

## 微通量閘磁場感測器之研製

國立高雄應用科技大學機械工程系 鄭振宗  
國立台北科技大學機電整合研究所 呂志誠

### 摘要

利用微線圈、印刷電路板、或 CMOS 晶片實現的微通量閘(microfluxgate)磁場感測器，其磁場解析度可比尺寸相仿的霍耳及磁阻感測器更高。微通量閘的訊號讀出需要相位敏感的交流偵測電路，元件設計與驅動電路開發皆為此研究領域的重要工作。我們利用 CMOS 晶片與微線圈，設計及製作微通量閘磁場感測器，並分析其響應度與雜訊。在適當的激發條件下，磁芯長度 1.9 mm 的晶片型微通量閘其 1 Hz 磁場雜訊可達到 2 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ，而磁芯長度 8 mm 的繞線式微通量閘則可達到 0.2 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。晶片型微通量閘可應用於地磁場偵測，並具有量產的潛力。

### 一、前言

磁場感測器(magnetic field sensors)是將磁場( $B$ )轉換為電壓( $V$ )或數字輸出的裝置，由前端的物理感測元件與後端的訊號處理單元構成。能偵測磁場分量的微型磁場感測器，現今的主要技術為霍耳效應(Hall effect)、異磁阻(anisotropic magnetoresistance, AMR)、巨磁阻(giant magnetoresistance, GMR)、穿隧磁阻(tunneling magnetoresistance, TMR)、巨磁阻抗(giant magnetoimpedance, GMI)、與微通量閘(miniature fluxgate 或 microfluxgate)等裝置[1],[2]。磁場感測器的性能表現於其靈敏度(sensitivity)、磁場雜訊(magnetic field noise)、可偵測範圍(detectable range)、非線性度(non-linearity)、以及平頻寬(flat bandwidth)，其中以靈敏度與磁場雜訊最為關鍵。靈敏度是輸出訊號對外加磁場的比值，以電壓為輸出訊號時，靈敏度可用符號  $dV/dB$  表示，或稱為響應度(responsivity)，公制單位為 V/T。磁場雜訊常以磁場雜訊頻譜密度

(field noise spectral density)  $\sqrt{S_B}$  表示，公制單位為 T/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ； $\sqrt{S_B}$  與響應度及電壓雜訊的關係為：

$$\sqrt{S_B} = \frac{\sqrt{S_V}}{dV/dB} \quad (1)$$

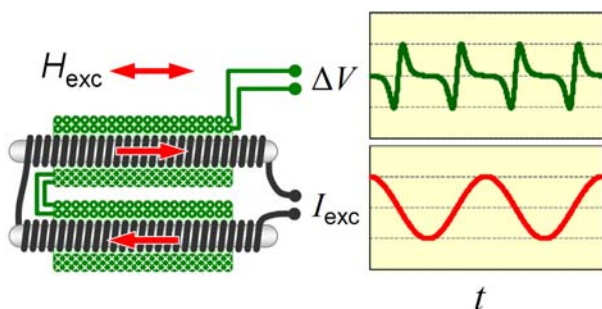
其中  $\sqrt{S_V}$  為電壓雜訊頻譜，單位為 V/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。在良好的磁屏蔽下，若後端訊號處理裝置的電壓雜訊可忽略， $\sqrt{S_B}$  的量值由前端物理感測元件的特性決定。磁場雜訊亦可用方均根磁場雜訊  $B_n$  表示，公制單位為 T：

$$B_n = \frac{V_n}{dV/dB} \quad (2)$$

其中  $V_n$  為方均根電壓，單位為 V。 $B_n$  亦稱為解析度(resolution)或偵測力(detectivity)，它與  $\sqrt{S_B}$  的關係取決於訊號頻寬。

通量閘[3]-[6]由軟磁芯與感應線圈組成，是極為靈敏的磁場向量感測器，具有低

溫度係數、低磁場雜訊、及高穩定性等優點，為軍事、航空、航海、與太空科技等領域所運用的磁感測技術。傳統通量閘的特徵尺寸約 1 至 10 公分，測定直流磁場的最佳解析度可達到 20 pT 以下。軟磁芯的尺寸與初始磁化率是通量閘性能的決定性因素；隨著新型軟磁金屬材料的研發，以及空間解析度與低功率的需求，特徵尺寸在 1 公分以下的微通量閘(microfluxgate)在近十餘年來有相當的進展[7]-[31]。微通量閘係以印刷電路板或矽晶片製作，可應用於磁性粒子偵測、非破壞檢測、磁場掃描感測器陣列、動作追蹤、以及行動裝置導航等領域。將通量閘微型化會影響靈敏度，但即使特徵長度小於 10 mm，其磁場解析度仍然比尺寸相似的霍耳感測器更高，並與磁阻(AMR、GMR、及 TMR)感測器相近或更高。

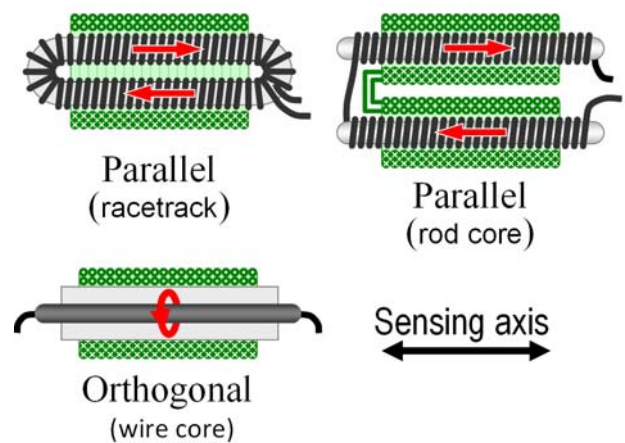


圖一、通量閘之操作原理

通量閘的基本架構如圖一，它利用磁化曲線的非線性來偵測磁場，在無回授操作時只需一對交流激發與感應線圈；它與磁阻感測器的主要差別為：通量閘不需直流偏電流，故包含激發線圈在內只需 4 個輸出入端點。激發線圈的兩個分支內各產生反相的交流激發磁場( $H_{exc}$ ，紅色箭號)，故感應線圈可消去  $H_{exc}$  對輸出電壓( $\Delta V$ )的干擾。假設  $B = \mu_0 H_0$  為磁芯之激發方向上的外加磁場，當  $B$  不為零，輸出電壓  $\Delta V$  對  $B$  的響應明顯表現於激發頻率的第二諧波(如圖一)。激發頻率提

高會使響應度  $dV/dB$  增加，但激發及感應線圈的寄生電容會限制允許的最高頻率。

依操作時激發磁場與感測軸的相對方向，微通量閘可區分為平行(parallel)[7]-[29]與正交(orthogonal)[30]-[31]兩類，其代表性架構如圖二。平行微通量閘的特色為激發磁場與感應線圈的檢測方向平行，十餘年來已有相當多研究[7]-[29]；常見的微通量閘架構有棒型(rod core)[7]-[21]與環型(racetrack)[22]-[29]兩種。環型設計具封閉磁路，所需激發電流較低，最低 1 Hz 雜訊可達到  $1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$  [27]；棒型設計受橫向場的干擾最小[16]，適於繞線製作，以平面線圈晶片實現時，1 Hz 雜訊仍可達到  $3 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下[20]。



圖二、微通量閘的代表性架構

近年來，不需製作激發線圈的正交微通量閘漸成為微型磁感測器研究的重要方向。正交微通量閘的原理類似於平行微通量閘，但其激發電流直接通過磁芯，在環繞軸線的圓周方向產生激發磁場，其方向與感應線圈的感測軸正交(如圖二)，故激發訊號不易進入感應線圈。若對此元件加上直流偏磁場，其對磁場的響應可表現於激發頻率的第一諧波(基頻) [32]。因激發磁場與感應線圈軸向正交，磁芯的磁化應具備高度的各向異性，才

能使輸出電壓提高[32],[33]。此種平行通量閘的架構與 GMI 元件[34]-[37]極為相似，環繞的激發磁場皆由直接注入的電流產生；差異之處在於 GMI 的訊號由磁芯的電流注入接點讀出，而平行通量閘的訊號則是由另一個感應線圈取出[34]。磁芯長度數公分的 GMI 感測器，其 1 Hz 的磁場雜訊可達到 0.1 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  的等級[36],[37]。不過，因為 GMI 的激發電流直接通過磁芯，磁芯的中央部份無法達到磁化飽和，故其輸出易受強磁場脈衝影響而變動 [34]。相較於 GMI，圖二的正交通量閘為更理想的架構[1],[30]，激發電流係經過中心非磁性的低電阻導線，包覆於其外的磁芯可被激發至磁化飽和。不過，激發電流的強度與導線能承受的電流密度  $J_{\max}$  有關，而導線周圍產生的最大磁場  $B_{\max}$  與導線半徑  $r$  成正比： $B_{\max} = (\mu_0 J_{\max} / 2) \cdot r$ ；舉例而言：取銅導線  $J_{\max} = 35 \text{ A/mm}^2$ ，若磁化飽和的條件為  $B_{\max} > 0.5 \text{ mT}$ ，中心銅導線半徑須大於 23  $\mu\text{m}$ ，即激發電流須大於 57 mA。微型正交通量閘的激發功率不高，長度 1.8 mm 的元件的激發功率為 8 mW，但 1 Hz 雜訊高達 95 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  [30]。雖然如此，藉由材料性質改善、元件設計最佳化、提高工作頻率、以及改變激發波形，其磁場雜訊仍有改善的空間。

以下將以平行通量閘為例，探討易於實現的繞線式與鋁線晶片型兩種微型化設計，分析其特性並展示可能的應用。

## 二、平行通量閘模型

磁芯的磁化曲線( $M-H$ )是決定平行通量閘之響應度的關鍵。較精確的通量閘模型須考慮磁滯性，此前提下磁芯的  $M-H$  曲線可利用 Jiles-Atherton 模型計算 [38]-[40]；若忽略磁滯，僅考慮  $M-H$  曲線的非線性特徵，其主要行為可簡化為以下非磁滯函數[18],[39]：

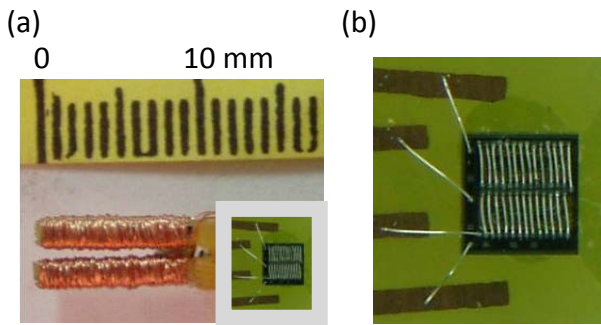
$$M(H) = M_{\text{sat}} \left( \coth \left( \frac{H}{\gamma} \right) - \frac{\gamma}{H} \right) \quad (3)$$

其中  $\gamma = 0.01 H_{\text{sat}}$ ， $H_{\text{sat}}$  為使磁芯接近磁化飽和 ( $M = 0.99 M_{\text{sat}}$ ) 的磁場。令待測磁場為  $H_0$ ，兩磁芯內沿激發方向的磁場為  $H_{\pm} = H_{\text{exc}} \pm H_0$ ， $\pm$  表示各磁芯內反向的激發，則通量閘輸出電壓  $\Delta V$  的波形可由法拉第感應定律求出：

$$\Delta V = -NA \cdot \frac{d}{dt} (B_+ - B_-), \quad (4)$$

其中  $B_{\pm} = \mu_0 (H_{\pm} + M(H_{\pm}))$ ， $A$  為各磁芯的等效截面積， $N$  為各磁芯上感應線圈的匝數。若兩磁芯的尺寸、材質、與激發線圈匝數皆相同，感應線圈之輸出電壓  $\Delta V$  的基頻為激發頻率的兩倍(如圖一)。若考慮  $M-H$  為磁滯但磁滯不大，磁滯對  $\Delta V$  波形無明顯影響，僅會改變  $\Delta V$  與激發磁場的相位差。

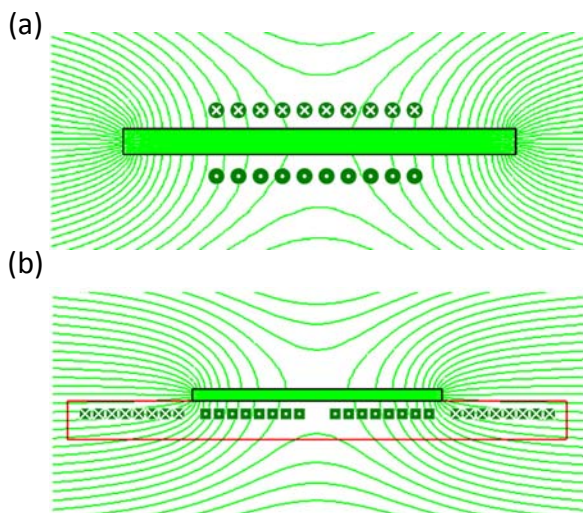
將利用方程式(3)與(4)計算的波形作諧波頻譜(harmonic spectrum)分析，可發現平行通量閘在正弦波激發下對外加直流磁場的響應包括第二、四、六、八等偶數諧波[21],[41]。當激發振幅較大，使磁芯週期性地接近磁化飽和，能抑制強磁場脈衝造成輸出準位漂移，但此時  $\Delta V$  的主要成份偏向較高階的偶數諧波，第二諧波的  $dV/dB$  會減小。若激發磁場波形係以調諧(tuned)電路在第二諧波共振而產生[41],[42]，可同時保有高激發磁場使磁化飽和及維持  $\Delta V$  以第二諧波為主的兩項優點；但調諧法無法應用在線圈共振品質因子(quality factor)較差的微型磁通閘，故改善  $dV/dB$  須採取不同的策略，例如提高激發頻率[1]，或採用多重諧波作訊號讀出[21]。



圖三、(a)繞線式與鉚線型(右下)微通量閘；  
(b) 晶片型微通量閘的放大圖，晶片尺寸為  
 $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。

### 三、感測元件及驅動電路設計

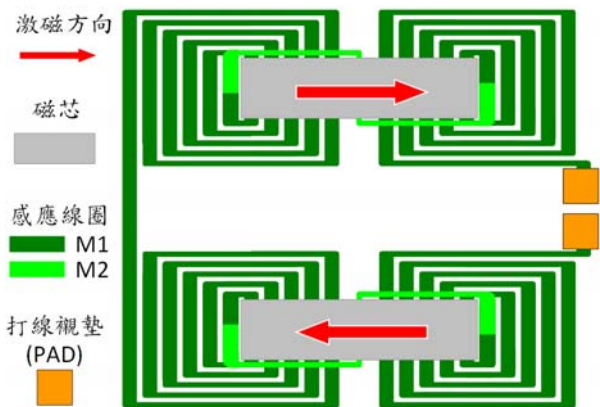
本研究團隊所製作的平行微通量閘之照片如圖三；圖(a)為繞線式微通量閘[21]，兩個磁芯上纏繞  $0.1\text{mm}$  漆包銅線構成激發與感應線圈，匝數分別為 160 與 140，線圈電阻分別為  $1.9$  與  $1.5\Omega$ ；各磁芯為兩片非晶磁性金屬帶(Metglas 2714A)固定在印刷電路板組成，金屬帶尺寸  $8\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.015\text{mm}$ 。



圖四、磁芯附近磁通分佈與感應線圈配置：  
(a)螺管線圈，(b) 平面感應線圈 (側視圖)。

圖三(a)右下角是尺寸  $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$

的晶片型微通量閘[19],[20]，放大的照片如圖三(b)。晶片型微通量閘的磁芯亦採用非晶磁性金屬帶，以黃光微影定義光阻圖案、Cr-7 蝕刻液成型後，磁芯尺寸為  $1.9\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ ，厚度為  $15\mu\text{m}$ 。磁芯在光罩對準機下貼合於附有平面微線圈的 CMOS 晶片，晶片製作係利用國家實驗研究院晶片系統設計中心提供的 TSMC  $0.35\mu\text{m}$  2P4M CMOS-MEMS 製程。平面微線圈晶片的設計，須考慮磁芯附近的磁場分佈。圖四為尚未磁化飽和時，磁芯與外加磁場作用的磁通量分佈示意圖，其中(a)為附有立體螺管線圈的繞線式通量閘，(b)為採用平面螺旋形線圈的晶片型通量閘；線圈方向的符號「 $\times$ 」為進入紙面，「 $\cdot$ 」為離開紙面，空間中的綠色實線表示磁通量線。由圖可知，多數磁通量線由兩端進入(或離開)磁芯，與磁芯表面幾乎正交。圖(a)的立體螺線管內可捕捉磁芯兩端以水平及垂直方向進入的通量，效率最高，而圖(b)的平面線圈只能捕捉垂直進入的通量；欲使平面線圈達到較佳的捕捉效能，平面感應線圈的螺旋中心點應放在磁芯的兩端點附近。圖五為晶片型微通量閘的感應線圈配置，每個磁芯下方的感應線圈由兩個平面螺旋線圈串聯而成，螺旋部份(深綠色)為 M1 鋁金屬層，橫向連通的接線(淺綠色)為 M2 鋁金屬層；螺旋中心到中心距離為磁芯長度，兩磁芯的激發磁場方向相反(紅色箭號)，使串聯的感應線圈可消去激發磁場訊號。感應線圈的電壓  $\Delta V$  經由打線襯墊(PAD)接到外部的放大與偵測電路作訊號讀出。



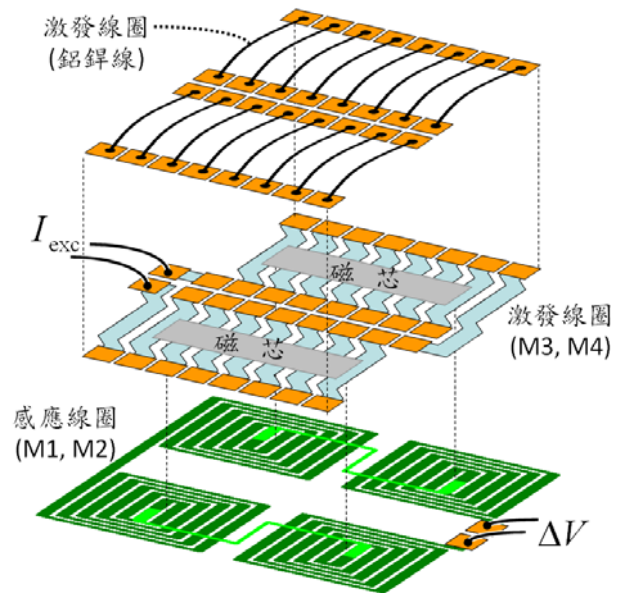
圖五、晶片型微通量閘的感應線圈配置。

為產生足以使磁芯磁化飽和的激發磁場，應使激發線圈包覆磁芯，並充份利用晶片上激發線圈的金屬層配置空間。激發線圈的設計如圖六，在磁芯下方的線圈是晶片內 M3 與 M4 鋁金屬層並聯而成的平面激發線圈，磁芯上方的部份則以鋁鎢線跨過磁芯連接磁芯下方(晶片內)的平面激發線圈，構成扁平狀的螺線管激發線圈。為配合鋁鎢線最小間距的限制(約  $120\ \mu\text{m}$ )，最大匝數約 16 匝，此時平面線圈寬度對間隙的比例在 10:1 以上，可達成較高的平均電流密度；螺線管激發線圈的總電阻約為  $5\ \Omega$ 。本設計的晶片線圈可利用 CMOS 製程大量製作，而激發線圈亦可運用業界廣泛使用的自動打線機(每秒 16 條線以上)迅速完成鋁鎢線連接。

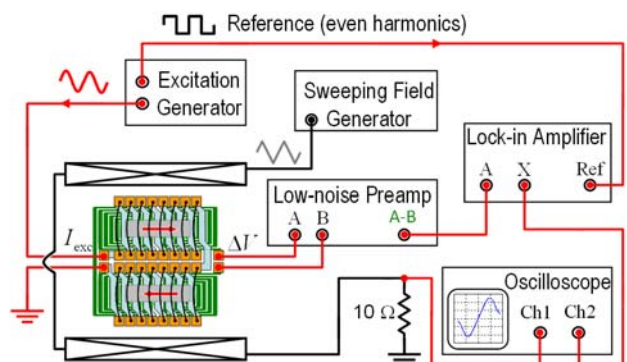
#### 四、響應度與雜訊分析

微通量閘之電壓-磁場(V-B)響應特性量測系統如圖七；激發產生器(excitation generator)產生正弦波激發訊號進入激發線圈，同步產生激發頻率(5 kHz 以上)的第二、四、六、或第八諧波的參考方波，進入鎖相放大器(lock-in amplifier)作為參考訊號；來自通量閘的感應電壓先進入差動讀取的低雜訊前置放大器(low-noise pre-amplifier)，放大後

再進入鎖相放大器與參考方波相乘，最後輸出以低通濾波去除高頻(激發頻率以上)訊號，所得到的直流準位即為正比於外加磁場的電壓輸出。



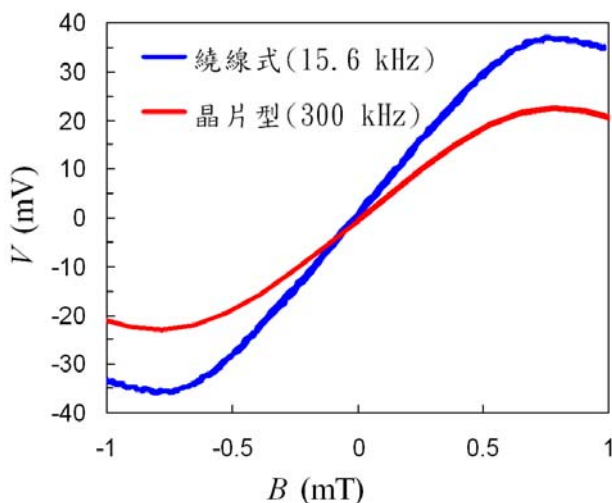
圖六、鋁線晶片型微通量閘 (爆炸圖)。



圖七、電壓-磁場(V-B)響應特性量測系統。

測試磁場產生需利用一可產生均勻磁場的線圈，以另一獨立的掃描磁場產生器(sweeping field generator)供應電流，此電流通過小電阻( $10\ \Omega$ )造成電壓降，利用示波器將此值與鎖相放大器輸出以 X-Y 模式顯示於示波器(oscilloscope)，即得 V-B 曲線；當鎖相放大器相對於參考訊號的相位差調至最佳值，感

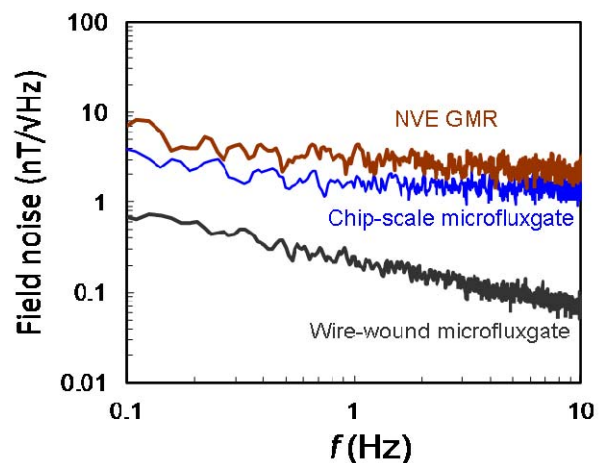
測器對磁場的響應度最大，此時以數字儲存記錄  $V$ - $B$  波形，即為通量閘的電壓-磁場響應特性。圖七的量測系統可利用實驗室的電子量測設備組成，例如函數產生器、鎖相放大器、及低雜訊前置放大器等；若採用具有差動輸入、訊號產生、及諧波偵測功能的鎖相放大器(例如 SR830)，可同時獲得激發磁場產生、感應訊號放大、及交流振幅偵測的功能，則只需另一函數產生器作為掃描磁場產生器以及一示波器作波形記錄及顯示。在實際的應用中，上述量測系統可利用類比積體電路等零件於印刷電路板組成[5],[21]，或以特定應用積體電路 (application-specific integrated circuit, ASIC) 實現[8],[9],[14],[17]。



圖八、兩種微通量閘之磁場響應特性比較。

圖三之繞線式與晶片型微通量閘的磁場響應特性如圖八，此處繞線式微通量閘的結果係利用印刷電路板組裝的電路作驅動[21]，激發頻率為 15.6 kHz，激發電流 90 mA。晶片型微通量閘的  $V$ - $B$  曲線係利用函數產生器與 SR844 高頻鎖相放大器測定，激發頻率為 300 kHz，激發電流 150 mA。繞線式微通量閘的響應度較高，在較低的激發頻率 (15.6 kHz) 操作時，其  $dV/dB$  已有 56 V/T；提

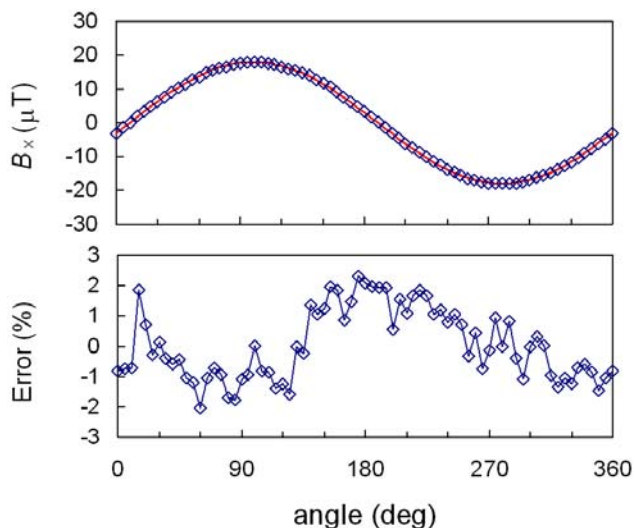
高激發頻率可再增加其響應度，但可操作的頻率範圍在 100 kHz 以下。晶片型微通量閘可操作頻率範圍較大，在 1 MHz 以上，但低頻的響應度較小，25 kHz 的  $dV/dB$  僅 4 V/T；激發頻率提高為 300 kHz 時，其  $dV/dB$  可提高至 40 V/T。欲提昇繞線式與晶片型微通量閘的  $dV/dB$ ，除了增高激發頻率，亦可同時偵測第二、四、六、八諧波並將其對磁場的響應加成[21]。微通量閘之  $dV/dB$  受溫度的影響不大，以晶片型晶片型為例，由 25°C 升溫至 85°C 時， $dV/dB$  的變動在 1% 以下。



圖九、兩種微通量閘與巨磁阻感測器的磁場雜訊頻譜比較。

依照方程式(1)與(2)，在電壓雜訊不變的前提下，提昇  $dV/dB$  即可降低磁場雜訊，但實際上改變激發頻率或激發振幅都會影響電壓雜訊。上述的繞線式與晶片型微通量閘達成低雜訊的最佳激發頻率都不高，皆在 10 kHz 至 50 kHz 之間。繞線式與晶片型微通量閘的磁場雜訊頻譜如圖九，其中 GMR 感測器的雜訊是作為對照，它是以類似通量閘的交流驅動法操作，低頻的  $1/f$  雜訊可略為降低[43]，1 Hz 雜訊為 3 nT/√Hz。由圖九知，在 15 kHz 的激發頻率下，晶片型微通量閘的 1 Hz 雜訊可達到 2 nT/√Hz 以下，略優於 GMR 感測器；繞線式微通量閘的雜訊則更低，在 15.6 kHz 的操作頻率下，1 Hz 雜訊為 0.2

nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。目前每種微通量閘設計之最佳激發頻率與激發振幅，仍須以實驗方法各別求出；未來若能建立精確的通量閘元件電路模型，據以設計激發與參考波形及修改訊號讀出電路，則微通量閘的雜訊仍有進一步降低的空間。

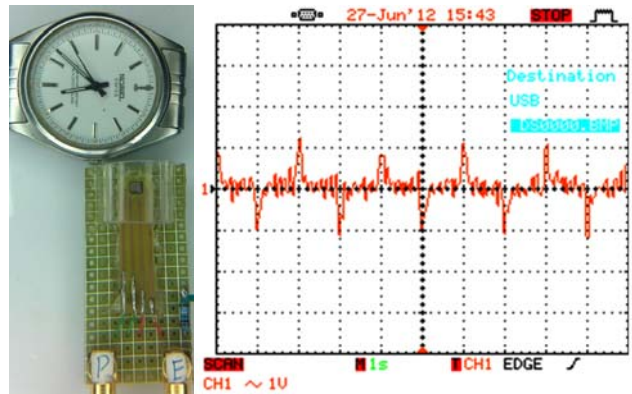


圖十、利用晶片型微通量閘偵測地磁場。

### 五、可應用性測試

微通量閘感測器的可能應用包括電子羅盤(地磁場量測)、非破壞偵測、磁粒子檢測、動作追蹤、與電流偵測等。圖十為利用晶片型微通量閘偵測水平面上各方向之地磁場分量的結果。實驗時，晶片型微通量閘架設於解析度  $0.1^\circ$  的旋轉台上，每旋轉  $5^\circ$  記錄一次。為避免旋轉台的磁性部份影響測試結果，感測器以非磁性的底座架高 18 cm。圖十的上半圖中，空心菱形符號為實驗值，紅色實線為地磁場的水平分量投影在各角度的擬合結果；下半圖為實驗值與擬合結果在各角度的偏差分佈。由圖可知，地磁場之水平分量的強度為  $18 \mu\text{T}$ ，各角度實驗值的最大誤差約 2%，磁場不確定度在  $0.1 \mu\text{T}$  以下，顯示晶片型微通量閘可應用於電子羅盤。由

下半圖可知，量測誤差與角度有相關性，其原因可能為  $V-B$  曲線的非線性度，或者旋轉台之磁性部份的干擾未完全排除；若將本系統加上磁場回授，源自於  $V-B$  曲線之非線性度的誤差問題可再改善。



圖十一、利用晶片型微通量閘偵測石英錶的磁場 (垂直刻度為  $34 \text{ nT/DIV}$ )

除了直流地磁場的方位偵測，微通量閘的另一項重要應用為交流偵測，例如動作追蹤及非破壞檢測等應用，在這些場合下感測器需具備微小交流磁場偵測能力。圖十一為利用晶片型微通量閘偵測石英錶附近之低頻磁場的結果，測得峰到峰磁場強度約  $70 \text{ nT}$ ，磁場解析度約為  $10 \text{ nT}$ 。此量測結果設定激發頻率  $15.6 \text{ kHz}$ ，低通濾波之頻寬為  $100 \text{ Hz}$ ；將低通濾波的頻寬提高，系統最大頻寬將由前端物理感測器的線圈電感與寄生電容等電路特性決定。將晶片型微通量閘激發頻率提高至  $400 \text{ kHz}$  以上時，其平頻寬在  $3 \text{ kHz}$  以上。

上述的微通量閘元件皆以交流激發連續驅動，繞線式微通量閘的激發功率為  $10$  至  $15 \text{ mW}$ ，晶片型微通量閘因激發線圈匝數較少，導致激發至相同磁場振幅所需的功率高達  $50$  至  $110 \text{ mW}$ 。降低功率的方案，除了變更元件設計以增加激發線圈匝數，亦可將驅

動方式改為不連續的脈衝激發，使高激發電流的時間縮短，則平均功率可下降 10 倍以上。較短的脈衝波激發訊號會包含更多的高頻諧波，相當於提高激發頻率，故脈衝激發的方法特別適合能以高頻激發的晶片型微通量閘。

## 六、結論

微通量閘感測器能測定微弱的直流與低頻磁場，其架構簡單、易於製作，雜訊水準與特徵尺寸相當的磁阻感測器接近，是極有應用潛力的微型磁場感測器。利用微型線圈與 CMOS 晶片，我們設計並製作繞線式及晶片型微通量閘磁場感測器；在適當的激發條

件下，繞線式微通量閘的 1 Hz 磁場雜訊最低值為 0.2 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ，晶片型則在 2 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  以下。晶片型微通量閘可應用於地磁場偵測作為電子羅盤，並具有量產的潛力。未來發展方向為具備向量感測能力的三軸微通量閘，並以脈衝激發降低整體功率。

## 誌謝

感謝國家實驗研究院之晶片系統設計中心及高速網路與計算中心提供晶片製作與軟體服務，並感謝 Hitachi Metals Hong Kong Ltd. 贊助磁芯材料。本研究部份經費由國科會提供，計畫編號：NSC 98-2112-M-151-002-MY3 及 NSC 98-2221-E-027-066。

## 參考文獻

- [1] P. Ripka and M. Janösek, "Advances in magnetic field sensors", IEEE Sensors Journal, vol. 10, pp.1108-1116 (2010).
- [2] D. Robbes, "Highly sensitive magnetometers—a review," Sensors and Actuators A 129, 86–93 (2006).
- [3] Pavel Ripka, "New directions in fluxgate sensors", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 215-216, pp.735-739 (2000)
- [4] P. Ripka, "Advances in fluxgate sensors," Sensors and Actuators A 106, 8–14 (2003).
- [5] 鄭振宗, 呂志誠, "通量閘磁強計之原理與應用", 台灣磁性技術協會會訊, 第 51 期, p.9, 民國 99 年 4 月。
- [6] 本文將 fluxgate 譯為“通量閘”，常見中譯亦作“磁通閘”或“磁通門”。
- [7] S.O. Choi, S. Kawahito, Y. Matsumoto, M. Ishida, Y. Tadokoro, "An integrated micro fluxgate magnetic sensor," Sensors and Actuators A, vol. 55, pp.121-126 (1996).
- [8] S. Kawahito, C. Maier, M. Schneider, M. Zimmermann, and H. Baltes, "A 2-D CMOS Microfluxgate Sensor System for Digital Detection of Weak Magnetic Fields", IEEE Journal of Solid State Circuits, vol. 34, pp.1843-1851 (1999).
- [9] L. Chiesi, P. Kejik, B. Janossy, R.S. Popovic, "CMOS planar 2D micro-fluxgate sensor", Sensors and Actuators, vol. 82, pp.174-180 (2000).
- [10] H Grüger, R Gottfried-Gottfried, "Performance and applications of a two axes fluxgate magnetic field sensor fabricated by a CMOS process", Sensors and Actuators A, vol. 91, pp.61-64 (2001).





- [11] Heinrich Grüger, "Array of miniaturized fluxgate sensors for non-destructive testing applications", *Sensors and Actuators A*, vol.106, pp.326-328 (2003).
- [12] P.M. Drljāca, P. Kejik, F. Vincent, D. Piguet, F. Gueissaz, and R. S. Popović, "Single core fully integrated CMOS micro-fluxgate magnetometer", *Sensors and Actuators A*, vol. 110, pp.236–241 (2004).
- [13] A. Baschiroto, E. Dallago, P. Malcovati, M. Marchesi, E. Melissano, P. Siciliano, and G. Venchi, "An Integrated Micro-Fluxgate Magnetic Sensor with Sputtered Ferromagnetic Core", *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006 (IMTC 2006), Proceedings of the IEEE*, pp.2045-2049.
- [14] A. Baschiroto, F. Borghetti, E. Dallago, P. Malcovati, M. Marchesi, E. Melissano, P. Siciliano, G. Venchi, "Fluxgate magnetic sensor and front-end circuitry in an integrated microsystem", *Sensors and Actuators A*, vol. 132, pp.90–97 (2006).
- [15] A. Baschiroto, E. Dallago, P. Malcovati, M. Marchesi, and G. Venchi, "A Fluxgate Magnetic Sensor: From PCB to Micro-Integrated Technology", *IEEE Tran. Inst. Meas.*, vol.56, pp.25-31 (2007).
- [16] E. Delevoye, M. Audoin, M. Beranger, R. Cuchet, R. Hida, T. Jager, "Microfluxgate sensors for high frequency and low power applications", *Sensors and Actuators A*, vol. 145-146, pp.271-277 (2008).
- [17] Andrea Baschiroto, Enrico Dallago, Massimo Ferri, Piero Malcovati, Andrea Rossini, Giuseppe Venchi, "A 2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup", *Measurement* vol. 43, pp.46–53 (2010).
- [18] Y. Vuillermet, M. Audoin, R. Cuchet, "Application of a non-linear Method of Moments to predict microfluxgates output", *Sensors and Actuators A*, vol. 158, pp.212–216 (2010).
- [19] C.C. Lu, W.S. Huang, Y.T. Liu, and J.T. Jeng, "Design, fabrication and characterisation of a 3D CMOS Fluxgate Magnetometer", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 47, pp.3752-3755 (2011).
- [20] Chih-Cheng Lu, Yu-Ting Liu, Fang-Yu Jhao, and Jen-Tzong Jeng, "Responsivity and Noise of a Wire-Bonded CMOS Micro-Fluxgate Sensor", *Sensors and Actuators A*, vol. 179, pp. 39-43 (2012).
- [21] Jen-Tzong Jeng, Jian-Hau Chen, and Chih-Cheng Lu, "Enhancement in Sensitivity Using Multiple Harmonics for Miniature Fluxgates", to be published in *IEEE Trans. Mag.*, Nov. 2012.
- [22] Trifon M Liakopoulos, Chong H Ahn, "A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils", *Sensors and Actuators A*, vol.77, pp.66–72 (1999).
- [23] Olivier Dezuari, Eric Belloy, Scott E. Gilbert, and Martin A. M. Gijs, "New Hybrid Technology for Planar Fluxgate Sensor Fabrication", *IEEE Trans. Magn.* vol.35, pp.2111-2117 (1999).
- [24] L. Perez, C. Aroca, P. Sánchez, E. López and M. C. Sánchez, "Planar fluxgate sensor with an electrodeposited amorphous core", *Sensors and Actuators A*, vol. 109, pp.208–211(2004).



- [25] Won-Youl Choi, Jun-Sik Hwang, and Sang-On Choi, "The Microfluxgate Magnetic Sensor Having Closed Magnetic Path", *IEEE Sensors Journal*, vol. 4, pp.768-771 (2004).
- [26] H. Joisten, B. Guilhamat, M. Audoin, R. Cuchet, J. M. Léger, B. Desloges, and P. Gaud, "Integrated Solutions to Decrease Micro-Fluxgate Sensors Noise", *IEEE Trans. Magn.* vol.40, pp.2649-2651 (2004).
- [27] Helene Joisten, Bernard Guilhamat, Marcel Audoin, Jean-Michael Léger, Robert Cuchet, Gerard Barrois, Jean-Baptiste Albertini, Pierre Gaud, Phillippe Renaux, Didier Bloch, and Bernard Viala, "Microfluxgate Performance Improvement in Microtechnology", *IEEE Trans. Magn.* vol. 41, pp.4356-4358 (2005).
- [28] W.Y. Choi and J.O. Kim, "Two-axis micro fluxgate sensor on single chip", *Microsyst. Technol.*, vol. 12, pp.352-356 (2006).
- [29] P.M. Wu, C.H. Ahn, "Design of a low-power micromachined fluxgate sensor using localized core saturation method", *IEEE Sensor Journal*, vol. 15, pp.308-313 (2008).
- [30] O. Zorlu, P. Kejik, R.S. Popovic, "An orthogonal fluxgate-type magnetic microsensor with electroplated Permalloy core", *Sensors and Actuators A*, vol. 135, pp.43-49 (2007).
- [31] O. Zorlu, P. Kejik, W. Teppan, "A closed core microfluxgate sensor with cascaded planar FeNi rings", *Sensors and Actuators A*, vol. 162, pp.241-247 (2010).
- [32] I. Sasada, "Symmetric response obtained with an orthogonal fluxgate operating in fundamental mode", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.38, pp.3377-3379 (2002)
- [33] Mattia Butta, Pavel Ripka, "Model for coil-less fluxgate", *Sensors and Actuators A*, vol.156, pp.269-273 (2009).
- [34] Michal Malátek, Pavel Ripka, "Co-Rich Amorphous Material in Fluxgate and GMI Regime," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 57, pp.77-79 (2006).
- [35] A. Boukhenoufa, C.P. Dolabdjian, and D. Robbes, High-Sensitivity Giant Magneto-inductive Magnetometer Characterization Implemented With a Low-Frequency Magnetic Noise-Reduction Technique, *IEEE Sensors Journal* 5 (2005) 916 - 923.
- [36] Lehui Ding, Sébastien Saez, Christophe Dolabdjian, Luiz G. C. Melo, Arthur Yelon, and David Ménard, "Equivalent Magnetic Noise Limit of Low-Cost GMI Magnetometer", *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 9, pp.159-168 (2009).
- [37] Basile Dufay, Sébastien Saez, Christophe P. Dolabdjian, Arthur Yelon, and David Ménard, "Impact of Electronic Conditioning on the Noise Performance of a Two-Port Network Giant MagnetoImpedance Magnetometer", *IEEE Sensors Journal*, VOL. 11, pp.1317-1324 (2011).
- [38] D.C. Jiles, D.L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 61, pp.48-60 (1986).
- [39] A. Raghunathan, Y. Melikhov, J. E. Snyder, and D. C. Jiles, "Generalized form of anhysteretic magnetization function for Jiles-Atherton theory of hysteresis," *Applied Physics Letters*, vol.95, 172510 (2009).
- [40] A. Raghunathan, Y. Melikhov, J.E. Snyder, D.C. Jiles, "Modeling of two-phase magnetic



- materials based on Jiles–Atherton theory of hysteresis", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol.324, pp.20–22 (2012).
- [41] Jan Kubik, Pavel Ripka, "Noise spectrum of pulse excited fluxgate sensor", *Sensors and Actuators A*, vol. 132, pp.236–240 (2006).
- [42] P. Ripka and S.W. Billingsley, "Fluxgate: Tuned vs. untuned output," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 34, pp.1303-1305 (1998).
- [43] Jen-Tzong Jeng, Ting-Yu Hsu, and Chih-Cheng Lu, "Odd-Harmonic Characteristics of the Field-Modulated GMR Magnetometer", *IEEE Trans. Mag.* Vol. 47, pp.3538-3541 (2011).