

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

微機電技術壓電薄板致動器與感測器元件電極分佈之最佳化設計

Optimal Electrode Distribution Design of MEMS Piezoelectric Piezoelectric Thin Film Sensors and Actuators

計畫編號：NSC 89-2218-E-002-022

執行期限：88/08/01~89/07/31

主持人：張所鉉

執行單位：國立台灣大學 機械工程學系研究所

摘要

本文針對在微機電領域中常見的方型複合壓電薄板作一設計上的探討，藉由電彈理論模型的建立、微元件的設計製造以及實驗的量測，獲得最佳化的壓電複合板之電極分佈情形，進而應用於致動器與感測器的設計。本文針對多層非對稱板進行電彈理論的推導，建立壓電複合板的數學模型，以 Rayleigh-Ritz method 找出位移函式的數值解，並求得不同材料、幾何尺寸下之固有頻率值，及機電轉換效率（Electromechanical coupling coefficient, EMCC）。進而討論機電轉換效率與電極分佈比例的關係，找出最佳化的電極分佈情形。

本文以有機金屬堆積法製造壓電薄膜，進一步利用微機電加工方法設計與製造微元件，其中包括有一部分壓電薄膜作為致動器，另一部分壓電薄膜作為感測器，量測各種不同電極分佈下的電能與機械能轉換情形。由數值計算結果得知，在電極塗佈比例 0.8 的情況下，較電極全佈滿的情況具有較高的機電轉換效率。

Abstract

As we examine mode shapes of a piezoelectric lamina transducer, actuation in some areas of the laminae is more effective than that in other areas. Therefore, for some desired mode shapes, suitable distribution of the electrode will elevate efficiency of electromechanical coupling. This paper studies the electromechanical behavior of the clamped square piezoelectric/elastic thin laminae transducer. The piezoelectric/elastic lamina consists of a silicon dioxide laminated with piezoelectric material which is fabricated by Metallo-Organic Decomposition (MOD) method. The analysis is aimed at the dependence of the size and location of the distribution of the electrode on the dynamic performance.

To study the characteristics of the laminae transducer an electroelastic plate theory, including the equilibrium equations,

the geometric relationships, the constitutive relations and the electrostatic equations is developed. The theoretical model includes one part that is covered by electrode and the other without electrode. The dynamic behaviors of the transducer include resonance frequencies, dynamic strain energy and electromechanical coupling coefficient (EMCC). Numerical analysis is conducted and results illustrate the optimum distributed-electrode design of particular mode shape. It is found that the 80 % electrode distribution has the stronger electromechanical coupling effect than the full distributed ones.

一、前言

微機電系統(Microelectromechanical systems, MEMS)是以半導體製造(Microelectronic fabrication)技術為基礎，製作出可控制(Controllable)及可移動(Moveable)的機械結構，廣泛地被應用於生醫、航太、汽車、環工及消費性電子產品等方面。

由於尺寸方面的大幅度縮小，與製程、組裝及操作上的限制，在感測器與致動器之驅動方式上，與傳統的驅動方式相較，將需要採用不同方式，在各種驅動方式中，壓電材料由於具有機電能互換的能力，能量密度高、動作反應快及對環境敏感度低等優點，因此在微機電系統領域，以壓電薄膜(Piezoelectric thin film)所製作的微型感測器與微型致動器甚受重視。

本文針對壓電微元件中常用的複合薄板結構建構理論模型，以數值運算並配合機電耦合係數（Electro-Mechanic Coupling Coefficient, 簡稱 EMCC）的概念，建立四邊固定非對稱複合板的位移函式，進而推導壓電複合板的最佳化電極分佈情形，並將運算的結果與有限元素分析的結果作比較。本文更進一步應用壓電薄膜製作技術於設

計微元件，以實驗量測的方式找對最佳化之電極分佈，同時由微元件的實驗針對各種機電轉換效率的假設作一驗證。

二、設計分析與製造結果

2.1 設計概念

由於在元件製作時所選用的矽晶圓基底為直接從 NOVA Electronic Material, Inc. 購得，為 <100> N 型雙面拋光 4 吋矽晶圓，在矽晶圓的兩面上各以熱氧化方式長成厚度為 1mm 的二氧化矽，在其一面上鍍上 20nm 的鈦與 150nm 的鉑金屬。其中，二氧化矽為方形壓電複合薄板之彈性材料部分，所以元件本身彈性材料厚度為固定的。為了製作出不同比例彈性與壓電材料的複合薄板，利用在有機金屬堆積法製造壓電薄膜的過程中，旋鍍預備溶液層數的不同以製作厚度不同的壓電薄膜。因此，決定單一方形壓電複合薄板元件的結構如圖 1 所示。

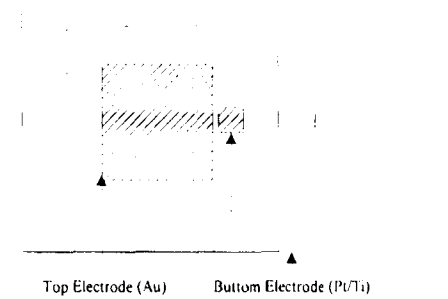
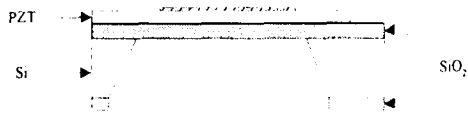


圖 1 單一方形壓電複合薄板元件的結構

2.2 位移函式的建立

本文針對由 6mm 點群壓電材料與等向性的彈性材料所組成之方形壓電複合薄板，以電彈理論經由適當的假設及忽略推導其運動方程式。由於在方板四周皆為固定的邊界條件情形下運動方程式並無解析解，本文利用 Rayleigh-Ritz method 找出位移函式的數值解，並求得不同材料、幾何尺寸下之固有頻率值，及機電轉換效率 (Electromechanical coupling coefficient, EMCC)。本文推導壓電複合板的統御方程式如下：（包括具電極激發與不具電極的部分）

$$D_1^* \frac{\partial^4 W_3}{\partial x^4} + 2D_{11}^* \frac{\partial^4 W_3}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{11}^* \frac{\partial^4 W_3}{\partial y^4} - R_0 \omega^2 W_3 = 0$$

$$D_1^* = (H(x - \pi a) - H(x + \pi a))(H(y - \pi a) - H(y + \pi a))(D_{11} - D_{11}) + D_{11}$$

$$D_{11} = \frac{Eh_1(h_1^2 - 3h_1h_n + 3h_n^2)}{3(1 - \nu_0^2)} + \frac{h - h_1}{12s_{11}^E(1 - \nu_1^2)(1 - 2B)} \left\{ 4 \left[(h^2 + hh_1 + h_1^2) - 3(h + h_1)h_n + 3h_n^2 \right] (1 - B + B\nu_1) - 3B(h + h_1 - 2h_n)^2(1 + \nu_1) \right\}$$

$$\overline{D}_1 = \frac{Eh_1(h_1^2 - 3h_1h_n + 3h_n^2)}{3(1 - \nu_0^2)} + \frac{(h - h_1)(1 - B + B\nu_1)}{3s_{11}^E(1 - \nu_1^2)(1 - 2B)} \left\{ (h^2 + hh_1 + h_1^2) - 3(h + h_1)h_n + 3h_n^2 \right\}$$

本文由數值方法推得位移函式為：

$$u_3 = \sum_i q_i(\omega) \cdot \Psi_i(x, y) \\ = m_0 \sum_i \left[\left[\sum_r \frac{\phi_r^{(i)} \phi_r^{(i)}}{\omega_r^2 - \omega^2} \left[\int_{\Omega} \Psi_i(x, y) d\Omega \right] \right] \left[\sum_r c_r \phi_r^{(i)}(x, y) \right] \right] e^{i\omega t}$$

2.3 分析

進而討論機電轉換效率與電極分佈比例的關係，找出最佳化的電極分佈情形。發現全佈滿電極時的機電耦合係數略小於塗佈比例 0.8 的情況，如圖 2 所示；在改變電極塗佈比例下，可觀察出固有頻率隨著電極塗佈比例的遞增，呈現小幅度遞減，如圖 3 所示。

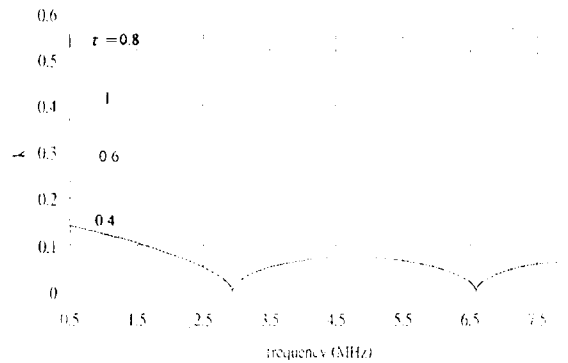


圖 2 k_e 隨頻率變化的情形

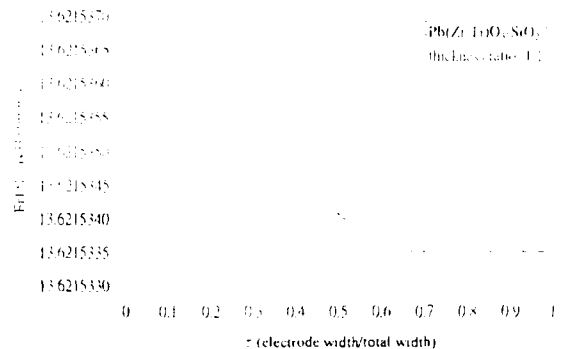


圖 3 固有頻率和邊長平方乘積與電極分佈比例的關係

2.3 製造

本研究中選用MOD方法製造壓電薄膜使用Pb, Ti, Zr之有機化合物, 其中鋇:鈦之比例為54:46, 在鍍有鉑的矽晶圓上, 使用以下之程序製作出PZT薄膜,

準備基底-->藥品混合-->旋鍍預備溶液-->熱解-->熱處理

微致動器之製造程序則經由四道光罩與圖2之光蝕刻技術, 程序製造如下:

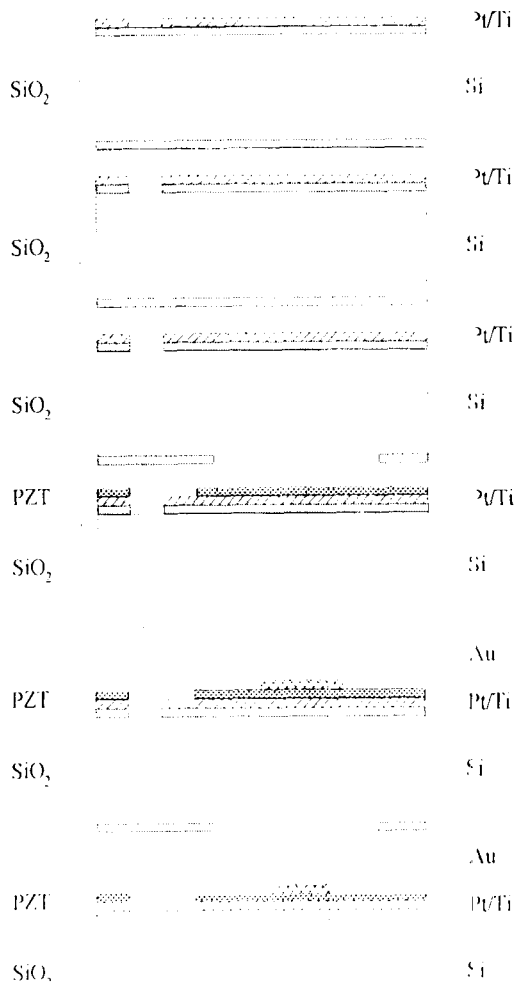


圖 4 光蝕刻技術

1. 在矽晶圓表面製作元件之底層金屬電極: 將所欲圖形轉移至矽晶圓上, 以光阻為保護層, 利用王水蝕刻矽晶圓正面之鉑鈦金屬層部分, 如圖 4 (a) 所示

2. 矽晶圓正面的二氧化矽層的蝕刻: 目的為去除正面二氧化矽層部分, 以利於步驟三以紅外線光罩對準儀作雙面圖形的對準, 如圖 4 (b) 所示

3. 製作矽晶圓背面非等向性蝕刻之保護層: 本文以紅外線光罩對準儀做雙面圖形對準, 使之與正面的鉑鈦金屬層圖形有正確的相對位置。以光阻為保護層, 利用 BOE 對矽晶圓背面之二氧化矽層進行蝕刻, 蝕刻之圖形則作為後序步驟中非等向性蝕刻之保護層, 如圖 4 (c) 所示。

4. 鍍著壓電薄膜, 並蝕刻部份壓電薄膜使底層電極露出: 以有機金屬堆積法製備壓電薄膜, 爾後微影圖形至晶圓上, 以光阻為保護層, 使用 BOE 來蝕刻壓電薄膜層部分露出底端電極, 如圖 4 (d) 所示。

5. 製作元件之上層金屬電極: 微影所欲圖形至壓電薄膜層上, 利用去除光阻 (Lift-off) 程序鍍著壓電複合元件的上層金屬電極, 如圖 4 (e) 所示。

6. 對矽晶圓中不需要的矽部分進行非等向性蝕刻: 以氫氧化鉀作矽的非等向性蝕刻, 達到所設計的法型薄片元件的面積及厚度, 如圖 4 (f) 所示。

2.5 性能量測實驗

阻:抗(Impedance)量測:

利用 HP 4194A 數位訊號分析儀(Impedance/gain-phase analyzer)所提供的阻抗量測用探針(Impedance probe kit), 直接量測在不同驅動頻率下薄片元件的阻抗值。由阻抗分析圖中, 可以觀察出複合薄片元件所產生共振與反共振的現象。如圖 5 所示為寬 2000 μm , 壓電厚度 0.3 μm 的複合壓電板, 在電極全佈滿下的阻抗值量測結果

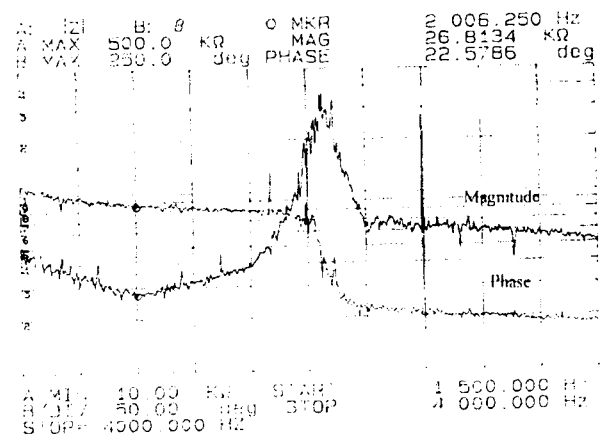


圖 5 複合壓電板電極全佈滿下的阻抗值

鐵電性質量測:

本文利用 RT66A 鐵電材料測試系統 (Ferroelectric test system), 量測壓電薄膜極化電場之遲滯曲線 (P-E

hysteresis curve)，以觀察所製作壓電薄膜的鐵電性質，可得薄膜壓電性的強弱。

比較不同的含鉛比例預備液所製作的壓電薄膜，在各起始電壓驅動下的飽和極化值、殘留極化值與矯頑電場值如表 1 所示。

表 1 壓電薄膜 P_s 值、 P_r 值與 E_c 值比較			
鉛未過量			
最大輸入電壓	$P_s (\mu C/cm^2)$	$P_r (\mu C/cm^2)$	$E_c (kV/cm)$
5 V	26.489	0.697	3.586
10 V	34.273	7.552	28.620
15 V	41.476	17.776	77.532
鉛過量 5 %			
5 V	-0.12	6.776	164.737
10 V	30.323	65.874	269.866
12 V	33.228	52.514	270.925

介電常數量測：

本文針對製作的壓電薄膜於常溫下，量測輸入頻率與介電常數的變化關係，其中鉛過量 5 % 的相對介電常數與頻率的關係如分別如圖 6 所示。比較量測資料可得，而鉛未過量的壓電薄膜則可以承受較高頻率的工作頻率，故壓電薄膜的製作品質與工作頻率範圍有直接的相關。

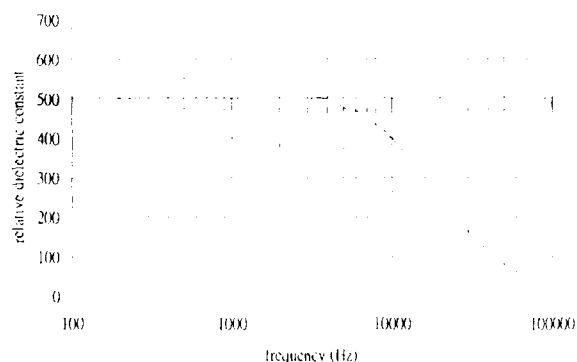


圖 6 鉛過量 5 % 的相對介電常數與頻率的關係

三、結論

本文針對以微機電系統製作技術所製作之非對稱方形壓電複合薄板之電極塗佈最佳化作一完整之分析，包括：理論分析、有限元素法分析、微機電加工元件製作及性能量測。

本文藉由壓電板內能關係定義的機電耦合係數，求得在特定頻率範圍內，不同電極塗佈比例與機電耦合係數的關係，作為評估壓電複合薄板元件性能之參考。由計算

結果得知，在壓電材料電極為全覆蓋的情形下，機電耦合係數略小於塗佈比例 0.8 的情況，與有限元素法求得的電位移分佈圖形相符。同時觀察出固有頻率隨著電極塗佈比例的遞增，呈現小幅度遞減。

本文以有機金屬堆積法製作壓電薄膜，並利用實驗儀器量測出壓電薄膜之材料特性。進一步製作方形壓電複合薄板元件，並進行微元件性能之量測。本文發現以鉛不過量、750 °C 退火下所製作出的壓電薄膜良率可大幅提高，有效地減少壓電材料層表面的缺陷，其鐵電性質、最大承受電壓與介電性上均有較佳的性能。

四、參考文獻

- S. P. Beeby and M. J. Tudor, "Modelling and optimization of micromachined silicon Resonators," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 5, pp.103-105, 1995.
- S. H. Chang and Y. C. Tung, "Electro-elastic characteristics of asymmetric rectangular piezoelectric laminac," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect. and Freq. Contr.*, 46 4), pp. 950-960, 1999.
- S. P. Beeby and M. J. Tudor, "Modelling and optimization of micromachined silicon Resonators," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 5, pp.103-105, 1995.
- K. Funk, T. Fabula, G. Filk and F. Lürmer, "Piezoelectric driven resonant force sensor: fabrication and cross talk," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 5, pp. 143-146, 1995.
- Yoshitaka Matsuoka, Yoshimi Yamamoto, Kazuji Yariada, Satoshi Shimada, Masanori Tanabe, Akio Yasukawa and Hidetoshi Matsuzaki, "Characteristic analysis of a pressure sensor using the silicon piezoresistance effect for high-pressure measurements," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 5, pp. 25-31, 1995.