

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告  
微型諧振陀螺儀軸對稱薄殼之設計與測試(III)  
The Design and Testing of Axisymmetric Thin Shell  
for Micro Resonator Gyroscope (III)

計畫編號：NSC 88-2218-E-002-022

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：周元昉 國立台灣大學機械工程研究所

一、摘要

本計畫針對前兩期計畫設計之直徑 $1000\mu\text{m}$ 殼厚 $2\mu\text{m}$ 之半球殼多晶矽陀螺儀，研究此陀螺儀平衡補償方法，探討補償後節線進動的特性，閉迴路伺服感測設計，以及等向性乾蝕刻裝置的設計與製作。

在非軸對稱的情形下，利用四個平衡電極來補償激振模態與感測模態的差異，並利用靈敏度法來求得四個平衡的電壓值，然後利用數值方法探討節點的進動行為。

在感測轉速方面，強制平衡式在反應時間和感測線性度上的表現優於開放迴路式。而在控制程序方面，最重要的就是求得球殼環狀波數為二的固有頻率，本文採用鎖相迴路來追蹤其固有頻率，在品質因子為2500下，此鎖相迴路可順利追蹤到其固有頻率。

為了改進單晶矽濕蝕刻無法達成完全等向性的缺點，本計畫設計製作一套利用 $\text{XeF}_2$ 氣體蝕刻的裝置，期望能達成完全等向性的需求。

關鍵詞：軸對稱、陀螺儀、諧振、微加工、多晶矽

Abstract

A  $2\mu\text{m}$  thick,  $1000\mu\text{m}$  in diameter

polysilicon HRG is the result of preliminary design phase. The compensation method to balance the gyroscope, the precession of nodal lines, close loop servo sensing design, and isotropic dry etching equipment design and set up are major works in this phase.

Four balancing electrodes are used to compensate the asymmetry and the sensitivity method is used to calculate the balancing voltage. The precession rate of the node of asymmetry is calculated by the numerical method.

In the rate sensing modes, force-to-rebalance method performs better than the open-loop method in the aspects of response time and sensing linearity. In the control process, it is most important to get the natural frequency of the gyroscope. The phase locked loop is adopted to find the natural frequency and works successfully for quality factor not larger than 2500.

An equipment for  $\text{XeF}_2$  dry etching is developed to etch silicon wafers. It is expected to improve the isotropy of wet etching.

Keywords: Axisymmetry, Gyroscope, Resonant, Micromachining, Polysilicon

## 二、緣由與目的

經過前兩期計畫的工作之後，已經設計了直徑  $1000\mu\text{m}$  殼厚  $2\mu\text{m}$  之半球殼多晶矽陀螺儀。由於結構軸對稱的關係，半球殼多晶矽陀螺儀的參考模態和感測模態之固有頻率相同，因此當以參考模態之頻率驅動時，科氏力所引發的感測模態將有大位移；而當球殼有非軸對稱情形發生時，若引致參考模態和感測模態之固有頻率不同，則感測信號將急劇下降，而減低陀螺儀的解析度。此時應對此陀螺儀進行平衡補償，設法調整系統之勁度，使其非軸對稱之影響減小。本研究利用四個平衡電極來補償激振模態與感測模態的差異，並利用靈敏度法來求得四個平衡的電壓值。

對於利用補償方法達成參考模態和感測模態之固有頻率相同的陀螺儀，其軸對稱性已不存在，因此利用節線進動的原理感測轉動角度的方法將受影響，本研究利用數值方法探討節線的進動行為，以檢討在此狀況下利用節線進動的原理感測轉動角度的可行性。

在感測轉速方面，強制平衡式在反應時間和感測線性度上的表現優於開放迴路式。而在控制程序方面，最重要的就是求得球殼環狀波數為二的固有頻率，本研究採用鎖相迴路來追蹤其固有頻率以利控制其振幅。

為了改進單晶矽濕蝕刻無法達成完全等向性的缺點，本計畫設計製作一套利用  $\text{XeF}_2$  氣體蝕刻的裝置，期望能達成完全等向性的需求。

## 三、研究方法

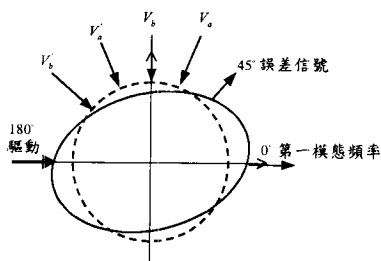
經過前兩期計畫的研究，已設計出一個直徑  $1000\mu\text{m}$  殼厚  $2\mu\text{m}$  之半球殼多晶矽陀螺儀，本期計畫繼續研究此陀螺儀平衡補償方法，探討補償後節線進動的特性，閉迴路伺服感測設計，以及等向性乾蝕刻裝

置的設計與製作。各項研究方法與結果分述如後。

### (1) 平衡補償

就一個軸對稱球殼而言，環狀波數為二的固有頻率應該是相同。但是由於製程條件的限制，所造成的非軸對稱的情形將導致此二固有頻率不再相等。而固有頻率的調整在整個補償過程中是相當重要的，固有頻率不等將使得由柯氏力所引發的感測模態的位移不明顯，而產生感測上的困難。在調整固有頻率時，如圖一所示分別以  $130^\circ$  和  $225^\circ$  為激振點，分別在  $45^\circ$  和  $0^\circ$  位置量取參考與感測模態的固有頻率，當參考與感測模態的固有頻率不等時，兩頻率的差值即提供一補償直流電壓，同時調整  $67.5^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $112.5^\circ$  和  $135^\circ$  的平衡電壓  $V_a$ 、 $V'_a$ 、 $V_b$  和  $V'_b$ ，使得此二頻率相等為止。在振形相角的修正上，基本上和固有頻率的調整相似，也是分別選擇  $180^\circ$  和  $225^\circ$  為驅動電極，分別激振出參考與感測模態的振形。當球殼為完全軸對稱時，以  $180^\circ$  為激振點時，可知其所對應的參考模態的節點位置在  $45^\circ$ ，而以  $225^\circ$  為激振點時，可激振出節點位置在  $0^\circ$  的感測模態振形。但是當非軸對稱的情形發生時， $45^\circ$  和  $0^\circ$  位置可能不再是參考模態和感測模態的節點位置，而會有位移的產生，量取此時  $45^\circ$  和  $0^\circ$  位置的信號，此二個信號即提供一誤差電壓，同時調整  $67.5^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $112.5^\circ$  和  $135^\circ$  的平衡電壓  $V_a$ 、 $V'_a$ 、 $V_b$  和  $V'_b$ ，使得  $45^\circ$  和  $0^\circ$  位置不再有信號輸出為止。

基本上，固有頻率的修正和振形相角的修正必須同時進行，同時調整平衡電壓  $V_a$ 、 $V'_a$ 、 $V_b$  和  $V'_b$ ，否則無法同時達到兩個條件同時滿足。比如說如果先修正固有頻率再修正振形相角，等振形相角修正好之後，固有頻率可能又再度分離了。因此只有同時調整此四個位置的勁度，才可能



圖一 平衡補償電壓的施加位置

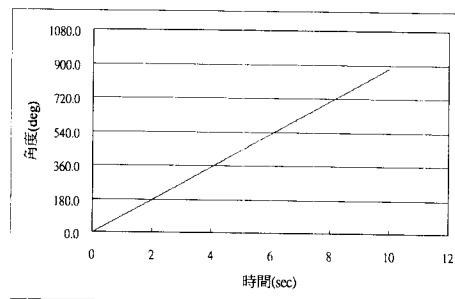
同時達到兩個條件同時滿足的情形。本研究以靈敏度法來修改結構的動態特性，以求得平衡電壓  $V_a$ 、 $V_a'$ 、 $V_b$  和  $V_b'$ 。

### (2) 補償後節線進動

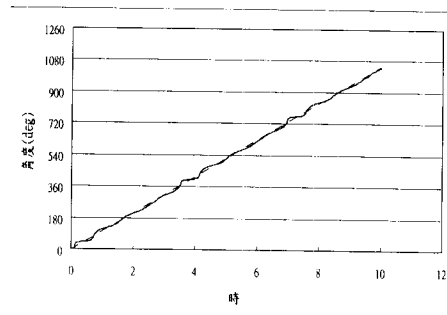
由於非軸對稱系統在旋轉時的運動行為受到幾何尺寸、材料性質非軸對稱分布情況等眾多因素的影響，使其運動行為難以歸納出一定的模式，而其不平衡的情形，將會使陀螺儀的感測信號產生極大的影響，在此利用 ANSYS 求得一個經過補償後，其振形相似且其所對應的固有頻率相差不大的例子，來探討非軸對稱情形經過補償後其節點進動的情形。對於一完全軸對稱的球殼而言，其環狀波數為二的固有振形相差  $45^\circ$ ，而其環狀波數為二的共振頻率相等，其頻率為 22720 Hz。由圖二可知在完全軸對稱的情形時，其節點進動速度為一固定值。

當以完全軸對稱為基礎，在半球殼上加上一質量塊，使其產生不對稱的情形，此時環狀波數為二的固有頻率不再相同，其頻率分別為 20569 Hz 及 22898 Hz，接著分別在  $67.5^\circ$  和  $112.5^\circ$  位置施加一平衡彈簧調整此二固有頻率為 25547 Hz 及 25550 Hz，在此一狀況下，節點進動的速度不在維持一固定值，其進動速度會有忽快忽慢如圖三的情形發生，而且可以發現節點每轉  $360^\circ$  即為一週期。由這個例子也發現品質因子的大小對於節點進動情形的影響並不是很大。

### (3) 閉迴路伺服感測設計



圖二 完全軸對稱時節線進動情形



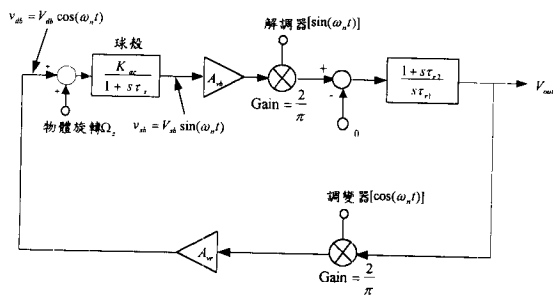
圖三 不完全軸對稱時節線進動情形

強制平衡控制迴路主要是用來作為轉速的量測。這個迴路的運作原理和振幅控制迴路很相似，主要的差別在於在量測點不再希望有位移，亦即沒有信號輸出。也就是說，在  $180^\circ$  位置為驅動點時，可激振出節點位置在  $45^\circ$  的參考模態振形，當物體轉動時，由於受科氏力的影響，而引發出感測模態，此時未轉動時原節點位置的振幅不再為零，因此調整  $225^\circ$  位置的電極電壓，使其產生適當大小的靜電力，進而讓  $45^\circ$  原節點處的位移變為零，量取這時所需的電壓振幅，再和  $180^\circ$  位置驅動力的電壓振幅相比較，即可以得知轉速大小。圖四即為其控制迴路。

假設物體以  $\Omega_z$  的轉速轉動，由柯氏力耦合所導致  $45^\circ$  位置的位移所量得的電壓振幅  $V_{sb}$  和振幅控制迴路所需要的驅動電壓振幅  $V_{sa}$  相比較，可得

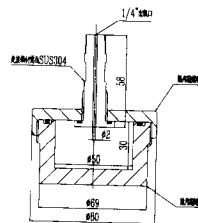
$$\frac{V_{sb}}{V_{sa}} = \frac{c_1 \Omega_z}{2\omega_n \zeta_n} = 4A_g Q \frac{\Omega_z}{\omega_n}$$

由上式即可以獲知物體在 z 方向的轉速。



圖四 伺服控制迴路

NOTE:  
1.0AXeF2 CRYSTALS CHAMBER

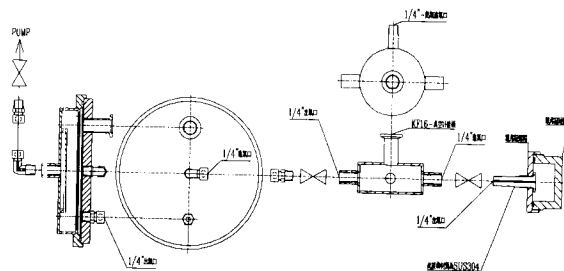


圖七 氣化腔構造

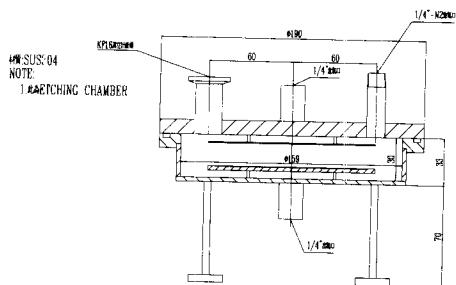
#### (4)等向性乾蝕刻

由前述的分析得知陀螺儀薄殼結構的軸對稱性對其性能有決定性的影響，因此矽晶圓等向性蝕刻就成為此設計能否成功的關鍵。由前兩年對矽晶圓進行等向性濕蝕刻的研究發現蝕刻時間一久，所形成的孔穴形狀會受晶格結構的影響，由半圓球形漸呈正交形狀，如此不僅無法具有量測角度的功能，連欲經由補償使具有量測角速度的用途可能都有困難。所以在這一年的製作工作中嘗試以  $XeF_2$ [1]的氣體進行等向性乾蝕刻，乾蝕刻的主要設備為三個腔體和一個真空泵，這些腔體的功用分別為氣化、膨脹、以及蝕刻，其構造示如圖五、六、與七，組合後之系統示如圖八。

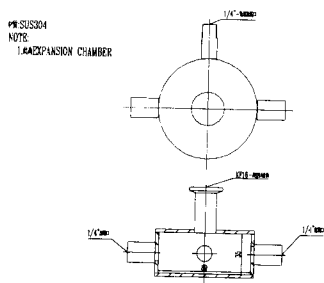
由於有些零件不太理想，經與承製廠商協調後正進行修改工作，不久之後即可正式進行蝕刻。



圖八 乾蝕刻系統組合圖



圖五 蝕刻腔構造



圖六 膨脹腔構造

#### 四、結論

本研究發現藉由在適當位置施加靜電場，可以補償些微軸不對稱之半球殼多晶矽陀螺儀之平衡性；而經由補償得參考與感測模態的固有頻率雖可相近且振形相角可以滿足角速率感測的需求，但此等陀螺儀已不在適合做為感測轉角之用。因此若欲感測轉角，則軸對稱性的要求非常嚴苛，所以單晶矽的等向性蝕刻成為本計畫能否完全達成目標的重要因素之一。本計畫所完成的乾蝕刻設備相信可以改善濕蝕刻無法達到完全等向性的缺點。

#### 五、參考文獻

- (1) Patrick B. Chu, et. al., "Controlled Pulse-Etching with Xenon Difluoride," Transducer '97, Chicago, 1997.