

國家原子能科技研究院  
委託研究計畫研究報告

低功耗磁阻式感測器元件研究

**Research of low-power magnetoresistance sensor devices**

計畫編號： 112A005

受委託機關(構)：國立陽明交通大學

計畫主持人：曾院介

聯絡電話：03-5712121 轉 31898

E-mail address： [yctseng1978@nycu.edu.tw](mailto:yctseng1978@nycu.edu.tw)

報告日期： 2023 年 12 月 12 日

## 目錄

中文摘要.....	2
英文摘要.....	3
壹、計畫緣起與目的.....	5
貳、研究方法與過程.....	9
參、結果與討論.....	18
肆、結論.....	27
伍、參考文獻.....	28

## 中文摘要

磁場感測器在機械控制、消費性電子元件等領域中擁有極為重要的地位，尤其是在與永磁體標記結合的情況下，能夠在自動控制領域提供高度精確的位置和角度信息。在消費性電子裝置中，它亦可應用於電子羅盤等方位和姿勢感測工具。磁阻式感測器的結構由自旋閥構成，包括兩層鐵磁層和一層非磁性隔離層，而兩層鐵磁層之間的相對磁矩排列角度則決定了自旋閥的電阻狀態，進而實現對磁場的高效感測。在本計畫中，我們選擇以化學濺鍍的方式，採用多層鐵磁層-非磁性層的互層堆疊製備磁阻式感測器，其基於異常霍爾效應的原理具有超順磁特性；同時，透過隧道式磁阻效應的應用，我們成功製備出磁阻比大於 50% 的薄膜結構。在響應頻寬與噪聲分析實驗中，團隊證實元件對待測磁性訊號之動態感測功能。在未來的研究計畫中，我們將進一步優化這兩種效應優點，致力於開發一種同時具有超順磁和隧道式磁阻效應的節能、快速且精確的感測裝置。

## 英文摘要

The magnetic field sensor is crucial in mechanical control and consumer electronic components, especially when combined with permanent magnet markers. In the domain of automatic control, it can provide highly precise information about position and angle. In consumer electronic devices, it finds applications in tools like electronic compasses for orientation and attitude sensing. The structure of the magnetoresistive sensor consists of a spin valve, comprising two layers of ferromagnetic material and a layer of non-magnetic isolation material. The relative alignment of magnetic moments between the two ferromagnetic layers determines the resistance state of the spin valve, enabling efficient sensing of the magnetic field.

In this project, we have chosen a chemical sputtering method to prepare a magnetoresistive sensor with a multi-layered stack of ferromagnetic and non-magnetic layers, exhibiting superparamagnetic characteristics based on the anomalous Hall effect principle. Simultaneously, by applying the tunneling magnetoresistance effect, we have successfully fabricated a thin film structure with a magnetoresistance ratio exceeding 50%. The device demonstrated distinct transient response features to the measured magnetic signals in experiments involving response bandwidth and noise analysis. In future research projects, we aim to integrate these two characteristics further, striving to develop an energy-efficient, fast, and precise sensor simultaneously possessing superparamagnetic and tunneling magnetoresistance effects.

## 一、計畫緣起與目的

### 1.1 磁阻感測器

磁場感測器在機械控制、消費性電子元件等應用中扮演著極為關鍵的角色。搭配永久磁鐵標記，磁場感測器能夠在自動控制領域提供高度準確的位置與角度資訊。在消費性電子方面，它還可支援諸如電子羅盤等方位和姿態感測的應用。

一般而言，磁場感測器主要可分為霍爾感測器和磁阻式感測器兩大類。霍爾感測器通常由高度摻雜的三五族半導體塊材（如砷化鎵、砷化銦等）構成主要結構，利用正常霍爾效應，即外加磁場對於運動電荷所產生之洛倫茲力產生的霍爾電位差，來感測單一軸向磁場。而磁阻式感測器則由自旋閥構成，即兩層鐵磁層與一非磁性的間隔層隔開的異質結構，兩層鐵磁層之間的相對磁矩排列角度決定自旋閥處於不同電阻態，以進行磁場感測。

透過文獻回顧可以發現，現今的磁阻式感測器主要可分為幾種類型，如各異向性磁阻（Anisotropic Magneto Resistance, AMR）感測器、穿隧式磁阻（Tunnel Magneto-Resistance, TMR）感測器、巨磁阻（Giant magnetoresistance, GMR）感測器以及異常霍爾磁阻(anomalous Hall effect, RAHE)感測器等。在此介紹本次計畫較為相關的巨磁阻感測器、穿隧式磁阻感測器以及異常霍爾磁阻感測器。

## 1.2 巨磁阻感測器

巨磁阻效應發生於由鐵磁金屬/非磁性金屬/鐵磁金屬的多層薄膜系統中。當電阻率與兩層鐵磁層的磁矩相對指向發生變化時，會導致阻值的高低出現變化現象。如圖 1.(a)、(b)所示，當外部磁場改變鐵磁層中相對於彼此的磁化強度時，金屬層系統中的電導率會產生變化。鐵磁層的磁化方向可分為兩種：平行排列與反平行排列，通常平行排列比反平行排列具有更低的電阻。不同排列方式導致的阻值差異，再加上磁矩變化造成的阻值變化，是巨磁阻（GMR）感測器的重要原理。

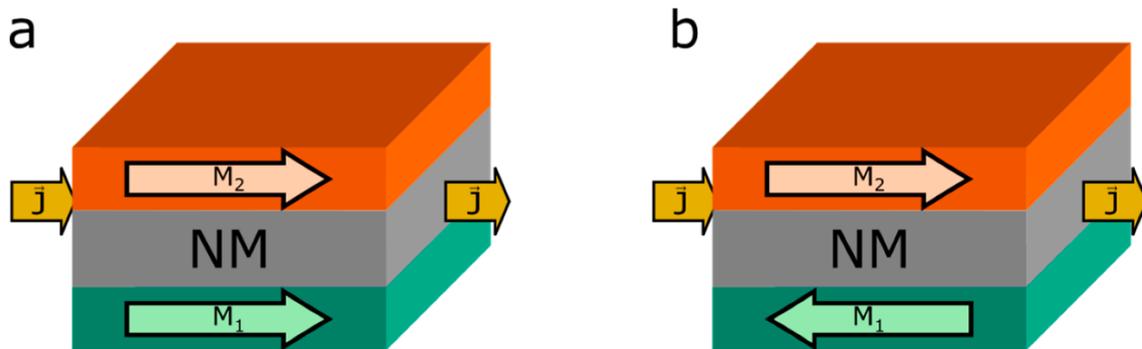


圖 1. 平面電流 (CIP) 配置中的 GMR 雙層鐵磁層。(a) 鐵磁層磁化方向平行；(b) 磁化方向反平行。

Fert 等科學家於 1988 年製造了第一個 GMR 多層疊層系統，以深入探討 GMR 效應的起源。受到汽車和硬碟讀寫頭感測器等潛在應用行業的推動，自那時以來，已有大量的研究致力於改進 GMR 系統。其中一個主要目標是改進膜層的材料和厚度，以確定最佳的微觀結構和磁性特徵，進而增強多層系統中的 GMR 效應幅度，提高感測器的靈敏度。界面粗糙度是決定 GMR 潛力的微觀結構特徵之一，並已深入研究。此外，還必須考慮晶粒尺寸的影響。目前已經發現晶粒尺寸和界面粗糙度這兩個條件不能單獨主導多層的 GMR 系統，而是二者共同影響。研究指出，

大晶粒與中等界面的組合能夠組成良好的 GMR 系統。使用適當的緩衝層可以影響界面粗糙度，因此必須根據使用的材料和膜層的數量選擇合適的緩衝層厚度。對於少量的雙層鐵磁層而言，增加緩衝層的厚度有利於獲得最佳的 GMR 效應，因為這會增強最下層鐵磁層中的反鐵磁耦合效應。

圖 2.(a)呈現了巨磁阻感測器膜層的結構示意圖。由圖可明，巨磁阻 (GMR) 系統包括一個參考層和一個自由層，兩者之間夾著一層非磁性材料。電子的自旋方向和鐵磁層的磁矩方向平行與否決定了電阻值的大小。為了確保參考層的磁矩方向在測量和使用過程中不受外加磁場的影響而偏轉，需要使用具有強大磁各異向性的材料。系統中還需添加外加的反鐵磁材料層，位於參考層旁，以透過交換偏壓 (Exchange Bias) 固定參考層的磁矩方向。另一選擇是使用人工反鐵磁層 (synthetic antiferromagnet)，利用層間交換耦合 (Interlayer exchange coupling) 進行固定，如圖 2.(a)所示。相較於圖 2.(a)的巨磁阻系統，我們預計採用的結構 (圖 2.(b)) 以及所使用的異常霍爾效應 (AHE) 系統較少受到這方面的問題。

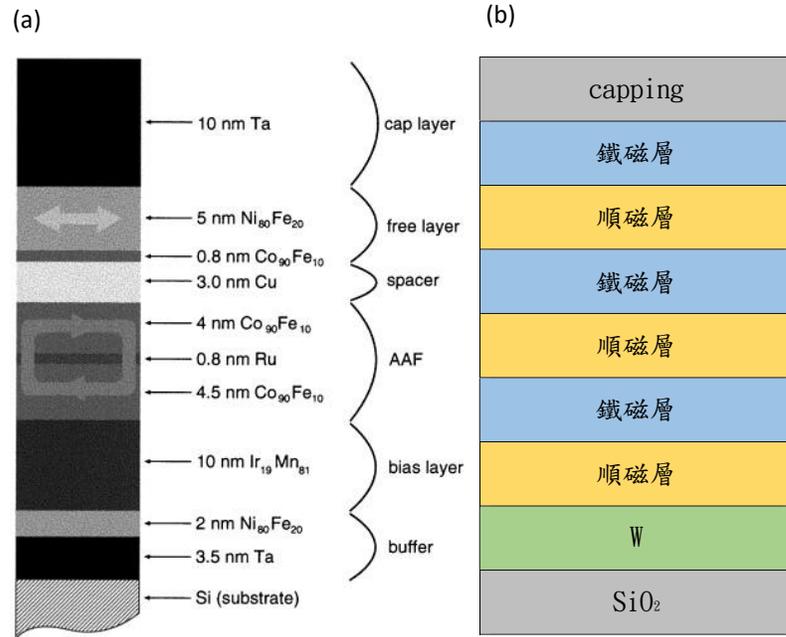


圖 2. 巨磁阻感測器與異常霍爾效應感測器比較(a) 巨磁阻感測器膜層示意圖。free layer 為自由層；spacer 為阻斷層；AAF 為參考層；bias layer 為反鐵磁層。(b) 我們計畫製作的多層鐵磁層結構示意圖。

## 1.2 異常霍爾磁阻感測器

異常霍爾效應 (AHE) 的基本原理在於當電流在鐵磁層中流動時，由於鐵磁層的磁化效應，導致電流垂直於鐵磁層的方向流動。此效應的起源在於傳導電子的軌道力矩與局部電子的自旋磁相互作用 (spin-orbit interaction)。傳導電子所具備的軌道力矩受電子運動方向和位置的影響。局部電子的自旋產生的磁場與傳導電子的軌道力矩相互影響。當局部電子的自旋方向與傳導電子的軌道矩平行時，能量較高；反之，自旋方向與軌道矩反平行時，能量較低。由於軌道力矩的方向依賴性，能量差異導致散射概率依賴於自旋方向和散射方向，而這種散射概率的差異會引發垂直於偏置電流的電子電流，即霍爾電流。

異常霍爾效應 (AHE) 在鐵磁金屬和合金中作為磁場感測的潛在選

項，一直以來受到廣泛關注。相對於廣泛應用的半導體霍爾效應感測器，AHE 感測器具有更穩定的合金材料需求、簡單的製造工藝、組成元素的無毒性，以及鐵磁金屬和合金卓越的熱穩定性等優勢。此外，AHE 感測器的金屬特性還具有更寬的響應頻率（高達數 GHz），其噪聲特性的特點在進行公正比較時至為重要。

### 1.3 穿隧式磁阻感測器

隧道磁電阻效應發生於磁隧接觸電阻結構中，即鐵磁性金屬/非磁性絕緣層/鐵磁性金屬的多層薄膜體系。當非磁性絕緣層的厚度相對較薄（約 1-2 奈米）時，電子通過隧道效應能夠從一個鐵磁性層穿越到另一個鐵磁性層，如圖 3 所示。在此過程中，自旋電子得以保持其自旋方向。

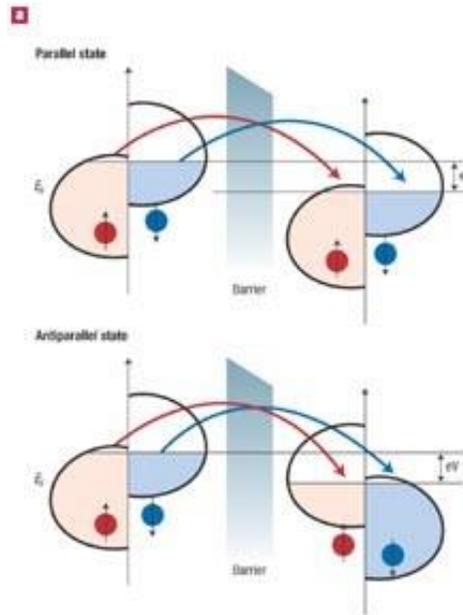


圖 3. 兩個相同的鐵磁金屬層之間由非磁性非晶絕緣時，隧道磁阻的示意圖。

TMR 通常被定義為  $(R_{AP} - R_P) / R_P$ ，其中  $R_{AP}$  和  $R_P$  分別為磁矩反平行 (AP) 和平行 (P) 排列的阻值。TMR 數值的大小直接與隧道電子的自旋極化 (tunnelling spin polarization) 有關，隧道自旋極化 (TSP) 越高，TMR 越高。磁阻比的運算方式和 TMR 的通常定義相同，即  $(R_{AP} - R_P) / R_P$ 。在多種磁阻式感測器中，能夠運算磁阻比的有巨磁阻感測器及穿隧式磁阻感測器，但由於原理不同，巨磁阻效應計算出來的磁阻比一般  $< 10\%$ ，無法達成本計畫要求的磁阻比  $> 50\%$  的目標。因此，在解決磁阻比方面的問題時，我們預計採用穿隧式磁阻感測器。

## 二、研究方法與過程

我們選用超高真空磁控濺鍍技術系統製造感測器，於二氧化矽基板上製備多層鐵磁層異質結構。如圖 4 所示，我們的真空室保持在室溫狀態 (後續量測主要在室溫進行)，真空室內的壓力維持在小於  $9E-8$  Torr，而 Argon (Ar) 的濺射壓力為 3 mTorr。我們使用濺鍍方式製備薄膜層。

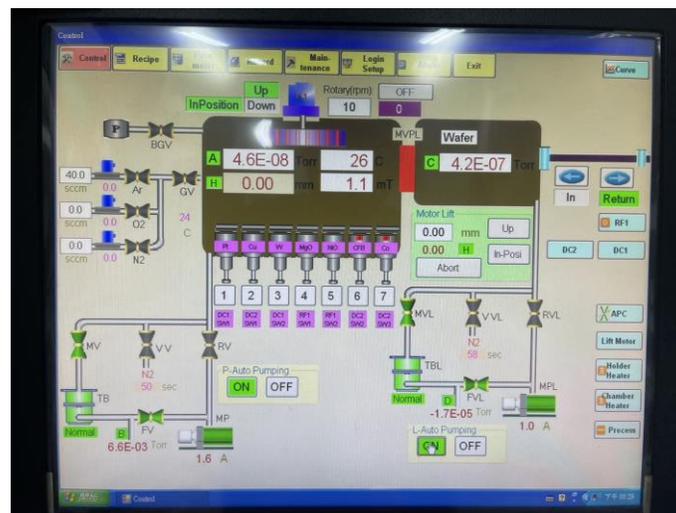


圖 4. 超高真空磁控濺鍍機上的壓力設定。

在本研究計畫中，我們採用鈷 (Co)、鉑 (Pt)、鉭 (Ta)、鈦 (Ru)、鈷鐵硼 (CoFeB) 和氧化鎂 (MgO) 等靶材，透過磁控濺鍍技術將它們沉積於矽基板上，以製備所需的薄膜結構。為確保元件具備優異的感測性能，我們必須精心調控結構的易-難軸、磁場及膜層厚度等因素。這樣的調節能夠提高結構對外界磁場的敏感度，進而提升感測器的準確性和靈敏度。

本計畫的焦點在於感測器結構，因此我們優先採用圖 5 所呈現的多層鐵磁結構製備感測器。這種結構不僅滿足感測器元件對超順磁現象等特定要求，而且相對於單層合金結構或雙層鐵磁層結構，多層鐵磁層結構由於擁有更多層次，因此能夠實現更細緻的調控。

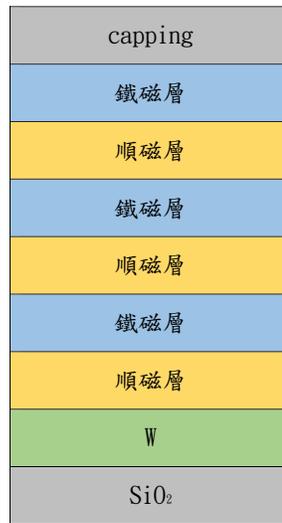


圖 5. 多層鐵磁層感測器結構示意圖。

透過調整膜層的種類、鍍膜條件、多層鐵磁層的厚度比例，以及非磁性間隔層的厚度等條件，我們能夠對膜層結構的磁性表現進行相當大程度的調控。在理想的情況下，我們預期可以實現同時具有高磁阻比、磁化量對外加場近乎成線性關係，且幾乎無磁滯的超順磁磁阻式感測器。

在完成膜層的製備後，我們將首先進行磁滯曲線的量測。若多層鐵磁層結構的磁滯曲線測量結果符合預期，我們將其製作成如圖 6 所示的元件，並進行阻值量測，以檢測此感測器元件的各項特性，以確認結構是否符合要求。

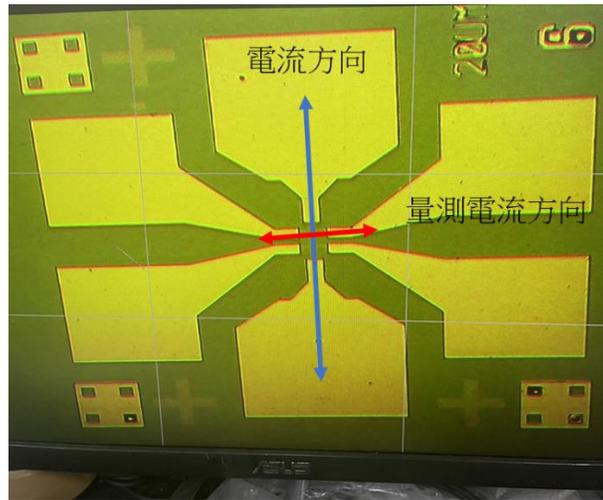


圖 6. 感測器元件結構藍色箭頭為電流之方向、紅色箭頭為量測電流之方向。

在圖示 6 中，藍色箭頭表徵了量測時電流的方向，而紅色箭頭表示了量測電流的方向。在進行阻值量測之前，我們需要對元件進行預先處理。此處理過程涵蓋將製作完成的元件試片以雙面膠黏附於 PCB 板上，接著使用鋁絲焊線機(見圖 7a)將元件上鍍有黃金電極的部分與 PCB 板上的金屬部分進行鋁線焊接連接(見圖 7b)。

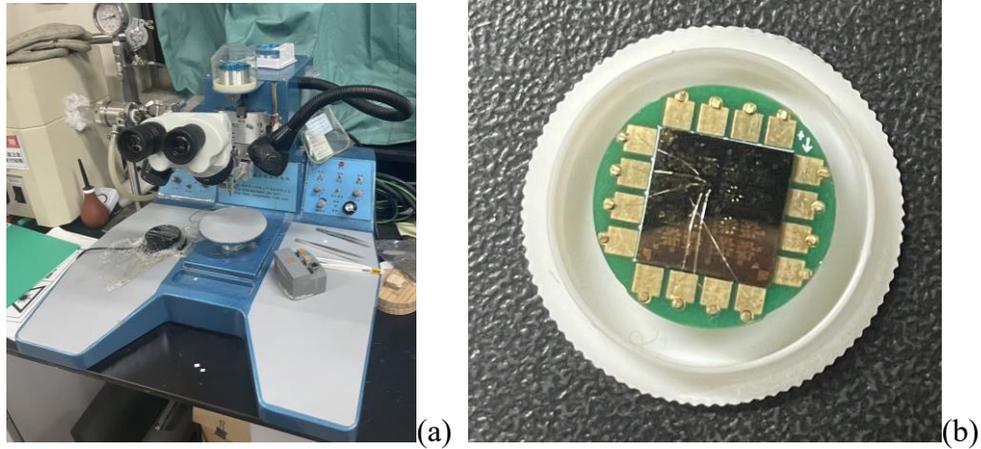


圖 7.(a)進行鋁線焊接所需的鋁絲焊線機；(b)元件焊接示意圖。

處理完元件後，將其連接至阻值量測儀器（如圖 8 左側子圖所示），並結合響應頻寬與噪聲分析模組：向量網路分析模組(Vector Network Analyzers,VNA)（如圖 8 右側子圖所示），以進行磁性相關檢測。

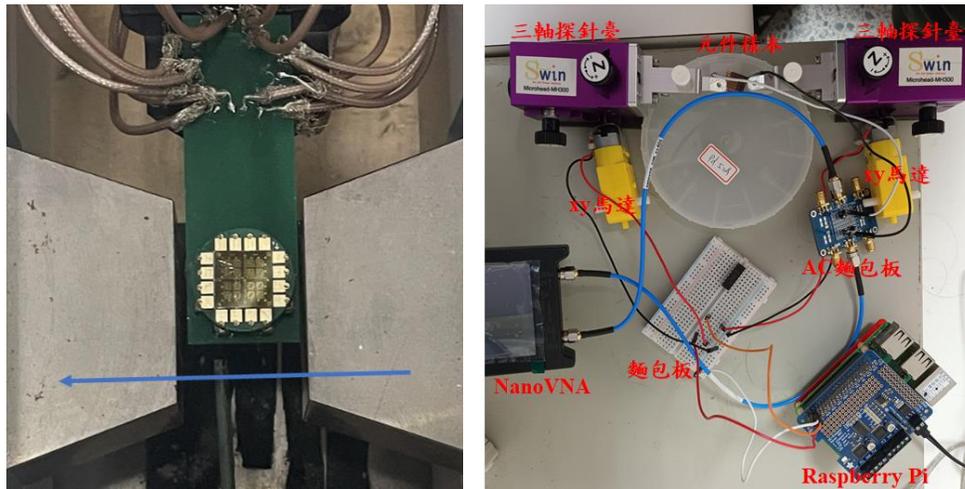


圖 8. (左圖)阻值量測示意圖，圖中藍色箭頭為外加磁場方向，(右圖) 頻寬與噪聲分析模組：向量網路分析模組。

### 三、結果與討論

我們決定以製作優良的感測器元件為目標，首先嘗試採用 W(2)/Pt(0.55)/Co(0.55)/Pt(0.55)/Co(0.55)Pt(0.55)/Co(0.55) Pt(0.55) (單位：nm) 膜層結構。在圖 9 中，我們呈現了對該結構進行磁滯曲線量測的結果（外加場垂直於試片表面）。由圖可見，此結構具有優越的垂直磁各異相性性質，且在外加磁場強度小於 100 Oe 時，幾乎沒有磁滯效應。這種特性可提高感測器的靈敏度和穩定性，顯示該結構非常適用於感測器應用。

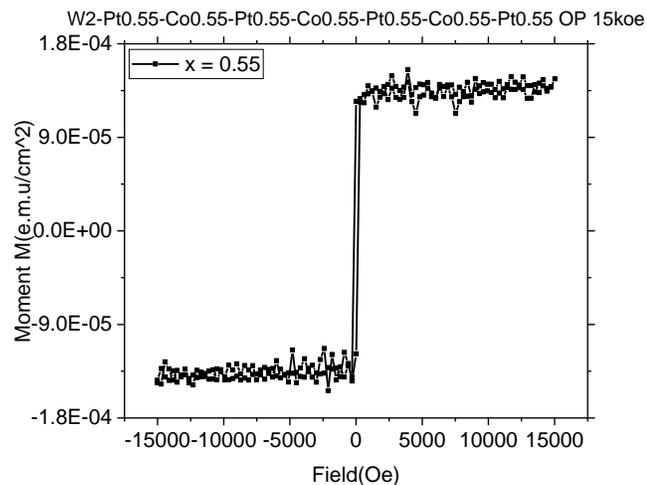


圖 9. 多層鐵磁層結構之磁滯曲線量測圖

將該結構製成元件並進行阻值量測後，我們獲得了如圖 10 所示的結果。當外部場垂直於元件表面，且外部施加的電流上升至 15 毫安培時，這種薄膜層結構製造的感測器元件表現出卓越的靈敏度，同時呈現出明顯的超順磁特性。這表明這種多層鐵磁層結構作為感測器結構具有適用性。

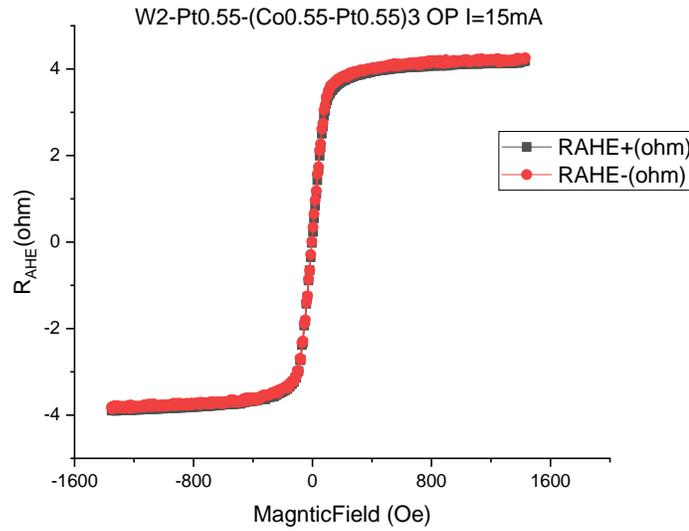


圖 10.多層鐵磁層結構感測器之阻值量測圖

鑒於圖 10 中的薄膜結構雖然具備感測器元件所需的高靈敏度特性，但其磁阻比規格尚未達到 50% 以上的需求。為實現此目標，我們對薄膜結構進行了調整。我們選用 Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.2)/CoFeB(1.3)/Ta(5)/Ru(5) (nm) 的多層鐵磁層結構，並在 280°C 的條件下進行了 1 小時的熱退火。對這種結構進行了磁滯曲線測量後，結果見於圖 11，其矯頑力矩相對於圖 10 有所提升。

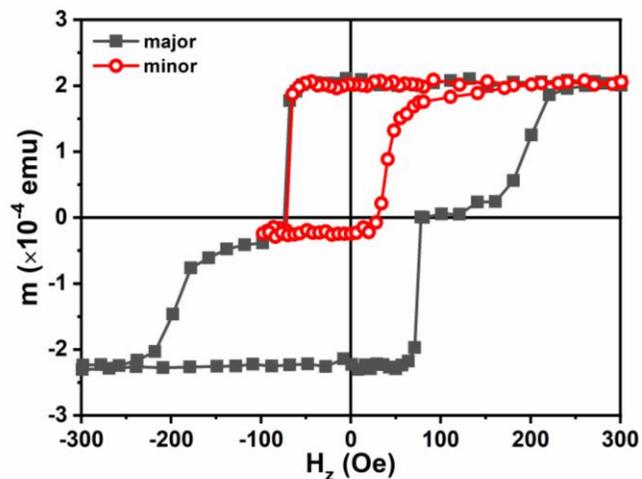


圖 11. Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.2)/CoFeB(1.3)/Ta(5)/Ru(5)結構之磁滯曲線量測圖

將該結構製成元件後，透過阻值量測得到的結果如圖 12 所示。我們可以觀察到元件的性質已經提升了磁阻比規格，然而同時也降低了感測靈敏度特性。

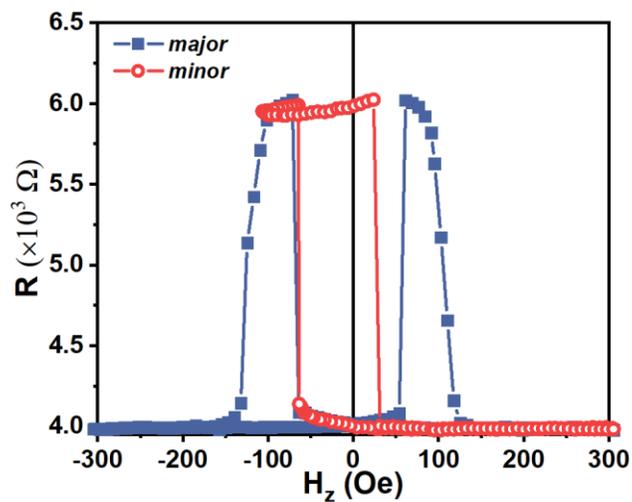


圖 12. Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.2)/CoFeB(1.3)/Ta(5)/Ru(5)結構之阻值量測圖

經由對圖 12 的高低組數據進行分析並進行計算後，我們成功獲得了如圖 13 所示的磁阻率對外加磁場的關係圖。研究結果顯示，此設計的結構具有卓越的磁阻率，達到了 52.2%，已達成磁阻率大於 50% 的計畫目標。然而，為了滿足感測元件對高靈敏度特性的需求，未來的研究將需要進一步優化材料與結構，以期使元件同時具備高磁阻比和卓越的靈敏度特性。

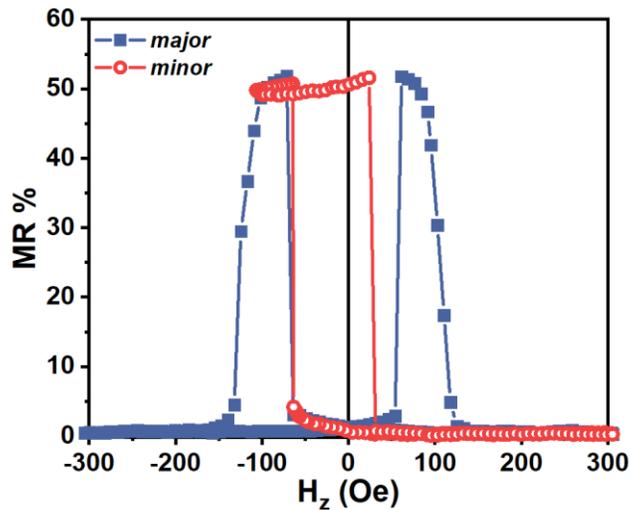


圖 13. Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.2)/CoFeB(1.3)/Ta(5)/Ru(5)結構感測器之磁阻率-外加磁場圖

圖 14 展示了經過初步優化的結構 Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.4)/CoFeB(1.2)/Ta(5)/Ru(5)在 280°C 退火後經過 1 小時保溫的磁滯曲線量測結果。相較於優化前的結構，該結構呈現出比圖 9 和圖 11 的結構更大的矯頑力矩。

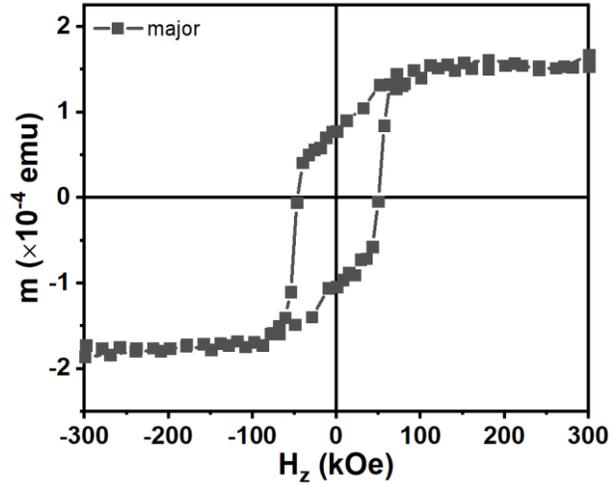


圖 14. Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.4)/CoFeB(1.2)/Ta(5)/Ru(5)結構之磁滯曲線量測圖

圖 15 展示了此優化結構 Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.4)/CoFeB(1.2)/Ta(5)/Ru(5)的阻值測量結果。從圖 15 數據中可以推論，該結構可在維持磁阻比特性的同時，提高感測靈敏度特性。

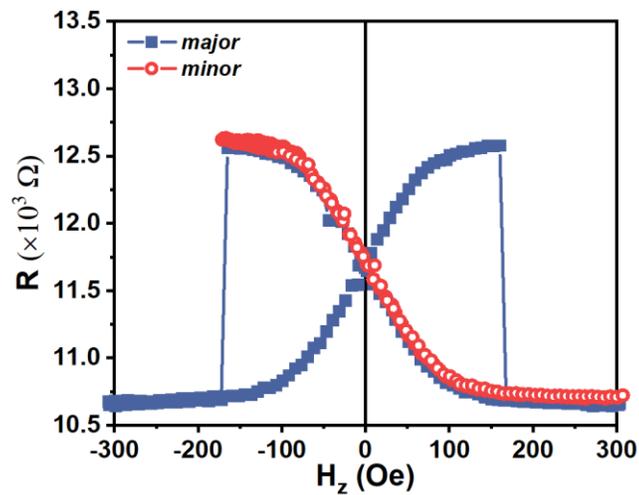


圖 15. Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.4)/CoFeB(1.2)/Ta(5)/Ru(5)結構結構感測器之靈敏度量測圖

具體將圖 15 中所測得的高低組數值進行計算後，得到了圖 16 中的磁阻率-外加磁場圖。從圖中可以得知，此結構的磁阻率可維持在中高磁阻比 20%，同時顯著提高了矯頑力矩(靈敏度)特性。

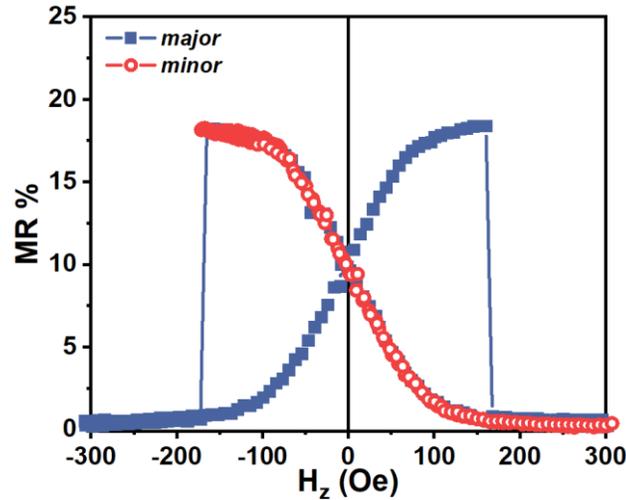


圖 16. Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.4)/CoFeB(1.2)/Ta(5)/Ru(5)結構感測器之磁阻率-外加磁場圖

為進行磁性訊號感測功能的實際測試，團隊進一步運用響應頻寬和噪聲分析模組，對元件進行了磁-電訊號轉換的頻譜分析。在圖 17 中，我們進行了感測元件對磁性待測物的動態響應分析。在圖 17(a)中，資料呈現感測元件的功率傳輸頻譜曲線。當將待測的磁性物體放置在晶片上方時，如圖 17(b)所示，頻譜即刻產生特定頻率的訊號。而圖 17(c)則說明，在待測磁性物體放置一段時間（約 2 秒）後，頻譜曲線呈現向低頻偏移的現象。

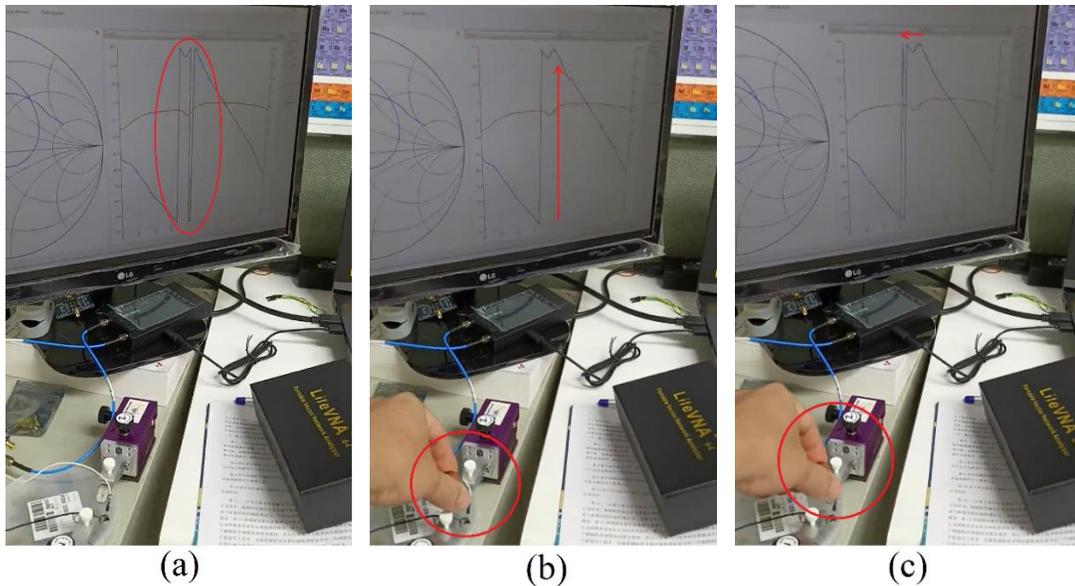


圖 17.感測元件對磁性待測物之動態響應：(a)初始之感測元件(功率傳輸)頻譜曲線，(b)放置待測磁性物體後，頻譜產生特定頻率之訊號，(c)待測磁性物體放置 2 秒後，頻譜曲線呈現向低頻偏移的現象。實驗說明元件具備初步的即時檢測功能

其次，團隊進行了交叉比對驗證，分析感測元件對於磁性待測物的靜態響應。如圖 18(a)中的對照組晶片所示：在晶片中未插入感測元件的情況下，磁性待測物會導致功率傳輸頻譜向高頻方向移動。對於圖 18(b)中的實驗組而言，當晶片插入感測元件時，磁性待測物引起系統功率傳輸頻譜向低頻方向移動。這種分析顯示所開發的元件具備初步的即時檢測功能。同時說明，藉由整合交流 (AC) 相位訊號，元件可實現高訊號響應、低噪聲以及磁場源的識別（例如抗干擾）等功能。

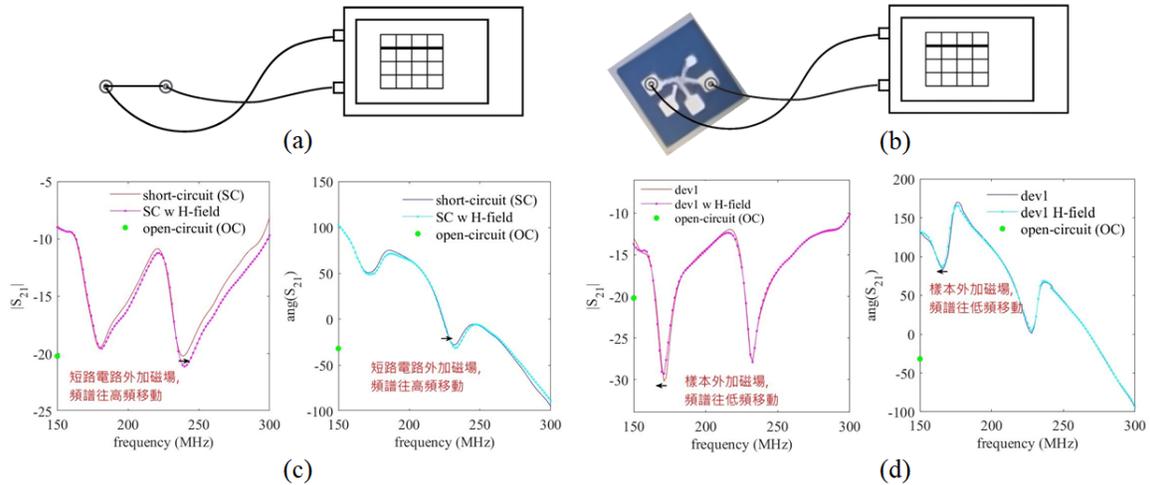


圖 18. 在磁性待測物的靜態響應試驗中，感測元件的效應如下：(a)對照組晶片-在晶片中未嵌入感測元件時，當磁性待測物被放置時，(c)功率傳輸頻譜會向高頻方向移動；(b) 實驗組晶片-在晶片中插入感測元件時，當磁性待測物被放置時，(d) 系統的功率傳輸頻譜會向低頻方向移動。

#### 四、結論

本團隊透過在多層鐵磁層結構中調整膜層厚度、材料種類、熱處理環境等條件，成功開發適用於感測器應用之 Pt/Co 多膜層結構 W(2)/Pt(0.55)/Co(0.55)/Pt(0.55)/Co(0.55)Pt(0.55)/Co(0.55) Pt(0.55)。該結構具有低矯頑力矩且幾無磁滯效應，即呈現超順磁特性，為一高靈敏度的磁阻式感測器元件。同時，本團隊亦成功製作出以 CoFeB/Mgo 為基礎的 Si/Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/CoFeB(1.2)/MgO(1.2)/CoFeB(1.3)/Ta(5)/Ru(5) 膜層結構，其經 280°C 退火持溫 1 小時後的元件，可具有高解析度和寬測量範圍（磁阻比 > 50%）的特點。

進一步團隊計畫將兩者優點結合以製作高品質感測器元件，相較先前之二種結構（Pt/Co 結構，具高靈敏度與低測量範圍；CoFeB/MgO 結構，具低靈敏度與寬測量範圍），初步的優化元件可在維持中高磁阻比約

20% 的條件下，顯著提昇元件感測靈敏度，並在響應頻寬與噪聲分析實驗中，證實元件對待測磁性訊號之動態感測功能。未來本團隊預計嘗試接著優化膜層結構並更改退火處理條件等，以實現更高靈敏度、高解度與寬測量範圍之節能感測裝置。

## Reference:

- [1]. Zhang, Y *et al.* Low-Frequency Noise of Magnetic Sensors Based on the Anomalous Hall Effect in Fe–Pt Alloys. *Sensors* **2019**, *19*, 3537
- [2]. Ennen, I *et al.* Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications. *Sensors* **2016**, *16*, 904.
- [3]. J.M. Daughton, GMR applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 192, Issue 2,1999, Pages 334-342
- [4]. V. S. Luong *et al.*, "Planarization, Fabrication, and Characterization of Three-Dimensional Magnetic Field Sensors," in *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 17, no. 1, pp. 11-25, Jan. 2018
- [5]. K.-M.H Lenssen *et al.*, "Robust giant magnetoresistance sensors", *Sensors and Actuators A*: 85, Issues 1–3,2000, Pages 1-8
- [6]. Chappert, C *et al.* The emergence of spin electronics in data storage. *Nature Mater* **6**, 813–823 (2007).