

電容式微型振動發電器之設計與製造

Design and Fabrication of Capacitive Micro Vibration-to-Electric Power Generator

潘吉祥¹、吳永仁²

Chi-Hsiang Pan¹, Yong-Ren Wu²

¹ 國立勤益科技大學機械工程系

¹ Department of Mechanical Engineering,
National Chin-Yi University of Technology

E-mail: pancks@ncut.edu.tw

² 國立勤益科技大學機械工程系

² Department of Mechanical Engineering,
National Chin-Yi University of Technology

E-mail: k0184346@gmail.com

摘要

本文藉由微機電技術開發出以振動能作為發電之電容式微型發電機。本文設計之能量擷取結構之可變電容器分兩種：一種為共平面式梳齒狀電容結構；另一種為共平面式平板狀電容結構。在懸吊結構的設計上，本文特別以雙穩態結構為懸吊結構，除了能增加電容結構間距位移或面積重疊之變化量，以致提高電容值之變化，更可提高微型發電機在非共振操作下之可行性。本文首要針對此微型發電機之雙穩態懸吊結構設計及機-電耦合效應，作理論解析及使用 ANSYS 有限元素法進行模擬分析。製程上，利用 SOI 晶片深蝕刻加工製造，以增加高深寬比的結構。元件大小在 $1300\mu\text{m} \times 700\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ ，經實驗量測，測得最大輸出電容為 1.7pF ，其中包含寄生電容。而 MMA 量測頻率響應在 230kHz 時有 $7\mu\text{m}$ 位移。

關鍵字詞：電容式發電器、微型振動、雙穩態。

Abstract

This thesis proposes a micro power generators capable of converting ambient vibration energy into electrical energy based on electrostatic effect. The key element of the power generator is the energy harvester, which is composed of variable capacitors, a proof mass and suspended structures. The variable capacitor of the energy harvester is divided into two kinds of architectures: one is comb-like capacitor, and the other is face to face plate-like capacitor. Both are moving in plane. In this project the special design is suspended structures made of bi-stable structures, and is the main subject of this project. Using bi-stable structure is to amplify the capacitance of the variable capacitors and to enhance the implementation of the energy harvesting in non-resonant condition. Commonly when subjected to acceleration, the gap variation of the capacitors is small in non-resonant state, thus the amount of harvesting energy is very low. However, large amplitude motion of the bi-stable structures can improve the phenomenon. Two architectures of the bi-stable structure are proposed, one is centrally-clamped parallel beam type, and the other is compliant-mechanism type. Design, analysis, and fabrication of the harvesters are described in this project. Analytical approach and finite element method (ANSYS) for the electro-mechanical analysis are employed. The devices are fabricated by silicon-based micromachining technique that is compatible with IC processes. SOI wafer with DRIE processes is included to increase the aspect ratio of the structures. The size of device is $1300\mu\text{m} \times 700\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$, and the max. capacitance change is about 1.7pF which the parasitic capacitance is included. The displacement is $7\mu\text{m}$ in 230kHz frequency measured by MMA.

Keywords : Capacitive Power Generator, Micro Vibration, Bistable .

1. 前言

針對產品短小輕薄的趨勢、網路及可攜式電子通訊產品的無線化，以及面對植入人體之生醫產品微型化等之需求，如何延長電子產品之電能壽命已是現今科技產業面臨的一大課題。本文朝向更具挑戰性的完全自我供電元件挺進。對於電池充電的能量來源有許多種，本計畫從環境中其他能源著手，例如環境當中常存在之振動能量。振動能量可從人體、機器、運輸工具及建築體等的振動或聲波中獲得，因此它是一種廣泛隨處可得的能源，而且常是被視為浪費的能源，然而藉由本計劃的技術可以將這些取之不盡且廢物利用之能源，轉換成電池充電之最佳能源。若能妥善地利用這些隨處可見的能源，對於提高我國在綠色能源開發領域之國際競爭力。以振動能作為發電之能量來源，其能量擷取的原理主要分為三大類，第一類為電容原理，第二類為壓電原理，第三類為電磁原理。由於電容原理在尺度微型化下有較佳之效益趨勢，且其結構製造簡易，製程及材料與目前半導體技術最相容，以和電子產品系統整合的角度來看，採電容原理製作將是最佳的選擇。此外，針對目前各樣產品之短小輕薄化，發電機之研發勢必也要朝微型化發展，因此本計畫將藉由微機電技術開發出以振動能作為發電之電容式微型發電器。

2. 電容式微型振動發電器結構設計與分析

2.1 雙穩態彈簧結構設計

在雙穩態彈簧結構的設計上，分別有撓曲式及平行式兩種設計，雙穩態彈簧結構在作動時文獻中的作動模式是在第一穩態位置施加力量，當力量到達臨界點時，會自動彈跳至第二穩態位置，且擁有高位移量。

雙穩態結構的角度及尺寸長度會深深影響作動時所需的力量強度，角度越大所需的力量越大。雙穩態結構在作動時若作動變形空間不夠，會使雙穩態結構出現折痕失去彈性，造成該結構最大推力高於拉力的情況。為了避免此種情況發生，不同的雙穩態長度就必需搭配合適的撓曲半

徑及角度，才能充份發揮出雙穩態結構的效果。

2.2 可變電容結構設計

設計雙穩態彈簧機構，雙穩態彈簧機構分為平行式與撓曲式兩種。在可變電容結構的設計中，分別為梳齒狀可變電容結構與平板狀電容結構。將所設計的兩種雙穩態彈簧機構與兩種可變電容結構互相搭配，可設計繪製出多種不同樣式之微型發電器結構。圖2.1為平行式雙穩態微發電器結構之示意圖，圖2.2為撓曲式雙穩態微發電器結構之示意圖，圖2.3為平行式雙穩態結構尺寸分佈示意圖，圖2.4梳齒狀可變電容結構設計尺寸示意圖，圖2.5、圖2.6為設計微發電器結構之示意圖，以Solid Works 3D繪圖軟體繪製。表2.1為平行式雙穩態結構相關設計尺寸。表2.2為梳齒狀可變電容結構設計尺寸。

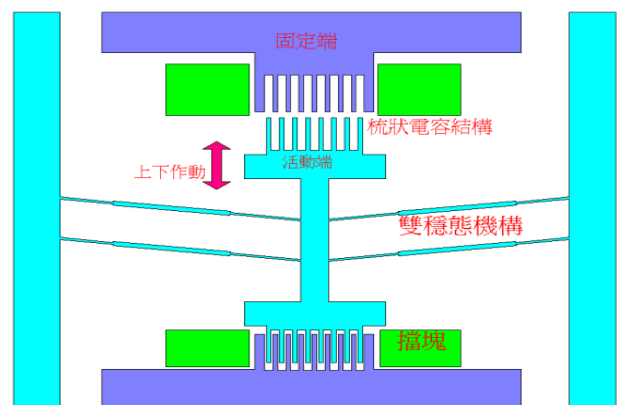


圖2.1 平行式雙穩態微發電器結構之示意圖

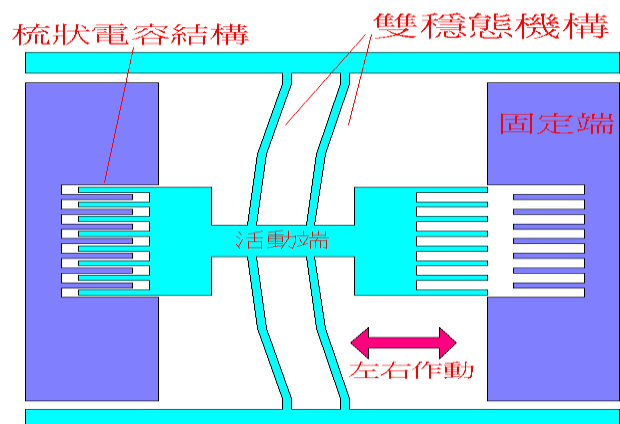


圖2.2 撓曲式雙穩態微發電器結構之示意圖

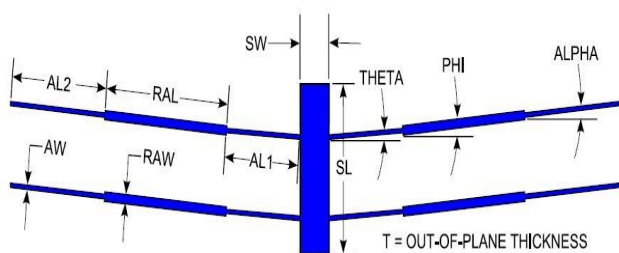


圖2.3 平行式雙穩態結構尺寸分佈示意圖

表2.1 平行式雙穩態結構相關設計尺寸

| 平行式雙穩態吊機構 | THETA/PHI/ ALPHA | AL1/RAL/ AL2 | RAW/AW | SL | SW | 厚度 | 所搭配之 電容結構 |
|-----------|---------------------|-----------------|--------|-------|------|-----|--------------|
| 第一組 | 6度 | 75μm | 5.2μm | 150μm | 30μm | 2μm | 梳狀 |
| 第二組 | 8度 | 125μm 57μm | 2.5μm | | | | |

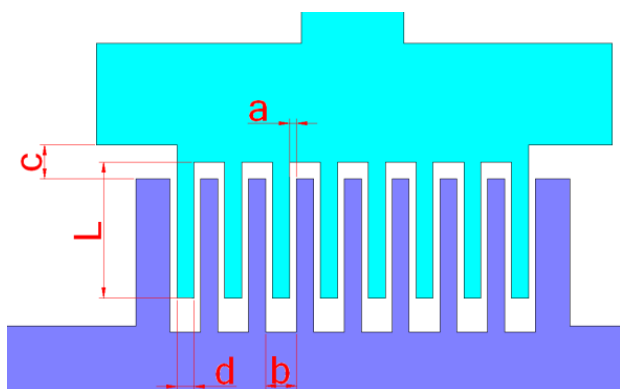


圖2.4 梳齒狀可變電容結構設計尺寸示意圖

表2.2 梳齒狀可變電容結構設計尺寸

| | |
|---------|------|
| D | 5μm |
| L | 40μm |
| A | 2μm |
| B | 9μm |
| C | 10μm |
| 厚度 | 2μm |
| 數量(活動邊) | 8個 |
| 數量(固定邊) | 9個 |

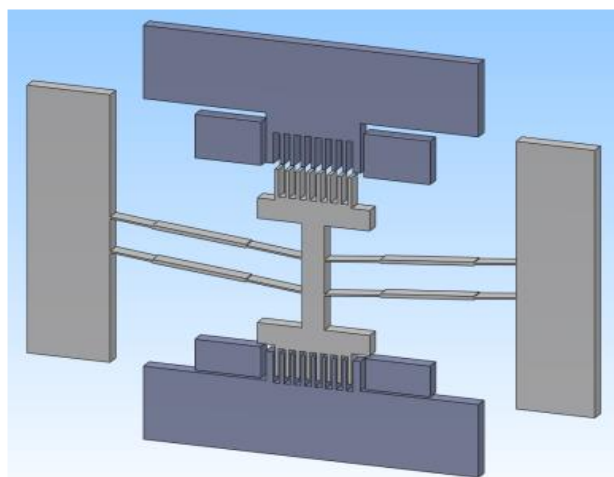


圖2.5 平行式雙穩態搭配梳齒狀可變電容結構

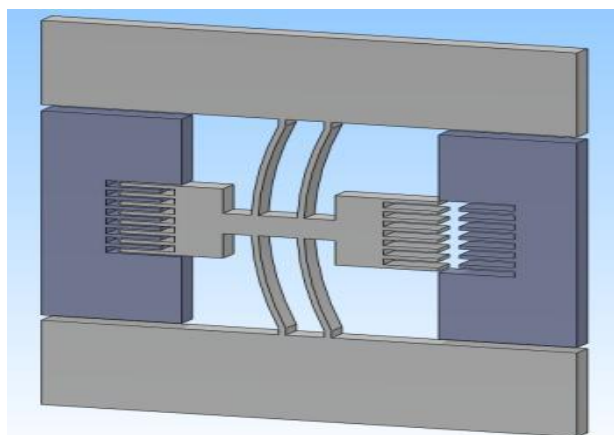


圖2.6 撓曲式雙穩態搭配梳齒狀可變電容結構

2.3 ANSYS模擬分析

分析分別以ANSYS有限元素分析軟體分析微發電器之雙穩態彈簧機構結構之模態共振頻率分析，在ANSYS模擬分析中所輸入的材料參數是依照使用的材料矽晶圓的矽材參數，彈性系數為 164 GPa，普松比為 0.23，質量密度為 2330kg/m³。

首先建立一個元件模型，接著輸入矽材料的相關材料參數，之後將元件進行分割網格。接著將固定邊進行結構選取鎖定。選擇分析10組模態來觀察，觀察得知在第六模態的共振頻率下是理想的元件作動方式，模態分析平行式雙穩態結構 8°時之自然共振頻率，所分析出的共振頻率為 2.2499e+05赫茲。模態分析平行式雙穩態結構 6°時之自然共振頻率，所分析出的共振頻率為

2.13033e+05赫茲。繞曲式雙穩態機構為之自然共振頻率，所分析出的共振頻率為5.2131e+05赫茲。ANSYS結構分析，模態分析可以了解所設計知不同的結構所產生的不同自然共振頻率，理論上可將所有結構整合一起，在非共振的狀況下也能擷取能量。

2.4 光罩設計

光罩種類分為光罩與倍縮光罩，一般而言，當鉻膜玻璃上的圖案可以涵蓋整個晶圓時，稱之為光罩(Mask)。而光罩通常是以1:1的比例將圖案轉印到晶圓的表面上。光罩最高解析度大約為1.5 μm 。而當鉻膜玻璃上的圖案僅能覆蓋晶圓的部分區域時，稱之為倍縮光罩(Reticle)。而本研究採用的為1:1比例的光罩。以AUTOCAD繪圖軟體繪製微發電器結構，陣列於4吋晶圓上，如圖2.7所示，將其繪製完成之光罩圖檔送審至國立中興大學貴儀中心製作光罩，光罩成品如圖2.8所示。

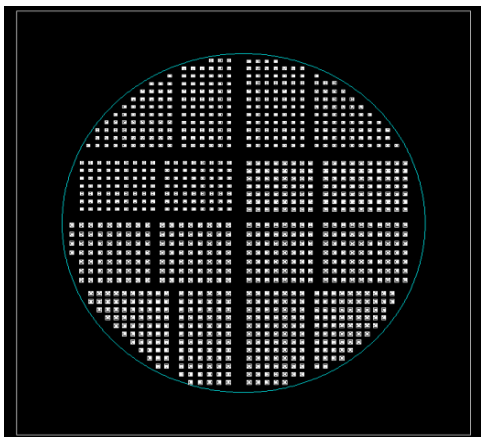


圖2.7 AUTOCAD繪製光罩圖

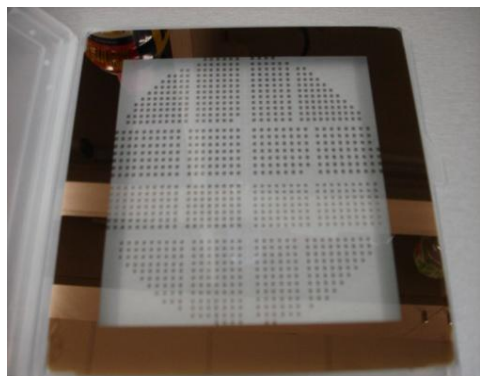


圖2.8 光罩

3. 電容式微型振動發電器之結構製作

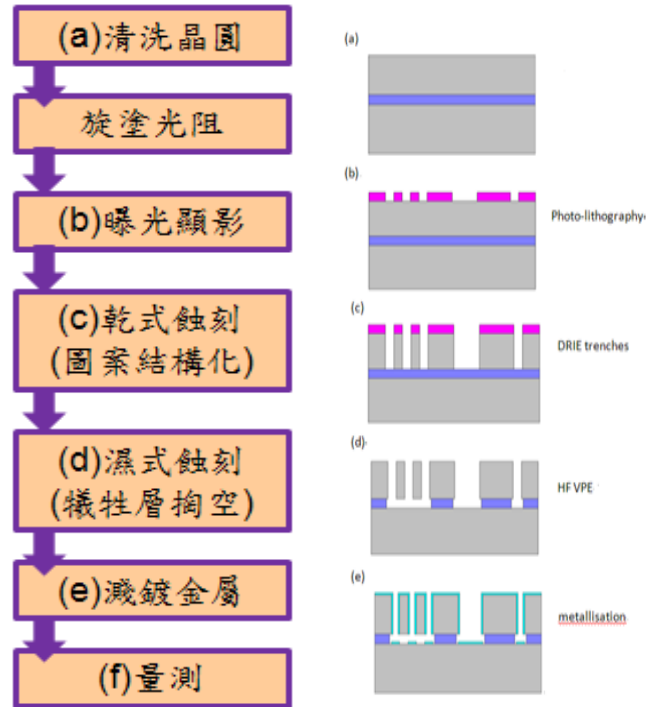


圖 3.1 微發電器結構製作步驟

3.1 微影製程

以4吋SOI晶圓製作，上層為厚度2 μm 的矽結構層，氧化結構層為厚度2 μm 的二氧化矽，又稱犧牲層，下層為厚度450 μm 的矽結構基底層。此製程為圖案化製程，將設計好的圖案從光罩藉由曝光，轉印到晶圓表面的光阻上時所使用的技術。

3.2 高密度活性離子蝕刻(HDP-RIE)製程

此製程為乾式蝕刻，為非等向性蝕刻，主要目的是將曝光後的圖案進行結構製作，讓結構可以形成於SOI晶圓之上層的Si層。

3.3 懸臂結構製程

進行完乾式蝕刻後的結構進行濕式蝕刻，將第二層氧化層去除，形成懸臂結構。濕式蝕刻為等向性蝕刻，而蝕刻速率依照不同的化學溶液以及不一樣的濃度而有所不同，矽半導體中除了矽以外最常見的為氧化矽。以濕式蝕刻去除氧化矽最常使用的為氫氟酸。

3.4 金屬電極濺鍍製程

為了讓元件在之後的量測上更為方便，因此在原件上濺鍍了一層厚度約為 150nm 的導電金屬銅薄膜電極，且銅金屬擁有良好的導電性，且比起金或銀金屬，價格更加便宜，使用儀器為高真空濺鍍系統。

4. 量測與結果

4.1 機械特性量測

機械特性之測量目的主要是得知元件的機械頻率響應及共振頻率。本文所使用的量測儀器為微機電系統運動分析儀(MMA)，製作之元件經 MMA 測量頻率響應，頻率範圍由 900Hz 搜尋至 275kHz，而量測頻率間隔為每 5kHz 擷取一點，如圖 4.1 所示。由圖中得知，在 230kHz 有最大運動振幅，由圖 4.2 顯示在 230kHz 有 7 μ m 的振動位移量，但平行式雙穩態結構未從第一穩態位置到達第二穩態位置，第一穩態位置到達第二穩態位置共有 30 μ m，且需要位移 12 μ m 至 15 μ m 時，元件才得以從第一穩態位置彈跳置第二穩態位置。會造成元件未能到達所需的力量彈跳置第二穩態位置，可能的原因是因頻率過高而元件的質量不夠所致，導致元件沒有足夠的力量位移至第二穩態位置，解決的辦法可以將雙穩態結構的角度設計縮小，角度縮小相對所需的力量也會縮小，再者可以增加元件的質量，增加厚度或者將元件設計得以施加質量塊，改變頻率及位移所需的力量，讓元件能順利的進行高位移量的作動。另外，要更加精準的量測到共振頻率，可將搜尋的頻率間隔縮小，更可精準的擷取不同的頻率點所產生的振幅。

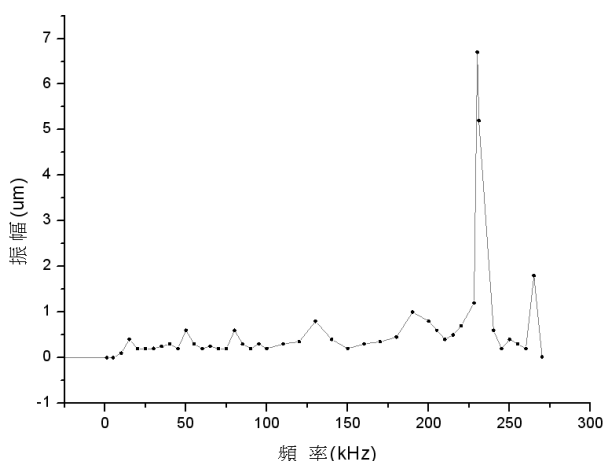


圖 4.1 MMA 量測振幅結果

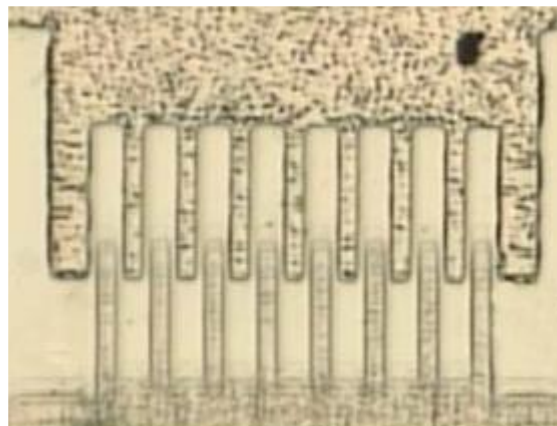


圖 4.2 頻率在 230kHz 時振動位移為 7 μ m

4.2 電性量測

4.2.1 量測寄生電阻

製作元件之量測電路，本文所使用的偏壓電源為 10V 的偏壓源以及 10M Ω 的負載電阻，此電路理想的輸出電壓應該是為 0V，表示沒有寄生電阻的產生。

經三用電表量測得知道的輸出電壓為 0.83V。因此透過分壓原理求得結構的寄生電阻約為 115M Ω ，由於製作元件時沒有沉積絕緣層於結構上，且在製作元件時有微小顆粒附著於結構上，例如梳狀可變電容結構的間隙，造成部分元件的短路，形成一寄生電阻，導致有 DC 電流流過，可由改變製程來解決此問題。

4.2.2 可變電容量測

以積體電路探針系統連接電容計，來量測結構所產生的電容值，以及隨著結構的位移，電容值產生的變化量。兩端的可變電容結構分別為 C1 與 C2，當 C1 的可變電容結構未位移在初始位置，量測到的電容值為 1.7pF。將可變電容結構由 C1 往 C2 位移 15 μ m，此時 C1 量測到的電容值 0.5pF。最後將可變電容結構由 C1 往 C2 位移至第二穩態位置時，C1 的可變電容結構已經呈現出完全脫離固定端的梳狀結構，此時 C1 量測出的電容值為 0pF。

會產生寄生電容的原因經探討得知可能的原因有兩個，首先是由矽基板所產生的寄生電容，再者為空氣中的微小顆粒所產生的寄生電容，微小顆粒的材質不同 面積不同，所產生的寄生電容值也不同。而由 MatLab 軟體去推算的 C1 可變電容值變化及 C2 可變電容值變化中發現，當梳狀結構的重疊面積越多，電容值越多，隨著重疊面積遞減時，電容值也隨之下降，與量測值呈現相同的狀況。

5. 結論與未來展望

1. 由 ANSYS 模擬分析可得知不同的發電器原件有不同的振動頻率，可知在相同的結構尺寸下，雙穩態結構的角度加大，則所需要的振動頻率也會增加。
2. 在發電器結構製作中，理論上乾蝕刻製程會造成的結構破壞，如底切現象、結構線寬縮小等，尤其是破片實驗更為明顯，但由本文中可知乾蝕刻製程所造成的結構破壞並不明顯，主要原因是破片在進行乾蝕刻製程前黏附破片的緊合度非常的密合，沒有出現黏附高低差過大，得以保護結構的側壁遭破壞，再來就是光阻阻擋層的厚度足夠，避免阻擋層不足而破壞結構。
3. 由文獻得知雙穩態結構可擁有高位移以及往復定位的優點，在本文量測中以探針去推動結構使其位移，發現與文獻中雙穩態結構的優點都優越的呈現出來，擁有高度的位移量，在作動的同時，當位移達到臨界點時會自動的從第一穩態位置彈至第二穩態位置。
4. 由機械特性量測得知，在輸入振動頻率230kHz時，有最大振幅 $7\mu\text{m}$ ，但結構並非從第一穩態位置彈跳至第二穩態位置，探討可能的原因為元件的質量不足而造成頻率過大而力量不夠所導致元件無法產生大位移。再者雙穩態結構的角度設計越大，所需要位移的力量也就越大。解決的辦法是可以將元件的厚度增加，來提高元件的質量，或者將元件設計可外加質量塊來改變振動頻率。而設計雙穩態結構的角度可以縮小，或者增加長度，長度越長，相對所需的位移量也會增加，但長度增加，在懸臂製程中很有可能會產生黏滯現象，這可由製程技術來解決。
5. 在微發電器結構製作中，本文所製作的結構為平行式雙穩態結構搭配梳齒狀可變電容結構，並沒有製作撓曲式雙穩態結構搭配梳齒狀可變電容結構，主要原因是因為撓曲式雙穩態結構搭配梳齒狀可變電容結構中的梳齒狀結構在設計上梳齒間距在 $1.5\mu\text{m}$ ，導致在微影製程時無法成功的將梳齒結構間距突顯出來，造成梳齒結構間距處於相連接導通的情況，因此本文只有製作平行

式雙穩態結構搭配梳齒狀可變電容結構之微型振動發電器。

6. 致謝

在本文研究中，感謝不斷給予我指導的指導教授潘吉祥老師，老師教會了我很多事，在研究實驗上提供給我許多學習的環境，讓我可以不斷磨練進步，學習到微機電系統製造的知識與技術，更教導我許多在做人處事上應有的態度，這是在課業上無法修到的寶貴學分。

7. 參考文獻

1. A. J. Bhavnagarwala, X. Tang, J. D. Meindl, "The Impact of intrinsic device fluctuations on CMOS SRAM Cell stability," IEEE Journal of Solid-state Circuits, Vol. 40, no.9, pp. 1804-1814, September, 2005.
2. B. Linden and T. Reddy, Handbook of Batteries: New York: McGraw-Hill, 2002.
3. A. Heinzl, C. Hebling, Muller, M. Zedda, and C. Muller, "Fuel cells for low power applications," Journal of Power Sources, vol. 105, pp. 250-255, 2002.
4. M. Daugherty and K. Leonard, "Utracapactors for Renewable Energy Storage," SolRanol Inc, Feb. 21, 2009.
5. B. C. Roisin, "SOLAR ENERGY," ENGS-44, Sustainable Design, 12 January 2012.
6. 林盈旭，"壓電式振動微發電機之設計與製作" 碩士論文，國立中興大學機械工程系，2002。
7. 郭炯廷，"靜電式振動電能轉換器之改良與測試" 碩士論文，國立交通大學電機與控制工程研究所，2006。
8. 曾繁果，"整合機械式開關之微電容式振動-電能轉換器" 碩士論文，國立交通大學電機與控制工程研究所，2007。
9. 莊凱翔，"用於低壓直流應用之形狀記憶合金電熱式電斷路器之研發" 碩士論文，國立勤益科技大學機械工程系，2011。