

第四章 實驗結果與討論

本篇論文中主要針對以 IrMn 作為反鐵磁層之具有奈米氧化層 (NOL) 自旋閥結構 (IrMn/CoFe/NOL/CoFe/Cu/CoFe/Ta) 來做相關性質探討。在以往的研究中，我們得知在自旋閥中加入奈米氧化層，可以使得鏡面反射行為更顯著，進而讓自旋閥磁阻表現提升；但我們更發現，在某些特定條件的製備膜層過程中，竟會使得具有氧化層之磁性自旋閥鐵磁層磁矩方向呈現 90 度之夾角。

對具有此特性之自旋閥膜層做變場磁阻量測，結果如圖 4.1 所示。

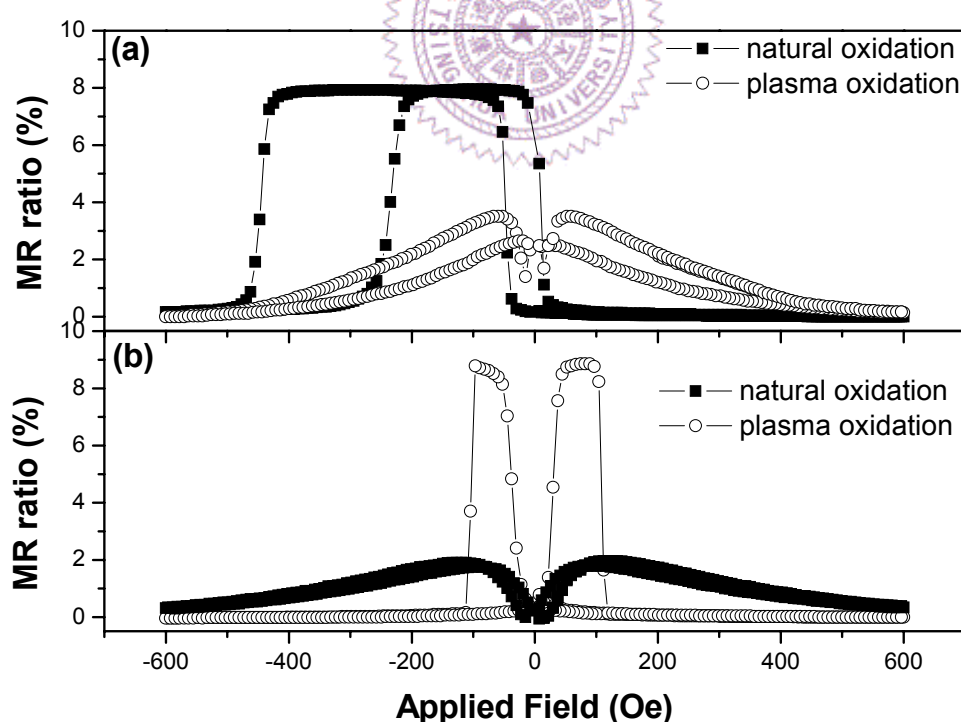


圖 4.1 自然氧化與電漿氧化形成 NiFeO_x 自旋閥之 R-H loop，
(a)沿著 0° 方向，(b)沿著 90° 方向量測。

圖 4.1(a)中所顯示為沿著膜層後退火方向加場量測結果，我們可以看到以自然氧化法（圖中黑色方塊）所製備之 NOL 自旋閥，在平行退火場方向呈現一個具有交換異向性之磁阻曲線；亦即經自然氧化處理之自旋閥中，鐵磁層與鐵磁層之磁矩方向會隨著外加場的改變而呈現平行（低磁阻值）或反平行（高磁阻值）排列。

然而，我們發現，若經由適當的電漿氧化程序來製備自旋閥中氧化層，有機會得到與以往磁性自旋閥截然不同的磁阻表現(如圖 4.1(a)中圓點所示)；對該結構作磁阻量測，不同於自然氧化法自旋閥的具有交換異向性，並且最大磁阻值發生在垂直退火場方向(圖 4.1(b))。

這樣特別的磁阻表現，很明顯地是來自於電漿氧化法所製備之 NOL 自旋閥中，磁性膜層之易軸已經不單單被固定於平行反鐵磁層之方向，而是在某些情況下，這些磁性膜彼此間會夾一角度耦合的關係。

Fukuzawa 於 2002²² 年首先提出在自旋閥結構中，上下兩層 pinned layer 磁化方向不一致的現象。他發現在 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 的 pinned layer 中加入 $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ 的 IAO（ion beam assistance oxidation）氧化物，會使得上下兩層 pinned layer 磁化方向轉一角度耦合。

而我們首先則是在 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 的 pinned layer 加入 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 的氧化層（ NiFeOx ），也觀察到了磁性膜層夾一角度耦合之表現。為了釐清是什麼樣的機制使得 NOL 自旋閥會產生這樣特別的性質，並且探討自

旋閥中各膜層不同的條件對於磁矩夾角度耦合之影響，我們設計實驗如下：

4.1 觀察自旋閥中各層對 90 度耦合之貢獻

藉由逐層鍍製正交合自旋閥之磁性膜層，我們希望觀察各層之磁性質表現，以釐清在這樣特殊的結構中，究竟何者扮演著影響磁矩平行或是九十度排列的重要角色。

逐層鍍製結果

利用 VSM 進行磁滯曲線以及磁通量之量測

1. $\text{SiO}_2/\text{Ta}35\text{\AA}/\text{Py}40\text{\AA}/\text{IrMn}80\text{\AA}/\text{CoFe}10\text{\AA}/\text{Ta}35\text{\AA}$

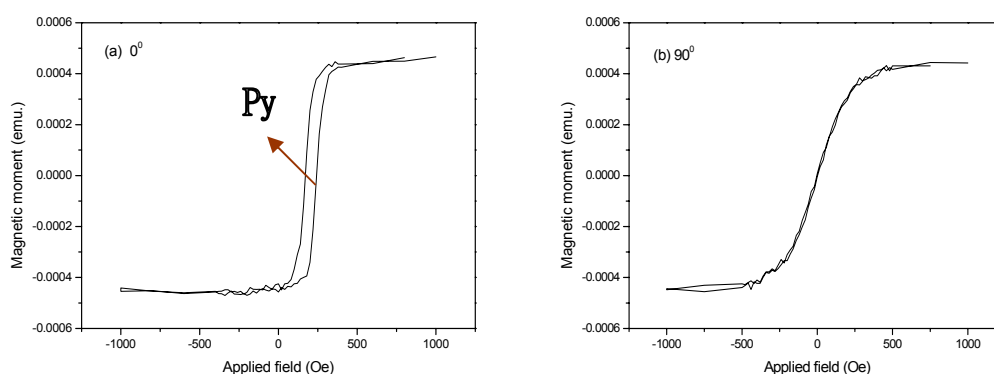


圖 4.2 VSM 量測得磁滯曲線($\text{Ta}35\text{\AA}/\text{Py}40\text{\AA}/\text{IrMn}80\text{\AA}/\text{CoFe}10\text{\AA}/\text{Ta}35\text{\AA}$)，
(a)為沿著 0° ，(b)沿著 90° 之結果。

雖然在 bottom-pinned CoFe 僅厚 10 Å 的情形下，我們幾乎無法由 VSM 結果中辨別該鐵磁層磁矩之大小方向，但理論上由於反鐵磁層 IrMn 以及 bottom-pinned CoFe 之間的交換異向性，會使得 CoFe 之磁矩被固定在與反鐵磁層同向，故可以推知磁矩方向如圖 4.3 所示。

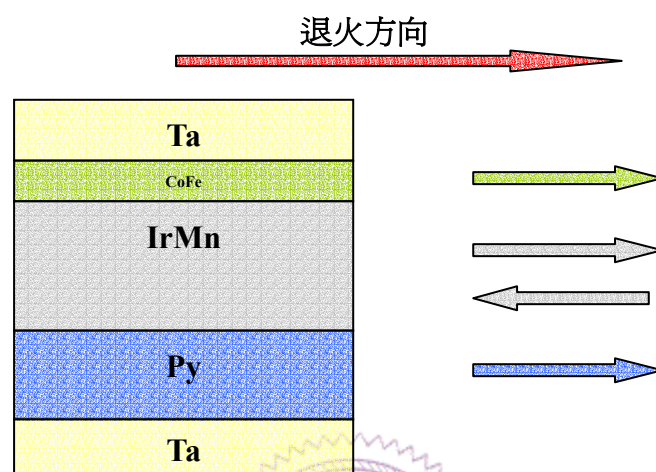


圖 4.3 結構 Ta35Å/Py40 Å /IrMn80 Å /CoFe10 Å /Ta35 Å 之磁矩方向示意圖。

2. SiO₂//Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/Ta35 Å

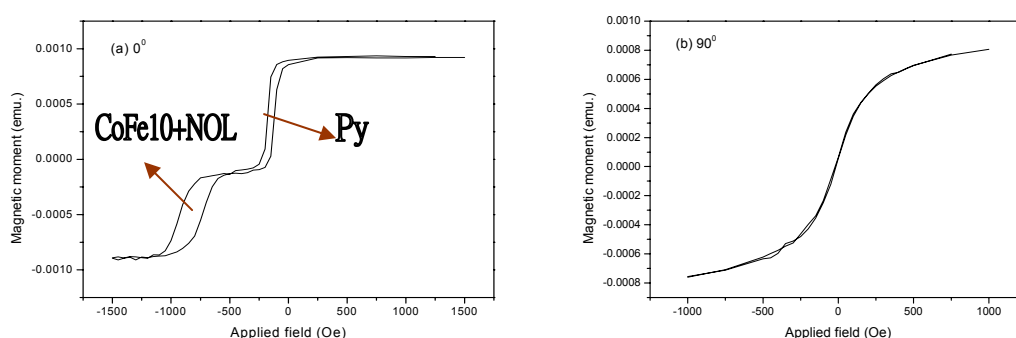


圖 4.4 VSM 量測得磁滯曲線，(a)為沿著 0°，(b)沿著 90°之結果。
(Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/Ta35 Å)

由於 NiFeO_x 的介入，使得在 VSM 量測中已然可以觀察到 bottom-pinned CoFe 以及 NOL 所貢獻出之磁訊號(圖 4.4)，也就是表

示以 NiFe 進行電漿氧化後，所形成之氧化物能夠使得 bottom-pinned CoFe 之鐵磁行為在 VSM 量測中顯現出來。由結果推斷各膜層磁矩方向如圖 4.5 所示。

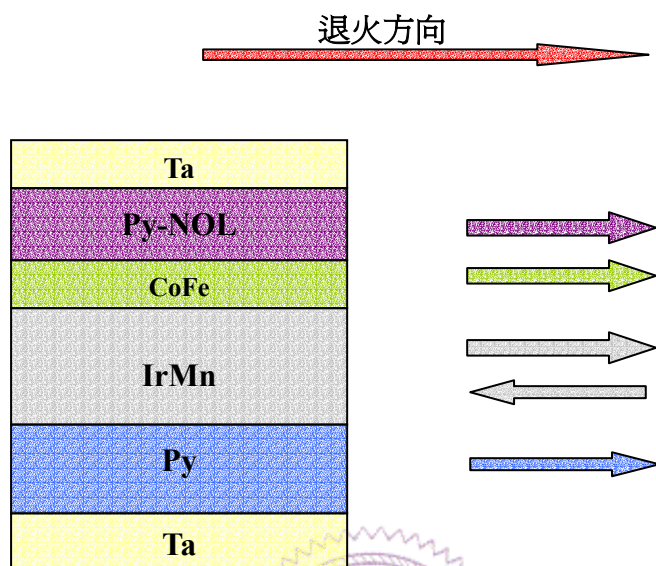


圖 4.5 結構 Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/Ta35 Å 之磁矩方向示意圖。

3. SiO₂//Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe25Å/Ta35 Å

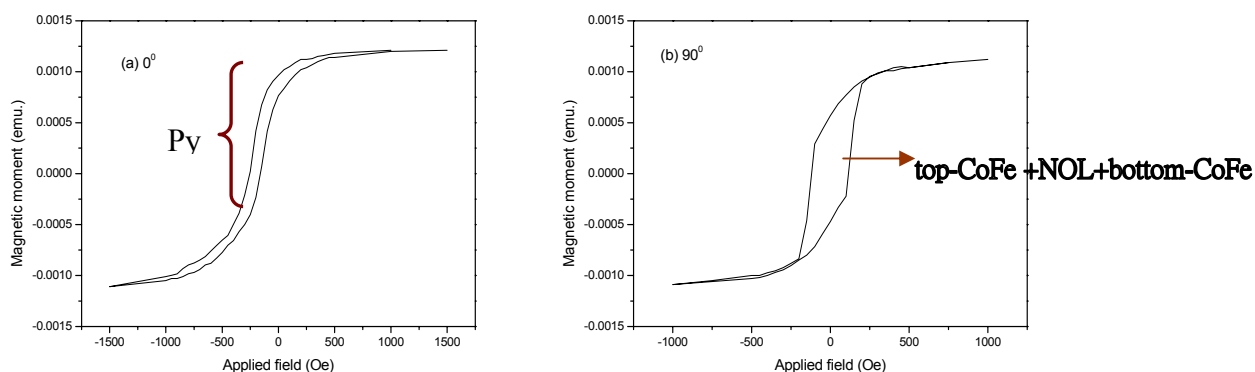


圖 4.6 VSM 量測得磁滯曲線，(a)為沿著 0°，(b)沿著 90°之結果。
(Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe25Å/Ta35Å)

此時很明顯地，由圖 4.6 結果中，我們在沿著 90 度方向之 VSM 量測看到有磁矩易軸落於此處，對各層之磁矩值進行演算，推知在此結構下，各磁性膜層之磁矩排列如圖 4.7 所示。

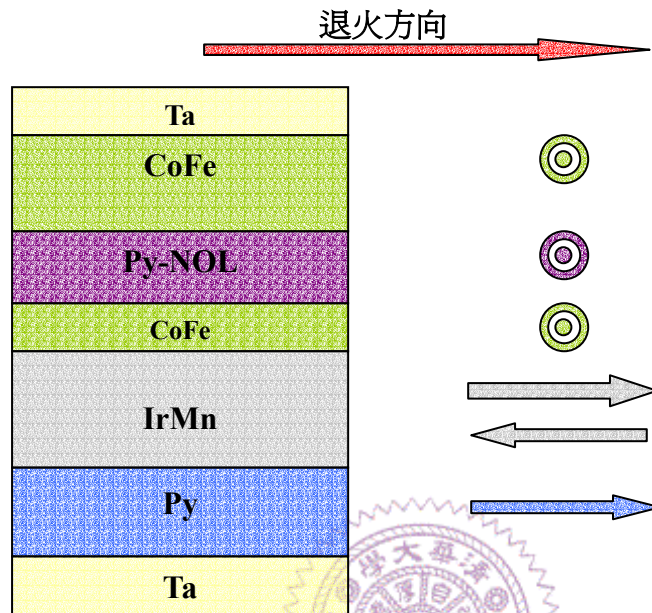


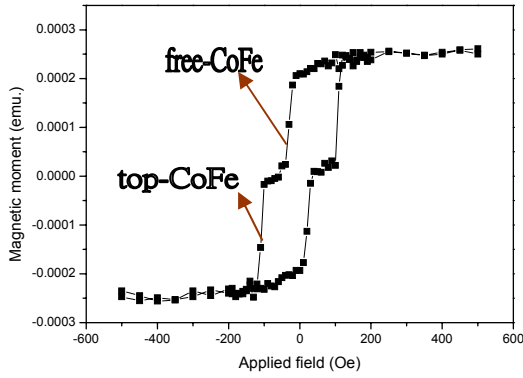
圖 4.7 結構 Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe25Å/Ta35Å 之磁矩方向示意圖。

4. Si//Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe35Å/Cu24Å/CoFe25Å/Cu10 Å/CoFe10Å+ natural/Ta35Å

特別針對此完整具磁阻自旋閥結構，做變溫（由室溫降至-170℃）之 VSM 量測。我們先在沒有外加場的情形下將溫度降到我們所希望，接著在保持持溫的情形下再進行磁滯曲線之量測。

i). 室溫

(a)



(b)

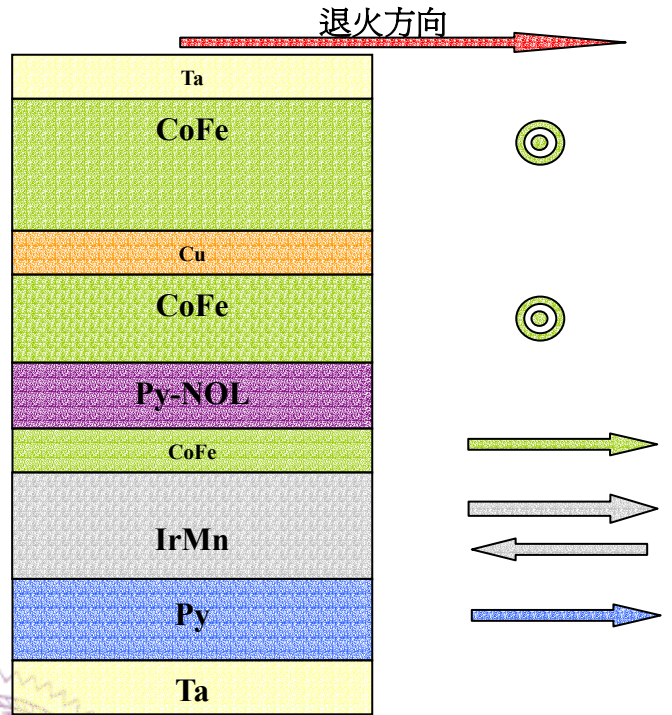


圖 4.8 (a)為室溫下沿著 90° VSM 量測得磁滯曲線，(b)磁矩示意圖。

(Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe35Å/Cu24Å/CoFe25Å/Cu10 Å/CoFe10Å+ natural/Ta35Å)

ii). -50°C

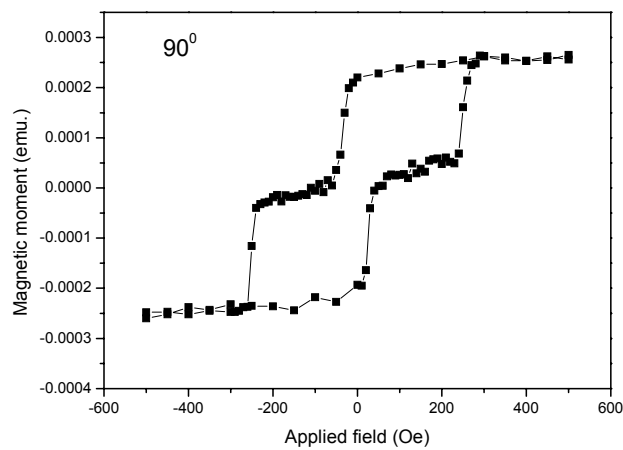


圖 4.9 為 -50°C 下沿著 90° VSM 量測得磁滯曲線。

(Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe35Å/Cu24Å/CoFe25Å/Cu10 Å/CoFe10Å+ natural/Ta35Å)

iii). -100°C

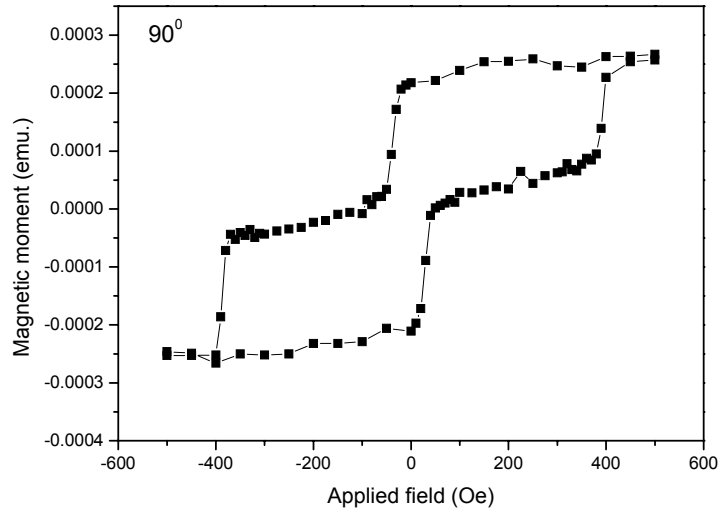


圖 4.10 為 -100°C 下沿著 90° VSM 量測得磁滯曲線。
(Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe35Å/Cu24Å/CoFe25Å/Cu10 Å/CoFe10Å+natural/Ta35Å)

一直到 -100°C 之前的量測溫度，都可以看出 top-pinned CoFe 在此垂直場方向為易軸，而透過 spacer Cu 亦使得 free layer CoFe 為易軸表現；但若觀察在 -150°C 時的量測結果（圖 4.11），可發現 top-pinned CoFe 之磁矩已然轉變回難軸方向，這應是因為溫度的下降而導致反鐵磁層所貢獻的交換異向性增強，在此時終於破壞了 top-pinned CoFe 的九十度耦合表現。

iv) -150°C

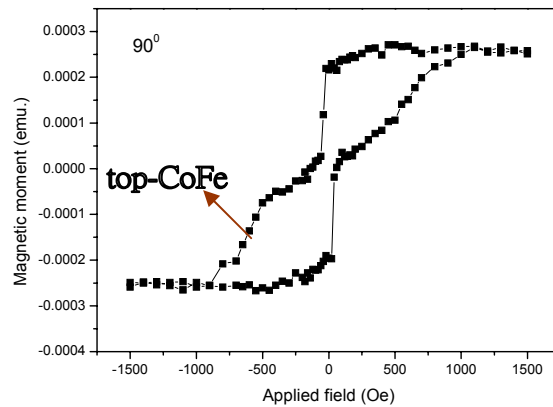


圖 4.11 -150°C 下沿著 90° VSM 量測得磁滯曲線。

(Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe35Å/Cu24Å/CoFe25Å/Cu10 Å/CoFe10Å+ natural/Ta35Å)

iv). -170°C

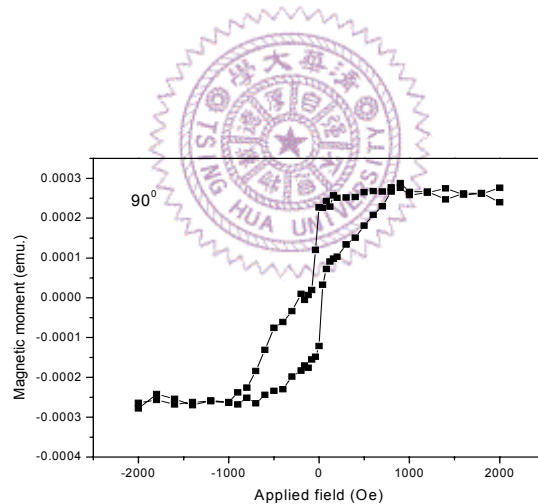


圖 4.12 為 -170°C 下沿著 90° VSM 量測得磁滯曲線。

(Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe35Å/Cu24Å/CoFe25Å/Cu10 Å/CoFe10Å+ natural/Ta35Å)

在量測溫度 -170°C 時，由 VSM 所得到之磁滯曲線觀察(圖 4.12)，很明顯地在這樣的溫度下(約 100K)，正交耦合的力量因為某些原因減弱了，才會造成這樣的表現。至於何種因素在低溫下影響了電漿氧化自旋閥之正交耦合表現，我們將在後面的章節中另加討論。

4.2 不同 underlayer 對 90 度耦合自旋閥表現之影響

4.2.1 Cu v.s. NiFe underlayer

在我們的實驗中，均利用下自旋閥（Bottom spin valve）來做性質研究，利用五槍濺鍍系統鍍製在 SiO_2 基板上；如圖 4.13。

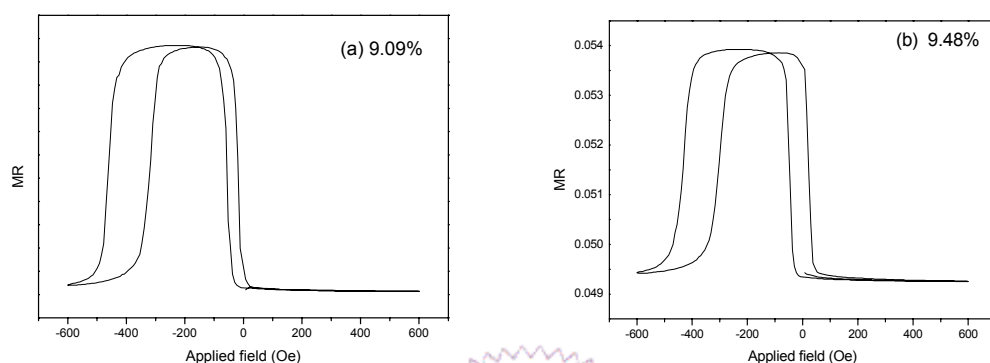


圖 4.13 不同 underlayer 之自旋閥磁阻曲線。(a)Cu 12Å，(b)Ni₈₀Fe₂₀ 40 Å。結構 Ta30Å/underlayer/IrMn80Å/CoFe30Å/Cu23Å/CoFe40Å/Ta30Å。

圖 4.13 分別表示為以 Cu 12 Å 以及 Ni₈₀Fe₂₀ 40 Å（加偏壓-100v）作為 underlayer 之磁阻量測結果。兩者均是經過厚度以及偏壓的調校後各自所能得到最大交換場之條件，在經過相同的後退火步驟處理，可以發現與 Cu 做種子層相比，若取 Ni₈₀Fe₂₀ 作為種子層，不但能得到較高之磁阻值，並且更能利用其高度的(111)纖構有效的提升 IrMn 交換場至 470 Oe 之多；對於我們往後的研究以及可能的應用，交換場愈大或許愈能幫助我們釐清其上各鐵磁層所扮演的角色，於是在接下來的實驗中，都選 Ni₈₀Fe₂₀ 40 Å（-100v）作為種子層。

4.2.2 加偏壓於 Py underlayer 對性質之影響

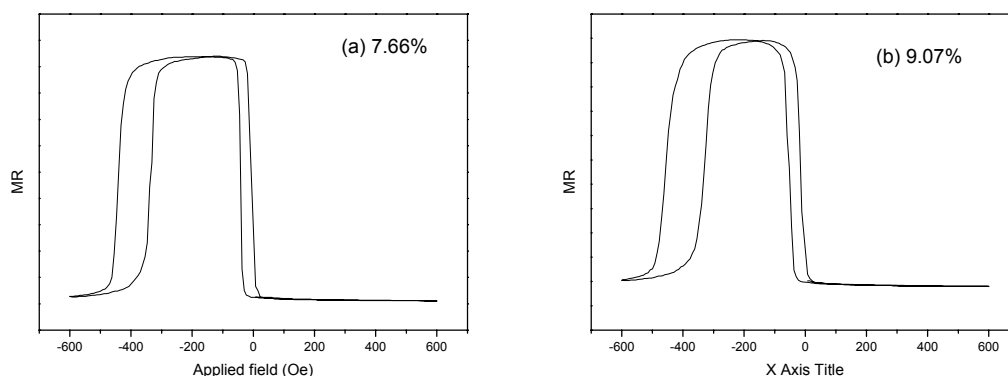


圖 4.14 加偏壓之自旋閥磁阻曲線。(a) 各層均加，(b) 除 underlayer、bottom CoFe 外均不加。結構 Ta30Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe30Å/Cu23Å/CoFe40Å/Ta30Å。

	Rmin (Ω)	ΔR (Ω)	MR (%)	Hintercoupling (Oe)
(a)	6.055	0.464	7.66	25
(b)	5.59	0.507	9.07	34

表 4.1 加偏壓之自旋閥磁性質

當我們在全部膜層均加偏壓，如圖 4.14(a)，發現會使得 Rmin 上升， ΔR 減弱，如此則 MR 變差。這可能是因為我們在 free layer、spacer 加偏壓，使得層與層之間的界面不平整，破壞了原本能提供鏡面反射的機會。

4.3 NiFeO_x-NOL 之正交耦合自旋閥

Fukuzawa 在 2002 年首次提出，在被固定層中加入 CoFe 的氧化層，能使得自旋閥內磁性層磁矩產生以一角度之耦合行為。我們相同的也在 Ni₈₀Fe₂₀ 的氧化層中看到了類似的行為，但就算如此，我們仍然無法明確地指出，究竟這樣特別的磁性質表現，是來自於 Fe 的氧

化物亦或是其他特殊條件，於是下面我們做了不同的氧化物成分與不同的氧化方法，來觀察它們是否都能夠產生正交耦合之情形，並且觀察彼此性質表現如何

4.3.1 自然氧化法 v. s. 電漿氧化法

4.3.1.1 自然氧化法

在 NiFeO_x-NOL 自旋閥的製程中，我們首先利用不同的氧化方法，來探討是否影響自旋閥結構中磁矩呈正交耦合之排列。在真空狀態之 loading chamber 中，通入 2 sccm 之氧氣體，同時持續對 loading 抽氣使其達成約 60 mTorr. 之氧分壓，使欲氧化之試片暴露於該環境下一分鐘，得到自旋閥磁阻表現如圖 4.15。

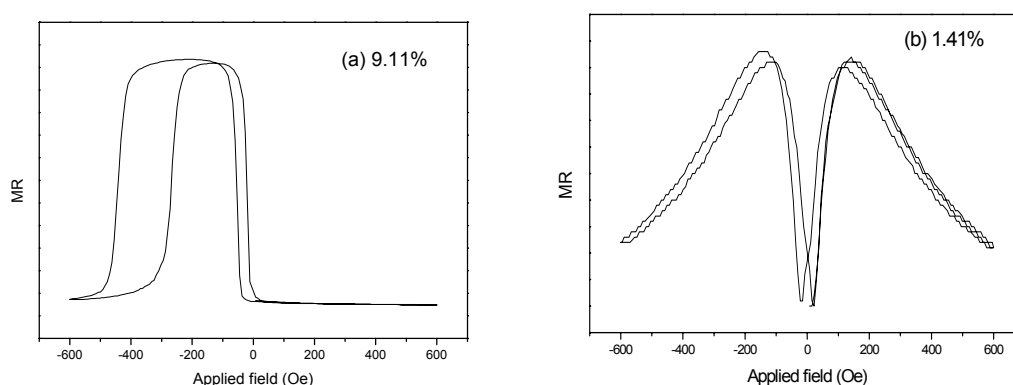


圖 4.15 自然氧化法形成之自旋閥磁阻表現。(a)0°，(b)90°。

在這組實驗中，無論我們如何改變氧氣的流量，亦或是增長氧化的時間，均無法在自旋閥之磁阻表現中觀察得到有正交耦合排列之情形發生。

4.3.1.2 電漿氧化法

若我們改而通入 20 sccm 之氧氣，利用氧電漿離子轟擊，以 RF 電源供應器提供功率 10 瓦的電源，來產生氧氣電漿，當氧離子撞擊膜面與膜面原子發生反應而產生氧化的動作。並且嘗試改變電漿氧化之時間。

由圖 4.16，在以電漿進行氧化之實驗中，我們可以很明顯的觀察到，當改變氧化時間由 10 秒至 30 秒，都有機會能夠使得 NiFeO_x-NOL 之自旋閥結構發生正交耦合之情形；但隨著氧化時間的增加，在垂直異向性場方向之 R-H 平台會急遽地縮減，並且磁阻值大幅地下降。

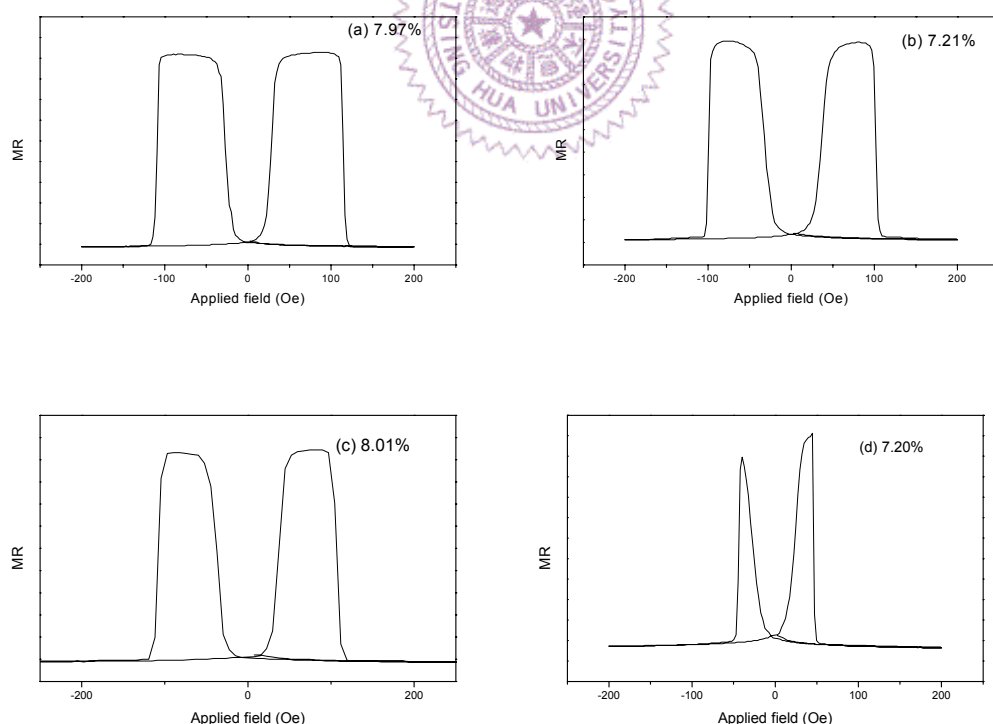


圖 4.16 變電漿氧化時間之 0° 自旋閥磁阻表現 (a)10, (b)20, (c)30, (d)40 秒。
(Ta35Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe35Å/Cu24Å/CoFe25Å/Cu12Å/CoFe10Å+normal/Ta35Å)

由上述結果，可以得知，在具有奈米氧化層之巨磁阻自旋閥結構中，當中的磁性膜層磁矩會呈 90 度排列之行為僅發生在以電漿氧化法製備 NOL 的自旋閥中，而且除了與氧化方法相關之外，一旦延長氧化的時間，使得作為氧化層之 NiFe 完全氧化而波及下層 CoFe，亦會致使正交耦合之強度銳減、磁阻值遽降。

4.3.1.3 TEM 影像

對上述兩種氧化方式，所得之巨磁阻自旋閥，由 cross sectional TEM 影像中，我們分別觀察自然氧化法以及電漿氧化法所形成之氧化層。在 TEM 的分析中，我們可以看到經自然氧化法(圖 4.17(a))所形成之氧化層約有 18Å，並且結構相當鬆散，並且仍然可以看到下層 CoFe 仍能夠透過氧化層繼續生長；而當利用電漿氧化法製備氧化層，由 TEM 圖 4.17(b)中，緻密的氧化層阻絕了上下層 CoFe 間的鐵磁耦合力量，使得自旋閥中的正交耦合有機會發生。

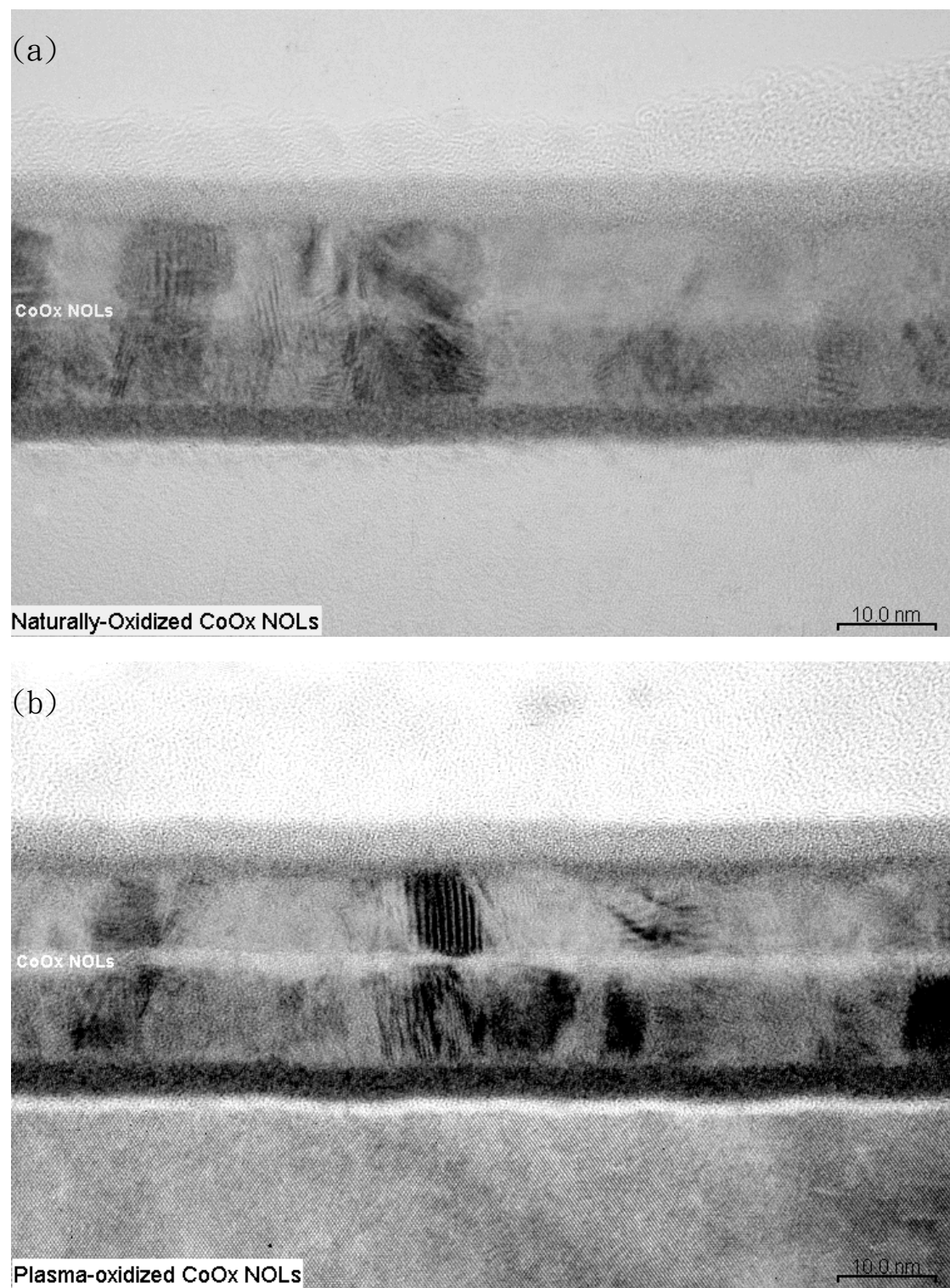


圖 4.17 (a)自然氧化法與(b)電漿氧化法製備之自旋閥 cross sectional TEM。

4.3.2 NiFeO_x 之改變角度量測

4.3.2.1 改變量測角度

在以 IrMn 作為反鐵磁層之 Ni₈₀Fe₂₀-NOL 自磁阻自旋閥中，由於不一樣的製成條件，我們在完全相同的膜層結構中，分別利用自然氧化法以及電漿氧化法製備奈米氧化層，可以分別得到一般的鏡面反射自旋閥以及具有正交耦合磁性膜層之自旋閥。

這種因磁矩不同的翻轉表現而造成巨磁阻自旋閥在磁性值上的差異，我們在第一節的討論中已經提出解釋，概因為利用電漿氧化所形成之氧化層，能夠使得自旋閥中某磁性層之磁矩傾向停留在與交換異向性垂之方向，是故最佳磁阻表現發生在與退火場夾 90 度角方向。

我們進一步對自然氧化以及電漿氧化所製備之 NOL 自旋閥同樣進行變角度之磁阻值量測，定義 0 度為平行退火場方向，結果如圖 4.18 所表示。

其中方塊數據表示電漿氧化所形成之具正交耦合自旋閥，圓點數據則為自然氧化後的普通鏡面反射自旋閥。由圖 4.18 我們可以很清楚的看到這兩者在變角度磁阻值的變化上的確是以 90 度的相位差相似著。

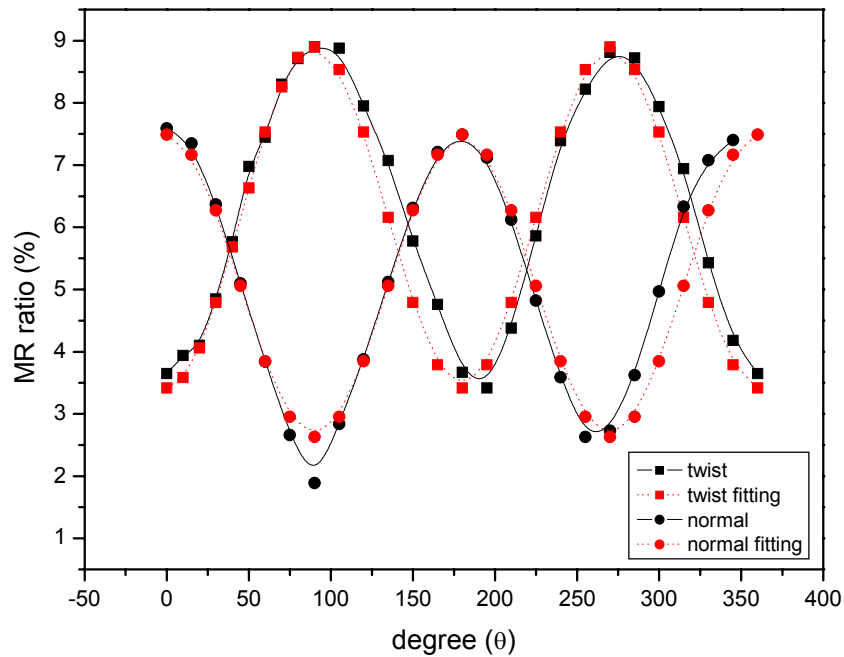


圖 4.18 自然氧化以及電漿氧化法自旋閥之磁阻值對角度變化。

對此兩種自旋閥磁阻表現作 cosine 角相變化之 fitting，
得到對角度變化關係式如下：

對正交耦合自旋閥之磁阻值做 fitting 時，其函數值為：

$$2.74 * \cos(((\theta - 90) * 2) / 180 * \pi) + 6.16$$

而對一般 NOL 自旋閥之磁阻值做 fitting：

$$2.43 * \cos((\theta * 2) / 180 * \pi) + 5.06$$

這兩個方程式分別為圖 4.18 中之 cosine 虛線；比較兩個 cosine 函數，進一步證實在正交耦合以及一般 NOL 自旋閥中，磁阻值對量測角度變化關係的確呈九十度之相位差。

4.3.2.2 改變退火場方向

在我們的實驗中，巨磁阻自旋閥中反鐵磁層磁矩排列的方向是由後退火處理時所提供的 1000 Oe 外加場方向來決定，在這樣大小的外加場下，經過 200°C 15 分鐘的持溫處理，可以使 IrMn 中的磁矩排列與退火場方向同向，因此其上各鐵磁層便能有規律地隨此定義方向呈現平行或是反平行排列。

由於在本論文中所要探討的具正交耦合自旋閥結構中，有磁矩居然能夠一反常態，傾向停留在與反鐵磁層交換異向性垂直之方向，我們感到好奇，一旦在完成對 IrMn 磁矩定向的程序，也就是經過後退火處理、得到一垂直磁矩排列後，倘若再度利用持溫退火改變反鐵磁層的磁矩方向，對於這樣一個正交耦合之自旋閥又會產生怎麼樣的影響。

於是針對這個問題，我們設計了下面的實驗，取具正交耦合之巨磁阻自旋閥來做改變退火場方向之退火處理，圖 4.19 為退火後垂直最後退火方向的 R-H 量測結果。

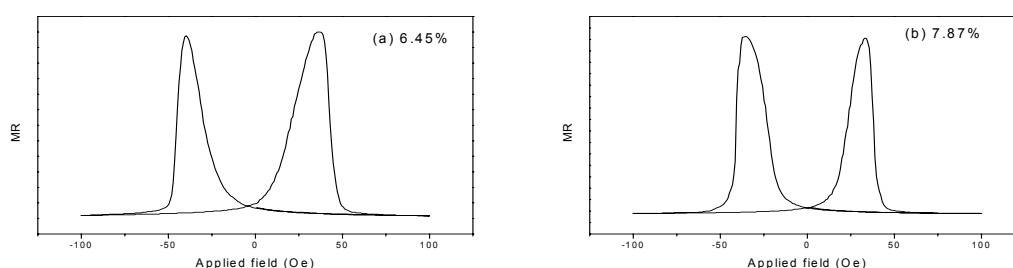


圖 4.19 正交耦合自旋閥之變角度退火與磁阻表現

圖 4.19(a)為正交耦合之自旋閥試片經過第一次退火後，在垂直退火場方向之磁阻表現，而圖 4.19(b)則為取經過第一次退火後之(a)試片，轉九十度再退火，在與第二次退火場方向垂直處（即第一次退火所定義之 0 度方向）所量得知磁阻曲線。

發現對正交耦合性質之自旋閥結構試片，取其在與原退火方向夾 90 度再做等溫度退火（210°C），其 90 度耦合現象改而出現在與最後退火方向夾 90 度角處；意即當改變交換場的方向，巨磁阻自旋閥中 top-pinned CoFe 之易軸表現仍然會出現在與交換異向性垂直處，這就證明了自旋閥中磁矩呈正交耦合之行為與反鐵磁層所提供之交換場有相對關係。

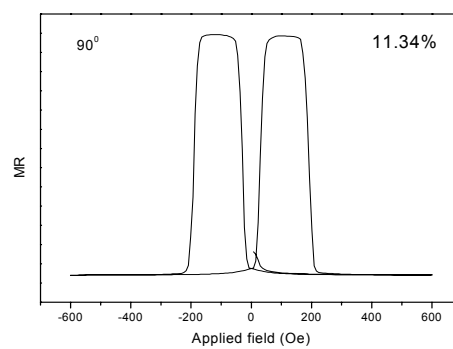
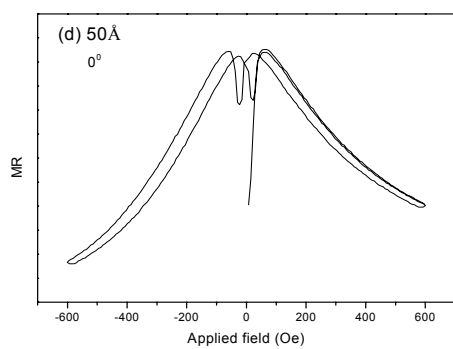
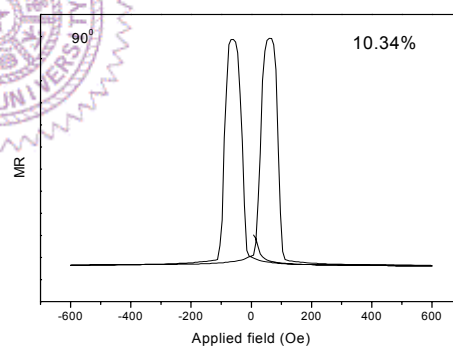
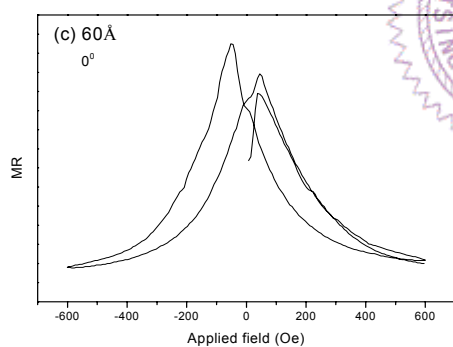
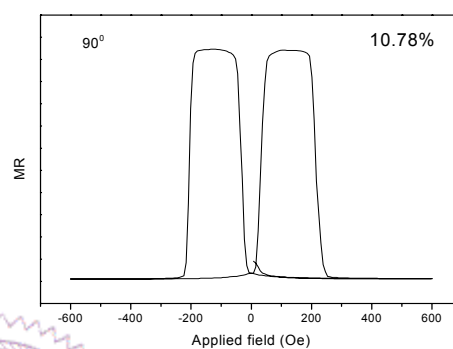
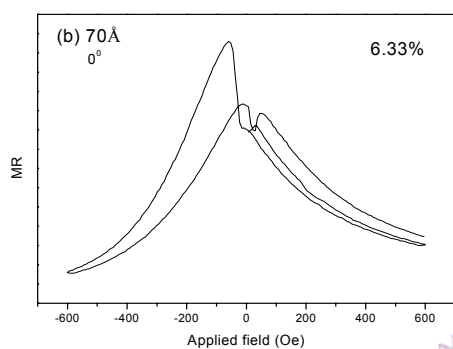
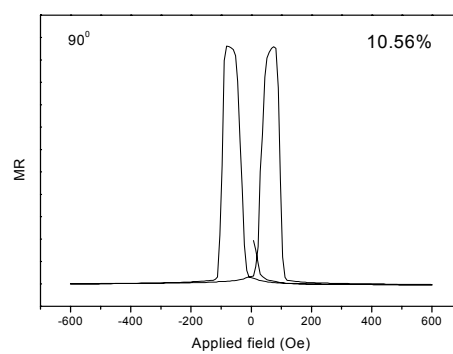
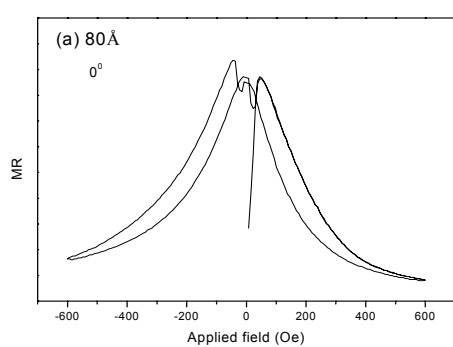


4.3.3 改變各層厚度對正交耦合性質之影響

接下來我們嘗試著藉由調變巨磁阻自旋閥中各層的厚度，來探討其對於正交耦合表現之影響。我們選用以 IrMn 作為反鐵磁層、NiFeOx 為氧化層之自旋閥結構（Ta/Py/IrMn/CoFe/Py-NOL/CoFe/Cu/CoFe）來進行這些實驗。

4.3.3.1 反鐵磁層

首先我們改變反鐵磁層 IrMn 的厚度，研究其對正交耦合強度表現之影響。



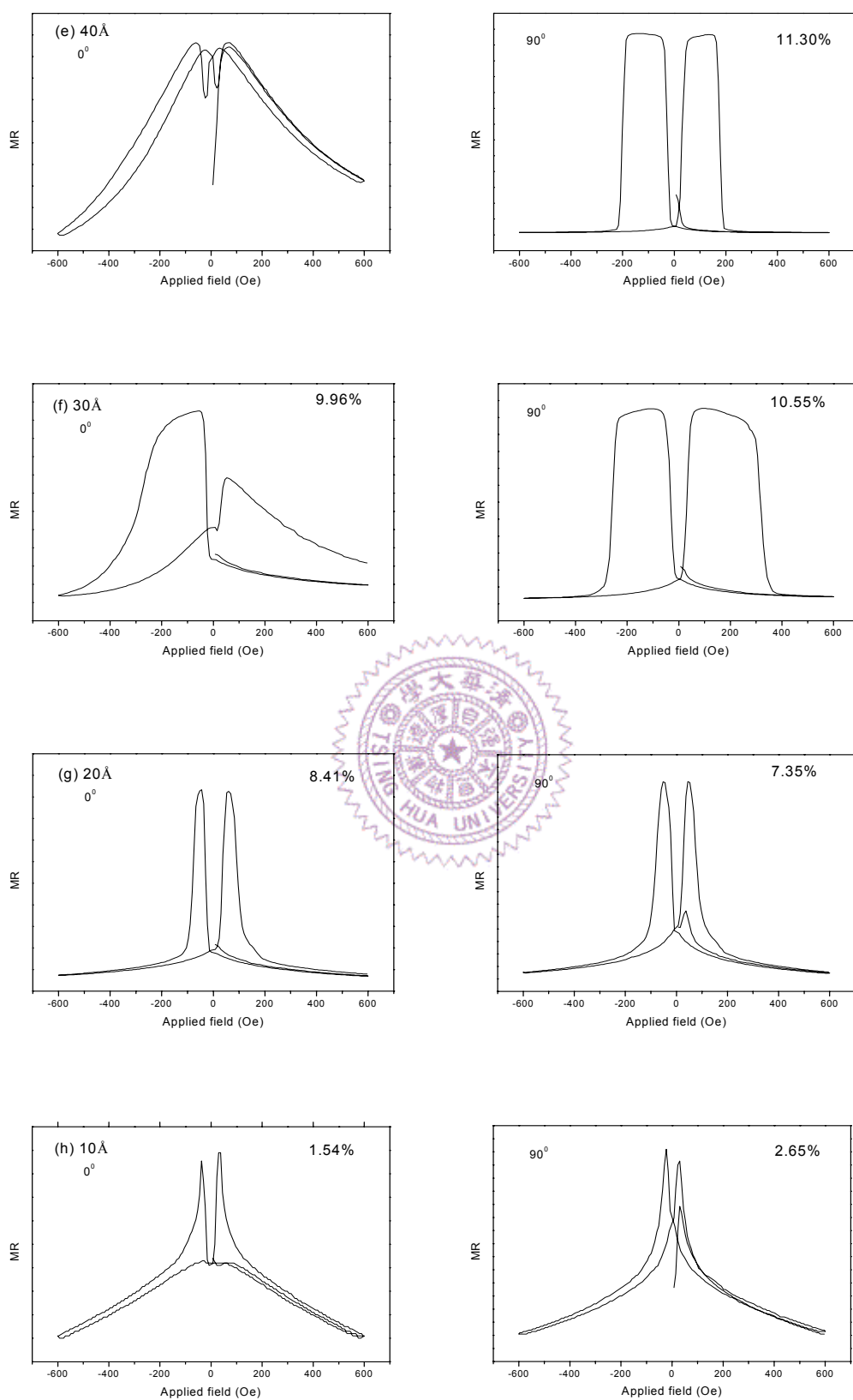
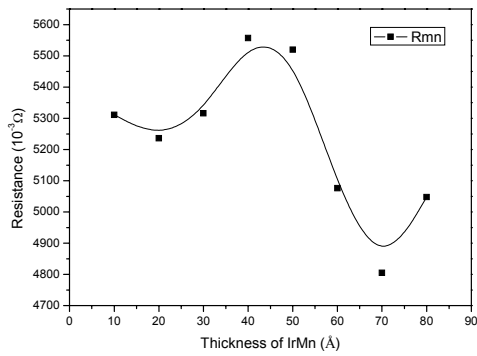


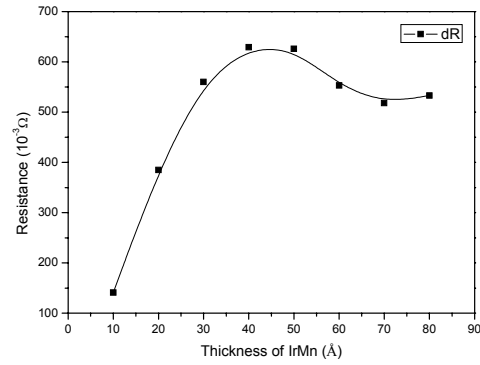
圖 4.20 改變自旋閥中反鐵磁層 IrMn 厚度。
(Ta35Å/Py40Å/**IrMn**/CoFe10Å/Py13Å+plasma/CoFe25Å/Cu23Å/CoFe40Å/Ta35Å)

針對該組試片，我們可以得到其磁性質對反鐵磁層厚度之相關表

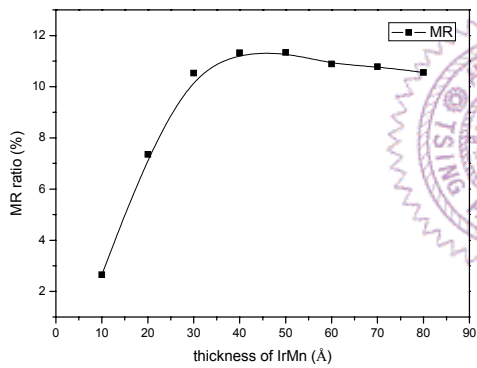
現如圖 4.21 所示：



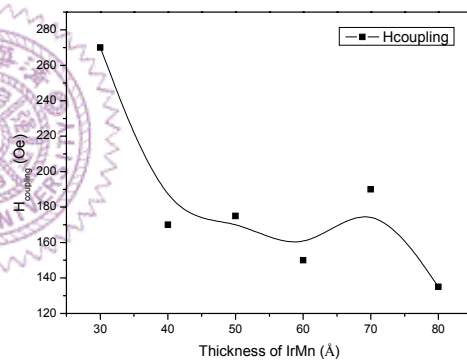
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4.21 (a) R_{min} , (b) ΔR , (c)MR, (d) $H_{coupling}$ 與 IrMn 厚度之關係。

當反鐵磁層減薄之時，我們可以發現正交耦合的強度有很明顯的提升。當我們減薄 AFM 厚度時，對其上 CoFe10 之 Hex 亦隨之降低，如圖 4.22 所示。

當 IrMn 層厚度減為 20、10 Å 時（圖 4.20(g)、(h)），發現正交耦合之現象漸消失，轉而形成類似 PSV 之表現，即反鐵磁層未能貢獻

足夠之 pinning 力量。

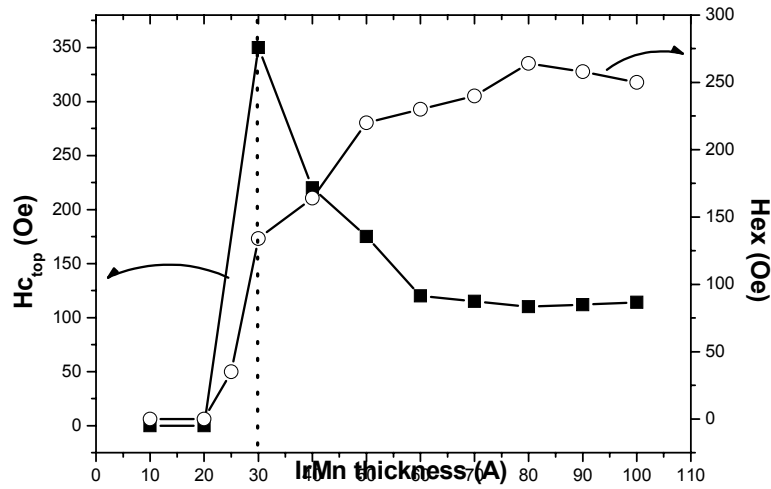


圖 4.22 $H_{c_{top}}$ 、 H_{ex} 與 IrMn 厚度之關係

黑色方塊所代表交換場大小反鐵磁層厚度之變化曲線為結構 IrMn/CoFe50Å 下的量測結果，而 $H_{c_{top}}$ 則指在垂直異向性方向 top-pinned CoFe 之矯頑場大小，也就是我們所謂的正交耦合強度。

由圖 4.22，可以發現我們藉由改變反鐵磁層的厚度，即可以使正交耦合的強度產生變化，而並非 Fukuzawa²² 或是 Matt²³ 所提出，認為是由於 NiFeOx 的磁性上之不平整而使得巨磁阻自旋閥中之磁矩發生夾一角度之翻轉。

對此現象，我們嘗試提出一種解釋，見圖 4.23，此為我們所推論之具正交耦合之 NiFeOx 自旋閥結構中，各層磁矩翻轉機制示意圖。我們首先利用加場退火固定反鐵磁層的方向，由於反鐵磁層與其上之 bottom-pinned CoFe 之間產生交換異向性之耦合力量，會將

bottom-pinned CoFe 的磁矩固定與反鐵磁層同向，我們稱之為 reference layer，正因為有這層 reference layer 的存在，在依附其上成長之 NiFeOx 層底部會形成一些與 bottom-pinned CoFe 同向的 reference spin，但 NiFeOx 本身為 amorphous 的結構，因此除了 reference spin 之外，其餘磁矩會來回地在平行與反平行 reference layer 磁矩的方向擾動著；正由於 NiFeOx 之 spin 會往復於 0 度以及 180 度之間，top-pinned CoFe 的磁矩為尋求最穩定狀態，因而傾向停留在與 reference spin 正交方向。

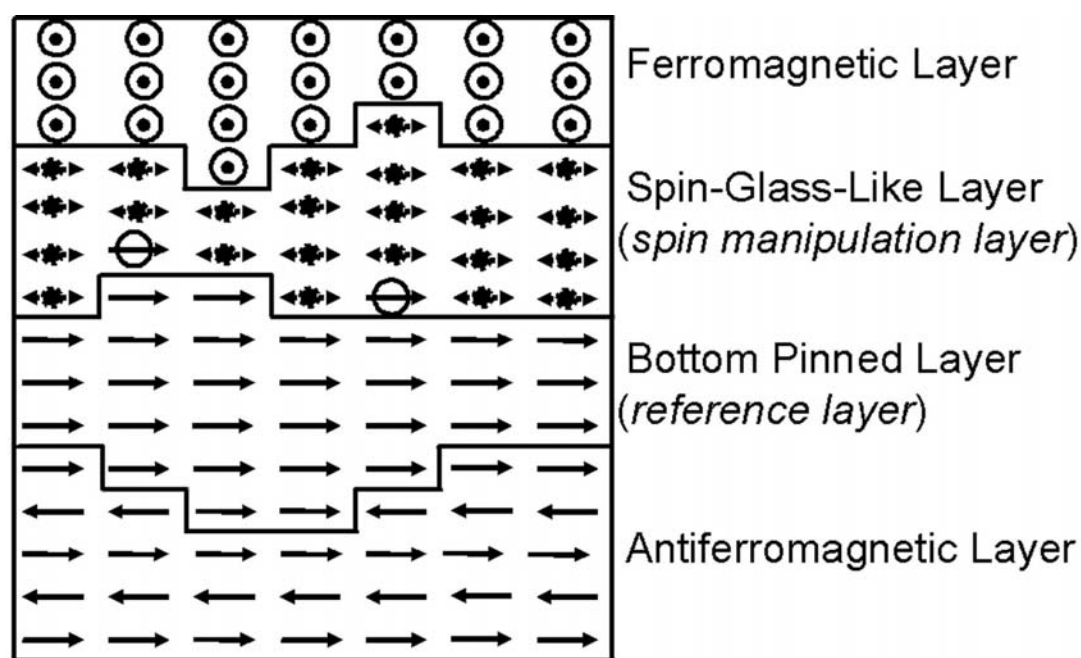


圖 4.23 NiFeOx 正交耦合自旋閥之機制示意圖。

NiFeOx 層中 $\odot \rightarrow$ 表示 reference spin

利用上述之 NiFeOx 正交耦合機制，我們對改變反鐵磁層厚度之性質作以下探討。

在圖 4.22 中，我們可以看到藉由改變反鐵磁層的厚度，在 IrMn80Å 交換場達到一個最大值，將此現象分為兩部分來討論：

(a) $30 \text{ Å} \leq t_{\text{IrMn}} < 80 \text{ Å}$: 其中 t_{IrMn} 表示為反鐵磁層 IrMn 的厚度，在這段厚度間，IrMn 與 bottom-pinned CoFe 之間的交換異向性提供了一個單方向異向性固定住 bottom-pinned CoFe 中的磁矩，而在 NiFeOx 中的某些磁矩 (reference spins) 也被固定在這個方向，並且強迫 NiFeOx 中其餘的磁矩在 0° 方向不停地擾動，而就因為在這區間，交換場大小隨著厚度的增加而遞增，使得 reference spins 增多，那麼剩下能在 0° 與 180° 方向來回擾動之磁矩則減少，則正交耦合之強度相對地減弱；若我們降低反鐵磁層厚度，使交換場變小，即 reference spins 變少，則 NiFeOx 中會來回擾動而停留在垂直交換異向性方向之磁矩變多，所以就如同我們所觀察到的，正交耦合強度因反鐵磁層厚度減薄而遞增，而在 IrMn30Å 處產生一最大強度 355 Oe。

(b) $t_{\text{IrMn}} < 30 \text{ Å}$: 當反鐵磁層厚度持續減低，此時交換異向性已經無法提供足夠的力量來形成 reference spins，磁矩改而在三度空間中隨意翻轉，於是正交耦合表現消失。

4.3.3.2 bottom-pinned CoFe

當改變 bottom-pinned CoFe 厚度由 10 Å (圖 4.24(a)、(b)) 至 15 Å (圖 4.24(c)、(d)) 時，可以看到正交耦合的強度由 1150e 降低為 860e，而一直到 t_{bottom} 增加至 25 Å (圖 4.24(e)、(f)) 為止，正交耦合之表現一直存在，但一旦將 t_{bottom} 增加為 35 Å (圖 4.24(g)、(h))，正交耦合之強度隨即銳減，推測此現象應該與 bottom-pinned CoFe 與反鐵磁層之間的交換耦合力量有關。

亦即當 bottom-pinned CoFe 的厚度增加時，最上層磁矩方向受 IrMn 層的影響而減弱，於是無法提供 NiFeOx 層足夠的參考方向，因此 NiFeOx 層中的磁化方向變為散亂排列，使正交耦合強度下降。

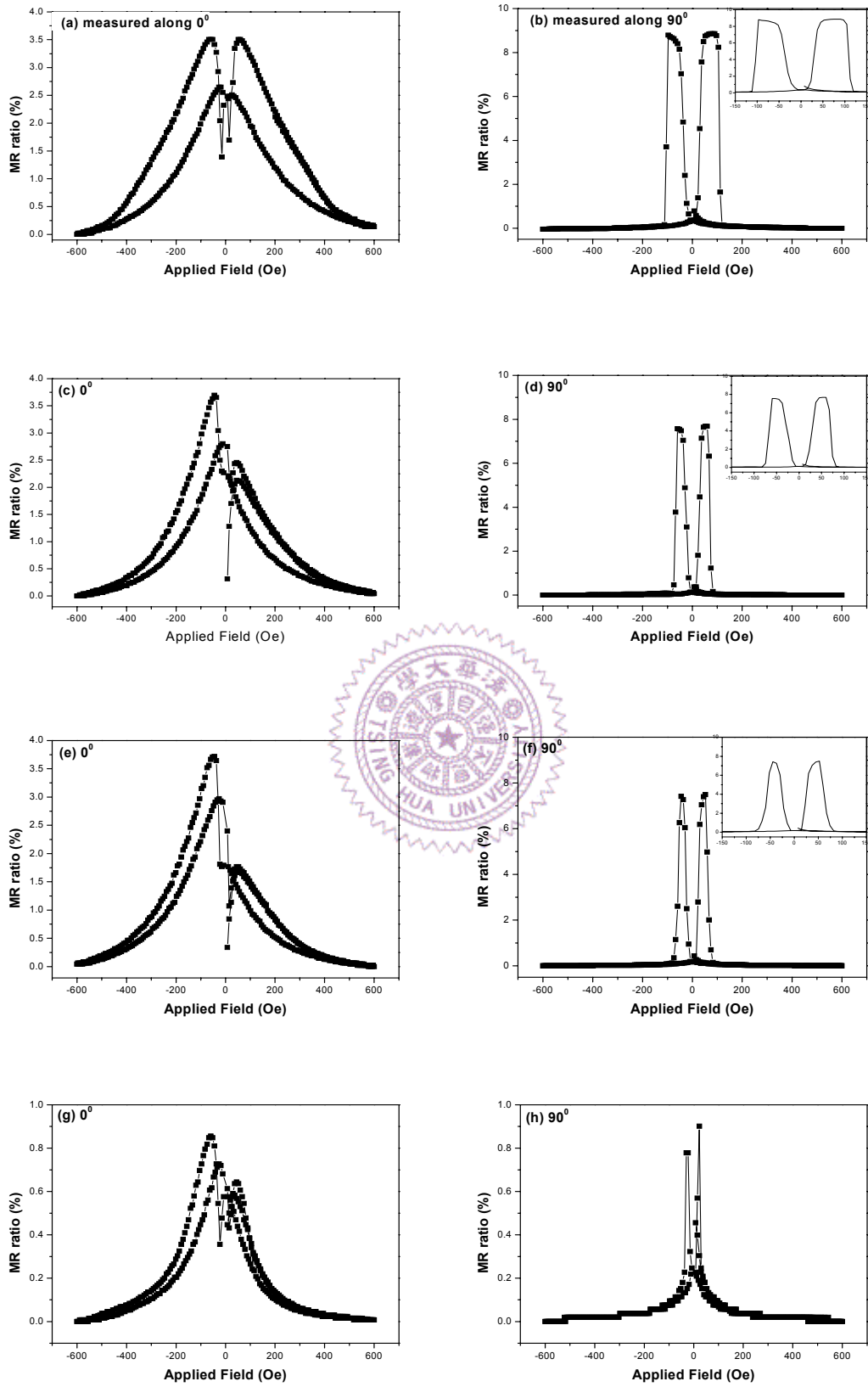


圖 4.24 改變 NiFeO_x 之正交耦合自旋閥中 bottom-pinned CoFe 之厚度，
(a)&(b)10Å，(c)&(d)15Å，(e)&(f)25Å，(g)&(h)35Å。

4.3.3.3 NiFeO_x 層

首先我們取 NiFe 作為氧化層，改變其厚度由 7Å ~13 Å，並以相同氧化條件進行氧化步驟，結構為 Ta30Å/Py40Å/IrMn80Å/CoFe10Å/NiFeX+plasma/CoFe25Å/Cu23Å/CoFe40Å/Ta30Å。得到磁阻表現圖 4.25 所示。

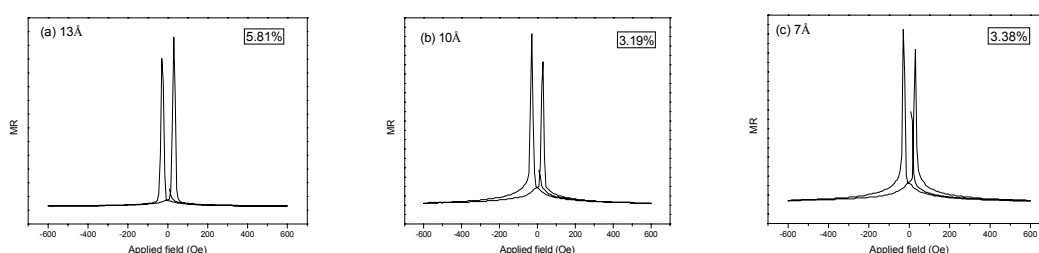


圖 4.25 改變氧化層 NiFe 厚度，(a)13Å，(b)10Å，(c)7Å。

觀察各 NOL 之磁阻表現，當 NiFe 厚度為 13 Å 時，我們可以得到最佳之阻值，而所形成之正交耦合場強度則皆相近。

當我們改變氧化層厚度，當 Py 厚度減少，對於 Rmin 的影響並不顯著，而 ΔR 下降，所以整體而言磁阻值有變小的趨勢；注意在磁阻急遽下降處，R-H 曲線上出現 shoulder，亦即部分的磁矩並未在該場下馬上被翻轉回平行態，所以沒有立即降至 Rmin。

經由上述結果，我們可以知道，當改變氧化層的厚度，在 7Å~13Å 之內，均能夠使得自旋閥內磁性膜產生正交耦合之行為，並且強度亦沒有太大的變動。

4.3.3.4 top-pinned CoFe

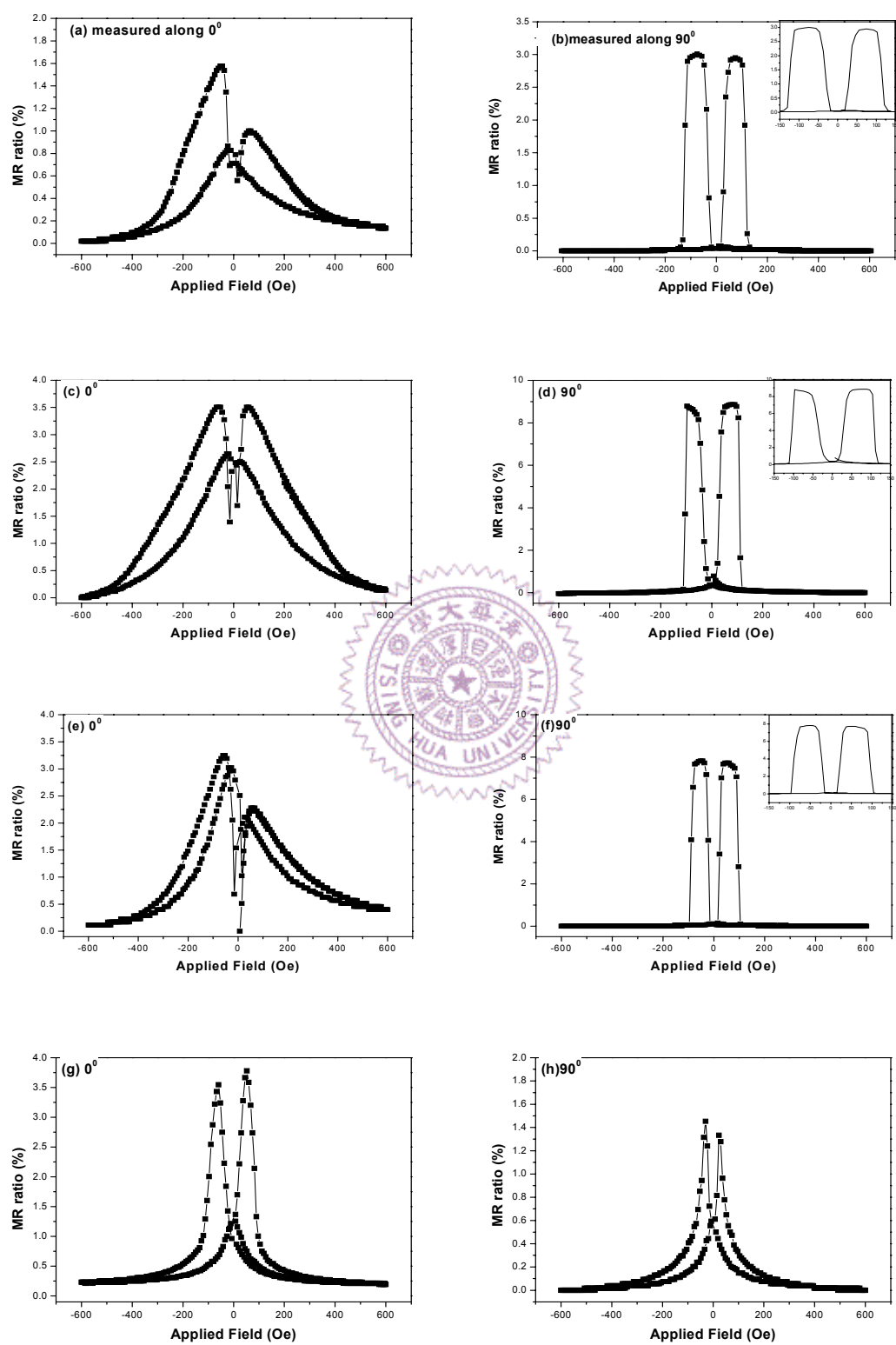


圖 4.26 改變 NiFeO_x 之正交耦合自旋閥中 top-pinned CoFe 之厚度，
(a)&(b) 20\AA ，(c)&(d) 25\AA ，(e)&(f) 30\AA ，(g)&(h) 35\AA 。

由圖 4.26 之結果看來，當改變 top-pinned CoFe 之厚度，則正交耦合場的強度會隨著 top-pinned CoFe 厚度的增加而有下降的趨勢，這正表示能夠造成磁矩 90 度排列之力量，是和 top-pinned CoFe 與下方反鐵磁層之間的交互作用力息息相關；並且值得注意的是，當 top-pinned CoFe 厚度提升至 35Å 之時（圖 4.23(g)、(h)），正交耦合之表現完全消失，呈現類自旋閥之性質。



4.3.4 改變退火溫度對正交耦合之影響

4.3.4.1 normal v.s biquadratic 自旋閥

針對正交耦合之自旋閥結構，我們藉由改變後退火程序中的持溫溫度，來觀察該結構之熱穩定表現。圖 4.27 為相同結構下，分別以自然氧化以及電漿氧化法所鍍製之 NOL 自旋閥，比較兩者對於改變退火溫度從 190°C ~ 300°C 的磁阻值變化。

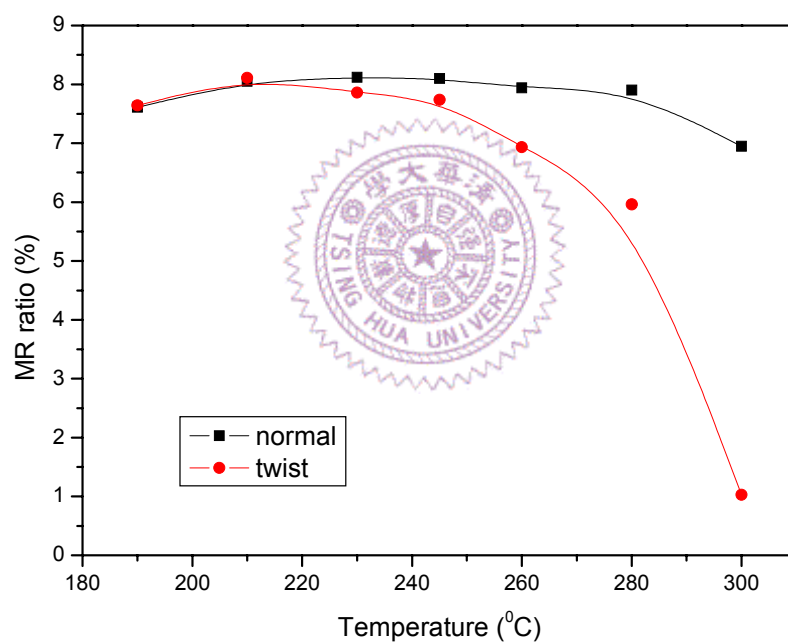


圖 4.27 退火溫度對自然氧化與電漿氧化自旋閥磁阻表現之影響。

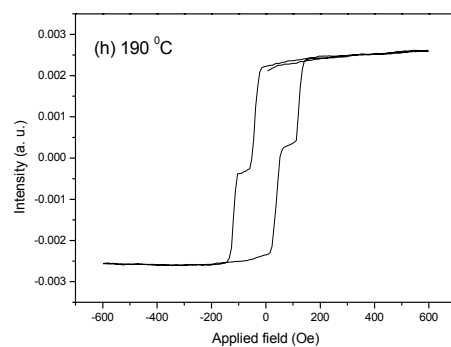
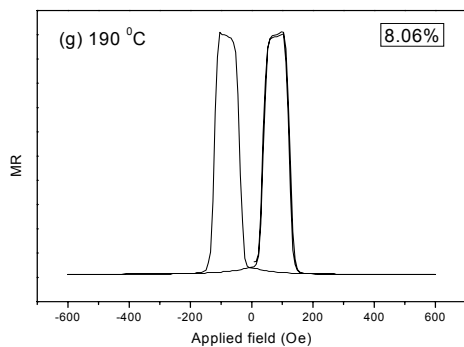
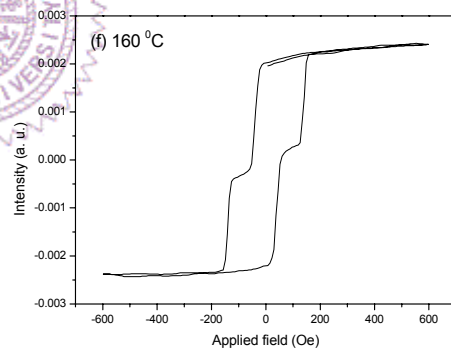
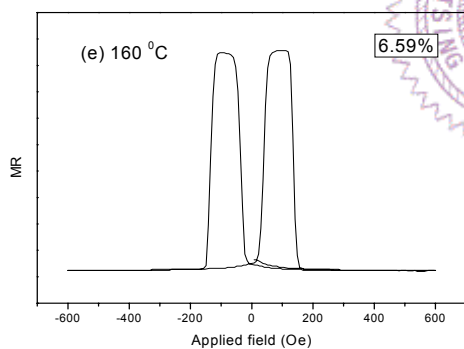
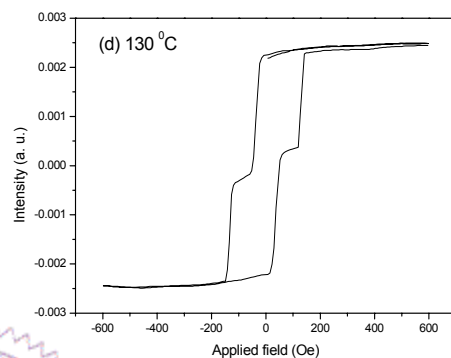
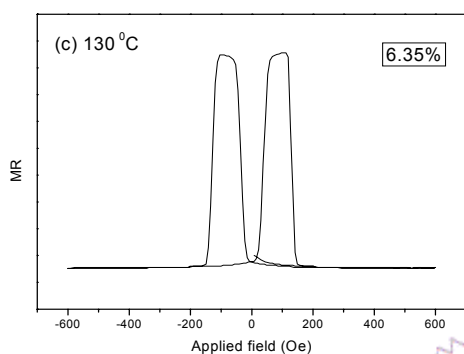
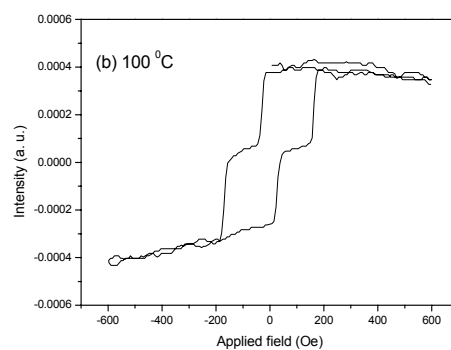
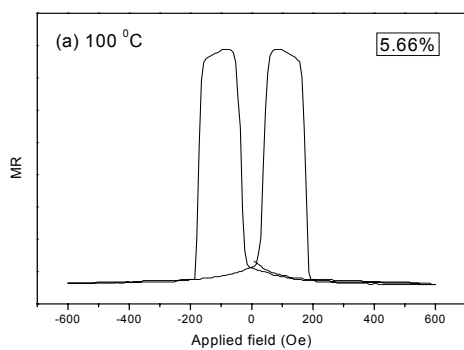
由圖 4.27 之結果，我們可以看出 NOL 自旋閥中具有正交耦合現象之試片其磁阻值隨著退火溫度的提升而下降，尤其在 250~300°C 之時遽減，顯示出以如此特殊條件所形成的 90 度耦合結構，其熱穩

定性比一般的 NOL 自旋閥來得差。

當逐步提升退火溫度，在一般的 NOL 自旋閥磁阻表現中，由於磁阻是由於自旋閥中磁性膜層磁矩的平行、反平行排列所導致，因此雖然退火溫度持續地增加，會造成反鐵磁層所提供之交換異向性略微減弱，但已足夠造成鐵磁層之平行、反平行排列；反觀具正交耦合之自旋閥，欲使 top-pinned CoFe 之磁矩固定在垂直反鐵磁層之方向，必須取決於透過 NiFeOx 層所得之正交耦合強度，當退火溫度升高，致使靜磁能克服了正交耦合的力量，則 top-pinned CoFe 之磁矩慢慢希望能回到與交換場方向同向，因而不完全排列在垂直退火場方向，或許就介於平行與垂直異向性方向間，於是造成在 240°C 後磁阻值頓減。

4.3.4.2 退火溫度對 90 度耦合自旋閥之影響

取結構為以 Py 作為 underlayer、NOL 之試片由低溫 (100°C) 起做退火，並觀察其磁性質，結果如下：



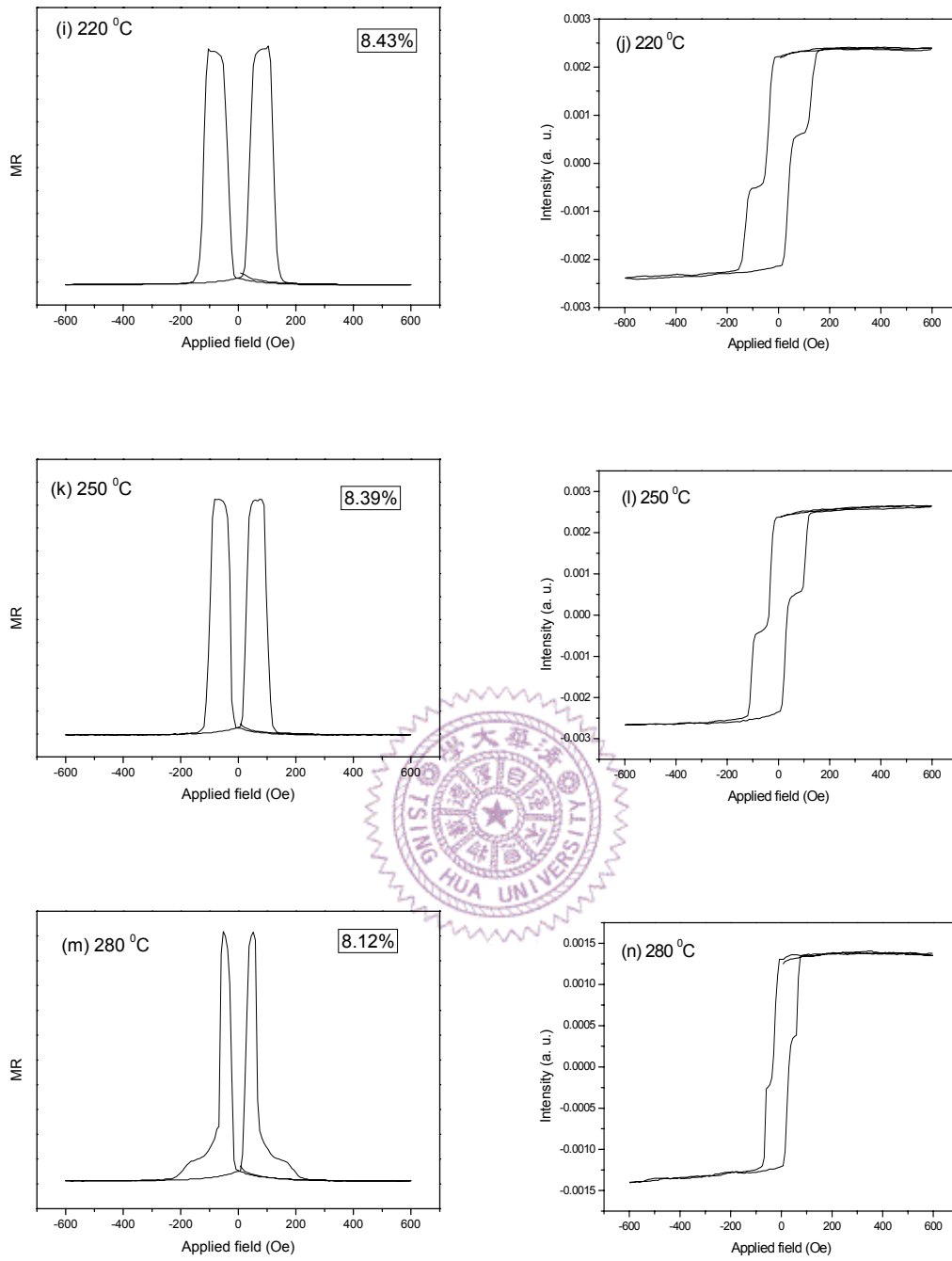


圖 4.28 改變退火溫度，(a)(c)(e)(g)(i)(k)(m)為 R-H loop，其餘為 M-H loop。

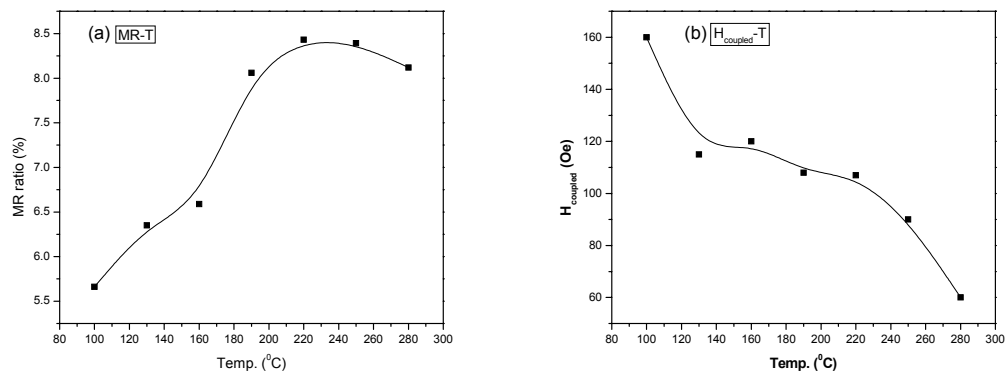


圖 4.29 (a) MR 與(b)正交耦合場強度對退火溫度之關係。

由圖 4.29，MR-T 以及 H-T 之結果，可以知道當退火溫度為 100°C 如此低溫時，已能引發自旋閥之正交耦合性質，並且在最低溫時有最好之正交耦合強度表現。但是為了得到最佳的磁阻值，我們仍必須將退火的溫度提升至 190~220°C 間。是故如何在正交耦合的強度與磁阻值的表現之間取得最佳平衡，仍有妥善權衡的必要。

值得小心注意的是，這組數據之取得，為同一張試片經過連續的退火後所量之結果，因此，對於在 280°C 退火後大幅降低之耦合場強度表現，是否有可能是因為退火時間延長之因素所影響，我們將再取另外相同結構之試片來做比較。

4.3.4.3 退火溫度 v.s 退火時間

如前面一個小節所解釋，我們考慮到自旋閥在改變退火溫度之時的磁性質變化，是否有因為時間的累加而對結果形成影響，於是設計

下列實驗，再取相同結構 (Si//Ta35/Py40/IrMn80/CoFe20/Py13+10w 30sec/CoFe35/Cu24/CoFe25/Cu12/CoFe10+1*10e-3 1min/Ta35) 之試片，直接在 190°C 做持溫 15 分鐘之後退火處理。結果見圖 4.30。

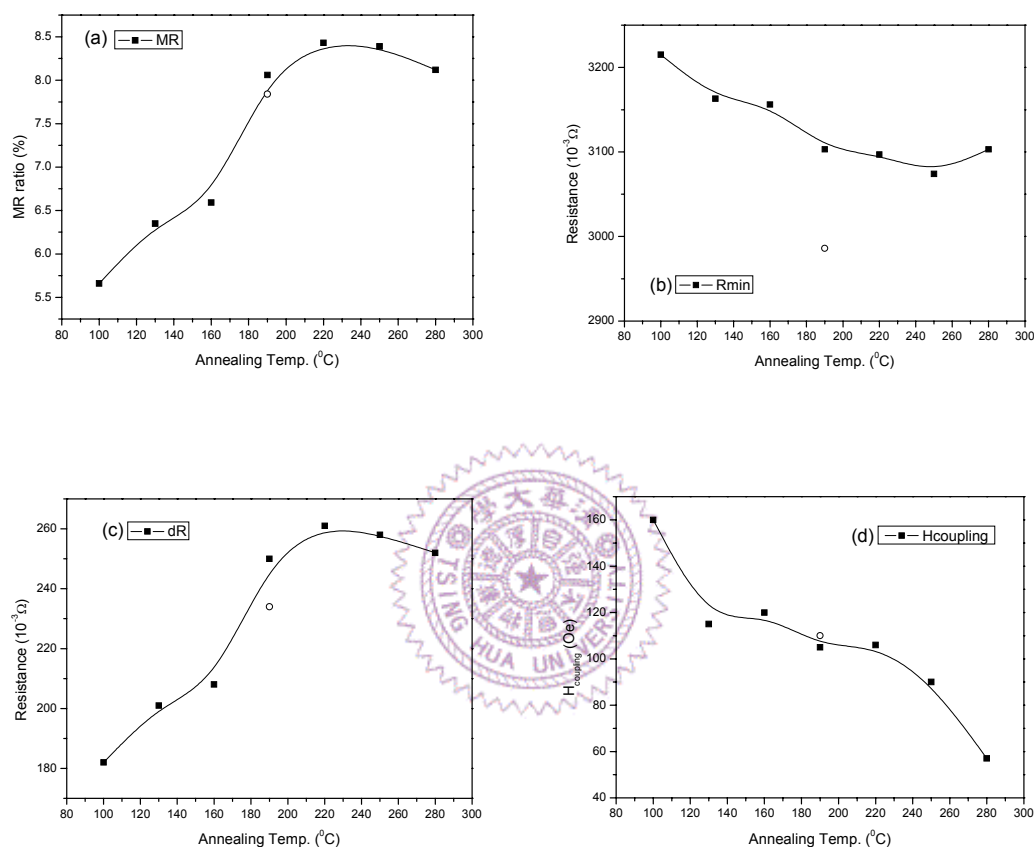


圖 4.30 NiFeOx 自旋閥中退火溫度對於(a)MR，(b)Rmin，(c) ΔR 以及(d)正交耦合強度之影響，其中空心原點表示直接在 190°C 退火 15 分鐘。

由圖 4.30(a)，空心點為取初鍍膜之試片直接在 190°C 退火 15 分鐘，其磁阻表現與退火時間一直累加試片並無太大差別；同樣的情形也出現在正交耦合強度的表現上。於是我們可以知道，對於 NiFeOx 正交耦合自旋閥來說，其加場退火後磁性質的變化，主要受溫度的影響，而與時間沒有太大相關性。

4.3.5 即時變溫量測

對於以 NiFeO_x 作為氧化層，具正交耦合之巨磁阻自旋閥結構之試片，我們取其做相關的即時變溫量測，變化溫度由 -263°C (10K) $\sim 150^\circ\text{C}$ (423K)，觀察正交耦合場的強度變化行為。

實驗結果如下：

升降溫度量測之性質

1. 升溫至 150°C (423K)，我們在垂直自旋閥交換異向性方向，得到下面的 R-H 量測結果。

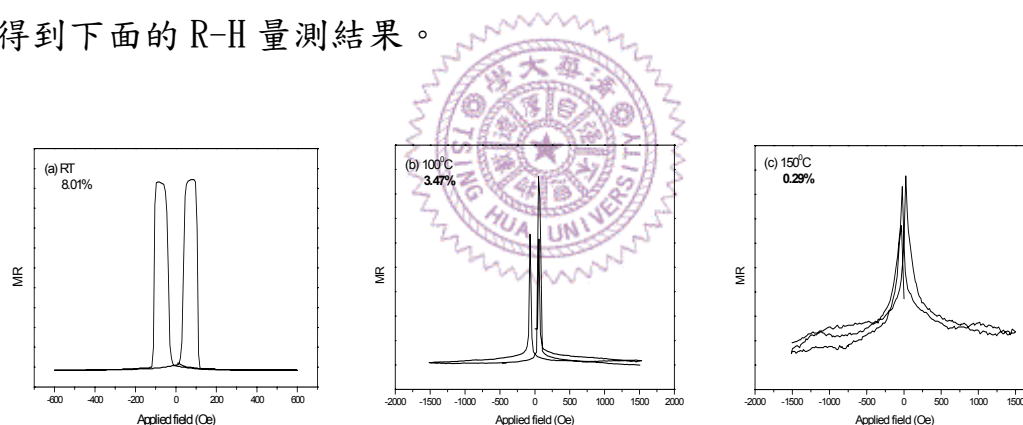


圖 4.31 NiFeO_x 自旋閥(a)室溫，(b)即時升溫 100°C ，(c) 150°C 量測。

當我們提升外加溫度至 100°C 時 (圖 4.31(a))，自旋閥的磁阻表現隨即比室溫量測時大幅地下降 (原約為 8%)，並且得到的 R-H 曲線並不穩定，這是因為我們在提供一加熱電流時，容易使得試片台因受熱而震動，所以難以測得穩定的訊號；見圖 4.31(b)繼續提升溫度到 150°C 時，表現比先前更差，我們僅能隱約地觀察出該自旋閥仍有

磁阻性質，但表現極差。

另取標準自旋閥試片（non-NOL）來相比對，結構如下：

Ta30/NiFe20/IrMn80/CoFe30/Cu24/CoFe30/Ta30

在 non-NOL 自旋閥的磁阻表現中，磁阻值並未發生隨著量測溫度的提高，而產生非常顯著地削弱，而比較兩者的訊號表現，在 100°C 時，標準試片亦仍然保有相當的穩定性，但同樣改變溫度至 150°C，再度發生了因加熱而產生熱擾動影響的情形。

1. 降溫 \sim -263°C（10K）

接著我們取相同結構試片，對其做即時降溫的量測。我們利用 PPMS（Physical Properties Measurement System）進行低溫下的大場磁阻值測量，先將試片置於外加大場中，在有外加場的情形下降低溫度，待到達欲量測之溫度點時變場進行磁阻測量。得到結果如下：

Si//Ta35/Py40/IrMn80/CoFe20/Py13+plasma 10w

20s/CoFe35/Cu24/CoFe25/Cu12/CoFe10+1*10e-3 1min/Ta35

（一） 平行場退火方向(0°)低溫量測

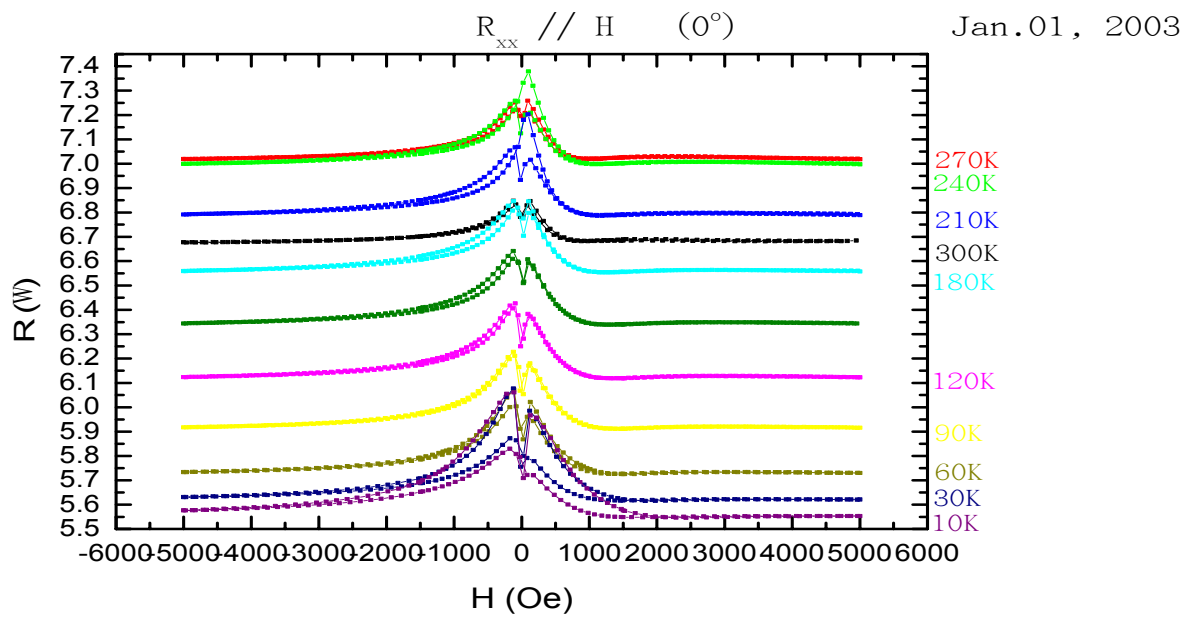


圖 4.32 NiFeO_x 自旋閥之低溫及時磁阻量測

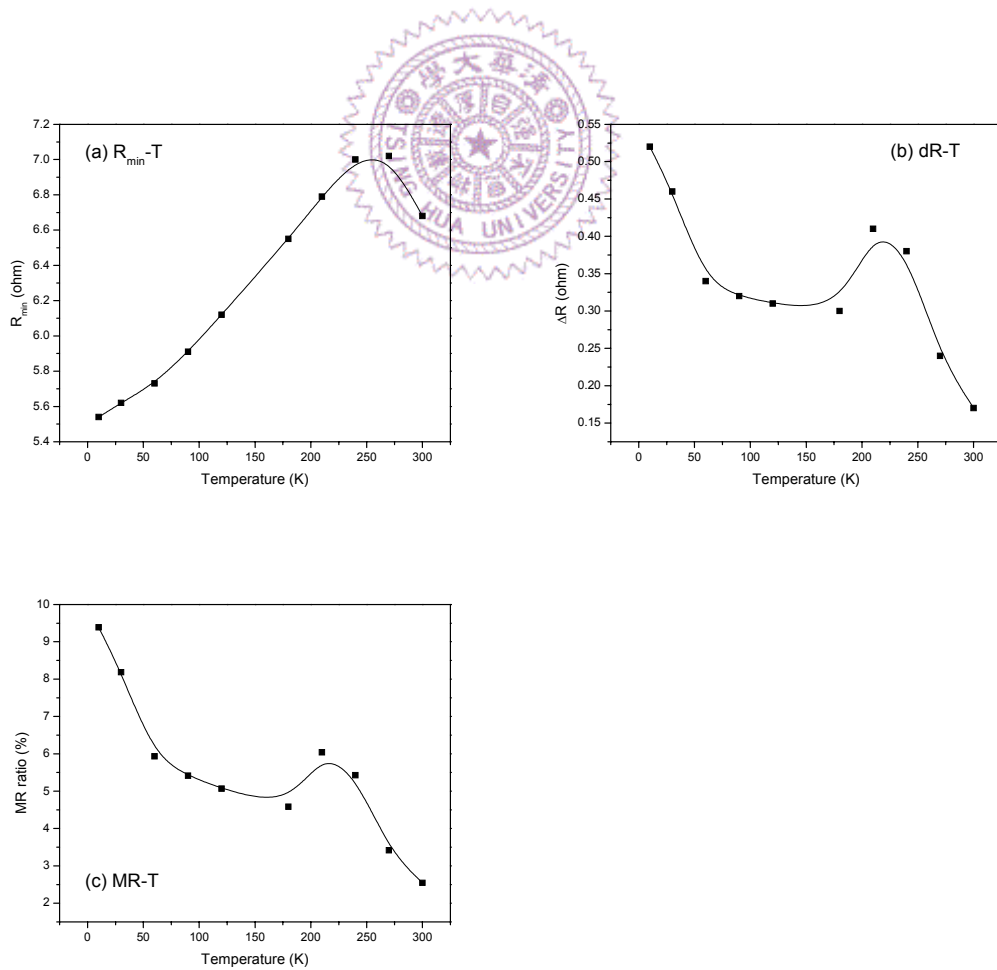
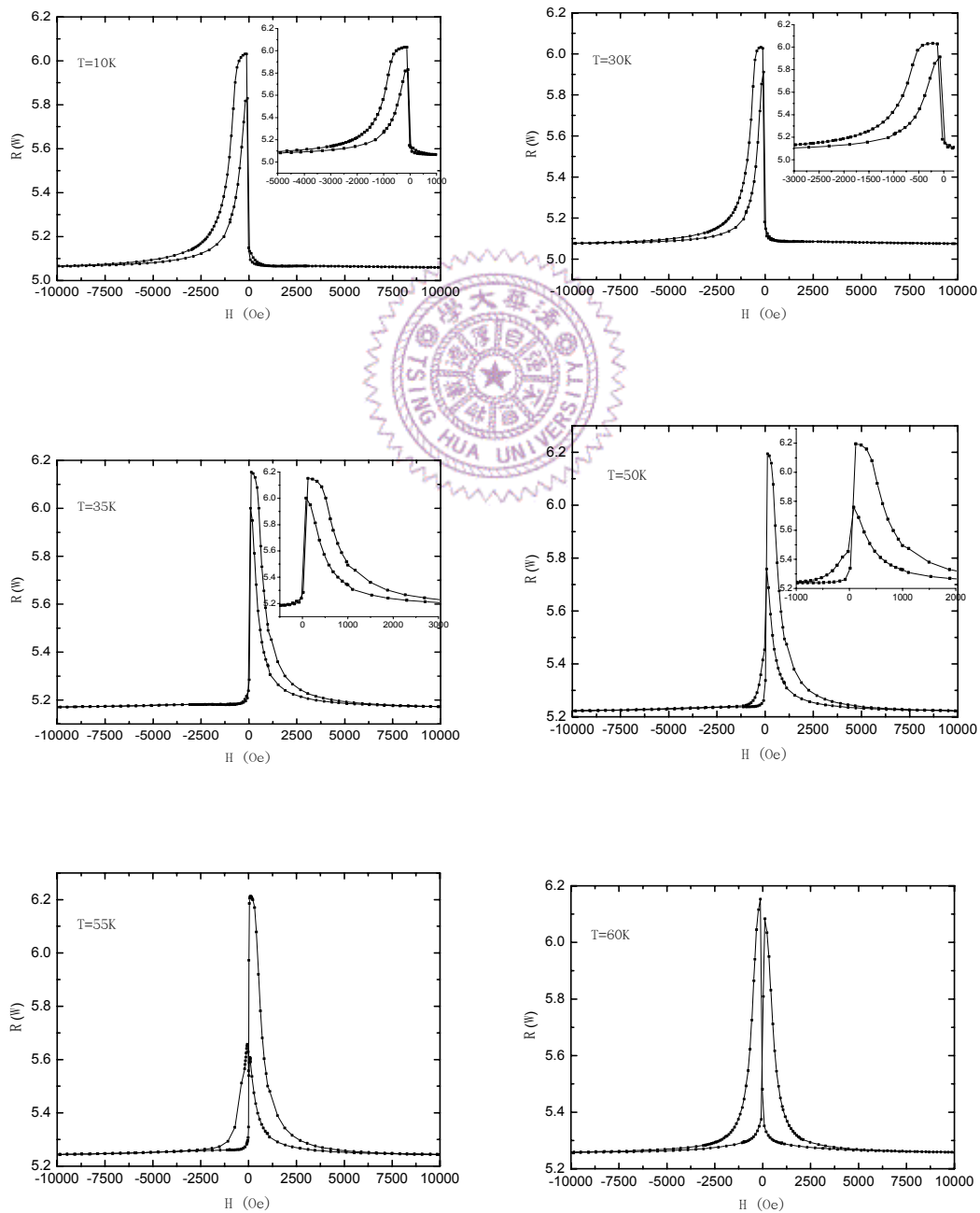


圖 4.33 改變量測溫度對自旋閥之(a) R_{\min} 、(b) ΔR 以及(c)MR 之影響。

在圖 4.33 中，我們可以看到，隨著量測溫度的下降， R_{min} 也跟著下降。而 ΔR 以及 MR 曲線在約 200~250K 有奇怪之趨勢，則應該是由於在做低溫測量時 resolution 過大而導致數據失真之緣故。

(二) 垂直場退火方向(90°)低溫量測



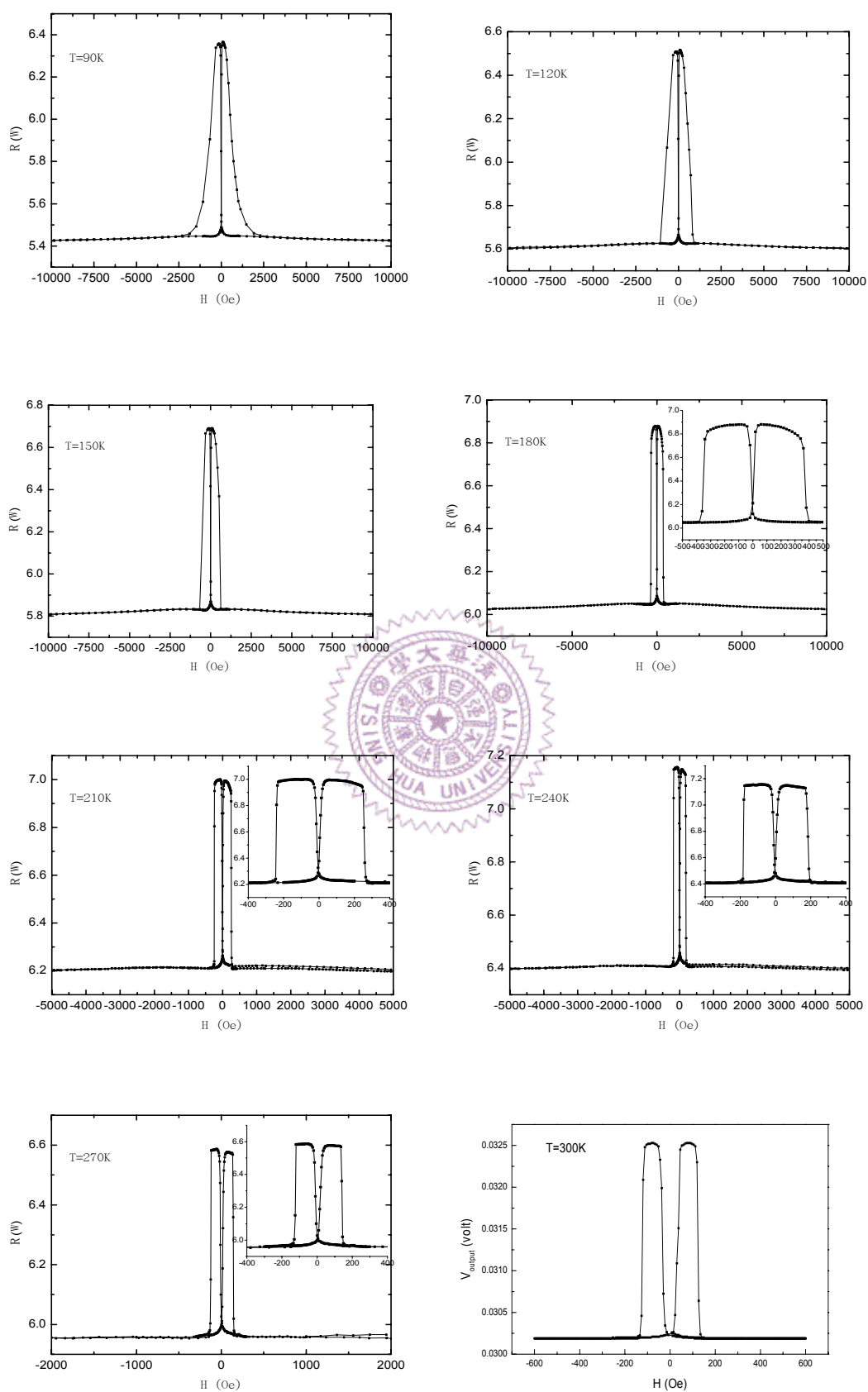


圖 4.34 沿 90° 方向變溫量測正交耦合自旋閥之磁阻表現。

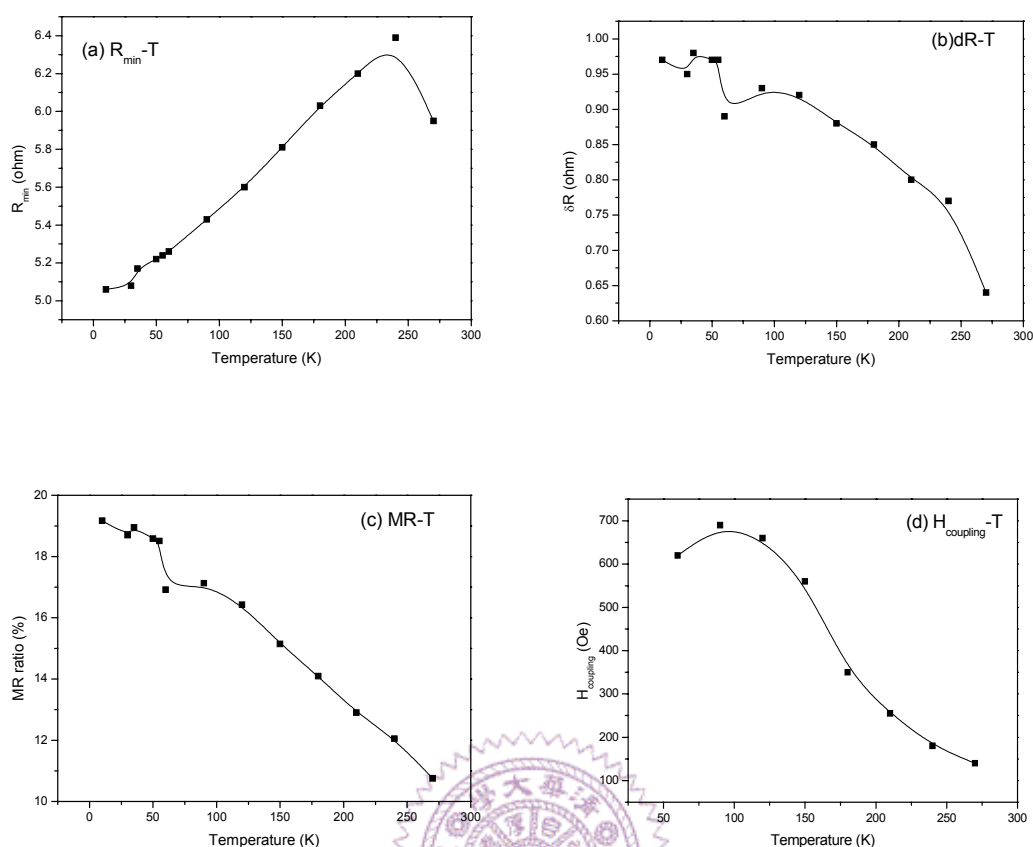


圖 4.35 改變 NiFeOx 自旋閥即時量測溫度對於 (a) R_{min} , (b) ΔR , (c) MR 以及 (d) 正交耦合強度之影響。

見圖 4.34 中，由 10K 逐步升高溫度做 R-H loop 量測，本在室溫下磁矩呈正交耦合排列之自旋閥轉而變回為一般正常平行、反平行排列之自旋閥，但隨著溫度持續地升高，在 50~60K 之間，此結構由平行態耦合漸漸轉變成為正交耦合結構；於是我們可以知道，在低於 50K 的溫度下，NiFeOx 層之磁矩排列也傾向於翻轉成與外加場平行方向；我們在先前曾經提出討論，NiFeOx 內之磁矩會在平行與反平行參考層磁矩之方向來回擾動，但一旦我們將溫度降低，位於 NiFeOx

中之磁矩喪失擾動的能力而被固定與反鐵磁層同向，於是在低溫下（約 55K），NiFeO_x 自旋閥又恢復為一般耦合表現。

在 60K 時正交耦合場的強度居然可以達到 620 Oe 之多，然後隨著溫度升高，耦合強度一路下降，最後回到室溫下的 110 Oe。

我們比較低於 30K 下與 35~50K 之量測結果，均同樣是由負場方向開始加場量測，但得到的 R-H loop 卻有類似 180 度之翻轉情形，是因為 PPMS 之低溫磁矩量測，是在有外加大場的狀態下對試片進行降溫，於是如同上述之 NOL 層中磁矩被固定之表現，一旦改變降溫時施加場的方向，就會形成 R-H 曲線成 180 度翻轉之情形。

觀察較高溫度下之量測結果，從 210K 開始（由正場方向開始量測），其 R-H loop 在最後回到正場時 R 值有略微提升的現象，這是因為在做 R-H 測量時必須通入電流(10mA)，致使試片在經過一段時間導電後後溫度略微升高，自然 R 值就會有飄高的情形；這樣的現象在越高溫度時可越明顯的觀察到。

4.4 FeO_x-NOL 之正交耦合自旋閥

在上述各節的討論之中，我們已經可以斷言，正交耦合自旋閥之表現來自於 NiFeO_x 所形成之特殊構造，使得氧化層中之 spin 傾向於排列在交換異向性方向，但會來回作 0 度與 180 度之翻轉，令 top-pinned CoFe 在未施加外場時即停留在與反鐵磁層磁矩正交方向。而當嘗試以 Fe 作為氧化層成分，卻發現，在某些特定條件之下，我們一樣可以觀察到自旋閥中磁性層磁矩也有轉角度的表現，於是針對以 NiFe 作為 underlayer、IrMn 為反鐵磁層之自旋閥結構，設計實驗如下：



4.4.1 自然氧化法 v.s 電漿氧化法

4.4.1.1 自然氧化法

當利用自然氧化法製備自旋閥中 FeO_x 層，與 NiFeO_x 相同的，無論如何調變自然氧化的時間，我們依然無法得到具有正交耦合表現之自旋閥。因為自然氧化法所得到之 FeO_x 膜層同樣地鬆散，致使上下磁性層能夠輕易的透過氧化層傳遞鐵磁耦合之力量，於是 top-pinned CoFe 永遠被固定在與反鐵磁層平行或是反平行的方向，是為一般的巨磁阻自旋閥。

4.4.1.2 電漿氧化法

為了有效阻絕在 NOL 上下之鐵磁耦合力量的傳遞，我們利用電漿氧化的方法來得到緻密之氧化層，結構如下：

Si//Ta30/Cu12/IrMn80/CoFe10/Fe10+plasma10w10s/CoFe25/Cu23/C
oFe40/Ta30，量測其 MR-H 表現。

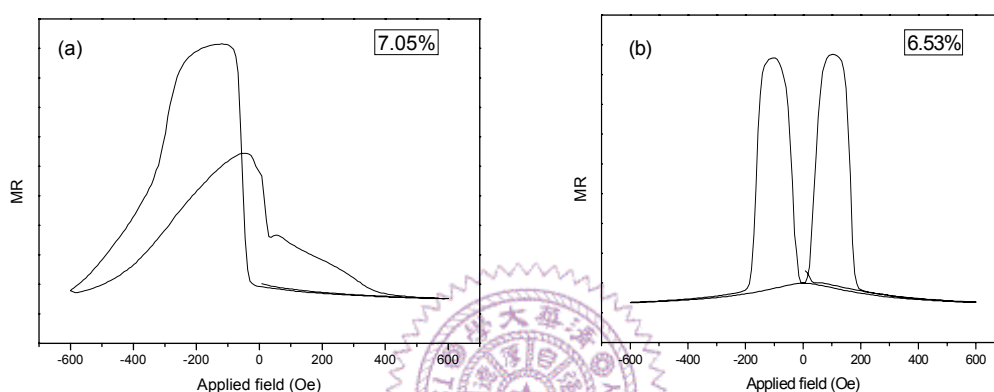


圖 4.36 電漿氧化法形成之 FeO_x 自旋閥磁阻表現。(a)0°，(b)90°。

由圖 4.36 中我們可以看到，在(b)垂直反鐵磁層方向，與 NiFeO_x 自旋閥相同地有磁性層易軸出現，並且出現高磁阻值；但再比較平行場退火方向（圖 4.36(a)），很明顯地磁阻表現不同於 NiFeO_x，而在 0° 方向仍有交換異向性之特徵；這樣的特性反倒和 NiFeO_x 自旋閥中 IrMn 厚度僅 30Å 的試片類似（見圖 4.18(f)）。

我們判斷在 NiFeO_x 自旋閥中之正交耦合之表現來自於 NiFeO_x 所形成之特殊構造，但為何在 FeO_x 中，我們亦能觀察到磁矩轉角度之行為？讓我們繼續以下列實驗討論之。

4.4.2 改變量測角度

在 NiFeOx 所造成之正交耦合自旋閥中，我們藉由變角度之磁阻量測，可以很明確地知道其磁阻值變化與一般自旋閥成 90 度相位差之關係；而在 FeOx-NOL 自旋閥系統中，並非因為 NiFeOx 所形成之 spinglass-like 構造而促成磁矩正交耦合的表現，並且在平行反鐵磁層方向更有殘存的交換場出現，磁阻值也並未下降太多。

針對 FeOx-NOL 之夾角度耦合自旋閥結構，對其做變角度磁阻量測；結果如圖 4.37。

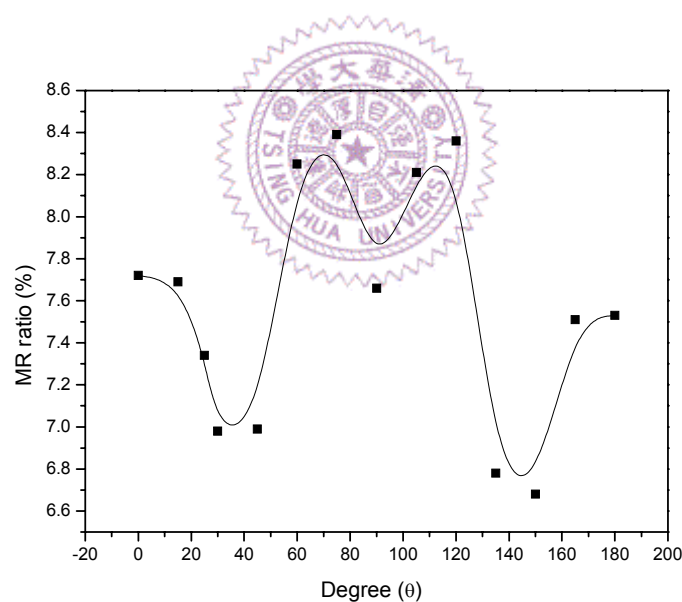


圖 4.37 電漿氧化法之 FeOx 自旋閥磁阻值對角度變化

當變化量測角度由 0° 至 180°，我們觀察其磁阻值對應角度變化之表現與 NiFeOx 截然不同；這或許是因為由 FeOx 形成 NOL 之自旋閥結構中，磁矩呈現夾角度排列主要來自於磁矩排列之粗糙度，是故會

有很差的交換場出現在平行反鐵磁層的方向，進而在該方向亦貢獻磁阻表現，使 FeO_x-NOL 自旋閥對角度變化相對複雜。

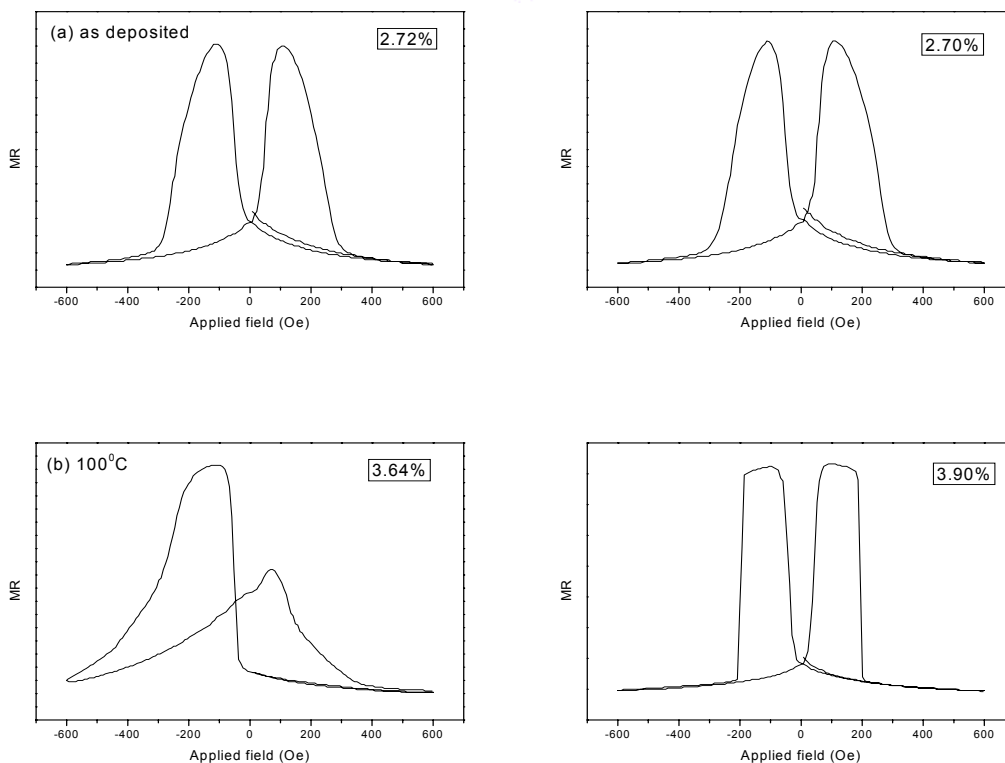
4.4.3 改變退火溫度

在前面章節的討論中，我們曾經提到，在觀察巨磁阻自旋閥的正交耦合表現上，單以 Fe 或者是 Ni₈₀Fe₂₀ 作為氧化層的成分，所得到之磁性質表現有相當程度的不同，尤以在平行退火場方向的表現來得明顯。

同樣地，我們也取以 FeO_x 作為氧化層之正交耦合自旋閥來做改變退火溫度之實驗，並與 NiFeO_x 的結果相比較：

0°

90°



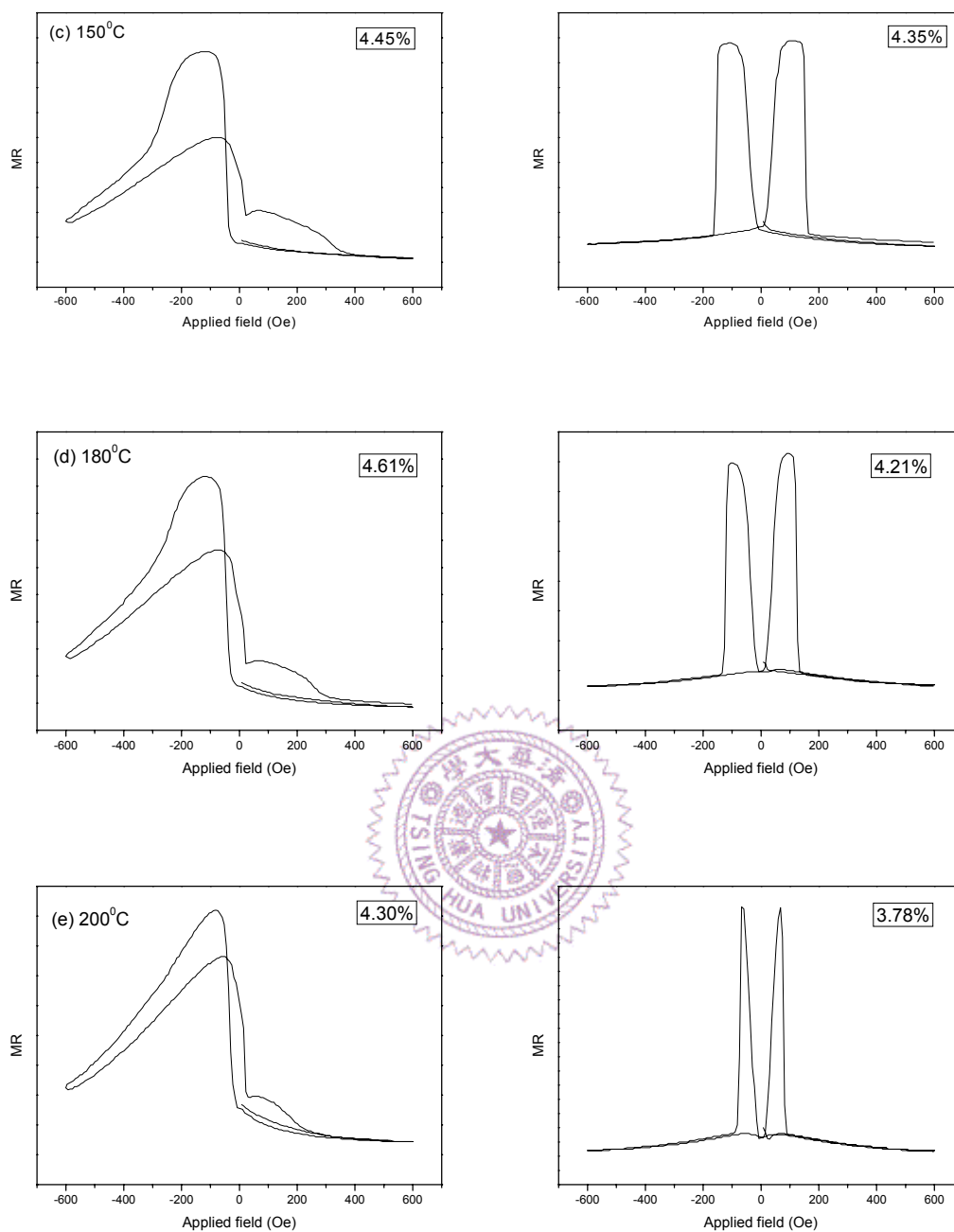


圖 4.38 改變 FeO_x-NOL 正交耦合自旋閥之退火溫度

可以得到該自旋閥對應退火溫度之磁性質如圖 4.39

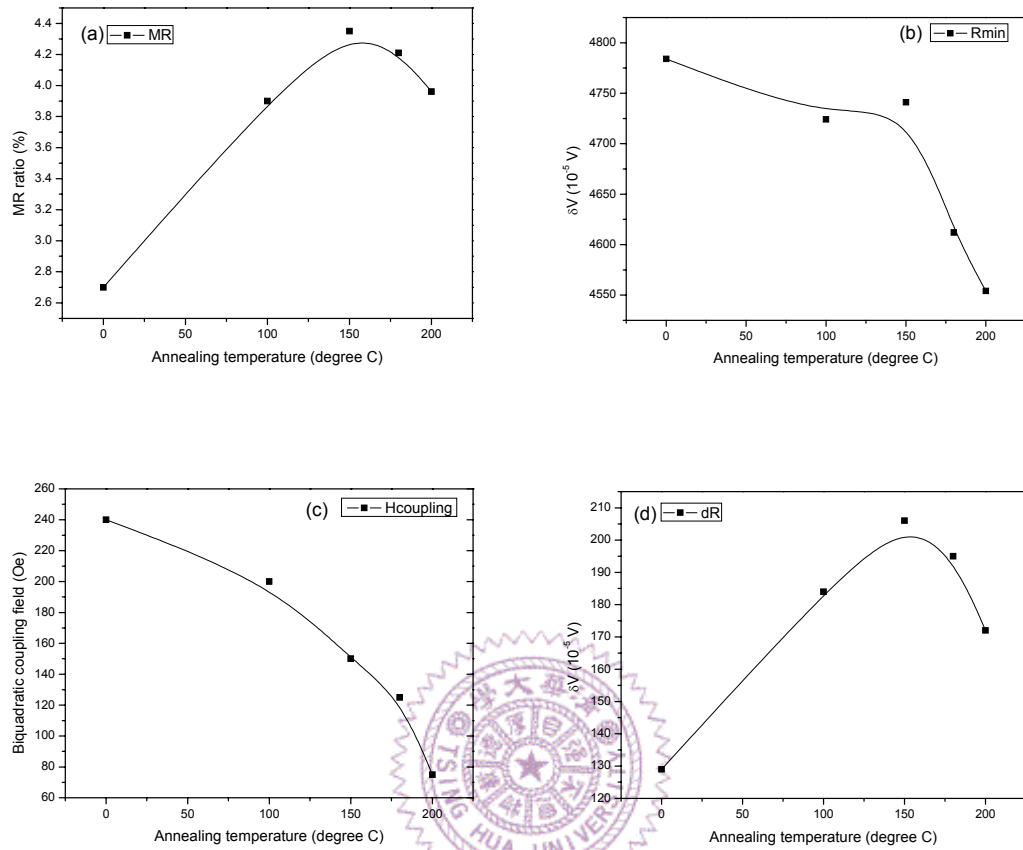


圖 4.39 FeOx-NOL 自旋閥中，退火溫度與(a)MR、(b) R_{min} 、(c)正交耦合強度與 (d) ΔR 之關係。

MR 表現一樣由 R_{min} 來控制，而 MR 最佳值發生於 180 °C 時，較 NiFeOx-NOL 的 220 °C 來得略低。

4.5 Composited-NOL 之正交耦合自旋閥

在前述章節中，我們針對 NiFeO_x 以及 FeO_x 之 NOL 自旋閥作其性質分析探討，發現 FeO_x 之 NOL 自旋閥的九十度耦合與 NiFeO_x 之 NOL 機，是否也會有機會制不盡相同，於是我們猜測，若另取不同成分之鐵磁材料製備自旋閥中的氧化層，是否也有機會促使正交耦合表現的發生。

下面實驗中，我們針對數種不同比例之複合式 NOL 成分(CoFe 、 CoFe/Fe 、 NiFe/Fe)進行探討。

4.5.1 自然氧化法 v.s 電漿氧化法



4.5.1.1 自然氧化法

如同 NiFeO_x 以及 FeO_x 之製備，無論我們如何變化自然氧化法的條件，對於各成分比例之 Composited-NOL 都無法促成正交耦合的發生。

4.5.1.2 電漿氧化法

I. CoFe -NOL

當選用 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 作為氧化層時，無論如何改變 NOL 厚度，或是控

制氧化的時間長短，仍然無法觀察到如 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ -NOL 自旋閥中所看到的 90 度耦合情形，所得到的磁阻表現就如同自然氧化法所製備的 NOL 自旋閥，如下圖所示。而 Fukuzawa 等人觀察到夾角度耦合之自旋閥氧化層成分為 $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ ，與我們所用的相比較，或許正因為氧化層中的 Fe 含量多寡，能夠影響氧化層上下的鐵磁層磁矩耦合行為，需進一步規劃實驗來證明。

Si//Ta30Å/Cu12Å/IrMn80Å/CoFe10Å/CoFe10Å+plasma/CoFe25Å
/Cu23Å/CoFe40Å/Ta30Å：

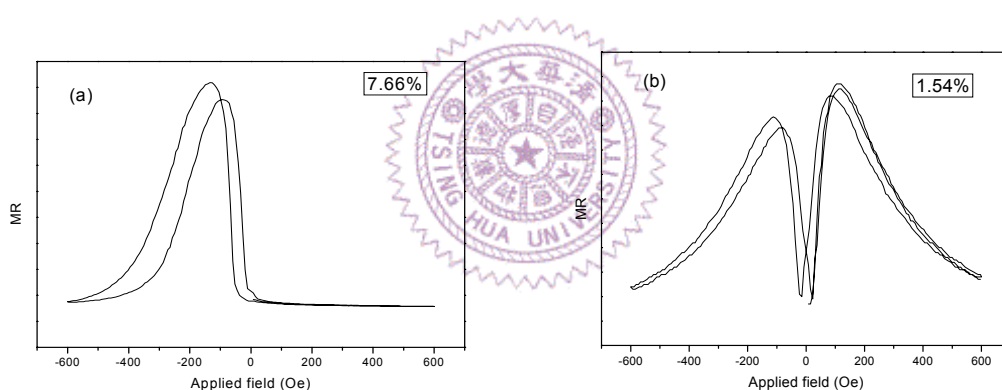


圖 4.40 電漿氧化法形成之 CoFeO_x 自旋閥磁阻表現。(a) 0° ，(b) 90°

II. CoFe/Fe NOL

當我們純粹以 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 作為氧化層時，發現自旋閥中磁性膜層之 90 度耦合現象已經可以明顯地被觀察到，但與純鐵之氧化層自旋閥相比較之下，兩者的性質表現似乎又不能稱是全然相同。

以 NiFeO_x -NOL 自旋閥做例子，在平行與垂直退火場方向所得到

之磁阻值有很明顯的差異，並且在平行退火方向量測時，會得到與一般自旋閥的垂直異向性方向量測幾乎相同的結果；而改以 Fe 做氧化層，同樣的有機會使自旋閥磁性膜層成 90 度排列，於是我們在垂直退火場量測中一樣觀察到對零場對稱之高阻值平台，但此時造成高低電阻變化之磁性膜層耦合力量明顯大於 NiFeO_x-NOL 自旋閥，另外在平行退火場方向亦仍然具有與垂直方向接近之磁阻值，並有類似交換異向性的性質顯現。

既然以 NiFe 或是 Fe 作為氧化層之耦合表現有如此顯著的差異，我們推論，或許除了 Fe 的氧化物提供了讓自旋閥中鐵磁層成 90 度耦合的條件之外，是否 Ni 的氧化物也扮演不可忽略的角色？亦或是在鐵磁性氧化物中，鐵佔有的比例才是決定 90 度耦合與否的條件？於是在以下的實驗中，我們取 CoFe/Fe 作為氧化層，仔細比對以不同比例的 CoFe/Fe 形成的自旋閥性質，結果如下：

Ta/Cu12Å/IrMn80Å/CoFe10Å/NOL/CoFe25Å/Cu23Å/CoFe40Å/Ta

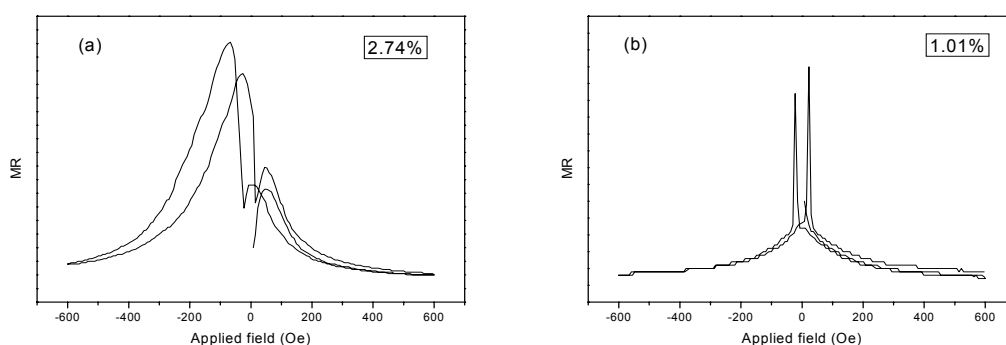


圖 4.41 改變 NOL 成分為 CoFe7/Fe3，(a)沿 0°，(b)沿 90° 量測。

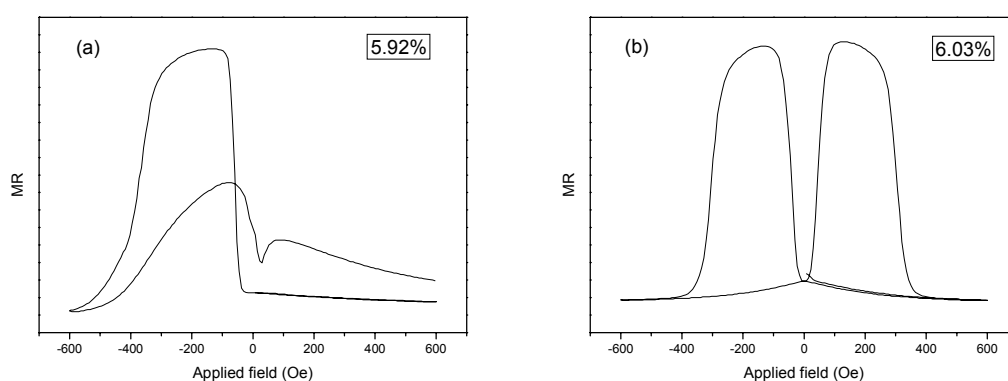


圖 4.42 改變 NOL 成分為 CoFe₅/Fe₅，(a)沿 0°，(b)沿 90° 量測。

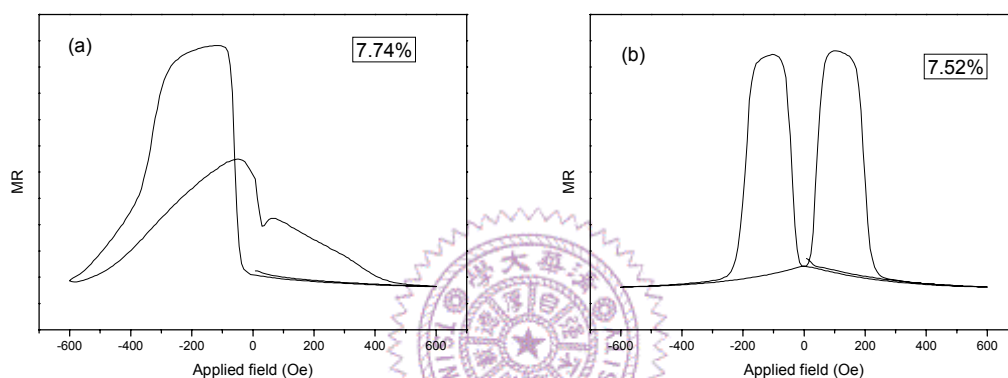


圖 4.43 改變 NOL 成分為 CoFe₃/Fe₇，(a)沿 0°，(b)沿 90° 量測。

比較上列各組實驗，發現當 NOL 的成分為 CoFe₅ Å/Fe₅ Å 時（圖 4.42）之磁矩耦合強度表現最佳。當 Fe 厚度降低，則 R_{min} 提升， ΔR 變小，於是磁阻值就會減低；尤其是在 Fe 的厚度小於 5 Å 之後，因為我們在實驗中固定氧化層總厚度，相對地 CoFe 就一直增厚，所以磁性膜層 90 度耦合的現象便逐漸消失。

藉由上述結果，我們以不同比例之 CoFe 氧化物來製備 90 度耦合自旋閥，所產生之磁阻表現仍然類似於以 Fe 作為氧化物，並且性質與氧化層中內含 Fe 的多寡相關，是故可以推論當分別取 Fe 或是

$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 作為自旋閥中氧化層，他們所形成之 90 度耦合的機制可能並非完全相同。

III. NiFeO_x

經由 CoFe 氧化層之實驗，我們發現 Fe 的氧化物對於 90 度耦合具有相當的影響，於是接著觀察若用純 Fe 以及 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 以不同組成比例來作為氧化層之成分，則所得到的 NOL 自旋閥性會如何。固定氧化層的厚度為 10 Å，結果如下：

$\text{Ta}/\text{Py}40\text{\AA}/\text{IrMn}80\text{\AA}/\text{Py}10\text{\AA}/\text{NOL}+\text{plasma}/\text{Py}35\text{\AA}/\text{Cu}24\text{\AA} / \text{Py}50\text{\AA}/\text{Ta}$

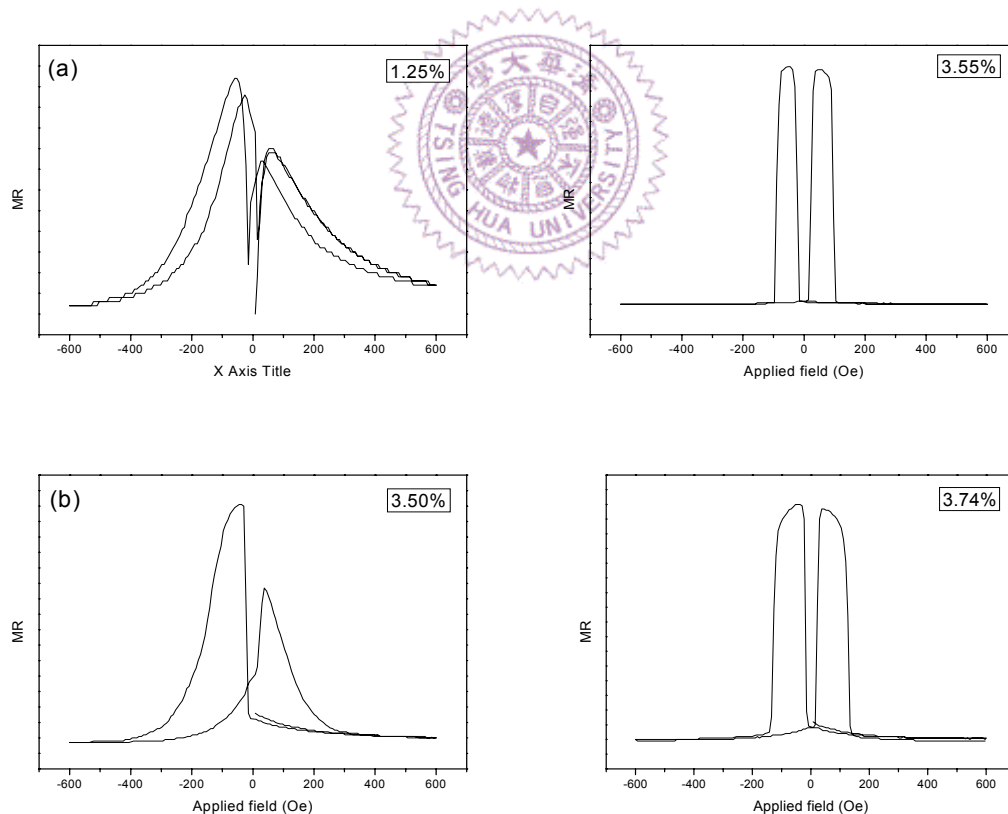


圖 4.44 改變

$\text{Si}/\text{Ta}30\text{\AA}/\text{Py}40\text{\AA}/\text{IrMn}80\text{\AA}/\text{Py}10\text{\AA}/\text{NOL}+\text{plasma}/\text{Py}35\text{\AA}/\text{Cu}24\text{\AA}/\text{Py}50\text{\AA}/\text{Ta}$
 30 Å 中 NOL 之成分為 (a) $\text{NiFe}10\text{\AA}$ 、(b) $\text{NiFe}5\text{\AA}/\text{Fe}5\text{\AA}$ 、(c)
 (d) $\text{NiFe}2.5\text{\AA}/\text{Fe}7.5\text{\AA}$ 、(e) $\text{Fe}10\text{\AA}$ 。

	Rmin (Ω)	ΔR (Ω)	MR (%)	H _{coupling} (Oe)
NiFe10Å	4.39	0.156	3.55	90
NiFe7.5Å/Fe2.5Å	5.23	0.007	0.13	X
NiFe5Å/Fe5Å	4.28	0.16	3.74	125
NiFe2.5Å/Fe7.5Å	4.772	0.016	0.34	X
Fe10Å				X

表 4.2

由於濺度系統的限制，為了調變氧化層成分，必須捨棄 CoFe 以 NiFe 同時作為 underlayer、NOL、pinned layer 以及 spacer，正因為如此，我們雖然可以看到有將近 1000e 的耦合場出現在垂直退火場方向之磁阻量測，但因為 NiFe/Cu/NiFe 之間的介面無法提供與 CoFe/Cu/CoFe 相當之差異性自旋散射效應，使得所得到的磁阻值相對的低許多；於是我們著眼於出現耦合場之氧化層成分以及性質比較。

當氧化層中的 Fe 越厚，首先可以觀察到當成分為 NiFe10/Fe0 時（圖 4.44(a)），90 度耦合現象明顯，coupling 場強度可達 90 Oe；但開始逐漸以 Fe 取代 NOL 的上層 NiFe，隨著 Fe 變厚，會由類似 PSV 情形轉變成類似於 90 度耦合的現象。

另外，由圖 4.44(c)發現在 Py5/Fe5 時 coupling 場可達 135 Oe，但其 0 度時的表現不同於完全以 NiFeO_x 作為氧化層時的翻轉。