14.11
槳形振盪器外觀的電子顯微鏡照片⁽⁶⁾。

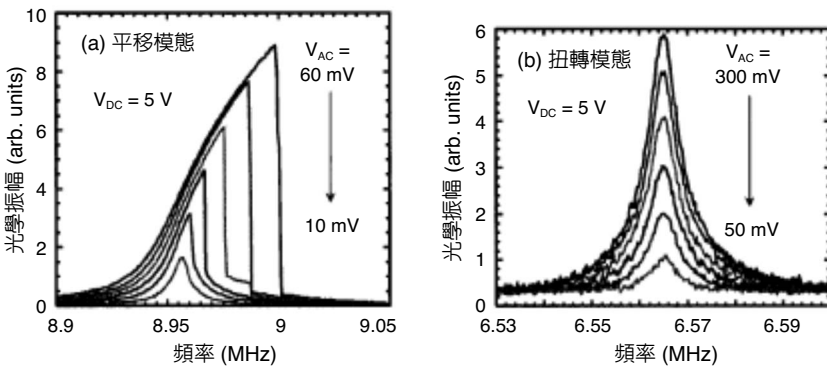


圖 14.12
振盪器頻率響應 ($d = 3\ \mu\text{m}$)，(a) 平移模態，
(b) 扭轉模態⁽⁶⁾。

係數。其結果與振動學模型計算出之理論值 $b_1 = -0.5$ 、 $b_2 = -1.5$ 相當吻合。

由光學檢測系統可得扭轉模態之振幅與參考電壓成線性比例。在微小位移的條件下，可如預期得到驅動電壓振幅、振盪器對應振幅及光學檢測訊號之間的線性關係。但在平移模態下，即使在最低的驅動電壓振幅時，其亦呈現非線性關係。

此振盪器製作成蜂巢狀陣列，如圖 14.13 所示，可應用於光通訊開關或力的偵測上。

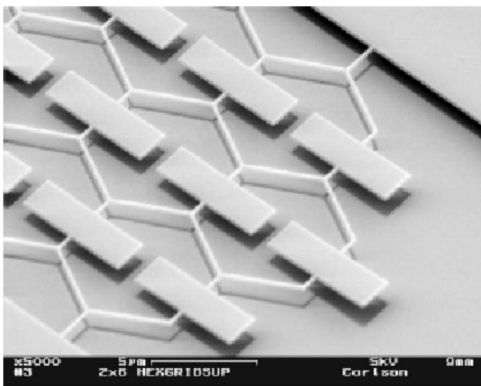


圖 14.13
蜂巢狀槳形振盪器陣列⁽⁶⁾。

14.3 奈米機電系統的應用

NEMS 技術的應用範圍非常廣泛，在量測學和基礎科學方面，包括了運用機械方法偵測奈米等級的帶電量及熱傳導研究。

14.3.1 運用奈米機電技術的資料儲存裝置

以電磁力為基礎的儲存方式，由於超順磁性極限的限制，最大的儲存密度約為 100 Gbit/in²。目前的硬式磁碟機產品已經朝此一目標前進。IBM 最近則發展出以 AFM 探針陣列做為資料儲存的方式⁽⁸⁾。

其基本原理即使用熱變形及熱偵測的機械 (thermo-mechanical) 方法。可參考圖 4.14 所示之兩懸臂樑支架的矽結構，尺寸為長 70 μm、厚 1 μm，藉離子佈植 (ion implantation) 法可製作電阻值偏低的兩支架處結構，而矽前端處則具有較高的電阻，以作為加熱器。利用 AFM 探針對 PMMA (壓克力材料) 加壓加熱產生微小孔洞，即能用於資料儲存，再利用 AFM 探針掃描 PMMA 基板，測試探針到 PMMA 基板之間的熱傳率，來辨別凹洞是否存在，即能讀出資料。

由於此一動作需要比磁力讀寫頭花費更多的時間，若要實用化，則必須製成如圖 14.15 的陣列型式，才能快速存取。目前 IBM 的研究團隊已經製作出了 32 × 32 陣列的原型機，儲存密度達 400 Gbit/in²。預估此技術的發展，儲存密度將可達 1 Tbit/in²，在郵票大小的面積上即可儲存相當於 25 片 DVD 的資料。

機構的作動方式可參考圖 14.14 及圖 14.15，利用電阻加熱同時讓懸臂樑彎曲，使 AFM 探針向 PMMA 方向移動並加熱 AFM 探針。全結構皆使用微／奈米機電製程製作，在矽基材上，植上所需的平面結構形狀，最後再使用非等向性蝕刻技術，將平面結構從矽基材上釋放成為一懸臂樑結構。寫入資料時，需將探針加熱到 500–700 °C。寫入資料後產生凹洞的 PMMA 如圖 14.16 所示，其中圖 (a) 的大小約為 40 nm，間距為 120 nm，PMMA 厚度為 70 nm，圖 (b) 的凹洞密度約為 400 Gbit/in²，圖 (c) 的凹洞密度達 1 Tbit/in²。

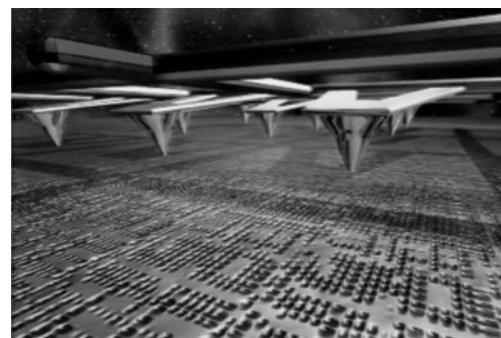
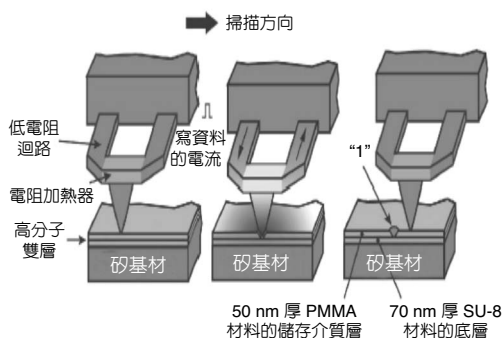


圖 14.14 IBM Millipede 資料儲存裝置基本原理⁽⁸⁾。

圖 14.15 AFM 陣列資料儲存示意圖⁽⁸⁾。

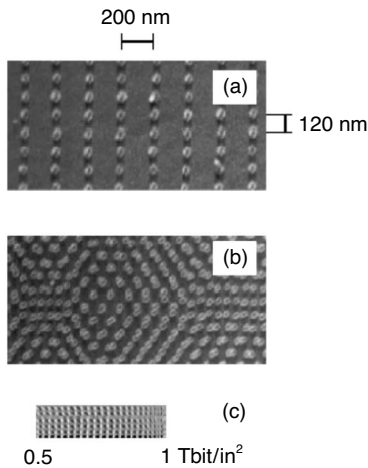


圖 14.16

不同儲存密度下，PMMA 上的凹洞分布⁽⁸⁾。

14.3.2 原子力顯微鏡下操作的奈米碳管夾子

此為一個具有兩根奈米碳管 (carbon nanotube) 的奈米夾子 (nanotweezer)，可於原子力顯微鏡 (AFM) 下以電機的方式操作。其製程是在掃描式電子顯微鏡 (SEM) 影像幫助下，使用原子力顯微鏡奈米碳管探針的製造技術。奈米夾子使得奈米立體結構的建立成為可能⁽⁹⁾。

奈米碳管是以電弧放電的方法製備，因此為多層奈米碳管，長約 1 至 5 μm ，直徑平均為 10 nm。奈米碳管卡匣的製造，是以電泳的方式將奈米碳管對準放置好的刀片刀鋒進行組裝。

AFM 的矽懸臂樑是奈米夾子的基礎結構，在矽針尖上鍍一層鈦／鉑鍍層後，將三條鋁導線以光蝕刻技術連接至鈦／鉑鍍層，如圖 14.17(a) 所示。鈦／鉑鍍層以聚焦 Ga 離子束 (focused ion beam) 切割成兩個獨立的部分，分別連接至兩條導線以及單條導線，如圖 14.17(b) 所示。直流的電流將會經過這些導線並傳至兩獨立的鈦／鉑導電層來操作奈米夾子。

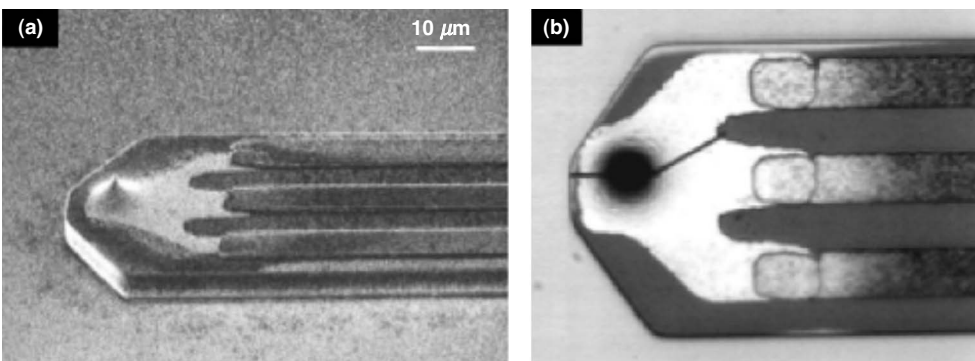


圖 14.17 作為奈米夾子之基礎結構的矽懸臂樑 SEM 照片。(a) 一片針尖上的鈦／鉑鍍層連接至鋁導線。(b) 此一鈦／鉑鍍層被切開為兩部分，並分別連接至一條及兩條鋁導線⁽⁹⁾。

奈米碳管的組裝是在一特殊設計的場發射掃描式電子顯微鏡 (field-emission SEM) 下進行，在此一顯微鏡內有三組獨立的致動平台。在此實驗中，兩個移動平台主要用來進行奈米碳管的組裝：一個移動矽懸臂樑，一個移動奈米碳管卡匣。而第三個移動平台則裝置一鎢針，當奈米碳管已經由卡匣轉移至矽針尖後，用來細調奈米碳管的位置。進行組裝時，一鍍有金屬鍍層的矽針尖會與卡匣中的目標奈米碳管接觸，此時一非結晶的碳薄膜被沉積於接觸部位。這些沉積的污染物大部分是 SEM 腔室中的碳氫化合物，可以被電子束所清除。最後奈米碳管將會被拉出卡匣。在另外一邊鍍有金屬鍍層的矽針尖上也裝上一根奈米碳管。第三個移動平台上的鎢針會將兩根奈米碳管調整成平行，而且以沉積的碳薄膜將奈米碳管根部固定。為了與外界絕，緣整個奈米碳管表面會鍍上一層碳薄膜 (幾個 nm 厚)。在兩個奈米碳管手臂相接觸時或是夾起導電的粒子時，這層碳鍍膜可以防止巨大電流的產生。

圖 14.18 顯示的兩根奈米碳管長 $2.5 \mu\text{m}$ ，初始間距 780 nm ，間距會隨著施加電壓的增加而減少。兩奈米碳管突然的互相接近，不是因為奈米碳管本身的挫曲所造成，而是奈米碳管在靜電吸引力與彎曲扭矩之間失去平衡所致。而且區域性的機械強度不足造成左邊奈米碳管明顯彎曲。當 $V = 0 \text{ V}$ 時，他們會回到初始位置，這表示他們可以被視為均勻且連續的彈性材料。量測三組不同直徑的奈米碳管與施加電壓的關係變化，結果如圖 14.19 所示。

14.3.3 單晶矽懸臂樑超微小力之量測

一個由微機電技術的熱蒸鍍製程所製造出的鈷針頭 (cobalt evaporated tip) (圖 14.20)，為考量懸臂樑對力量測的解析度，其量測必須在真空環境中，同時在室溫及 4.8 K 下，使用光纖干涉儀 (fiber optic interferometer) 進行。懸臂樑的彈性係數在室溫下 ($T = 295 \text{ K}$) 是利用 $k = k_B T / (x_{\text{rms}})^2$ 進行估計。其中 x_{rms} 是針頭的均方根位移 (root mean square displacement)，係利

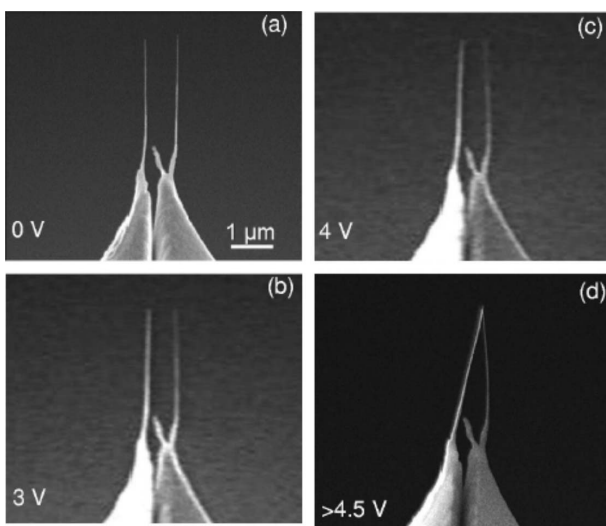


圖 14.18

SEM 影像顯示奈米夾子上奈米碳管的動作與施加的電壓有關⁽⁹⁾。

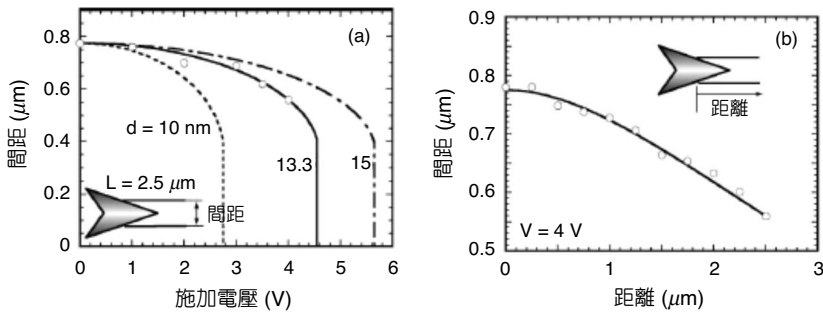


圖 14.19 (a) 三種不同直徑奈米碳管之奈米夾子的施加電壓與兩奈米碳管之間距的相關性。(b) 當施加電壓固定為 4 V，奈米碳管直徑為 13.3 nm 時，兩奈米碳管位置與間距關係圖。實線部分為數值計算結果，係以長度為 2.5 μm、楊氏係數為 1 TPa 來計算⁽⁹⁾。

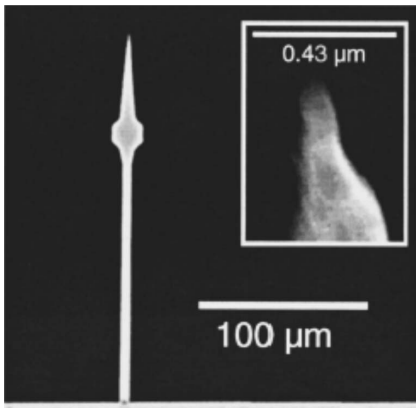


圖 14.20

厚 600 Å、共振頻率為 1.7 kHz 的鈷針頭光學顯微鏡照片。插圖是電子顯微鏡所拍攝出來的針頭，其曲率半徑為 450 Å⁽¹⁰⁾。

用 $x_{\text{rms}} = cx_{p,\text{rms}}$ 估算得知，此處 $x_{p,\text{rms}}$ 代表量測時在槳片 (paddle) 處由振動雜訊頻譜所產生的均方根熱雜訊振幅 (root mean squared thermal noise amplitude)， c 表示在針頭與槳片處位移振幅的比值。以圖 14.20 中 600 Å 厚的懸臂樑來說，典型的 c 值為 1.6， $x_{p,\text{rms}}$ 是 155 Å， $x_{\text{rms}} = 250$ Å，而 $k = 6.5 \times 10^{-6}$ N/m。以此方法量測的彈性係數與利用有限元素法分析所得的結果比較，誤差在 10% 以內。

在溫度為 4.8 K 時， x_{rms} 降至 27 Å，此時 $x_{\text{rms}} = 43$ Å。將這個值與懸臂樑其他參數 (基礎共振頻率 $f_0 = 1.7$ kHz、品質因子 $Q = 6700$) 合併考慮，則可產生 5.6×10^{-18} N/√Hz 的力雜訊頻譜密度 (force noise spectral density)。其量測的 x_{rms} 將比理論上的 32 Å 大一些，這項些微的偏差可能是因為雷射熱殘留或是環境擾動所造成。

為實現原子力偵測，懸臂樑必須放置一個約 1 mm 的電極，用來產生一靜電力，使懸臂樑在共振頻率下振動。圖 12.21 顯示了用干涉儀和鎖相放大器 (lock-in amplifier) 所測得懸臂樑振動振幅的時間軌跡 (time trace)。當靜電力開啟時，懸臂樑達到一穩態振幅 370 Å_{rms}。基於前面所求得的 k 和 Q 值，會產生一個 36 aN_{rms} (atto-Newton, 10^{-18} N) 的力。使用由樑的自

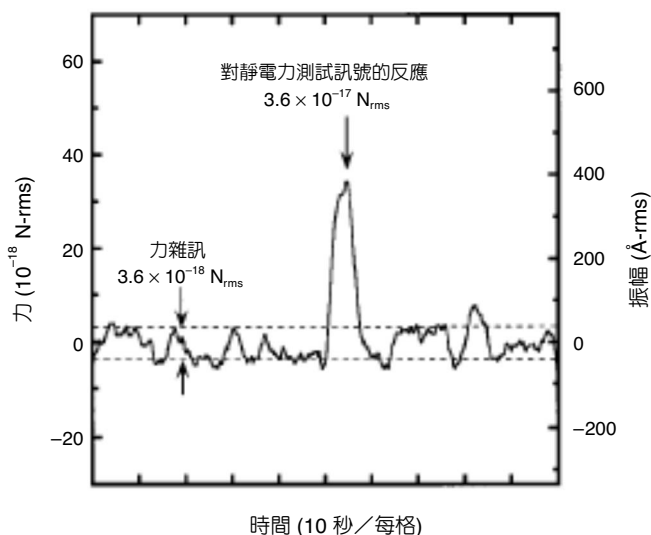


圖 14.21

懸臂樑振動振幅的時間軌跡圖，顯示了雜訊和 36 aN 靜電力的振盪情形。右邊的刻度是懸臂樑的振動振幅，而左邊的刻度是相對應的力振幅。從量測的雜訊等級得知，力解析度估計為 3.6 aN⁽¹⁰⁾。

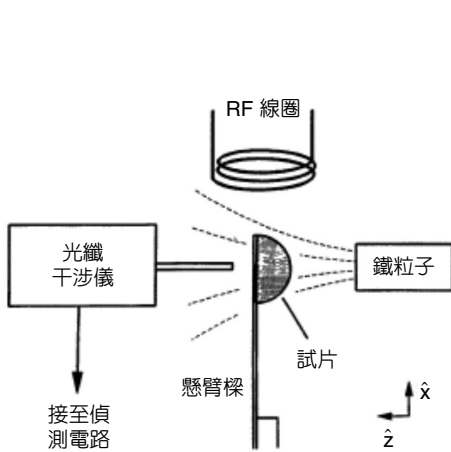
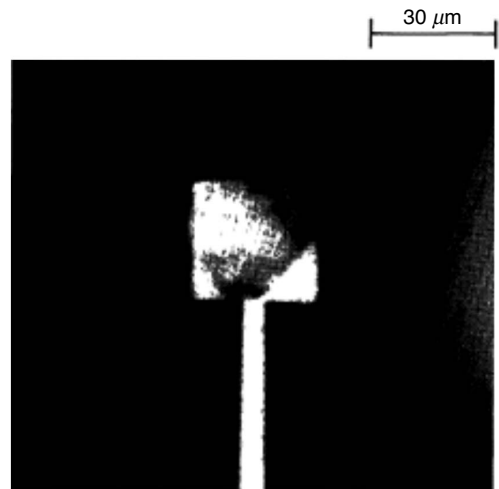
然頻率所控制的偵測頻寬 (detection bandwidth)，當 3.6 aN 的雜訊等級被量測時，將會產生大小為 10 的訊雜比。

14.3.4 磁共振力顯微鏡學

磁共振力顯微鏡學對於從分子生物學到材料科學等諸多領域有巨大的衝擊。利用磁共振力顯微鏡 (magnetic resonance force microscope, MRFM) 偵測單自旋 (single-spin) 共振現象時，需要量測超微小力 (attoneutron force)，其數量級比利用原子力顯微鏡 (AFM) 所量測的 pico (10^{-12}) 等級更小。單晶矽懸臂樑 (ultra-thin single-crystal silicon cantilevers) 可以達到此等級的解析度，在實際應用上，可以在頻寬 1 Hz 下量測到 5.6×10^{-18} N 的力。

此力偵測設備如圖 14.22 所示，於室溫下裝設有一超導磁鐵，且為避免懸臂樑造成之空氣阻力，在壓力小於 10^{-3} Torr 真空環境中操作。試片係由 12 奈米克 (ng) 的硝酸鉍所構成，並黏合於材料為 Si_3N_4 之懸臂樑上。選擇硝酸鉍作為試片材料，是因為它含有大量的氫粒子 (質子)，而且它緩和的行為非常適用於週期性的絕熱倒置現象 (adiabatic inversion)。此實驗於室溫下操作，藉由直徑 0.8 mm 的線圈 (繞 2.5 圈)，並以 100 MHz 之無線電頻率激發產生磁核共振 (NMR)。Z 方向之試片材料因週期性絕熱倒置現象而被磁化，且對倒置現象施予一具有模組化的頻率，使得倒置現象產生振盪。振盪磁化現象於一不均質場的磁力作用下將會產生振盪磁力，而使得懸臂樑產生振動。此振動量的大小可由光纖干涉儀及鎖頻放大器來量測。

如圖 14.23 所示，本設備之懸臂樑厚度僅 900 Å，彈性係數為 10^{-3} N/m。此彈性係數更低於一般 AFM 所使用的探針懸臂樑之彈性係數的 1/30。此懸臂樑之機械共振頻率為 1.4

圖 14.22 磁核共振力偵測實驗裝置⁽¹¹⁾。圖 14.23 厚度 900 Å、材料為 Si_3N_4 之懸臂樑的光學顯微鏡照片，此懸臂樑之頸部尺寸為長 50 μm 、寬 5 μm 。

kHz，且於真空下其品質因子 Q 值為 3000。

力靈敏度之均方根 F_{min} 為 5×10^{-16} N，且於共振頻率下測得懸臂樑之鎖頻時間常數為 1 秒。此優異的靈敏度係歸因於懸臂樑具有非常低的彈性係數與相當高的 Q 值所致。

對於磁核共振的研究，可藉奈米機電技術完成超薄之懸臂樑製程，以改善力偵測靈敏度達 5×10^{-16} N，可於高磁場 (2.35 T) 中操作且增加核極化能力，並可藉由週期性之絕熱倒置現象調整磁化的強度。若再配合數百奈米磁鐵粒子參與作用，可產生出 600 T/m 的磁場梯度。此磁核共振結果導致單一量測具有 1.6×10^{15} 個質子的解析度，相當於空間解析度為 2.6 μm 。

上述技術可應用於磁共振力顯微鏡學 (magnetic resonance force microscopy, MRFM)⁽¹²⁾。目前核磁共振 (nuclear magnetic-resonance) 已普遍地應用於醫學攝影上，這項技術揭露出一個事實，大部分的細胞核都有內部的磁力矩或「自旋 (spin)」，可與外加的磁場作用，然而需要 $10^{14} - 10^{16}$ 個細胞核才能產生一個可以被量測的反應訊號，也就是說，需要大量的原子核才能產生可以偵測到的訊號，而這麼多的原子核其大小大約是一毫米 (mm) 等級，因此醫院進行腦部細胞掃描的解析度大約是一毫米。這就限制了早期異常細胞的偵測與治療。

NEMS 技術大幅提高對微小細胞的偵測能力，使得 MRI 的解析度從一毫米進展到一微米。假如腫瘤在一微米大小時就可以被偵查到，對於醫療有相當大的助益。圖 14.24 顯示一個原子力顯微鏡的懸臂樑⁽¹³⁾，下面有個探針，探針下面放一個奈米微粒 (nano-particle) 等級的磁鐵。當磁場導通的時候，人體內細胞的細胞核會對磁場反應，與奈米磁鐵反應產生一個反作用力，使得懸臂樑振動，這時用 AFM 的原理就可以偵測此輕微的振動量，而且可以量到 10^{-18} N。這是微機電加上奈米科技對人類產生極大貢獻的例子。

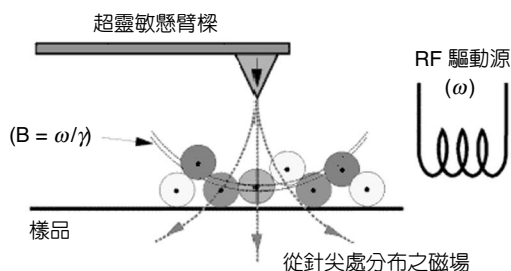


圖 14.24
磁共振顯微裝置⁽¹³⁾。

14.3.5 單電子電晶體位移感測

一種藉由單一電子電晶體 (single electron transistor, SET) 測量非常微小位移的方法正在研發中。該量測元件包含了兩端固定的撓性樑 (double-clamped flexural beam)、電容器及 SET，如圖 14.25 所示。其原理係利用 SET 量測撓性樑的微小位移。在元件機構中的樑會上下振動，使得電容的面積一直在改變，也使得電容值改變，而在撓性樑上加有偏壓，所以電容改變會造成電壓改變，進而造成流經 SET 的電流改變，再由 SET 判斷撓性樑的微小位移量。以 SET 代替以往類似的場效電晶體 (field effect transistor, FET) 裝置，最主要是反應速度上的快慢，SET 的反應速度可以跟得上頻率非常高的振動，而達到要求。

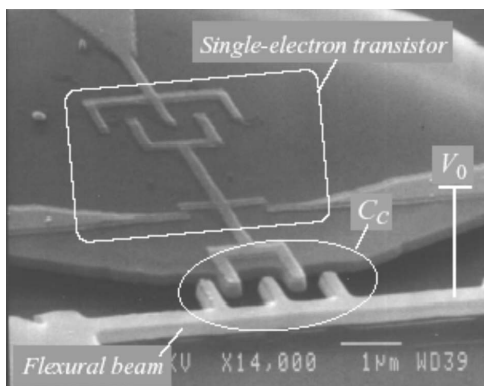


圖 14.25
包含交指式 (interdigital) 電容的撓性樑與 SET 相連接，振動撓性樑並在撓性樑的電容上加上直流偏壓，撓性樑的位移會改變電容電壓而控制流經 SET 的電流⁽¹⁴⁾。

14.3.6 奈米級機械式電子錶⁽¹⁵⁾

與目前的半導體感測器相較，奈米機械電子尺的靈敏度可達 $0.1 \text{ eHz}^{-0.5}$ 。此外，氣流擾動所造成的雜訊分析，顯示奈米機械電子尺可有效地達到 $10^{-6} \text{ eHz}^{-0.5}$ ，此係與低溫單電子電晶體 (cryogenic single-electron transistor) 的電量偵測性能比較的結果。奈米等級的電子尺還有可在高溫 ($\geq 4.2 \text{ K}$) 操作與反應的特點，並有較大的頻寬，其應用將更趨多樣化。

奈米機械電子尺的電子顯微鏡照片如圖 14.26 所示，包含了三個主要元件：電極 (用來感受當一個微小電量加入時的吸力)、可反應此吸力而移動的柔順機械元件 (compliant mechanical element)，和一個顯影此動作的位移偵測器。此儀器包含了三個電極：兩個用來感應和量測結構的機械響應，另一個用來耦合電量 (coupling charge)，此耦合現象會改變響應。另有一個外加的平行磁場作為輸出。在實際的裝置中 (如圖 14.26(a))，此結構的基礎共振頻率是 2.61 MHz，品質因子 Q 值為 6500；閘和共振器之間的耦合電容值 C 為 0.4 fF。共振器是由單晶矽放置於基質上所製成，也就是將 $0.2\ \mu\text{m}$ 厚的矽層放在 $0.4\ \mu\text{m}$ 的絕緣層上。金電極和共振器結構由電子束蝕刻而成，結構邊緣特徵的最小值約為 $0.2\ \mu\text{m}$ ，所以需要更精微的顯微鏡來偵測這些儀器，這可使頻寬提升至 GHz 的境界。

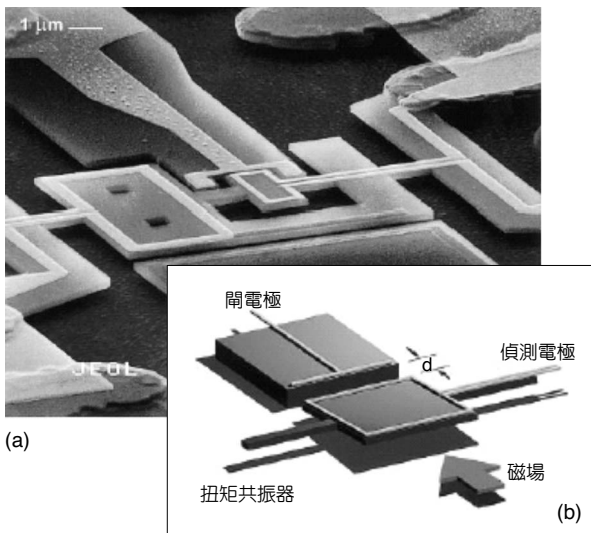


圖 14.26

(a) 奈米級電量偵測器，(b) 其主要的幾個元件：扭矩機械式共振器、偵測電極和用來將電量耦合至機械元件的閘電極⁽¹⁵⁾。

為了能精確使用電子量測技術，可以監看扭矩共振器中感應電量的改變，以及在電量模數 (charge modulation, G_{eff}) 下共振頻率的改變。前述方式若品質因子高的話，靈敏度會特別高，使用頻率模數檢測已可獲得較高的靈敏度及較大的測量頻寬。

這些實驗性的原型說明了奈米級機械尺可提供極高電荷靈敏度的量測新方法，並提供比單一電子電晶體更廣大的頻寬。與單一電晶體需要極低的 mK (milli-Kelvin) 溫度比較而言，另一個更進一步的優點是能在 4.2 K (甚至更高) 的溫度下操作。這開啟了幾項技術的可能性，諸如單一光子光測試照相技術 (single-photon photo-detection) 或是超高靈敏度掃描式電子尺 (ultra-sensitive scanned electrometry)。

14.4 未來展望

14.4.1 奈米機電系統的挑戰

現在的電子蝕刻技術和奈米製造技術已經可以將半導體奈米結構推向 10 nm 以下，但似乎仍有些問題阻礙了實際的應用，以下是三個主要的挑戰⁽²⁾：(1) 如何溝通奈米世界與現實世界之間的訊息，(2) 瞭解並控制介觀力學 (mesoscopic mechanics)，(3) 發展具高重複性的奈米製造技術。

奈米機電系統顯然是一個非常微小而精密的系統，所以在操作時系統的偏差或振動都是在一個極小的範圍裡。舉例來說，一個直徑為 10 nm 的電子束，在奈米製程的蝕刻中，其位移量僅僅是一奈米的一小部分，要製作一個高靈敏度可用來準確地將這個等級下的位置資訊讀出來的感測器，其準確度可能要遠比電子束在蝕刻時的位移量還小得多，而且伴隨自然頻率的提升而來的是體積的減小。若相較於以往的微機電系統，一個理想的奈米級感測器必須具備有解讀出 10^{-15} – 10^{-12} m 位移量及 giga-Hz 頻寬能力的兩項條件⁽²⁾，故其所面對的挑戰更大了。

有些在微機電領域裡仍舊使用的感測器並不適用於奈米領域中，然而在這個有趣的奈米世界中，有幾個新的概念要提出⁽²⁾，包括積體近場光學 (integrated near-field optics)、奈米磁力 (nano-scale magnet)、具高電子移動力的電晶體 (high-electron mobility transistor, HEMT)，均待深入研究。

14.4.2 接近或超越量子極限

奈米機電元件的操作極限將是量子極限，甚或是超越量子極限，現今最尖端的奈米機械元件已經瀕臨此一界線了。對於 NEMS 可否達到此一境界的關鍵是熱能 (thermal energy) $k_b T$ 和 hf_0 量 (quantity) 之間的關係⁽⁷⁾，此處的 k_b 是波茲曼常數 (Boltzmann's constant)、 h 是普朗克常數 (Planck's constant)、 f_0 是機械式共振器的基礎頻率，而 T 是溫度。當元件的溫度低且頻率夠高足以使 hf_0 達到 $k_b T$ 時，熱擾動將會比影響內部最低振動模式的量子雜訊還低。在此極限下，均方根振動振幅 (the mean square amplitude of vibration) 將可被量化，且振幅可假設為 $hf_0 Q/2k_{eff}$ 的整數倍⁽⁷⁾。

儘管有這項明顯的挑戰，在不久的將來，應該可以觀察到 NEMS 中的量子現象。即使是 1994 年第一部以高頻運作的共振器，若將其溫度降低至 100 mK，也只有矽有 20 個量子的狀態可以在最低的基礎模式下被激發，這樣的溫度卻可以用氦稀釋冷卻器而達到。所以必須留心的問題是，在奈米等級下的共振元件中是否可觀察到量子化振幅的躍升 (quantized amplitude jump)。如果可以的話，在系統與外界進行量子交換時，應該可以個別的轉移。在此觀點下，如果可以解決以下兩個關鍵點，我們將可以觀察到量子躍升的情形。第一個關

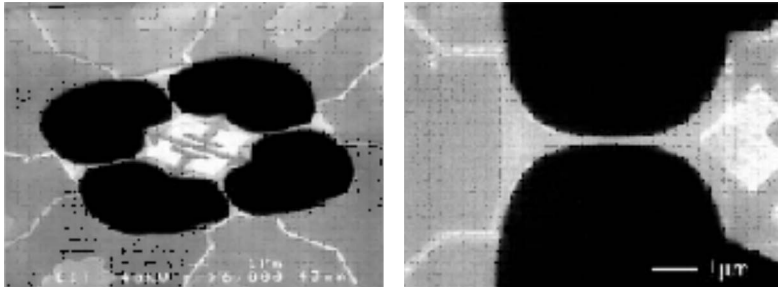


圖 14.27 聲子井元件結構，外觀大小約 $1.0 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ，有 8 條線路將薄鈮 (niobium) 片收斂至中間的懸吊元件上，中央白色區域是 60 nm 厚的氮化矽薄膜所懸吊的聲子井 ($4 \times 4 \mu\text{m}$) 元件。由薄膜成形、表面 C 形光亮的部分是金薄膜加熱器及感測器，而黑暗的部分是薄膜被移除的區域。加熱器與薄膜相接，鈮線路接頭則放在聲子波導的上端。這些接頭一直延伸到金屬線墊片上，右圖顯示聲子波導，最窄的區域其寬度收縮至 200 nm 以下⁽⁷⁾。

鍵點是共振器必須為只由幾個量子所構成的狀態，一般感測器係量測共振器的位移，而非量測位移的平方，如何研究位移的平方與量子化的關係是個關鍵。第二個關鍵是感測器必須具備能夠感測到一個量子躍升的解析度，有個簡單的估測是感測器必須具有可以解析 $10^{-15} - 10^{-12} \text{ m}$ 之位移的靈敏度才可觀察量子現象⁽²⁾，但至目前為止，這仍有相當大的努力空間。

由前述量測熱傳導的量子化研究中，使用氮化矽製成的聲子井 (圖 14.27)，發現在此區域的熱傳導率可被量子化，換句話說，每個聲子 (phonon) 可以最大的熱導率 $\pi^2 k_B^2 T / 3h$ 傳遞能量⁽⁷⁾。儘管在量子級的領域中將遭遇到極大的困難，但此領域的研究所帶給科技的回饋是顯而易見的。在這個極限上對力與位移的量測將開啟一項科學的新領域。

奈米機電技術 (NEMS) 提供了前所未有的技術與無窮的機會，在基礎量測及應用上，新奇的應用技術與物理學將不斷地從這項新領域中浮現出來。要完全地享受該系統的優點，必須不斷發揮想像力，不管是現有的方法或微米與奈米技術上的「創新」。

未來，將可藉由放置幾百萬個精準的原子，或者是藉由自組裝 (self-assembly) 的模式，量產製造複雜的分子級機械元件。顯而易見地，要達到奈米等級的控制，其與響應之間的關係仍需投入大量的努力。從近期看來，NEMS 清楚地將可提供關鍵性的科學與工程基礎，並且在未來為被奈米科技所大大地重視及運用。

參考文獻

1. R. P. Feynman, American Physical Society Meeting (Pasadena, CA), <http://www.its.caltech.edu/~nano/>
2. M. L. Roukes, *Physics World*, **14** (2), 8 (2001).
3. A. N. Cleland and M. L. Roukes, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2653 (1996).

4. Y. T. Yang, K. L. Ekinci, X. M. H. Huang, L. M. Schiavone, M. L. Roukes, C. A. Zorman, and M. Mehregany, *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2), 162 (2001).
5. A. N. Cleland, M. Pophristic, and I. Ferguson, *Appl. Phys. Lett.*, **79** (13), 2070 (2001).
6. S. Evoy, D. W. Carr, L. Sekaric, A. Olkhovets, J. M. Parpia, and H. G. Craighead, *J. Appl. Phys.*, **86** (11), 6072 (1999).
7. K. Schwab, E. A. Henriksen, J. M. Worlock, and M. L. Roukes, *Nature*, **404** (27), 974 (2000).
8. M. I. Lutwyche, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, W. Haberle, H. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G. K. Binnig, and P. Vettiger, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 3299 (2000).
9. S. Akita, Y. Nakayama, S. Mizooka, Y. Takano, T. Okawa, Y. Miyatake, S. Yamanaka, M. Tsuji, and T. Nosaka, *Appl. Phys. Lett.*, **79** (11), 1691 (2001).
10. T. D. Stowe, K. Yasumura, T. W. Kenny, D. Botkin, K. Wago, and D. Rugar, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 288 (1997).
11. D. Rugar, O. Zugar, S. Hoen, C. S. Yannoni, H. M. Vieth, and R. D. Kendrick, *Science, New Series*, **264** (5165), 1560 (1994).
12. M. L. Roukes, *Tech. Digest. Solid State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, June (2000).
13. <http://www.almaden.ibm.com/st/projects/nanoscale/mrfm/>
14. <http://www.iquest.ucsb.edu/sites/cleland/pdf/spieproceedingsrevtex4>
15. A. N. Cleland and M. L. Roukes, *Nature*, **392** (12), 160 (1998).