



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 環形諧振式微型陀螺儀之研究與實作

### The Investigation and Realization of Micromachined Vibrating Ring Gyroscope

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-062-

執行期限：89年8月1日至90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

本計畫之主要研究，首先針對環形諧振式微型陀螺儀分析其動態運作機制，並對結構進行數項分析，包括：形狀分析、對稱性分析、尺寸分析、模態分析、動態結構匹配分析、振動特性分析、加速度影響分析及溫度補償問題分析，以提供設計參數之最佳化；配合微加工技術，除了可將結構本體予以微小化之外，可將陀螺儀運作所需之相關電子電路部分，作系統化、簡單化之整體設計與加工；計畫中，將建構一診斷測試方法，以提供微型陀螺儀初步實現後之診斷測試與修正。陀螺儀於精確慣性導航已有非常廣泛的應用，而在一般消費性電子產品及民生應用上，陀螺儀也具有很大的應用空間，然傳統式的陀螺儀，由於配件繁多設計複雜，製造成本較高，不易於一般狀況中應用。現今低成本、中階效果的陀螺儀則是以振動式陀螺儀為主，計畫中所分析的環形諧振式陀螺儀，較振動式陀螺儀對於環境與溫度所造成的擾動有較佳之優越性。由於諧振式陀螺儀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，而此時結構的模態將影響系統運作績效，由此，研究中將對環形諧振式陀螺儀結構部分進行結構模態分析。另外，將研究加速度對於系統運作的影響，環形諧振式陀螺儀除了提供一般陀螺儀所提供的姿態感測外，亦可提供加速度感測。由於振動式陀螺儀不具旋轉件，使得結構大幅簡化，配合利用微加工技術，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。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。由於任何加工過程皆存在製造誤差，研究中將利用感測迴路，建立誤差檢測方法，檢驗因製造所產生的誤差，配合控制迴路作誤差補償。

**關鍵詞：**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:** gyroscope, micromaching technique

## 二、緣由與目的

陀螺儀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，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，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。

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。

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。

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。依據振動方式與結構分述如下：

1、彈性樑振動陀螺儀之構造為一彈性樑，其截面為矩形，樑的一端固定。因為截面為矩形，樑對固定端的振動可解耦為兩個自由度，即兩相垂直的振動方向。於樑側兩相互垂直面上裝設壓電元件，壓電材料特性為受應力後，會產生電壓電流輸出，可作為樑變形後對壓電元件施力的樑變形量感測器；相反的，若對壓電元件施加電壓，壓電元件會因此而產生變形，此時便會對樑施力而使樑產生變形，可作為致動器。彈性樑振動陀螺儀的運作原理是使樑延一自由度振動，一般狀況下，另一自由度不會感測振動，在軸向旋轉下，因科氏力的作用，另一自由度的振動產生，偵測此時的振幅量即可知軸向旋轉的大小。此型陀螺儀構造相當簡單，製造容易，成本相對較低，然而實際運作時，存在許多問題。首先，結構振動時，因空氣阻尼的存在，使得振幅  $Q$  值較小， $Q$  值小造成感測量變小，靈敏度教差，需要外加放大迴路。另外，運作時，因振動所產生溫度變化，造成結構強度變小，亦造成  $Q$  值變小，感測值受溫度變化產生飄移。最後，此結構易受環境雜訊影響，造成感測誤差[3, 4]。

2、音叉式振動陀螺儀其結構為音叉狀的樑，音叉根部固定[5]。此設計為彈性樑振動陀螺儀之延伸。相同點在於兩分支樑的側面兩相互垂直面上，裝設壓電元件，用以感測與致動。運作時，驅動音叉的兩支朝相反方向振動，這種振動方式的好處是振動過程中整個結構的質心不變，一個行程中所消耗的能量較小，於是，振動的  $Q$  值較大[5]。當音叉的兩支朝相反方向振動時，若存在對軸向的旋轉時，因科氏力作用，將產生另一自由度的振動，感測另一自由度的振動量即可知軸向旋轉的大小。一般設計，將兩分支樑的彎矩設計相同，也有設計不同彎矩。兩分支樑彎矩不同的好處是可將感測頻寬加大，而兩分支樑彎矩相同則可使振幅  $Q$  值增大。為了達到增大振幅及感測效果之目的，驅動樑振動的頻率會設定於結構的共振頻率。此種設計因具有對稱結構，對於元件固定點存在水平加速度的狀況有較好的強健性。而彈性樑振動陀螺儀則較易受影

響。實際運作時存在的問題有二。一是結構質心偏差問題，若兩分支樑的質心偏移，會造成振動時質心會振盪，質心振盪會消耗能量，振幅Q值於是變小，更會造成感測誤差。二是靜電力的問題，就一般大尺寸的結構來說，靜電力影響相對的很小，然而以微加工方式製造的結構尺寸縮小，靜電力影響相對增大，會造成感測誤差。

3、雙加速規式陀螺儀其結構為兩加速規的組合，並列的兩個加速規，若存在一角速度在兩加速規中間且加速規所在平面，將使加速規感測到位移。藉以感測加速規位移，便可知所受的角速度。其作用方式類似彈性樑振動陀螺儀，也因此，運作時也存在對環境雜訊抵抗較差的問題。另外，若加速規設計不良，其他方向的加速度也會造成感測誤差。

4、殼振動式陀螺儀之結構有許多種，圓柱薄殼型[6, 7, 8]、半球殼型[9]、薄圓盤型[4]及計畫中採用的圓環型[10]。其中，半球殼型已有應用實例，即 Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG)[9]，此型陀螺儀的精度效能甚至超過雷射陀螺儀。圓形振動薄殼能用來作角度改變的感測，是由 G.H. Bryan 所發表[11]。他觀察半圓形酒杯的徑向振動，發現到，若定原酒杯徑向振動的軸為0度，當酒杯底部旋轉90度時，酒杯徑向振動的軸旋轉約27度[9]，酒杯徑向振動軸旋轉角度對酒杯底部旋轉角度的比例稱為角度增益(angular gain)，對於不同幾何形狀的酒杯，角度增益不同。造成角度增益這樣現象的主因是由旋轉所造成的科氏力作用而成。徑向振動主軸隨狀況不同而改變，由於圓形結構，任意選取主軸的彈性常數皆相同，在溫度改變後，由於對稱的幾何形狀，溫度對任一主軸的彈性常數改變皆相等，而由科氏力作用的能量轉移並不受影響，因此，殼振動式陀螺儀對抵抗溫度變化的強健性較佳。由於結構對稱結構且較強健，對於環境雜訊與水平加速度的抵抗也較佳。

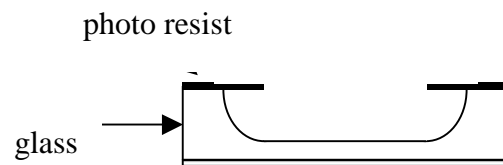
計畫將先對既有環形諧振式陀螺儀進行分析，再以其設計經驗進行初步設計。1995年，Putty已應用環形諧振方式設計環狀陀螺儀[9]；1998年，Farrokh Ayazi 利用相同結構，選用不同材料作為結構主體[10]。其結構主要可分兩大部分，一為主體圓環，其二為半圓環狀支撐架。對圓環部分模態分析指出，圓環所有振動行為可視為對兩組主軸振動的線性組合，此兩組主軸即為結構共振模態[13]，兩軸夾角為45度。兩振動主軸相互具有能量封閉性，換言之，無外力作用下，對一組主軸振動不會轉移至對另一主軸振動。若結構主體旋轉，造成科氏力產生，而使原於一主軸振動的能量轉移至另一主軸，科氏力激起另一主軸的振動。半圓環狀支撐架配製於主體圓環內部，八等份平均配

置接合於主體圓環內側，如此配製的原因是為使對0度軸振動的彈簧常數與對45度軸振動的彈簧常數兩者相當以達兩軸共振頻率與共振模態相同。圓環驅動方式係利用靜電力，於圓環旁設置電極，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。

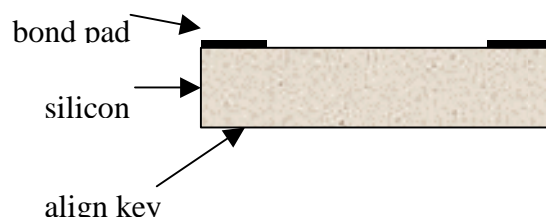
### 三、研究結果

既有設計包括：M. W. Putty 於1994年與 F. Ayazi 於1998年，分別製作結構類似材質不同的環形諧振陀螺儀。M. W. Putty 採用鎳為結構主體材料，F. Ayazi 則以矽為主體材料。採用電鑄方式須配合厚膜加工技術或 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。

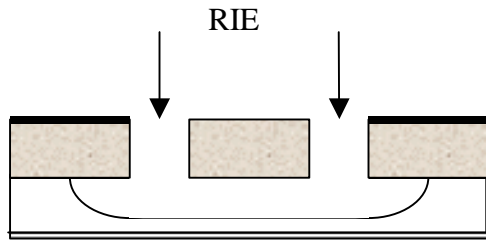
然而以 LIGA 製程配合電鑄以達到深且厚之厚膜加工技術或電鑄技術須配合所需光源，在便利性與技術運用上有其不易達成的部分，光源部分便利性較低，且電鑄過程所造成的不均勻性不易克服。於是本計畫修改製程，採用以玻璃為基板配合陽極接合技術，先將玻璃基板與矽晶圓接合後，再以反應離子蝕刻技術以非等向性蝕刻垂直晶片方向製造所需微結構。製造流程如下，



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，



以雙面對準曝光機對矽晶圓曝光顯影，並留下對準目標與蝕刻所需圖樣，



以陽極接合機將玻璃基板與矽晶圓接合後，再以反應離子蝕刻進行結構深刻與成形。

#### 四、結論

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，然電鑄成型之結構均勻性不易控制，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。

#### 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 5<sup>th</sup> 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*, 4<sup>th</sup> ed., John Wiley and Sons, New York, 1974, pp. 476-481.