

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

靜電式微機電振動-電能轉換器(I)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2215-E-009-066-

執行期間：93 年 08 月 01 日至 94 年 07 月 31 日

執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系(所)

計畫主持人：邱一

計畫參與人員：朱育杉，郭炯廷

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

摘要

當微系統或微感測器的技術越來越成熟時，各種利用微感測器或微傳感器所形成的智慧型網路系統或可攜式應用也慢慢的被提出來。在這些應用上，每一個標記或結點模組中都有完整的電路或微型的獨立電源。除此之外，如手機等各種可攜式 3C 產品，也都需要獨立、可靠及壽命長的電源供應。可攜式產品或系統的電源除了由電池來供應外，目前許多的功率微機電系統 (power MEMS) 正嘗試以微機電的技術，將各種化學能或動能轉換成電能，以做為系統中的整合型微型電源供應。因此，本計畫將利用靜電式的微機電能量轉換器，針對人體的動作以及自然界 120 Hz, 2.5 m/s^2 的振動，在 3.3 V 輔助電源的條件下，於 1 cm^2 的晶片面積上設計出一淨輸出為 $100 \mu\text{W}$ 的電源供應器。這個電源供應器可以和系統中其他的電源管理、信號處理及感測器電路整合，而形成一永續操作智慧型微感測系統。

關鍵詞：功率微機電系統；能量轉換；振動；靜電式；永續操作；智慧型微感測系統

Abstract

When micro system or sensor technologies become mature, distributed sensor networks or portable applications based on these new technologies are being proposed or realized. Best known examples include the RFID system and wireless sensor nodes. In addition to the system application, the need for independent, reliable, and long lifetime power supply also apply to portable 3C products, such as mobile phones. Besides batteries as portable power sources, there are increasing interests in the power MEMS technology, where various energy sources, such as chemical and kinetic, are converted to electric energy using MEMS technology. Therefore, the objective of this project is to design and fabricate an electrostatic MEMS vibration-to-electric energy converter within 1 cm^2 based on a 3.3 V auxiliary power supply. The targeted energy source is the 120 Hz, 2.5 m/s^2 vibration that is measured abundant in natural environment. This MEMS power source can be integrated with other power management, signal processing, and sensor circuits to form a self-sustained smart micro sensor system.

Keywords : power MEMS, energy conversion, vibration, electrostatic, self-sustained, smart micro sensor system

(一) 前言

微機電系統 MEMS 是以半導體產業中的平面製造觀念為基礎的一種整合技術。因為製程及材料大部分都和積體電路(IC)的製造相同，所以微機電系統中的各種感測器或致動器的發展，均以和 IC 整合而形成智慧型的模組或系統作為最終目標。當微系統的技術越來越成熟時，各種利用微感測器或微傳感器所形成的智慧型網路或系統應用也隨之而生。在這些應用上，每一個標記或節點的模組都可能有微型獨立電源的需求。拜先進的超大型積體電路與 CMOS 技術所賜，現今這些微系統節點的電能需求已降至數十微瓦的程度。因此利用微機電技術，將環境中的能源轉換成電能來使用取代傳統電池成為可行且更為長久可靠的方式。

我們提出了一種靜電式微機電振動電能轉換器的設計與製造。其運作原理在於，利用由振動驅動的可變電容器的改變，搭配直流電壓源，產生交流電流輸出。轉換器的核心可變電容部分是透過 SOI 晶片搭配深蝕刻製程，製造梳齒狀電極而成。轉換器目標是在 3.3V 輸入電壓、一立方公分的體積限制下，設計出可將生活中普遍存在的振動轉換為可用之電源供應器。

(二) 文獻回顧與研究目的

可攜式產品或系統的電源傳統是由電池來供應。不論是不可充電的一次電池（如乾電池），或是可以充電重覆使用的二次電池（如鋰離子電池），其壽命都有一定的限制，因此需要定期更換，而且電池具有污染及笨重龐大的問題。因此，從電源的系統獨立性而言，最好能將環境中的各種能量，利用適當的機制轉換成電能，以做為系統的電源供應的一部份。目前這方面最成熟的技術便是太陽能的利用。因為太陽能電池可以利用矽作為吸光材料，因此是整合型獨立電源供應的最佳選擇。但太陽能電池必須在有光源（如日照）的環境中才能工作，因此必須考慮到模組的封裝及使用環境的限制。

微機電系統具有多域耦合(multi-domain coupling)的特性，可將機械、電機、化學等領域的元件或結構作在同一基板上，又能容易的和 IC 相結合，因此從整合性的角度來看，微機電系統是一個相當有潛力的微型電源供應發展平台。最近許多的功率微機電系統（power MEMS）正嘗試利用微機電的技術，將自然界各種形式的能量，轉換成電能的輸出，例如 MIT 的微渦輪引擎計畫[1, 2]等係利用微機電技術與封裝技術作出微型的燃燒室，再利用燃燒所產生的氣體來推動渦輪及轉子，如此可將化學能轉換成動能的型式直接輸出，或再經過一次轉換而得到電能的輸出。Min et al. 提出的微燃料電池[3]，或是 Lam et al. 的光合作用微電池[4]等，則是將燃料電池微小化，直接將化學能轉變成電能輸出。在這些例子中，能量來源都是某種型式的化學燃料。雖然可達到相當大的功率及能量密度，但若考慮燃料系統的封裝，則體積縮小不易，且因燃料供應是有限的，所以這些電源模組的能量供應壽命也是有限的。

在自然環境中，熱能亦可用來產生電能輸出，其轉換是利用系統使用環境中的溫度差所造成的兩種不同材料間的電位差（熱電效應）來作為系統的電源供應[5, 6]。因為材

料可使用多晶矽、鋁、銅等半導體製程中常用的材料，所以與 IC 製程的整合性相當高。對於這種轉換機制而言，溫度差是一必要條件。目前的一個可能的應用是與 CPU 等高耗能 IC 搭配，將廢熱回收而轉換成電能再利用。雖然如果應用環境中沒有溫度或溫差過小，這種方式並不適用。

最後一個可作為能量來源的便是自然界中無所不在的振動，包括聲音，機器的運作等。將振動動能轉換成電能的機制有以下三種，我們將從能量密度及系統整合的角度來做一簡單的說明：

1. 電磁式(electromagnetic)

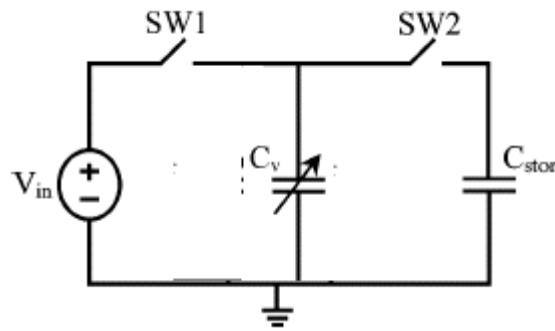
利用振動所造成的質量塊運動，造成電路中的部份迴路發生磁力線切割的現象，而產生一感應電動勢。Shearwood et al.於 1997 年利用 bonding 的方式製作出電磁式微電源供應器，對於 4.4 kHz 的振動輸入，輸出功率可達 0.3 μ W[7]；Amirtharajah, et al. 則是利用分立元件組裝的方式，利用人行走時的振動，產生約 400 μ W 的電功率輸出[8]。利用電磁感應所產生的能量輸出，必須利用外加的永久磁鐵來提供一個固定的強磁場，使得系統整合不易。這種方式的另一個困難點在於製作多圈數的高品質平面型微線圈，因此目前以微機電形式能夠達到的能量密度較其他方式為低。

2. 壓電式(piezoelectric)

利用振動所造成的質量塊運動，使結構中的壓電材料產生形變，利用壓電效應產生一等效的交流電源。其特色為能量密度較高，且不需輔助電源或燃料。但具有高壓電係數的材料（如 PZT 等）與矽晶片製程整合上有材料相容性的問題，目前的研究成果也多以塊材的形式來進行[9, 10, 11]，因此尚不適合用在整合型的微系統中。

3. 靜電式 (electrostatic)

靜電式能量轉換器的主要元件是一可變電容器，其電容值可在 C_{\max} 及 C_{\min} 之間變化[12]，如下圖一所示。當可變電容器在處於 C_{\max} 的情況下，經過 SW1 由一外部電源 V_{in} 充電。充電結束後，可變電容器的電容值由振動所造成的位移由 C_{\max} 變成 C_{\min} 。若在這個過程中電容器上的電荷量 Q 保持不變(SW1 open)，則電容器的端電壓會上昇，使得儲存在電容器中的電能增加，而達到將振動能量轉換成電能的目的。在電容達到 C_{\min} 時，SW2 關上(close)，便可將可變電容器中的電荷及能量轉移到另一儲存電容或負載電路上。利用微機電技術製作的可變電容已經非常的成熟，而且材料及製程都可以和 IC 製程相容，因此適合做為微系統中整合型的微電源供應。其缺點在於需要一個輔助的電源供應 V_{in} 來啟動能量轉換的周期。但只要微機電部份的淨輸能量大於輔助電源所提供的啟始能量，則提供給後段電路使用之外，多出的輸出能量仍可利用充電的方式存回輔助電源中。在目前有關靜電式微機電能量轉換器的文獻中[12, 13]，轉換器本身都仍在製作或測試階段中，尚未有實際測試數字發表。因此，這方面是一個極具潛力且尚未被仔細探討的領域，值得我們投入資源去研究。



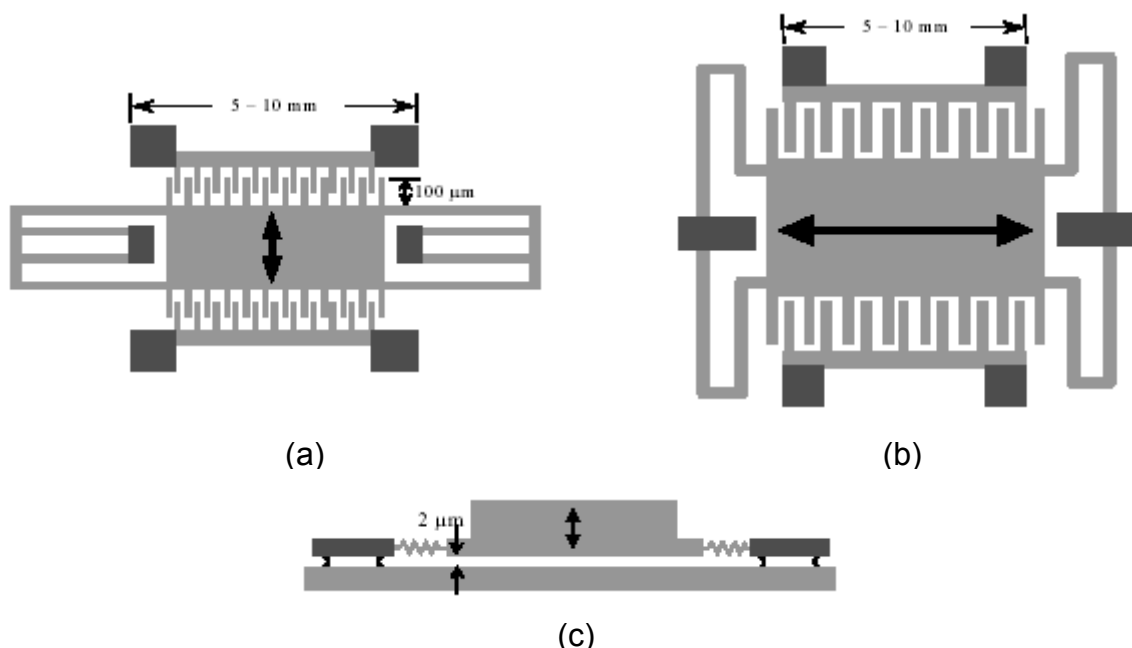
圖一 靜電式能量轉換器原理

綜合上述討論，一個獨立且可永續操作(self sustainable)的微型電源供應器可包含光電(太陽能電池)，熱電(熱電偶)，及動能-電能等能量轉換機制，藉由 IC 製程上的整合，可將環境中的各種雜散能量轉換成電能輸出。在建構如此的微型電源供應器的過程中，我們將循序漸進，以動能-電能轉換為第一個目標，發展靜電式的能量轉換器，並配合一輔助電源，設計並製作一個永續操作型微系統中所需的電源供應器。考慮系統的可實現性，我們選擇目前最普遍的 3.3 V 做為輔助電源，而且晶片面積限制在 1 cm^2 之內。預計輸出功率為 $100\text{ }\mu\text{W}$ ，可供系統中其他的低功率電路模組使用。

(三)研究方法

靜電式能量轉換器的輸出與可變電容的差值或比值有關。為增加 C_{\max} 及 C_{\min} 的差異或比值，除了利用結構共振產生最大位移外，另一個途徑是利用微機電的製程及結構設計，儘量提高可變電容本身的電容值，以提高元件的輸出功率。在微機電系統中，可變電容可以下列形式來實現：

1. 同平面電極重疊式：如圖二(a)所示，梳狀電極間的重疊面積和位移量成正比。
2. 同平面間隙縮減式：如圖二(b)所示，梳狀電極彼此靠近，造成間隙縮小。



圖二 三種不同的可變電容器設計: (a) 同平面電極重疊式，(b) 同平面間隙縮減式，(c) 出平面間隙縮減式

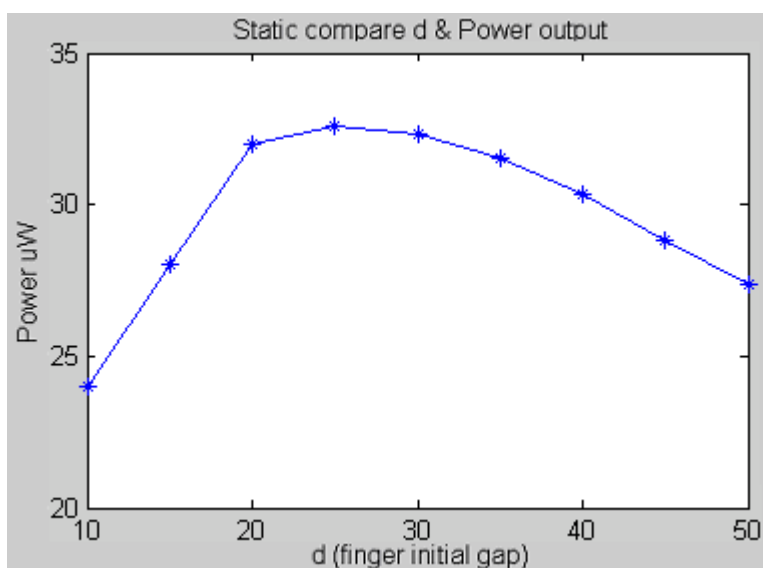
3. 出平面間隙縮減式：如圖二(c)所示，平面式可動電極板作垂直於電極平面的運動，造成與基板（固定電極）間的距離縮小。

基於可變電容量差值考量，以及製程上的可行性及系統穩定性的比較後，我們可以看到同平面間隙縮減式可變電容架構為最佳的選擇，因此我們選擇以其作為我們的可變電容設計設計架構。

(四)結果與討論

1. 系統靜態計算

在同平面間隙縮減式可變電容的設計上，為了提高可變電容量，我們希望可以把梳指的間隙數目(N_g)提高，但是在提高 N_g 的同時，在相同的面積限制下，將會造成初始間隙距離(d)的縮減，這個縮減相當於縮小了可變電容的差值，亦即減少了輸出電能，這兩者間的衡量可以透過一個簡單的靜態計算來得到。由圖三可見，梳指間距有一個最佳值，大約在 $25\mu\text{m}$ 左右，此時的輸出電能約為 $32.5\mu\text{W}$ 。這個模擬假設可變電容位移量可達到機械煞車位置，也就是梳指的最小間距($0.5\mu\text{m}$)。其餘模擬參數設定為厚度 $h=200\mu\text{m}$ ，梳指長寬 $1200\mu\text{m}, 10\mu\text{m}$ ，輸入電壓 3.3V ，輸入振動源頻率 120Hz 。



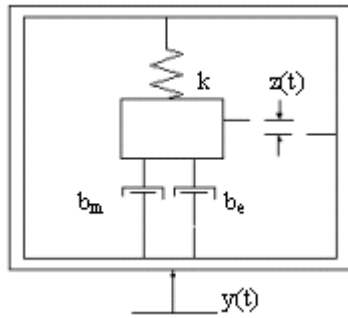
圖三 輸出電能與梳指間距關係

2. 系統動態模擬

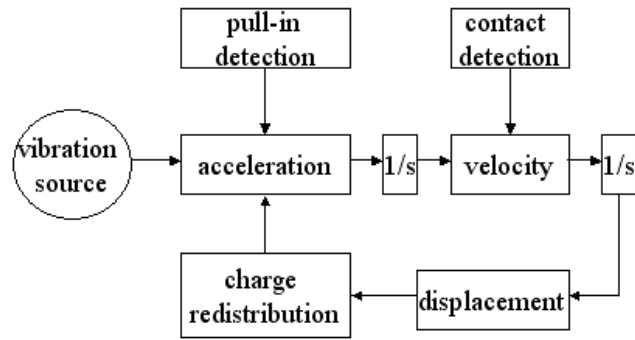
本這個系統的運動方程式為：

$$m\ddot{z} + b_e\dot{z} + b_m\dot{z} + kz = -m\ddot{y}$$

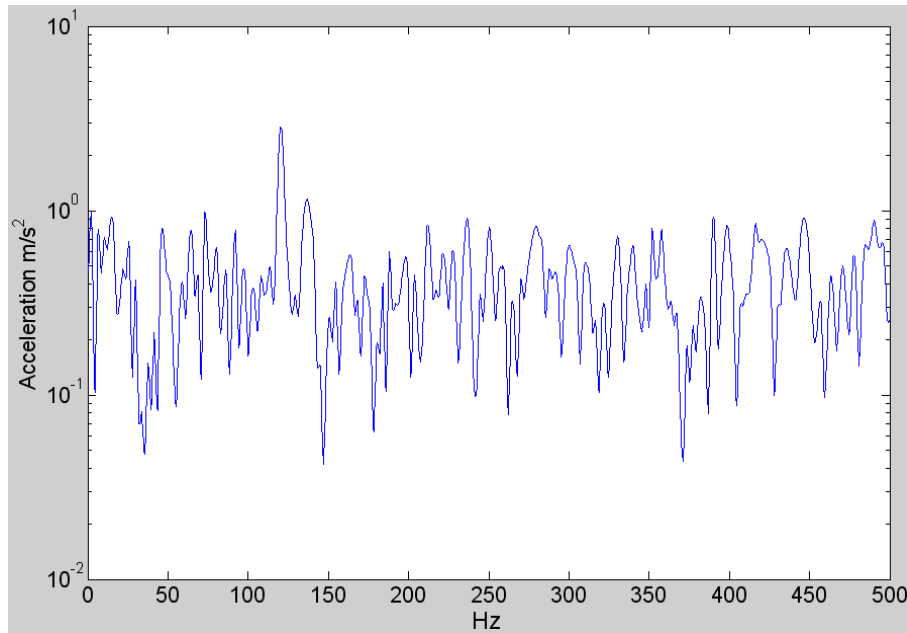
如圖四，其中 $y(t)$ 表示振動源的位移， $z(t)$ 表示可變電容中的可動電極的位置， m 為可動電極的質量， k 為連接可動電極的彈性結構的彈簧常數； b_m 為運動過程中的機械性阻尼，代表散失的能量； b_e 為等效的電性阻尼，代表轉換成電能而離開機械系統的能量。我們利用 MATLAB 的 Simu-link 建立動態模擬的平台如圖五。在輸入振動源方面，圖六為實際量到的一般家用電器上的振動頻譜。因此，我們將使用其中的 120 Hz , 2.5 m/s^2 的振動元作為後續的設計依據。



圖四 系統動態轉換模型



圖五 動態模擬平台架構



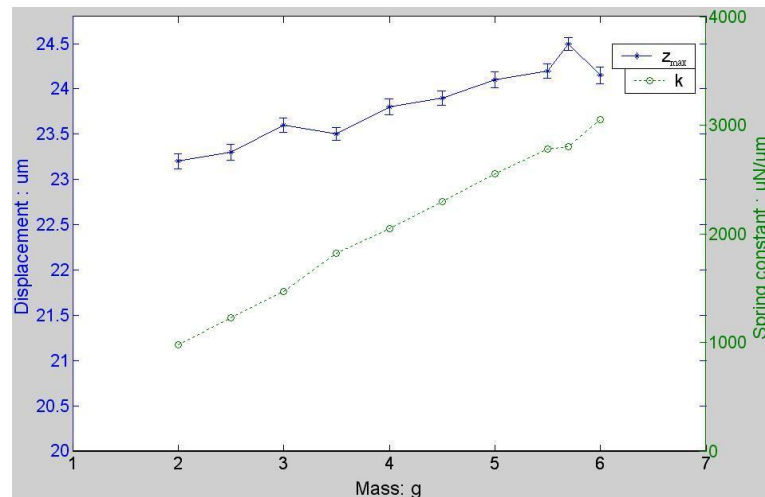
圖六 常見一般家電的振動頻譜

藉由這個動態模型的建立，我們可以得到理想狀態下結構參數影響系統輸出振幅的關係，同時可以得到可變電容器上的電壓電容值變化。另外由於 MEMS 製程上對於元件質量的限制，我們考慮使用外加質量塊用來增加可變電容的位移量和系統能量轉換效率，圖七顯示分別在外加各種不同質量塊下，元件會有的最大位移以及相對的彈簧常數。理論上，越大的質量會造成越大的位移量，但是由於元件本身體積的限制 (1cm^3)，超過 7 克的質量塊就很難實現，經過圖七的模擬，得到理想的質量塊是 5.7 克，此時彈簧常數 $k = 2.8 \text{ kN/m}$ 。最後再透過動態模型，經過一連串的疊代，找到最佳的結構參數設計如表一。而模擬得到的可變電容位移及輸出電壓如下圖八所示。

3. 元件製作

我們使用 SOI 晶圓來製造可變電容器結構，其上下層和中間氧化矽層厚度分別是 $200\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 。製程的第一步先用深反應式離子蝕刻 (Deep RIE) 定義出梳齒狀電容器 (圖九(a))，而後 HF 溶液被用來移除氧化矽犧牲層 (圖九(b))，第三步是在結構表面蒸鍍鋁薄膜用來降低接點電阻 (圖九(c))，最後將一個額外的鋼球質量塊加在元

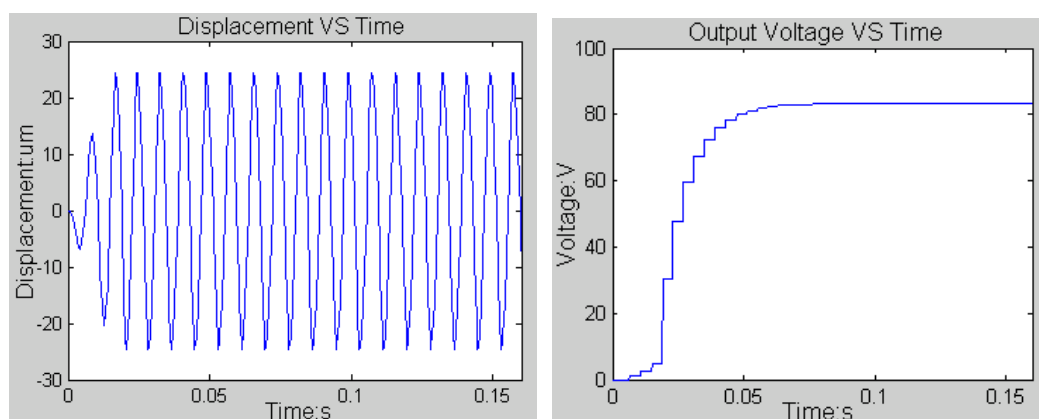
件上(圖九(d))，用來調整裝置的共振頻率，以期系統能夠達到最佳的能量產生效率。製造出的元件如圖十，由於微影和 RIE 製程的限制，梳齒的寬度由預期的 $10\mu\text{m}$ 縮減為 $6.8\mu\text{m}$ ，此項誤差將會影響到共振頻率和能量轉換特性。



圖七 相對不同質量塊的最大位移量和彈簧常數

表一 第一代元件最佳化設計參數

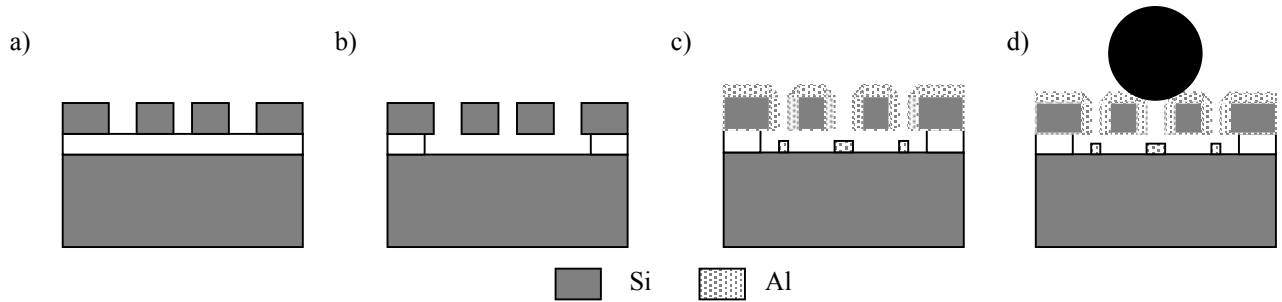
Variable	Description of variables	$0.5\mu\text{m gap}$
W	Width of shuttle mass	10mm
L	Length of shuttle mass	8mm
L_f	Length of finger	$1200\mu\text{m}$
W_f	Width of finger	$10\mu\text{m}$
mass	Shuttle mass	5.7Gram
d	Finger gap	$25\mu\text{m}$
d_0	Shuttle mass to base distance	$2\mu\text{m}$
k	Spring constant	$2.8\text{k}\mu\text{N}/\mu\text{m}$
P_{out}	Output power	$32.59\mu\text{W}$



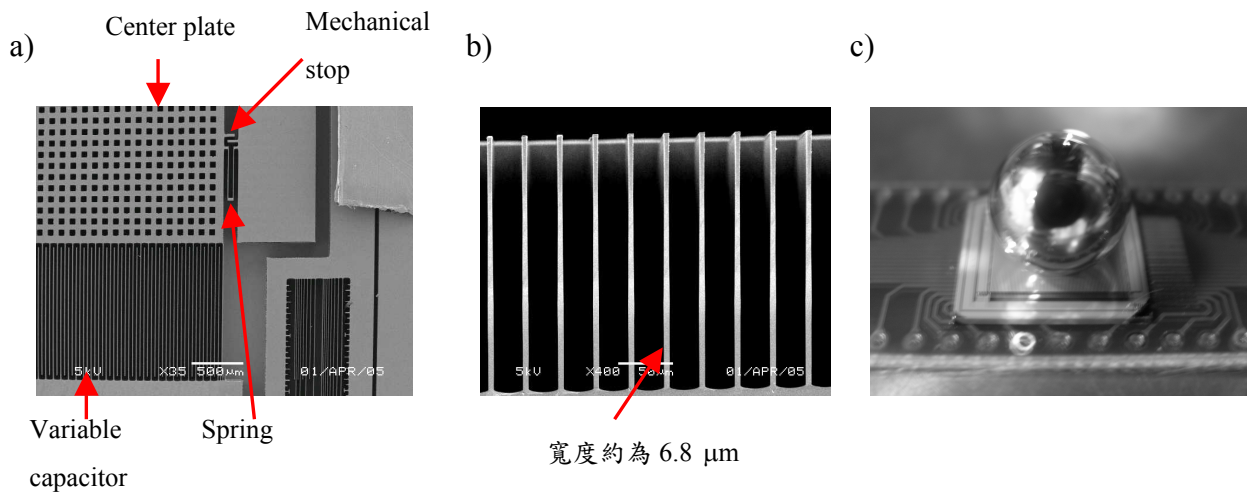
圖八 動態模擬結果

4. 實驗量測結果(機械量測)

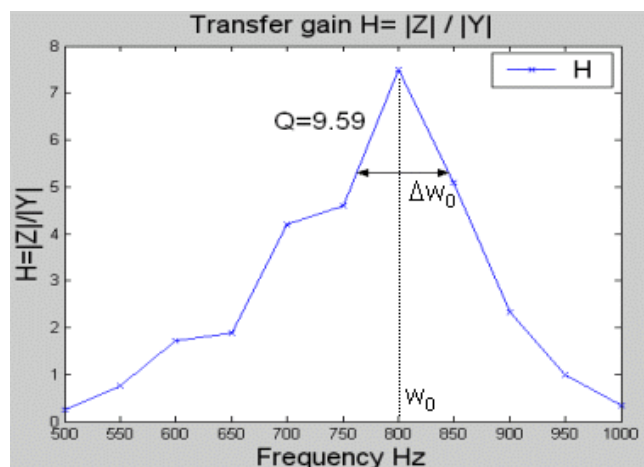
我們使用震動器(PROWAVE JZK-1 shaker)給予外加振動，對於未加上額外質量的元件進行了機械量測，頻率響應如圖十一，品質因素 $Q=\omega_0/\Delta\omega$ 約為 9.6，其中 ω_0 是共振頻率而 $\Delta\omega$ 是其頻寬。本元件的共振頻率約為 800Hz，把質量約 0.038 克列入考慮，可得等效的彈簧常數 $k=\omega^2m=960\text{N/m}$ ，與理論值的誤差主要原因在於線寬的縮減。另外，在此共振頻率之下，可動梳齒的最大位移約為 $10\mu\text{m}$ 。



圖九 製造流程



圖十 (a)SEM 上視圖 (b)梳齒截面圖 (c)固定在元件上的鋼球



圖十一 元件的頻率響應

5. 實驗量測結果(電性量測)

我們使用 INSTRON-816 LCR meter 和阻抗分析儀 HP-4192A impedance analyzer 量測本元件的電容電阻值，在元件未振動的情況下，量測到的電容值約 500~600pF，與 C_{min} 的理論值 50pF 存在著誤差，其原因在於元件中央板(center plate)和基板(substrate)造成的寄生電容的貢獻。

除此之外，元件本身也存在著約 2.5 k Ω 的並聯寄生電阻，主要是由元件空隙間的微小殘餘粒子所造成。寄生電容電阻的存在造成量測輸出電能的阻礙，目前我們正在著手改良的結構—移除中央板(center plate)下方的基板(substrate)，以避免微小粒子的影響並降低寄生電容。

6. 結論及未來工作

在本計畫中，我們已經完成了靜電式微機電振動電能轉換器的設計與模擬分析，也在 SOI 晶片上製造出本元件，並執行了元件機械與電性量測工作。結果顯示由於寄生電阻電容的效應使我們無法量測出系統輸出功率，目前正著手於第一代元件的改良，如移除中央板(center plate)下方的基板(substrate)，以降低寄生電阻電容效應之影響，並增加梳齒數等。並開始進行第二代的製程。

(五)參考資料

1. Epstein, et al., "Power MEMS and micro engines," in IEEE Conf. Solid State Sensors Actuators, Chicago, IL (1997).
2. Mehra, et al., "A six-wafer combustion system for a silicon micro gas turbine engine," J. Microelectromechanical Systems, 9, 517-527 (2000).
3. Min, et al., "Silicon-based micro-polymer electrolyte fuel cells," Proc. IEEE MEMS 2003, 379-382 (2003).
4. Lam, et al., "A micro photosynthetic electrochemical cell," Proc. IEEE MEMS 2003, 391-394 (2003).
5. Strasser, et al., "Miniaturized thermoelectric generators based on poly-Si and poly-SiGe surface micromachining," Sensors and Actuators, A97-98, 535-542 (2002).
6. Schaevitz, et al., "A combustion-based MEMS thermoelectric power generator," in International Conf. Solid State Sensors Actuators, Munich, Germany (2001).
7. Shearwood, et al., "Development of an electromagnetic micro-generator," Electronics Lett., 33(22), 1883-1884 (1997)
8. Amirtharajah, et al., "Self-powered signal processing using vibration-based power generation," IEEE J. Solid State Circuits, 33(5), 687-695 (1998).
9. Shenck, et al., "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics," IEEE Micro, May-June 2001, 30-42 (2001).

10. White, et al., "A novel thick-film piezoelectric micro-generator," *Smart Mater. Struct.*, 10, 850-852 (2001).
11. Ichiki, et al., "Characterization of piezoelectric lead zirconate titanate from the viewpoint of transducer and power generator properties," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41(11B) Part I, 7080–7083 (2002).
12. Meninger, et al., "Vibration-to-electric energy conversion," *IEEE Trans. VLSI*, 9(1), 64-76 (2001).
13. Roundy, et al., "Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters," *Proc. IMECE* 2002 (2002)
14. <http://www.kingstate.com.tw>
15. J.Boland, et al., "Micro Electrete Power Generator", *Proc 16th IEEE MEMS* 2003, kyoto, 538-541 (2003)
16. Y. Arakawa, et al., "Micro Seismic Power Generator Using Electrete Polymer Film," *Technical Digest, Power MEMS* 2004, 187-190 (2004)