

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

環形平面加速規與陀螺儀混成式微感測器之研究與實作

The Investigation and Realization of Ring-type Vibration Motion Sensor - Planar Motion detector

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-062-

執行期限：90年8月1日至91年07月31日

主持人：成維華 交通大學機械工程研究所

共同主持人：程 曜 行政院同步輻射中心微機械實驗室

一、中文摘要

本計畫主要研究以微加工技術實現一結合加速規功能與陀螺儀功能之混成式運動感測器。所謂混成式運動感測器即是整合加速規之加速度偵測功能與速度陀螺儀之角速度偵測功能於一感測器設計中，其功能包含二維加速度感測與一維角速度感測。計畫中將針對微型加速規與環形振動微陀螺儀為主體，以整合性設計為目標，研究加速度與角速度之功能性結合，其結合則包含微結構與控制迴路。應用微加工技術，可提供微結構與控制迴路間良好的整合。加速規與陀螺儀在許多領域已有相當廣泛的應用，而具有加速度與角速度複合功能之混成式感測器，則可大幅增加應用的彈性與廣泛性。計劃中將以加速規與速度陀螺儀結合的觀點進行微結構設計、感測機制設計、控制迴路與比較迴路設計。由於混成式微感測器的工作原理係利用靜電力驅動結構於結構之自然共振頻率，藉以獲得最大的響應，而此時結構參數所影響的模態將影響系統運作績效，由此，研究中將對微感測器結構部分進行結構模態分析，對於各階的模態分析將可了解複合式感測運作機制之積效，並對微結構參數設計與相對應的感測機制提供重要參考指標。微結構之動態特性將影響計劃目標中的加速度與角速度複合感測機制，因此對微結構及對應的控制迴路的動態特性，如頻率響應與相位改變，對於不同受力及受加速下的狀況，將加以了解。由於微結構對於加速度與角速度有相異之動態特性，除了微結構設計外，所對應之控制迴路亦須研究相異動態特性之整合性。計劃將利用微加工技術與半導體製程技術整合製造，以達到系統化之整體設計與加工。在利用微加工時，由於加工過程精密度高，可將元件尺寸縮小至數百微米等級，更可利用微加工技術批次製造的特性降低所須成本，以求更廣泛的應用。在微加工過程中，除結構部份外，所需之系統運作配合的電路部份如：訊號放大迴路、訊號處理迴路、控制迴路等，可同時構建於結構加工過程。

關鍵詞：加速規，陀螺儀，微加工技術

Abstract

This study proposes to analyze the dynamic mechanism of vibrating ring gyroscope. The analysis of the structure emphasize on the shape, geometric symmetry, size effect, modal analysis, impedance matching of the structure, acceleration effect, and temperature compensation. It offers the optimum of the design parameters. With the micromaching technique, both the minimization of the structure and the electrocircuits supporting the operation of gyroscope can be designed and fabricated simply and systematically. The diagnostic testing platform would be established and providing testing calibration right after the realization of ring gyroscope. Though gyroscope has been widely, extensively used in inertial guidance, it contains great potential of application for common used and commercial electronics. For the complication and high-cost, conventional spinning gyroscope seldom is the application for common purposes. Most low-cost, medium-performance gyroscopes are vibrating gyroscopes. The vibrating ring gyroscope, supposed to be analyzed in this study, is superior to the vibrating gyroscope for it's more robustious to the disturbance from environment. The vibrating gyroscope operates with the resonant frequency, which is used to drive the structure; and it would directly effect the efficiency. Therefore, the mode shape for the resonant frequency should be carefully analyzed. Moreover, with the analysis about the effect form the acceleration, the vibrating ring gyroscope operates attitude sensing and acceleration sensing. Vibrating gyroscopes have no rotating parts that required bearing, they can be easily miniaturized and batch fabricated using micromachining to produce low-cost, hundred-micrometer-size device. Inaccuracy always happens in any manufacturing process. A diagnostic error method to figure out the manufacture inaccuracy would be derived.

Keywords: accelerometer, gyroscope, micromaching technique

二、緣由與目的

加速規與陀螺儀配合於慣性導航已有非常廣泛的應用，舉凡飛行航空器如：飛機、直昇機、導向飛彈等等，其主要功能為感測載具於空間中運動所產生的姿態變化，單軸陀螺儀可感測物體對單一軸向旋轉的旋轉量與旋轉率，即角度與角速度。陀螺儀配合加速規，即可忠實紀錄載具於空間中位置的變化，在導航方面有很大用處。另外，加速規與陀螺儀可感測載具於空間中的姿態變化，對控制方面，如：飛行姿態控制、穩定度控制，可提供物體姿態狀態的重要資訊。除了航空載具之外，在一般消費性電子產品及民生應用上，加速規與陀螺儀也具有很大的應用空間，從汽車的全車狀態控制到虛擬實境中的力感手套，皆有很好的應用。微小化的慣性感測裝置，如：加速規，已應用於一般尺寸構件的動態感測，甚至微小尺寸系統的狀態量測也因為感測裝置的微小化，而被廣泛應用，加速規則是其中之一。然而傳統的陀螺儀，簡單包括旋轉件及環架，也因為高速旋轉件的存在，在設計上必須加入軸承與溫度控制的部分，需要許多相關的配件設計，由於配件繁多設計複雜，製造成本較高，在達到要求精度的前題下，元件尺寸不易縮小，不易於一般應用中利用，也因此失去許多可應用的空間。而振動式陀螺儀不具旋轉件不須軸承，使得結構大幅簡化，製造方便，再配合利用微機械加工技術，加工過程精密度高，可將元件尺寸縮小至數百微米等級，更可利用微加工技術批次製造的特性，降低所須成本，以求更廣泛的應用。隨著半導體製程技術進步所伴隨而來微機械加工技術的進步，已有許多低成本微小化的加速規被設計出來，由此帶動了微小化陀螺儀的開發。一般來說，加速規配合陀螺儀的感測所提供的感測資訊，可經過計算而得到物體於空間中狀態的改變，包括位置、速度、加速度及姿態。因此將加速規與陀螺儀整合於一系統中，可免除兩元件訊號協調的界面問題，亦可提高感測器使用的彈性與廣泛性。而計劃中，將採用微加工技術來整合加速規與陀螺儀整合於一系統。

慣性加速規所利用的工作原理是量測抑制測試質量移動力量的大小，此一抑制力量的大小則反映加速度的大小。根據牛頓第二運動定律，一質量受力正比於加速度。根據虎克定律，一彈性體受力與位移成正比。現採用抑制力使位移回復，此時抑制力大小即正比於加速度，上述抑制力可分為機械式的彈性抑制型、黏度剪力抑制型及慣性抑制型，

非機械式的靜電力平衡型與電磁力平衡型，本計劃則採用靜電力平衡型。振動式陀螺儀，結構簡單，製造方便，容易利用微機械加工方式製造，現今低成本、中精度效果的陀螺儀設計是以振動式陀螺儀為主。事實上，已有許多微型陀螺儀的應用，例如：遙控模型飛行載具、電腦用無線滑鼠等[2]。振動式陀螺儀，基本上，可分為：彈性樑振動陀螺儀、音叉式振動陀螺儀、雙加速規式陀螺儀及殼振動式陀螺儀[3,4]，計畫中採用的環形諧振陀螺儀為殼振動式陀螺儀的一種。振動式陀螺儀運作原理係利用科氏加速度，於桿件振動的過程中，若元件存在一旋轉量，振動桿件即會受科氏力所影響[5-13]。

基本上，微機械加工技術可分：面加工技術、體加工技術、厚膜加工技術及LIGA製程[1]。面加工技術所製造出的結構特徵為大面積，相對厚度較小，成品為一平行製造面的薄膜結構，若以這種結構作為機械主體，施以平行於結構的力，易產生挫曲，若施以垂直結構的力或力矩，則顯彎矩不足，特性不佳。因製程所限，不易製造大面積的懸浮結構。因此，應用面加工技術所製造的大多為利用薄膜結構特性的元件，如：薄膜壓力感測。體加工技術基本上是面加工技術的延伸，主要係利用非等向性蝕刻及選擇性蝕刻以求製造懸浮結構，然此種製造技術仍無法造出相對厚度較大的結構，也面臨與面加工技術類似的問題，如：彎矩不足、易產生挫曲等。主因為面加工技術與體加工技術皆利用目前的半導體製程，並不能製造滿足機械方面需求的3D結構。為了製造出符合要求的3D結構，須利用厚膜加工技術或LIGA製程。面加工技術與體加工技術之所以不易製造較高深寬比的結構，原因是曝光所用光束能量較低，對光阻深層部分曝光量不足，若厚曝光量不足，曝光過程未達預期效果，結構即無法順利形成。解決方式即是以能量較強的光束，對厚光阻進行曝光，使光阻深層得以順利曝光，以達到要求，其後再以沉積或電鑄方式建構所需結構。

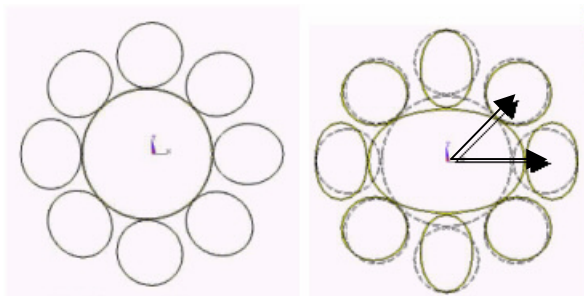
結構驅動方式係利用靜電力，於結構圓環旁設置電極，藉改變電極電壓造成對圓環產生不同程度施力的功能，而使圓環形狀改變與振動[14]。相反的，電極具有感測圓環位移的功能，即利用圓環與電極間不同距離下，電極感應電壓值會改變，以推測出圓環與電極間的距離。加速度作用下，結構受力亦對圓環與電極間的距離產生影響，於是，感測電極電壓值亦可感測加速度效應。混成式微感測器設計除了結構部分外，另一部分為支援運作的電路部分。電路部分可分為感測電路與控制電路。感測

電路包括放大電路與鎖相迴路。放大電路連接電極訊號，藉由 unity-gain buffer 接收電極訊號，再利用 buffer amplifier 放大訊號[15,16]。鎖相迴路用以感測訊號頻率，並有消除雜訊、再現訊號的功能 [17-20]。控制電路用以穩定訊號使圓環達到所需頻率與振幅，控制器係利用 PID 控制法則，參數設計原則為減少訊號振盪的現象。電路部分以矽晶片為基板，以DRIE技術製造結構主體，再以MOS製程製作所需電路，封裝元件，即完成。

計畫將針對加速規與陀螺儀整合設計為主軸，以環形振動式陀螺儀為架構，將加速規功能與既有的陀螺儀功能予以整合。感測與控制迴路亦需考慮多重訊號的傳輸與解耦。製程上，需考慮基板熱膨脹係數與結構不同，會造成溫度飄移。另外，因製造上或結構設計上的缺陷，共振模態將改變，會影響整體效能。計畫將對上述數個項目進行改善。如：對因基板材質所造成的溫度飄移進行溫度補償、改變支撐架設計以便控制加速度所造成的不良效果。進而對製造過程或環境所造成的個項缺陷作測試與補償。

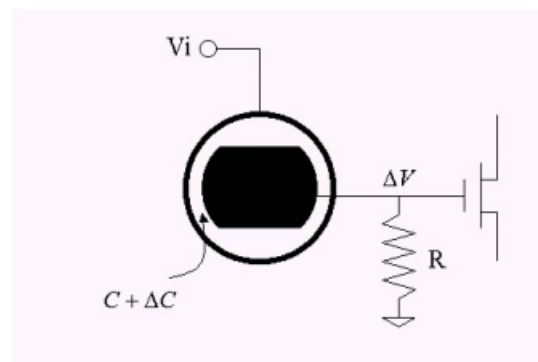
三、研究結果

本計畫感測器之結構設計係以 D4 對稱結構為主，並結合陀螺儀與加速歸之功能為目的。根據模態分析，結構振動行為可視為各振動模態之線性組合。就加速度而言，如圖一左，結構受加速度狀況下，於相對中心位置之兩環產生壓迫與拉伸之變形，可用於加速度感測。就角速度而言，二階振動之兩主軸夾角為 45 度，如圖一右。兩振動主軸相互具有能量封閉性，換言之，無外力作用下，對一組主軸振動不會轉移至對另一主軸振動。若結構主體旋轉，造成科氏力產生，而使原於一主軸振動的能量轉移至另一主軸，科氏力激起另一主軸的振動。此一振動量即正比於角速度。而上述之加速度與角速度在頻率上屬不同頻帶，可藉由濾波方式分別量測。因此可於同一結構上達成量測加速度與角速度之功能。



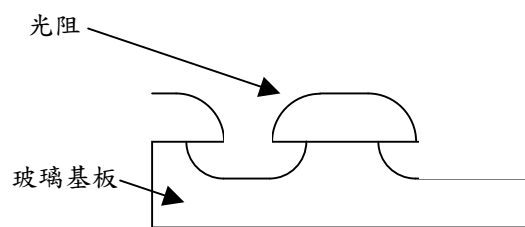
圖一、結構振動模態

結構振動之驅動與感測係以電容間靜電力為基礎，於環型結構中配置電極，電極與結構間具間隙，即形成可變電容，如圖二。於電極與結構施以電位差，電極與結構間即產生相吸之靜電力可用於驅動。反之則可用於感測電極與結構間之相對位移。由於以微加工技術製造之結構俱屬微小尺寸，相對的感測電容亦微小，此狀況下，一般的電容感測機制並不適用。計畫所採用之感測電路簡化如圖二。由電極部分打線連接至 NMOS，且並連一相對低阻抗。由圓環振動所引起的電容變化以電壓型式輸出，由 NMOS 後再連接放大電路。



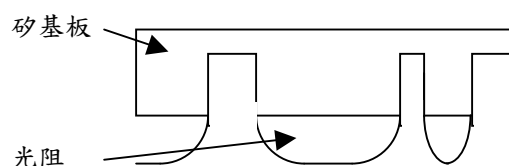
圖二、感測電路設計

製程部分，本計畫採用以玻璃為基板配合陽極接合技術，先將玻璃基板與矽晶圓接合後，再以反應離子蝕刻技術以非等向性蝕刻垂直晶片方向製造所需微結構。製造流程如下，



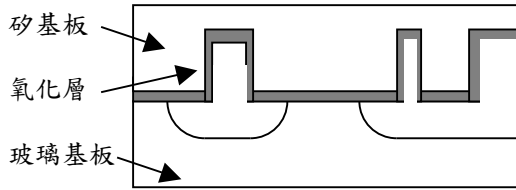
圖三、製程(一)

先於玻璃基板上曝光顯影所需圖樣，再以濕蝕刻方式產生懸空部分，



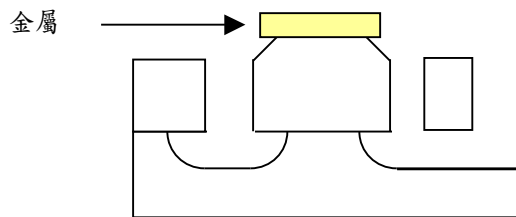
圖四、製程(二)

再將矽基板予以擴散，以避免金屬沉積作為導電接觸時，可能產生的非預期現象。再以電感耦合式反應離子蝕刻機，進行深矽蝕刻。



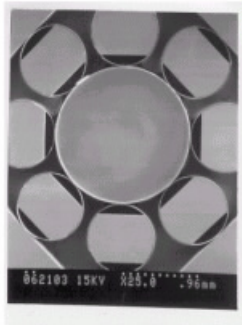
圖五、製程(三)

經高溫爐管成長氧化層作為保護層之後，將矽基板與玻璃基板以陽極接合機進行接合。



圖六、製程(四)

於矽基板沉積所須之金屬接合區，再以濕蝕刻方式將上層矽基板去除，以產生懸浮可振動結構。



圖七、矽微結構

結構完成如圖七。

四、結論

環形振動式陀螺儀具高度整合性，藉由 D4 對稱設計可將加速規與陀螺儀之功能整合於一結構設計中，配合微小電容感測電路與微加工技術，可將有效降低雜訊並將元件微小化。製程方面，以 LIGA 製程作為結構製造在光源取得上較不易，且需配合電鑄技術，計畫中所須結構對結構材料均勻性要求較高，以採用 LIGA 配合製程電鑄之結構不易達到要求。而本計畫中發展以矽晶元配合陽極接合與反應離子蝕刻具有許多優點，在材料與製程技術取得上具有相當的方便性，在矽晶元的材質上已具有相當高純度與均勻性，對於振動特性影響極少。在製程技術部分，陽極接合與反應離子蝕刻皆為相當成熟與穩定之技術，在利用上亦具方便性，此兩技術之配合，以產生可動結構，亦為微機電製程技術主流之一。

五、參考文獻

- [1] Madou, Marc J., *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, New York, 1997.
- [2] "The Vibrating Structure Gyroscope" *British Aerospace and Equipment Report#TR5102*. March 1993.
- [3] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology Navigation Guidance and Control*, Springer-Verlag, New York, 1993, pp. 148-162.
- [4] J. S. Burdess and T. Wren, "The Theory of a Piezoelectric Disc Gyroscope", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, VOL. ASE-22, No. 4, July 1986, pp. 410-418.
- [5] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology Navigation Guidance and Control*, Springer-Verlag, New York, 1993, pp. 149-151.
- [6] J. S. Burdess and T. Wren, "The Theory of a Piezoelectric Disc Gyroscope", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, VOL. ASE-22, No. 4, July 1986, pp. 271-280.
- [7] D. G. Harris, "Start; A Gyroscope for Very High 'g' Weapons", *RaeS Symposium 'Guidance and Control Systems for Tactical Weapons'*, April 1988.
- [8] A. Hiroshi et al, "Piezoelectric-Ceramic Cylinder Vibratory Gyroscope", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 31 (1992) Pt. 1, No. 9B, pp. 3061-3063.
- [9] E. J. Loper and D. D. Lynch, "Projected System Performance Based on Recent HRG Test Results", *Proceedings 5th Digital Avionics System Conference*, Seattle, Washington, Nov. 1983.
- [10] F. Ayazi, K. Najafi, "Design and Fabrication of A High-Performance Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope", *The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 1998.
- [11] M. W. Putty and K. Najafi, "A Micromachined Vibrating Ring Gyroscope", *Tech Digest, Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, Hilton Head, S.C., June 1994, Pp. 213-220.
- [12] G. H. Bryan. "On a revolving Cylinder or Bell", *Proceedings of the Royal Society (London)*, 47, 1890.
- [13] S. Timoshenko, D. H. Young and W. Weaver, *Vibration Problems in Engineering*, 4th ed., John Wiley and Sons, New York, 1974, pp. 476-481.