

壓電微型加速度計之製作與特性量測

何建龍 余志成*

國立台灣科技大學 國立高雄第一科技大學
機械工程系 機械與自動化工程系

摘要

本文探討微型壓電加速度感測器的製作與訊號量測，以薄膜中間設置震動島塊的簡化構造研究元件結構製作、鋇鈦酸鉛壓電薄膜 (PZT) 極化及特性分析、與元件量測技術。在以塊材微細加工技術製作震動島塊時，為避免振動質塊發生底切現象，本文也建議一種結合 $\langle 110 \rangle$ 方向細長條及 $\langle 100 \rangle$ 方向 Band 的補償方式，可作為當島塊深寬比較大，而島塊周圍光罩補償空間受限時使用。另一方面，本研究亦分析極化對於提升 PZT 壓電薄膜之壓電特性的影響，文中最後進行加速度計的量測設備設置、放大電路設計以及動態訊號量測，初步的量測結果已驗證元件設計與製程的可行性與頻率特性，加速度計的敏感度約為 6.9mV/g。

Keywords: 微加速度計、鋇鈦酸鉛薄膜、極化

Subject Category: Actuators and Mechanical/Physical Sensors, Material Characterization and device Testing

1. 前言

微加速度計屬於機械感測器的一種，發展至今有幾種不同的感測方式，如壓阻、電容、壓電[1]、熱阻、穿隧式等等，所量測的加速度變化經由轉換元件轉換為電阻、電流或電壓等電器量。不同的感測方式各有其優缺點，其中由於壓電材料具有單位形變所產生的電荷密度高、動作反應快、雜訊低、輸出力大、對環境干擾的敏感度低等優點，使得壓電式加速度計相較於其他加速度計有操作溫度高、極佳動態性能、量測範圍及頻寬高、訊號大且較為線性的優勢。壓電材料薄膜化除保有塊材的壓電特性外，更具有低成本的優點。在各種的壓電薄膜材料裡，鋇鈦酸鉛 (PZT) 薄膜是屬於鈣鈦礦結構之強鐵電材料，壓電係數較 AlN、ZnO 等壓電材料高一個等級，因此可提供更高的感測敏感度，再加上可以利用添加物來改善

PZT 的壓電性，使得 PZT 壓電薄膜之生產與應用更為廣泛。

2. 加速度計的設計與製造

2.1 微加速度計的設計

本文所研究之微加速度計有兩種，分別為懸樑型微加速度計[2]以及薄膜型微加速度計。對於懸樑型微加速度計 (如圖 1)，之前的研究成果已有完整的機電系統模式推導及利用有限元素軟體 ANSYS 驗證其理論及設計結果，並已完成元件之製程規劃及元件尺寸之初始設計與最佳設計探討，在元件製作上也完成了正面壓電轉換圖形的製作[3]。而為了驗證 PZT 壓電薄膜運用於微加速度計的可行性並考量製程的難度，我們另設計了薄膜型微加速度計，經由 Intellisuite 分析薄膜與島塊受加速度作用時的應變分佈情形，再將壓電轉換元件放置於應變最大的區域以獲得最大的輸出響應 (如圖 2)。不論是懸樑型或是薄膜型

微加速度計，其架構均是將一具有壓電轉換特性的材料放在感測器的薄膜結構上，當振動質塊感應到外來加速度的衝擊時，會帶動薄膜的彎曲變形，置於其上的壓電轉換元件也會隨著彎曲變形而有一電壓訊號輸出，加速度愈大，薄膜變形量愈大，輸出的電壓愈高。

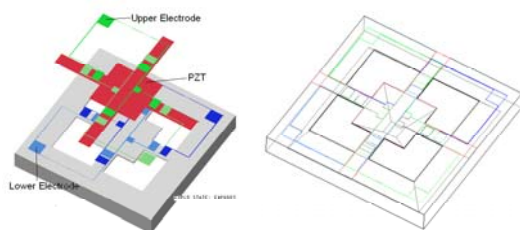


圖 1 懸樑型微加速度計三維示意圖

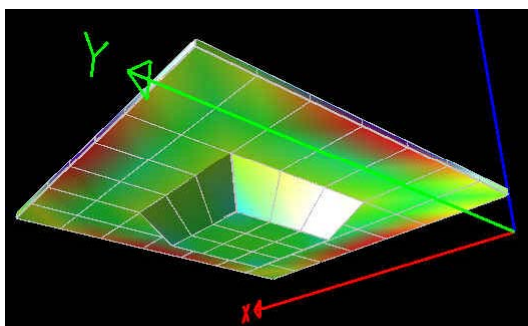


圖 2 Intellisuite 分析薄膜與島塊受加速度作用時的應變分佈

2.2 微加速度計製程規劃

本文的壓電微型加速度計依據不同的設計構想（懸樑型及薄膜型）而有不同的製程規劃。基本上均為整合面型微細加工技術（Surface Micromachining）、塊材微細加工技術（Bulk Micromachining）及 Sol-Gel 壓電薄膜的微加工製程，僅在 KOH 濕蝕刻矽基材之後，懸樑型要用乾式蝕刻法製作出十字型懸樑結構而薄膜型則不需要的差別，薄膜型加速度計的詳細製作流程如圖 3。

2.3 壓電轉換元件製作

壓電轉換元件一般由上下金屬電極中間夾壓電材料的結構所組成，而本文中的壓電轉換元件為金屬下電極

LSMO 氧化物電極/PZT 壓電薄膜/金屬上電極所構成的三明治電容結構，上、下金屬電極採 Pt/Ti 的結構，以 Lift Off 的方式製作，LSMO 氧化物電極及 PZT 壓電薄膜則使用 Sol-Gel 法配置前置溶液，再用旋鍍法披覆薄膜。在金屬電極與 PZT 之間加入具有鈣鈦礦 (Perovskite) 結構的 LSMO 氧化物電極薄膜，可改善鐵電薄膜與金屬電極間因晶格常數不匹配與熱膨脹係數差過大造成熱應力龜裂的問題。[4]

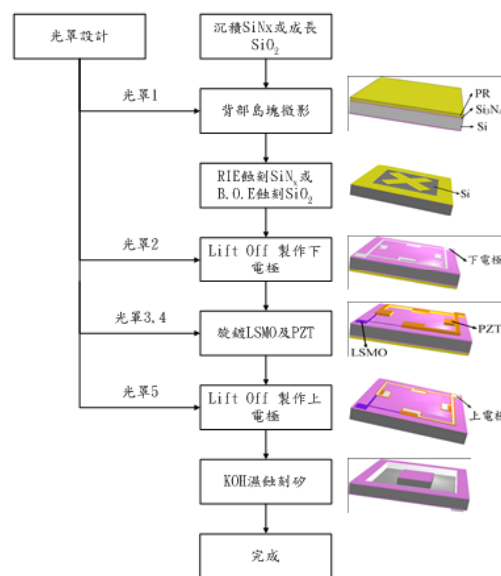


圖 3 薄膜型微加速度計的製作流程圖

3. 島塊之凸形角落蝕刻補償

由於矽基材被 KOH 蝕刻時會因底切效應造成凸角的四個尖點無法留存，因此必須在島塊的角落上設計補償的圖形[5]，圖 4 為本文使用之 $\langle 100 \rangle$ 方向加上長帶的補償方式，帶的兩邊是 $\{100\}$ 面，其蝕刻速率與深度方向的蝕刻速率相同，因此，若要達到完全補償的效果，帶的寬度必須等於蝕刻深度的兩倍，而且帶的長度必須夠長，使 $\langle 410 \rangle$ 方向的側邊及 $\langle 410 \rangle$ 方向側邊的交點的底切先停止，只剩 (100) 側面定義最後的底切，以 30wt% KOH 為例，帶的長度最少必須為帶寬的 1.6 倍[6]，圖 5 為蝕刻深度達 $358\mu\text{m}$ 之島塊圖。

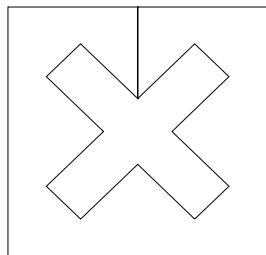


圖 4 <100> 方向長帶的補償方式

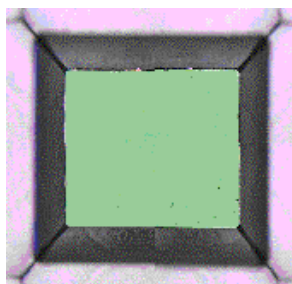


圖 5 蝕刻深度達 358μm 之島塊 OM 圖

若需製作較小質量的島塊時，島塊之頂端面積會縮小，以島塊頂端面積為 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ 為例，若要達到 $270 \mu\text{m}$ 的蝕刻深度，則其頂端面積至少要有 $764 \times 764 \mu\text{m}^2$ ，因此可知其頂端空間明顯不足，故 <100> 方向 Band 的方式不適用。為解決此一難題，可結合 Band 與 <110> 方向的細長條的補償方式 [7]，作為高深寬比島塊蝕刻時的角落補償設計，圖 6 為光罩設計與蝕刻模擬結果。

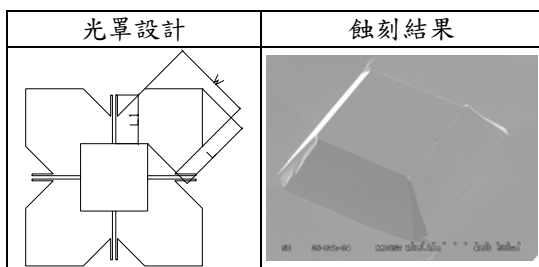


圖 6 高深寬比島塊角落補償與蝕刻結果

4. 極化對薄膜壓電性的影響

某些壓電材料在未極化以前並不具有壓電特性，需經過直流高壓的極化處理，使原來混亂分佈的晶域依極化電場的方向作規則的排列，使晶域內之偶極矩方向平行於電場方向，即可具備壓電特性。在極化處理時，極化的電場選擇十分重要，太小的電場

無法得到有效的極化，太大的電場容易使 PZT 產生裂縫，甚至於使 PZT 崩潰。而對任何組成而言，極化電場的下限為矯頑電場 (E_c)，上限為飽合電場 (E_s)。本文的 PZT 壓電薄膜厚度僅 $0.3 \mu\text{m}$ ，在極化電場等於 3 倍矯頑電場 (E_c)，極化溫度為 120°C 的極化條件下，僅極化 1 分鐘即使得 PZT 崩潰，為考量元件的妥善率，決定以提高極化電場到 5 倍矯頑電場 (E_c) 及延長極化時間 (30 分鐘) 來取代加溫的效果。表 1 為極化前後各種壓電特性比較表，極化後的 PZT 薄膜之殘留極化值 (P_r) 由 $15.82 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 提升至 $19.99 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、相對介電常數 (ϵ_r) 由 872 提升至 1059、橫向壓電應變常數 (d_{31}) 由 $-75.7 \text{pC}/\text{N}$ 提升至 $-116.2 \text{pC}/\text{N}$ ，薄膜特性的提升對於感測器訊號的敏感度將有正面的幫助。

表 1 極化前後各種壓電特性比較表

	P_r ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	C(nF)	ϵ_r	d_{33} (pC/N)	d_{31} (pC/N)
極化前	15.82	10.30	872	228.4	-75.7
極化後	19.99	12.51	1059	350.5	-116.2

5. 動態性能量測

圖 7 為動態量測設備圖，為了產生連續的動態加速度，我們使用振動器 (Shaker) 當作產生加速度的振動源，而加速度的大小由函數產生器 (Function Generator) 以調整頻率及振幅來改變，功率放大器 (Power Amplifier) 將由函數產生器輸出的訊號放大以推動振動器，將欲量測的加速度計固定在振動器上，使其承受與振動器同樣大小的加速度作用，此時加速度計的壓電轉換元件即會因懸樑或薄膜的彎曲變形而有電荷輸出，將此電荷經放大器處理後即可在示波器上讀出加速度計的輸出值大小，圖 8 為加速度約 14.5g 時量測之電壓值，大約為 100mV ，換算為敏感度 (Sensitivity) 約為 $6.9\text{mV}/\text{g}$ 。

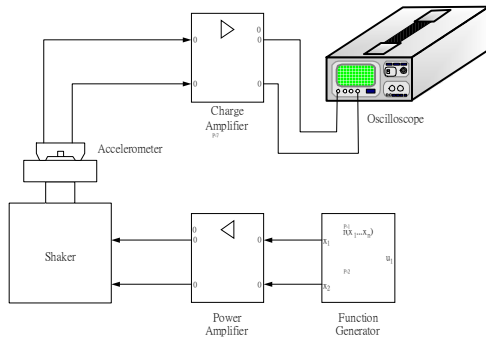


圖 7 動態量測設備圖



圖 8 加速度等於 14.5g 的電壓響應

為提高測試訊號的頻率，本研究另以喇叭作為聲波振動源所量測的輸出結果，從 20KHz~60KHz 的量測範圍，輸出值約從 150mV~200mV 之間如圖 9 所示。



圖 9 聲波振動量測結果

壓電薄膜的壓電特性的影響。最後進行量測設備設置、放大電路設計及動態訊號量測，雖然定量的敏感度量測結果尚未完成，但薄膜型加速度計在振動器產生之訊號特信以證明元件設計與製作之可行性。

謝誌

本研究承蒙國科會支持，計劃編號 NSC-92-2216-E-327-001，特誌謝意。

參考文獻

- [1]. Scheeper, P., "A Piezoelectric Triaxial Accelerometer", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 6, pp. 131-133, 1996.
- [2]. Yu, J. (余志成) and Lai, F.H. (2001), "Design And Fabrication Of Microaccelerometers Using Piezoelectric Thin Films", *Ferroelectrics*, Vol.263, pp.101-106.
- [3]. 李幸峰、余志成, (2001), "壓電薄膜加速度微感測元件之製程規劃與研究", 中國機械工程學會第十八屆全國學術研討會, 新興工程技術論文集, 2001/12/7-8, 台灣科技大學.
- [4]. Wang, Fan and Leppavuori, S., "Properties of Epitaxial Ferroelectric $PbZr_{0.56}Ti_{0.44}O_3$ Heterostructures with $La_{0.5}Sr_{0.5}CoO_3$ Metallic Oxide Electrodes", *J. Appl. Phys.*, 82 (3), August 1997, pp1293-1298.
- [5]. Gregory, T., Nadim, I., and Kurt, E., "Bulk Micromachining of Silicon", *Proceedings of the IEEE*, Vol.86, No. 8, August 1998, pp1536-1551.
- [6]. Zhang, Qingxin., Liu, Litian., Li, Zhijian., "A new approach to convex corner compensation for anisotropic etching of (100) Si in KOH", *Sensors and Actuators.*, A 56, 1996, pp.251-254.
- [7]. 林宜良、林煌堯、余志成 (2003) "化學溼蝕刻高深寬比凸角矽結構光罩補償圖形設計" 第三屆機密機械製造研討會, 2003/12/5, 國立中山大學.

6. 結論

本文已成功製作出薄膜型結構之加速度計，並研究極化對於提升 PZT