

## 第四章 實驗結果與討論

本研究使用雙離子槍濺鍍系統，以反應式濺鍍的方式製備鈷摻雜的氧化鋅稀磁性半導體薄膜。利用室溫製程的優勢，有效地避免系統中金屬鈷以及析出相的生成，並且在矽基板上成功地製備出具有磊晶結構的氧化鋅稀磁性半導體薄膜。所製備的樣品可以在室溫下觀察到鐵磁訊號，成功製備出居裡溫度高於室溫的氧化鋅稀磁性半導體，並且探討其與氧化鎳反鐵磁層間的低溫交互耦合現象。

### 4-1 氧化鋅稀磁性半導體薄膜製備

當電子通過稀磁性半導體時，會產生自旋極化的現象，使通過的電子具有特定的自旋量子態，這是稀磁性半導體做為自旋電子元件的優勢。考慮到實際的應用價值，稀磁性半導體除了居裡溫度要提升至室溫以上之外，在其薄膜結構方面也必須提升至磊晶的程度。當薄膜為磊晶結構時，其內部存在於晶粒間的晶界數目就會相對減少，而晶界的存在會使得通過的電子產生散射，因此導致電子失去維持本身自旋量子態的能力，並使得整體的自旋極化率下降。所以藉由提升磊晶結構的方式來減少系統中的電子散射中心，以提高整體的電子自旋極化率。有鑑於此，本節致力於提升氧化鋅稀磁性半導體薄膜的結構性質達到磊晶程度。

#### 4-1-1 磊晶結構氧化鋅稀磁性半導體薄膜

利用本實驗室的雙離子槍濺鍍系統，以反應式濺鍍的方式製備氧化鋅稀磁性半導體薄膜。首先使用 Si (100)的單晶基板，將其切割成尺寸為 12 mm × 12mm 的大小，隨後利用氫氟酸將切好的矽基板進行酸洗，去除矽基板上的原生氧化層(native oxide)，並且在酸洗過後將矽基板用去離子水洗淨。在氧化鋅稀磁性半導體薄膜的製備過程中，利用在 Zn 靶上貼上尺寸為 10 mm × 10 mm × 1 mm 的 Co 片，且在鍍膜過程中通入氧氣，以此方法製備摻雜鈷的氧化鋅薄膜，此外利用改變所貼 Co 片數目的方式來調變氧化鋅中鈷的摻雜濃度。

將鍍膜所需用的到矽基板準備好之後，利用雙離子槍濺鍍系統，以反應式濺鍍的方式在矽基板上鍍製膜層結構為 Si//Cu 40 nm/ZnCoO 40 nm 的樣品。製成過程中固定氫氣流量為 6 sccm，氧氣流量為 2.6 sccm，以室溫製程並調整離子槍的電源功率來控制鍍膜速率，樣品的膜厚經由 AFM 量測校正後，以石英震盪片對膜厚做即時監控。將所製備的樣品利用 XRD 分析其結構特性，結果如圖 4-1 所示，發現 ZnCoO 屬於纖鋅礦(wurtzite)結構。在 XRD 圖中除了 Si 的峰值之外，其他可以觀察到的就只有 ZnCoO (0002)以及 Cu (200)的峰值，並且其訊號強度相較於 Si (200)的訊號還要強上許多，說明了利用 Cu 做為緩衝層，而在其上所鍍製的 ZnCoO 有很好的優選方向。

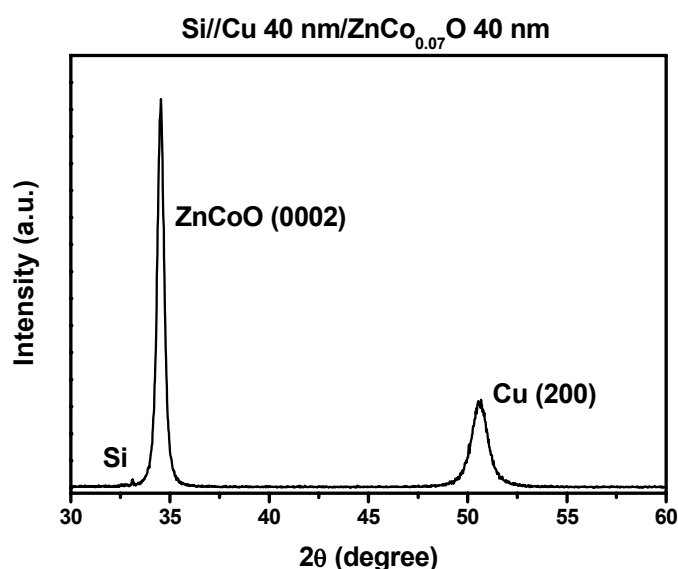


圖 4-1 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品的 XRD 分析

在 Si//Cu 40 nm/ZnCoO 40 nm 的樣品中，利用改變 Co 貼片數目的方式做為 ZnCoO 系統中 Co 濃度的調變參數，所利用的 Co 貼片數目分別為一片、兩片以及三片。將三種利用不同 Co 貼片數目所製備出來的樣品，利用 ICP-MS 做系統中 Co 濃度的分析，結果顯示在 Co 貼片分別為一片、兩片以及三片的條件下，其 Co 濃度分別為 4 %、7 %以及 10 %。圖 4-2 顯示了三種不同 Co 濃度的樣品其 XRD 的分析結果，從圖中可以發現除了 Si (200)、ZnCoO (0002)以及 Cu (200)這三根峰值以外，在 XRD 的分析靈敏度下，並沒有觀察到 Co 或其它相的峰值，這可以作為在 ZnCoO 中沒有鈷原子團或是析出相存在的初步驗證。此外從 ZnCoO 峰值的位置隨著 Co 濃度的增加而往低角度移動的趨勢也可以說明 Co 的確有成功溶入 ZnO 基材當中。另一方

面，從 rocking curve 的分析結果，如圖 4-3 所示，可以知道 ZnCoO 的 c 軸(0002) 為不錯的優選方向，其峰值的半高寬大約為  $\omega \sim 3.7^\circ$ 。

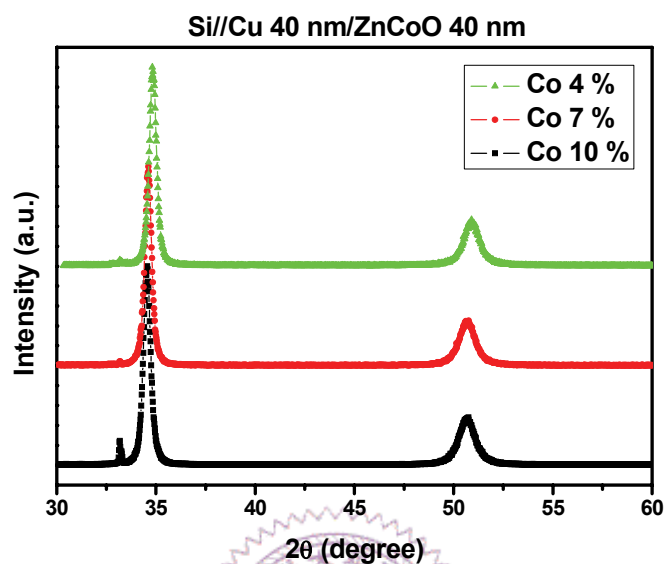


圖 4-2 三種鈷濃度的 Si//Cu 40 nm/ZnCoO 40 nm 樣品的 XRD 分析

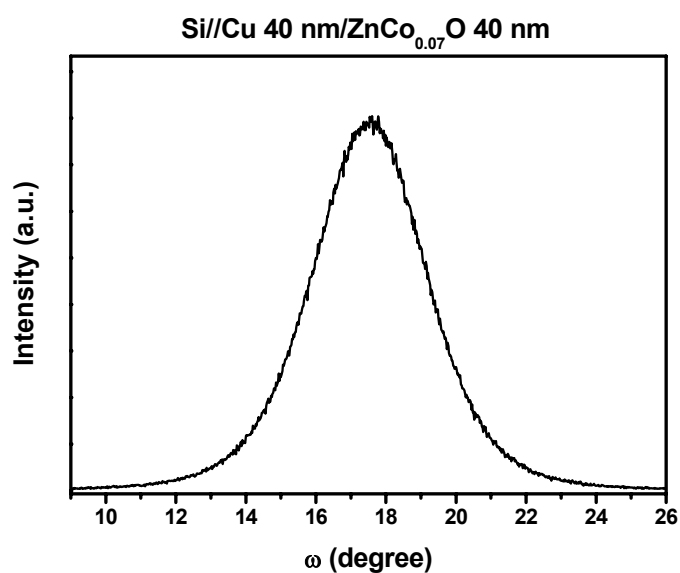


圖 4-3 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品的 rocking curve

利用  $\Phi$ -scan 分析膜層之間的堆疊關係，其結果如圖 4-4 所示。

從圖 4-4(b)中可以發現 Cu {111}有四根峰值，顯示 Cu 為四軸對稱結構，並且與 Si{111}的四根峰值相差 45 度，表示 Cu (200)與 Si (001)在垂直膜面(out-of-plane)方向為互相平行，並且在平行膜面(in-plane)方向呈旋轉 45 度的堆疊關係，顯示了 Cu (200)為磊晶結構，如 4-5 為其磊晶示意圖。令人意外的在 ZnCoO 的部分發現有 12 根 $\{10\bar{1}1\}$ 峰值，如圖 4-4(a)所示，顯示此為少見的十二軸對稱結構，並且也證明 ZnCoO (0002)的磊晶情況。

當 ZnCoO (0002)為垂直膜面時，理論上只能產生六軸對稱的結果，這並不能解釋利用  $\Phi$ -scan 分析所觀察到的十二軸對稱結構。根據 XRD 以及  $\Phi$ -scan 分析的結果，Cu (200)以及 ZnCoO (0002)之間的磊晶結構堆疊關係，可以圖 4-6 的示意圖來說明。ZnCoO (0002)有兩種晶粒，分別為 A grain 及 B grain，兩者發生的能量與機率相同，並且以彼此相互夾 90 度的方式堆疊在 Cu (200)上。在 A grain 及 B grain 兩者各貢獻出六軸對稱的情況下，可以合理解釋在圖 4-4(a)所觀察到的十二軸 ZnCoO 磊晶結構。這是一個少見的雙磊晶結構(bi-crystal structure)，也就是在平行膜面方向上有兩種排列的可能性，並且兩者發生的機率相等，值得一提的是在本實驗室的雙離子槍濺鍍系統中此結構的再現性趨近於百分之百。

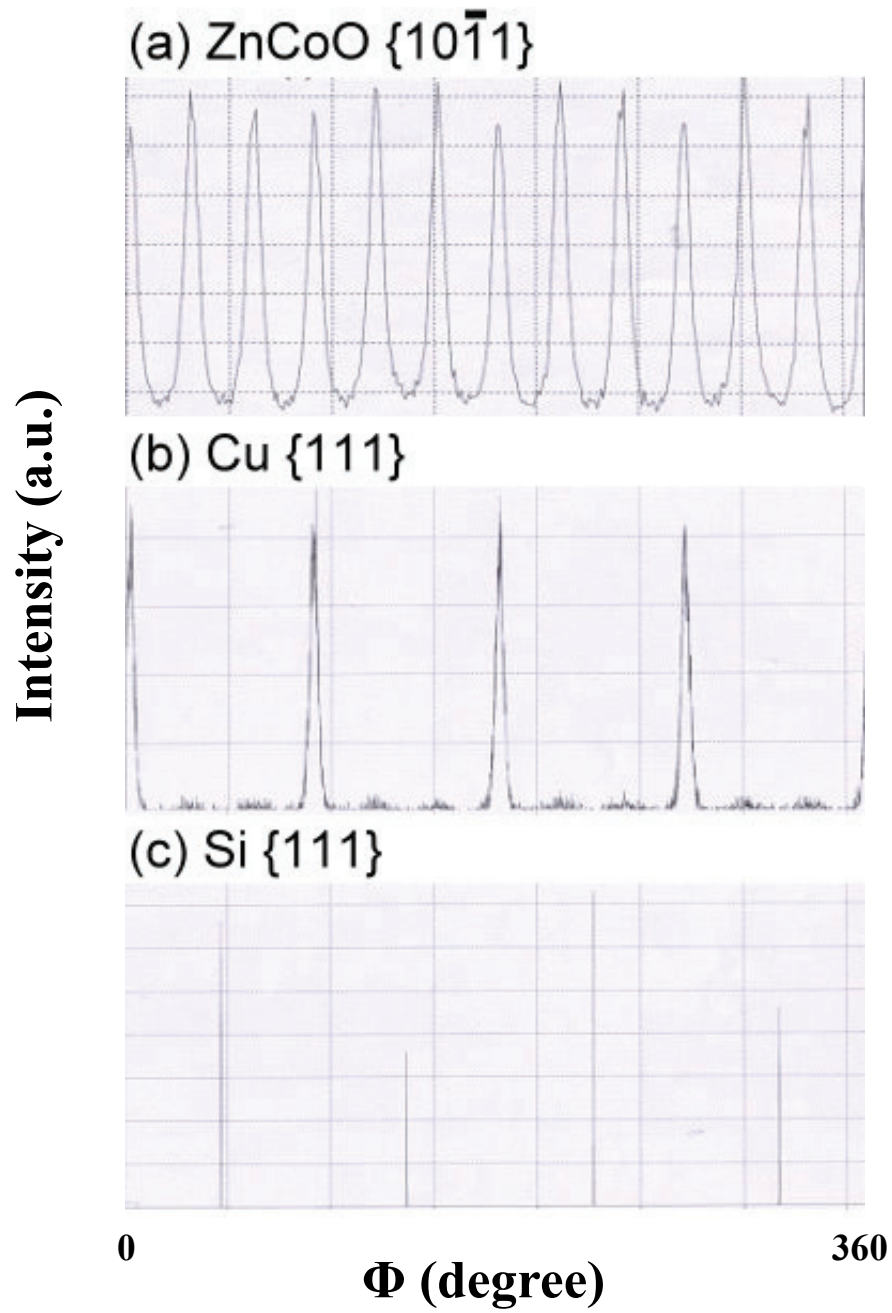


圖 4-4 利用  $\Phi$ -scan 分析  $\text{Si//Cu/ZnCo}_{0.07}\text{O}$  樣品的(a)  $\text{ZnCoO } \{10\bar{1}1\}$  ;

(b)  $\text{Cu } \{111\}$  以及(c)  $\text{Si } \{111\}$

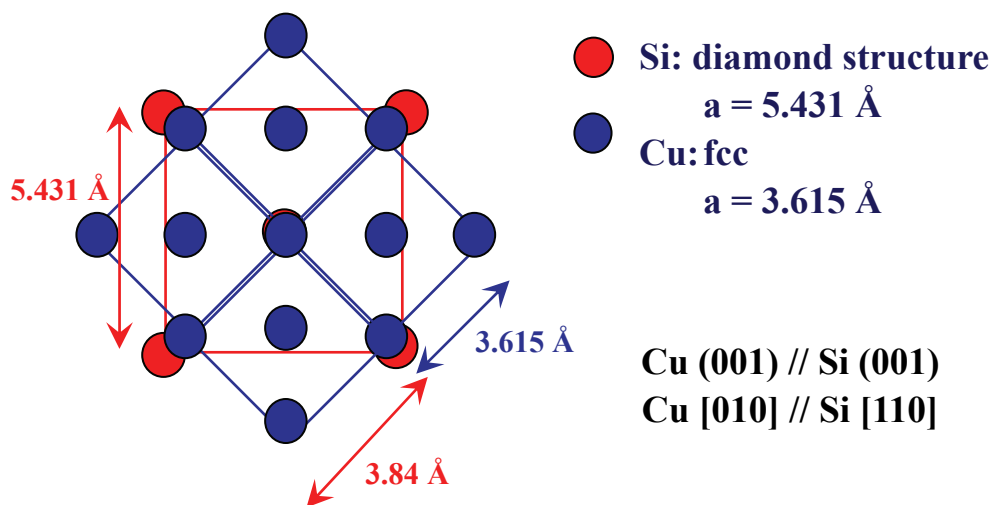


圖 4-5 Si//Cu 磊晶結構示意圖

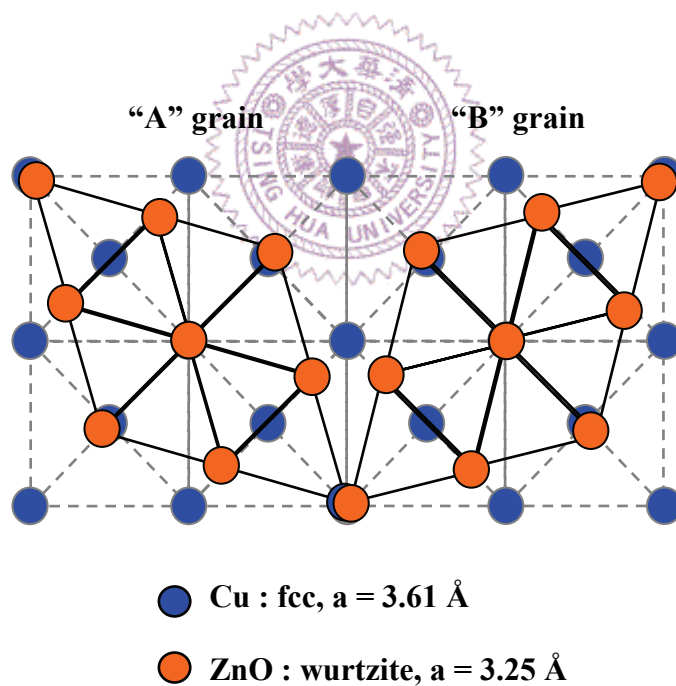


圖 4-6 ZnCoO (0002)的 A grain 及 B grain 在 Cu (200)上的磊晶示意

圖，A grain 及 B grain 彼此呈 90 度交錯排列

#### 4-1-2 鈷原子團的排除

由上一章節的討論中，利用 XRD 分析得知所摻雜進入 ZnO 基材當中的 Co 可以成功溶入其中，並且在 XRD 的分析靈敏度下並沒有觀察到 Co 或其它相的峰值，初步排除了系統中鈷原子團的析出。但是當系統中如果有更微小的鈷原子團或是析出相存在時，就必須使用更複雜的分析技術來排除這些可能性的存在。因此在這一節當中，將利用更嚴謹的分析方式來排除系統中鈷原子團的存在，並且利用分析所得到的結果來證明之後在磁性質分析上所觀察到的現象是本質性的稀磁性半導體表現。

利用位於同步輻射中心的 XPS 分析技術，分析三種不同 Co 成分的樣品，藉由 XPS 可以分析原子價數的優點，做為判斷樣品中鈷原子價數的依據，再加上同步輻射光源的高能量解析度，使得此分析結果具有更高的可信度。圖 4-7 為分析三種不同 Co 成分樣品的 Co 2p core-level 所得到的 XPS 結果，在 Co 4 % 以及 Co 7 % 的樣品中，只觀察到了 Co 2p<sub>1/2</sub> 及 Co 2p<sub>3/2</sub> 的訊號，以及位於兩個主峰旁的衛星峰，將此 XPS 結果與文獻中的分析做比較可以發現系統中的 Co 是以 +2 價的狀態存在[44]。反觀在 Co 10 % 的樣品中，除了 Co 2p<sub>1/2</sub> 及 Co 2p<sub>3/2</sub> 的訊號以外，在 Co 2p<sub>3/2</sub> 的峰值旁還發現了另外一個訊號，經過與文獻[44]的比較之後，發現這個訊號是由金屬鈷所貢獻。此結果說明了

當系統中 Co 成分達到 10 %時，雖然系統中仍有  $\text{Co}^{+2}$  的存在，但同時會有鈷原子團的形成，而在低摻雜濃度的條件下，XPS 的結果排除了系統中鈷原子團的存在。

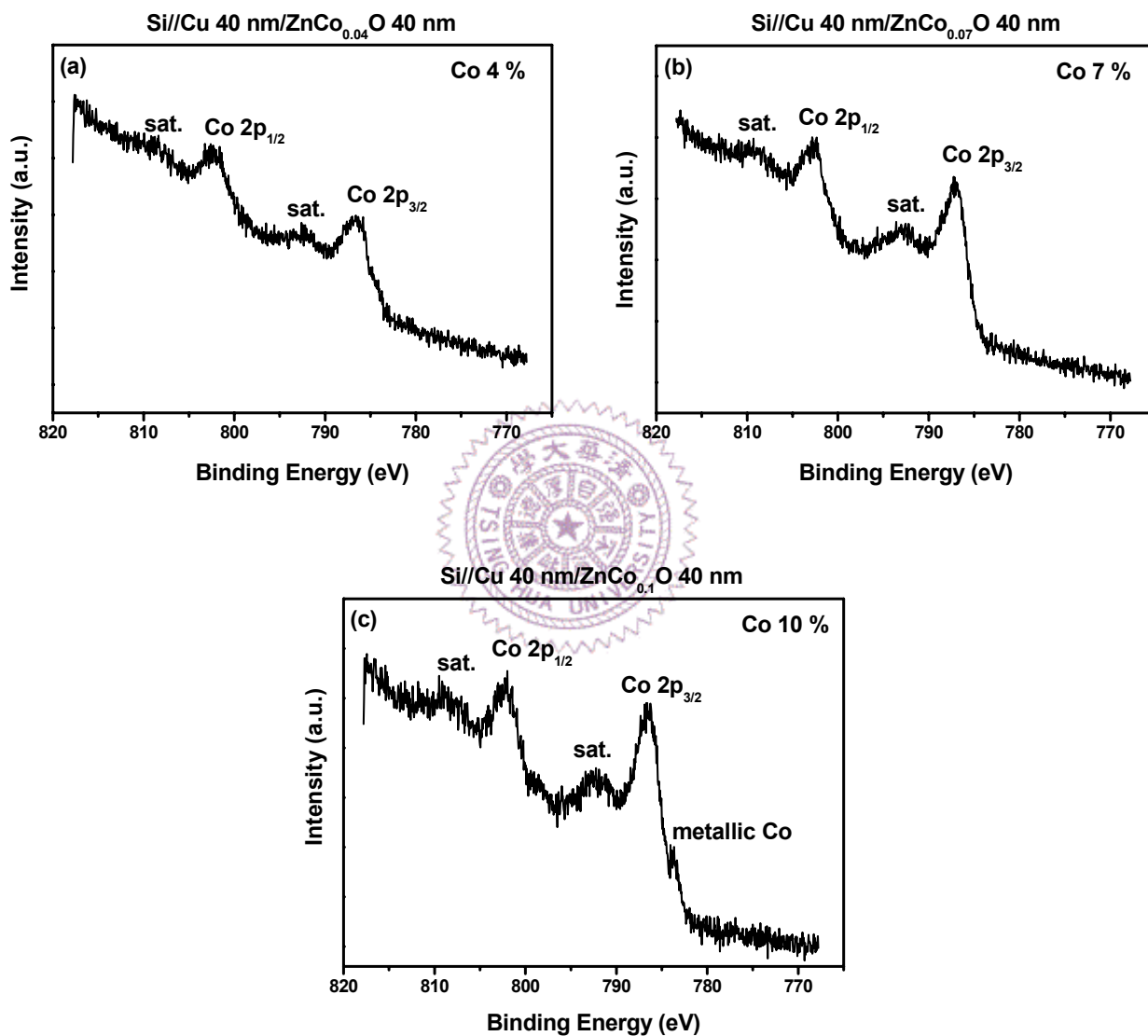


圖 4-7 不同鈷濃度(a) Co 4 %； (b) Co 7 %以及(c) Co 10 %  
的 Si/Cu 40 nm/ZnCoO 40 nm 樣品的 XPS 分析結果

經過 XPS 的分析之後，初步排除了在 Co 濃度為 4 % 以及 7 % 的樣品中鈷原子團的存在，接下來我們將針對 Co 濃度為 7 % 的樣品做進一步的微結構分析。利用高解析度穿透式電子顯微鏡(HR-TEM)來分析氧化鋅稀磁性半導體薄膜樣品的微結構。在樣品的橫截面(cross-section)影像圖中，並沒有觀察到鈷原子團的存在，如圖 4-8、圖 4-9 所示。由於 HR-TEM 的解析度可以達到原子等級，因此利用此分析技術做為樣品中鈷原子團的排除是最直接也是最有力的證據。

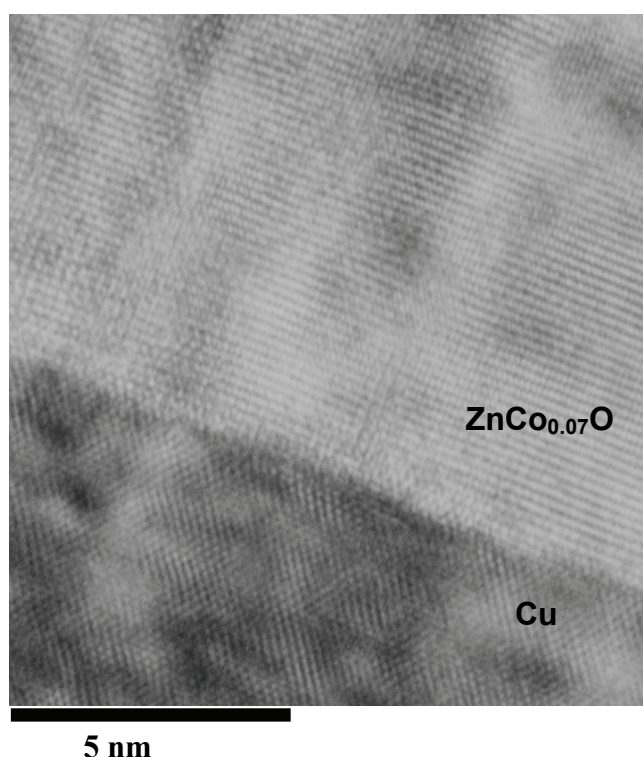


圖 4-8 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品中，Cu 與 ZnCo<sub>0.07</sub>O 介面的橫截面原子級影像圖

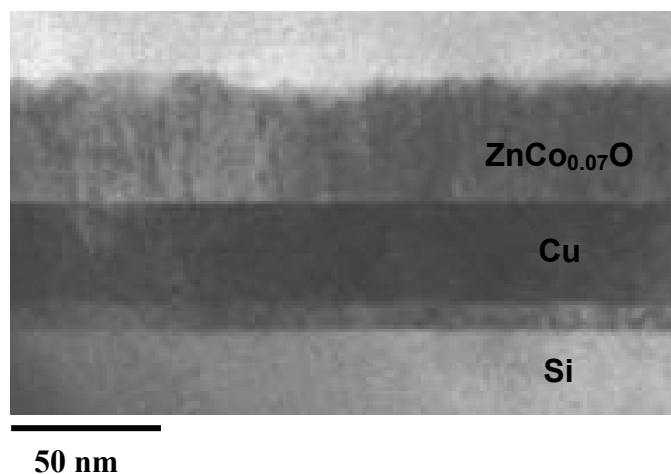


圖 4-9 Si//Cu 40 nm /ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品的橫截面 TEM 影像圖

從 XPS 以及 TEM 的分析結果，皆可以證明氧化鋅稀磁性半導體系統內的摻雜鈷原子是均勻分散於基材之中，並且在系統中沒有鈷原子團的形成。此一重要的分析結果說明了之後在磁性質分析上所得到的結果皆為樣品本質性的表現，而非系統內磁性原子團或其他相的貢獻。另一方面，在系統的微結構分析中排除了非均質相的存在，說明了系統中鐵磁/半導體界面，也就是系統中的電子散射中心，因為磊晶結構的提升而被有效地降低，這對於氧化鋅稀磁性半導體的自旋傳輸性質無疑是一大提升。

### 4-1-3 室溫鐵磁性質

經過 XPS 以及 TEM 的分析，確認了在 Co 濃度小於 10 % 的樣品中，不會有鈷原子團的產生，所以在接下來的磁性質分析中，將不會討論 Co 濃度為 10 % 的樣品。在 Co 濃度為 4 % 及 7 % 的樣品中，考量到當樣品摻雜濃度較高時，理論上其所能貢獻出來的磁訊號相對於低摻雜濃度樣品的磁訊號要來的大，並且較大的磁訊號在利用 SQUID 量測的訊號擷取上，也佔有一定的優勢。因此基於上述的原因，在接下來的磁性質分析中，主要將利用 SQUID 分析並且探討 Co 濃度為 7 % 的樣品。

圖 4-10 為利用 SQUID 在 5 K 之下，量測 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品的磁滯曲線圖，從圖中可以看出在 5 K 下有明顯的鐵磁訊號，其矯頑場接近 100 Oe，且飽和磁化量接近 25 emu/cc。這個結果搭配之前 XPS 及 TEM 的分析，初步說明了此 Co 摻雜的氧化鋅為一個本質性的稀磁性半導體系統。接下來同樣利用 SQUID 量測樣品，並且將量測溫度升高到 300 K，量測樣品在室溫的磁滯曲線圖，其結果如圖 4-11 所示。從圖中可以看出即使量測溫度提高到室溫，還是可以量測到不錯的磁滯曲線，說明了本樣品為居裡溫度高於室溫的稀磁性半導體，且其矯頑場接近 65 Oe，飽和磁化量接近 19 emu/cc，和 5 K 的實驗結果比較，300 K 的矯頑場和飽和磁化量降低都是合理的現象。

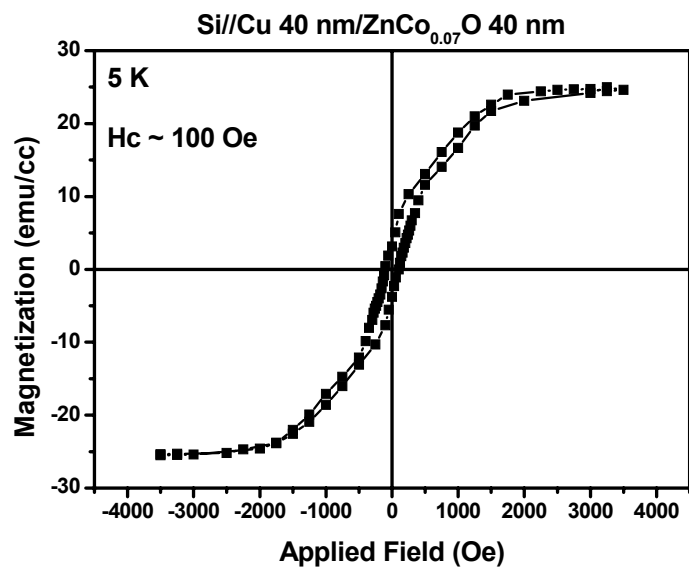


圖 4-10 Si//Cu 40 nm /ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品的 5 K 磁滯曲線圖

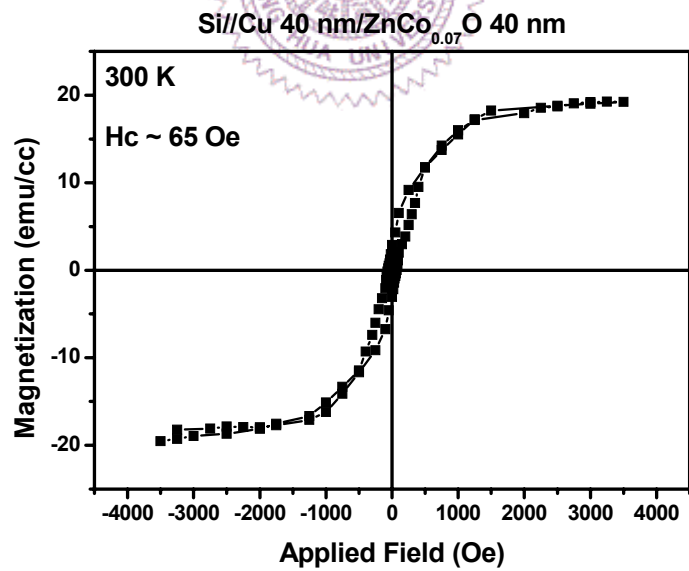


圖 4-11 Si//Cu 40 nm /ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品的 300 K 磁滯曲線圖

由前面 5 K 以及 300 K 的磁滯曲線分析結果，我們可以初步地估算出在樣品中每一個 Co 所能貢獻出的  $\mu_B$  值分別是  $0.66 \mu_B/\text{Co}$  以及  $0.48 \mu_B/\text{Co}$ ，此外我們也可以判斷在 Co 摻雜的氧化鋅系統中，其居禮溫度至少高於室溫。接下來將量測此樣品的 M-T 圖，也就是探討樣品的磁化量對溫度的關係。M-T 圖的量測方式是對樣品從室溫分別做零場冷(zero-field cooling, ZFC)以及場冷(field cooling, FC)到 5 K 後，再施加一量測場(通常此量測場與場冷時所施加的磁場大小相同)，接著將樣品由低溫逐漸升到高溫，並且在升溫過程中，擷取在不同溫度下樣品的磁訊號。依上述的量測方式，可以得到兩條樣品的磁化量對溫度的關係圖，也就分別是 ZFC 和 FC 曲線。隨著量測溫度升高，ZFC 以及 FC 曲線兩者將會逐漸靠攏，當量測溫度達到居禮溫度時，ZFC 及 FC 曲線將會相交，因此可以利用這種量測方式來判斷樣品的居禮溫度。

圖 4-12 顯示了利用上述方式所量到的 M-T 圖，首先將樣品升溫到 300 K，再對其做 ZFC 以及 FC 到 5 K，其中 FC 磁場和量測場皆為 100 Oe。由於此量測所使用的 SQUID 系統，其最高溫度只可以達到 350 K，因此 M-T 圖的量測範圍是從 5 K 到 350 K 之間。從圖 4-12 中可以看出 ZFC 以及 FC 兩條曲線在 300 K 時並沒有交會，再次驗證了樣品的居禮溫度高於室溫，而當溫度逐漸升高至 330 ~ 350 K 之間

時，ZFC 以及 FC 曲線兩者已經相當接近，因此可以初步判斷本樣品的居禮溫度接近 330 ~ 350 K 之間。

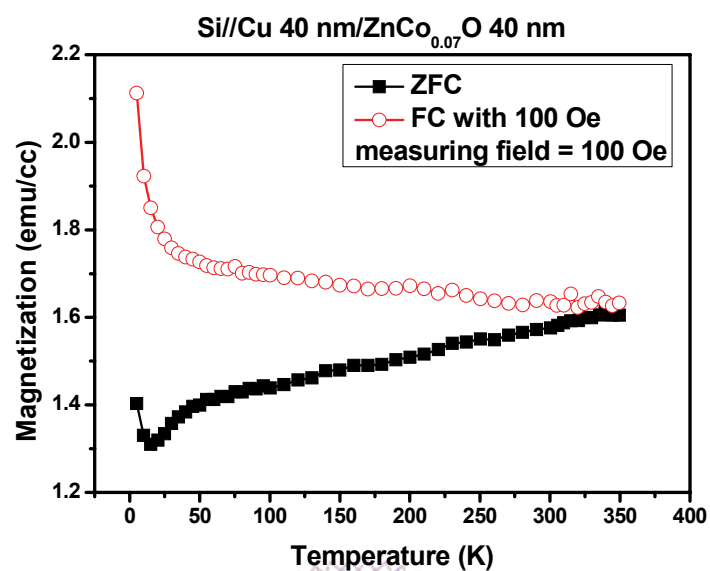


圖 4-12 Si//Cu 40 nm /ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品的磁化量對溫度關係圖

## 4-2 稀磁性半導體與反鐵磁之交互耦合

自從磁滯曲線偏移的現象在 Co/CoO 的系統中被發現之後，交換場的概念就被廣泛的研究與應用。然而在一般的鐵磁/反鐵磁系統中，要使反鐵磁層能有效提供交換異向性(exchange anisotropy)，並且使反鐵磁層對鐵磁層具有牽制(pinning)效果，進而表現出整體的交換場現象，必須有以下三個條件：

1. 反鐵磁層必須達到一特定厚度，若是厚度太薄則反鐵磁層的交換異向性大部分會貢獻到鐵磁層的矯頑場，反之若是反鐵磁厚度太厚其交換場的表現也會變差。
2. 反鐵磁層必須要具有磁矩未完全抵銷面(spin uncompensated plane)的纖構(texture)才有機會觀察到此交互耦合現象。
3. 必須利用磁場退火的方式定義反鐵磁層的交換異向性方向。

在接下來的討論中，將引入氧化鎳(NiO)反鐵磁層，並且觀察其與氧化鋅稀磁性半導體間的交互耦合作用。在文獻中提到 NiO 與一般鐵磁之間的交互耦合作用要貢獻出最佳的交換場表現，其厚度大約是在 50 nm 左右，而 NiO 的磁矩未完全抵銷面為(111)，因此接下來將討論藉由 NiO 反鐵磁層的引入，觀察在低溫時，其與氧化鋅稀磁性半導體間的交互耦合現象。

#### 4-2-1 氧化鎳反鐵磁層的引入

在接下來的實驗討論中，將固定氧化鋅稀磁性半導體中的 Co 濃度為 7 %，並且選用與氧化鋅同為氧化物的氧化鎳(NiO)作為反鐵磁層材料。利用前面章節所述的製程方式，以雙離子槍濺鍍系統製備膜層結構為 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 的樣品，並且利用 XRD 分析其結構性質，結果如圖 4-13 所示。從 XRD 的分析中可以看出，除了 Si (200)、ZnCoO (0002)以及 Cu (200)的峰值以外，在 36.52 度可以觀察到 NiO (111)的峰值。這樣的結果顯示了利用雙離子槍濺鍍系統的製程可以成功的在 ZnCoO 上成長出 NiO 的磁矩未完全抵銷面，這對於之後所要探討的鐵磁/反鐵磁交互耦合現象極為有幫助。

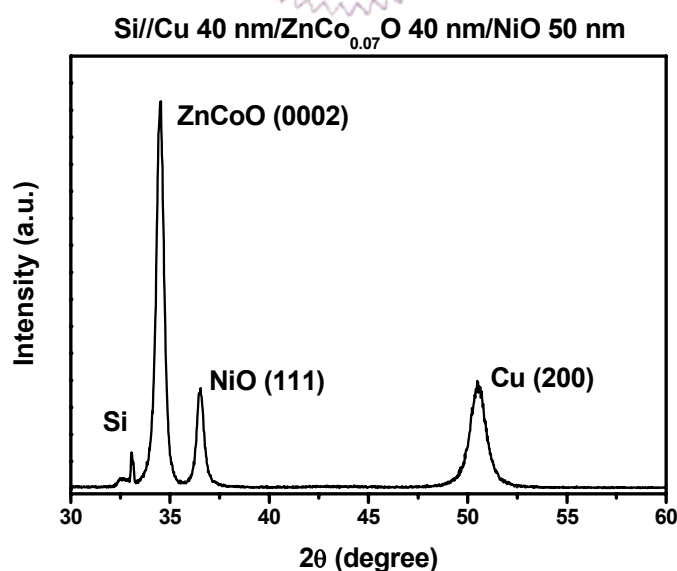


圖 4-13 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品的 XRD 分析

從樣品的 XRD 結果可以發現 NiO (111)的峰值強度與 Cu (200)的峰值強度相近，因此藉由  $\Phi$ -scan 分析來探討 NiO (111)與 ZnCoO (0002)之間的膜層堆疊關係，其結果如圖 4-14 所示。圖 4-14(a)中 NiO {220} 峰值訊號的銳利度(sharpness)並不是十分的好，其主要原因是在  $\Phi$ -scan 的分析中，分析 NiO (111)應該要擷取其{200}的訊號，但是其與 Cu (200)的峰值位置(peak position)太過接近，如果直接擷取 NiO {200}的訊號將會因為連帶取到 Cu 的訊號而使得 NiO 的訊號被蓋過，如此便無法觀察到 NiO (111)的膜層堆疊情況。因此在 NiO 的  $\Phi$ -scan 分析中，利用擷取 NiO {220}訊號的方式，犧牲其訊號的銳利度而成功得到 NiO (111)的  $\Phi$ -scan 分析結果。

從圖 4-14(a)中可以發現 NiO 有 12 根 {220}峰值，代表著 NiO 也同樣與 ZnCoO 具有十二軸對稱的結構，並且將其與 ZnCoO 的 12 根  $\{10\bar{1}1\}$ 峰值作對照可以發現，NiO (111)是與 ZnCoO 的(0002)在垂直膜面方向平行，且在平行膜面方向兩者為直接磊晶堆疊的關係。圖 4-14(b)的 ZnCoO  $\{10\bar{1}1\}$ 峰值以及圖 4-14(c)的 Cu {111}峰值與之前的  $\Phi$ -scan 分析結果相似。

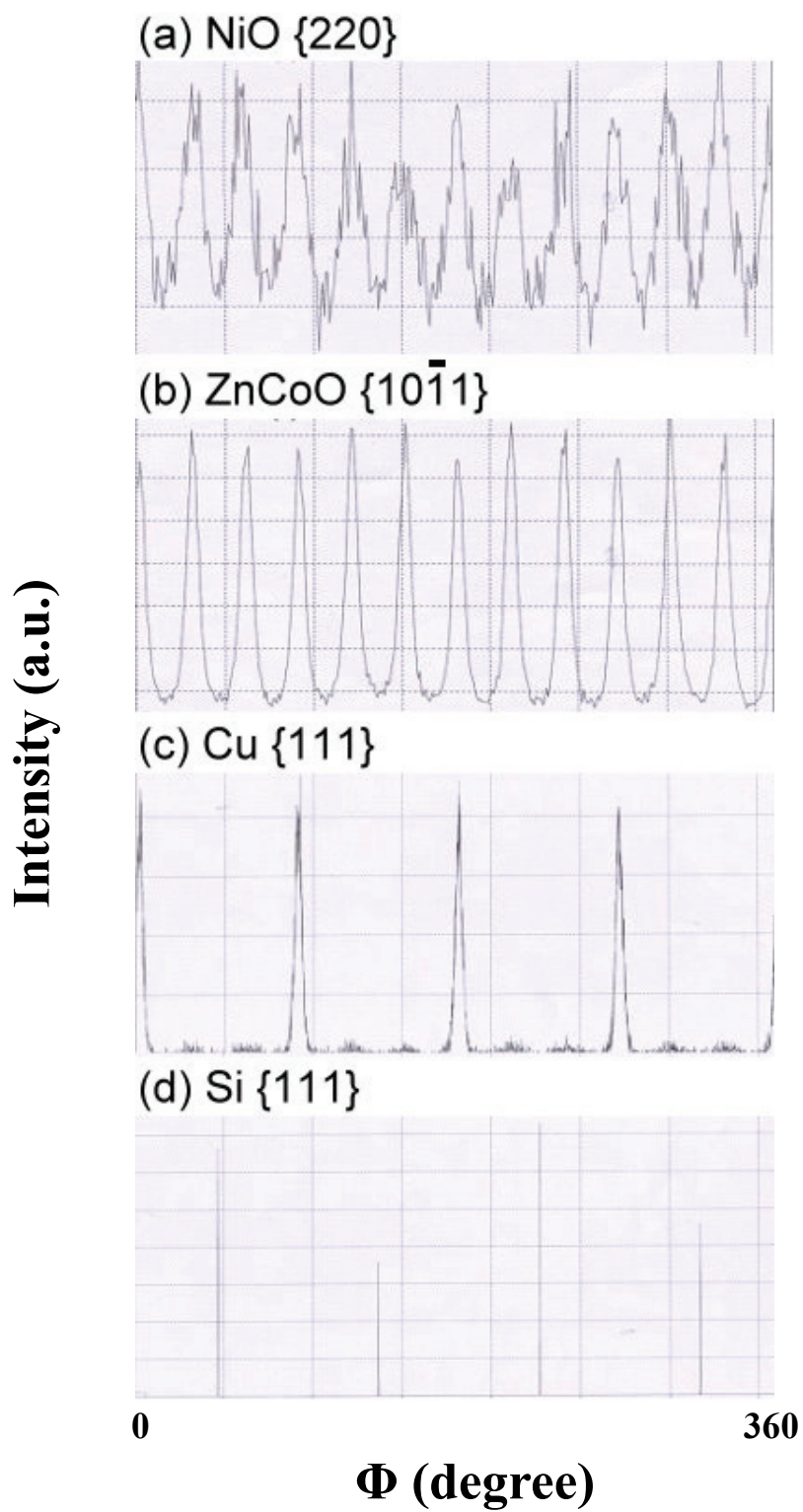


圖 4-14 利用  $\Phi$ -scan 分析 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品的(a) NiO {220}； (b) ZnCoO {10 $\bar{1}$ 1}； (c) Cu {111}及(d) Si {111}

#### 4-2-2 低溫交互耦合現象

前面章節提及一般要設定鐵磁/反鐵磁系統中的交換異向性方向，必須藉由磁場退火的方式來達成，將系統溫度提升到反鐵磁層的尼爾溫度(Néel temperature,  $T_N$ )以上，鐵磁層的居禮溫度以下，並且在退火過程中施加磁場，以此磁場的方向來設定鐵磁/反鐵磁系統的交換異向性方向。NiO 的尼爾溫度大約為 523 K 左右，這比絕大多數稀磁性半導體的居禮溫度還要高上許多，所以在 ZnCoO/NiO 中，是一個  $T_C < T_N$  的系統，與傳統的鐵磁/反鐵磁， $T_N < T_C$  的系統有所不同，因此是否可以利用磁場退火的方式有效定義系統中的交換異向性方向將是一個問題。另外在 Si//Cu/ZnCoO/NiO 中，經過高溫的磁場退火後，系統中 Cu 的擴散問題也是必須考量的因素之一。

考慮到上述的因素，因此接下來將利用 SQUID 的分析優勢，對 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 的樣品分別做零場冷(zero-field cooling, ZFC)和場冷(field cooling, FC)後，探討其磁性質上的表現。其中對樣品做場冷的過程，就是首先將樣品升溫到 350 K，維持此溫度的同時施加一外加磁場，隨後將樣品冷卻到 5 K，並且在冷卻過程中維持所施加的磁場。這整個場冷過程其實就類似於一般的磁場退火過程，只是在此系統中的磁場退火溫度相較於一般鐵磁/反鐵磁系統的磁場退火溫度要低上許多，並且在 NiO 的  $T_N$  之下。在文

獻中也有關於能在反鐵磁的  $T_N$  之下，設定鐵磁/反鐵磁系統的交換異向性之相關報導[45]。

圖 4-15 為 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品經過零場冷之後的 5 K 磁滯曲線圖，也就是將樣品從 350 K 直接冷卻到 5 K 後的量測結果。從圖中可以看出其矯頑場接近 104 Oe，飽和磁化量則有 40 emu/cc 左右，並且在圖中沒有發現磁滯曲線有橫向的偏移，也就是說雖然在樣品中有反鐵磁層 NiO 的存在，但是利用零場冷的方式，並不能使 NiO 的磁矩產生序化的動作，因此無法設定 ZnCoO/NiO 系統的交換異向性方向，所以在 NiO 與 ZnCoO 之間無法產生交互耦合作用，因此在低溫下並沒有觀察到樣品有交換場的表現。

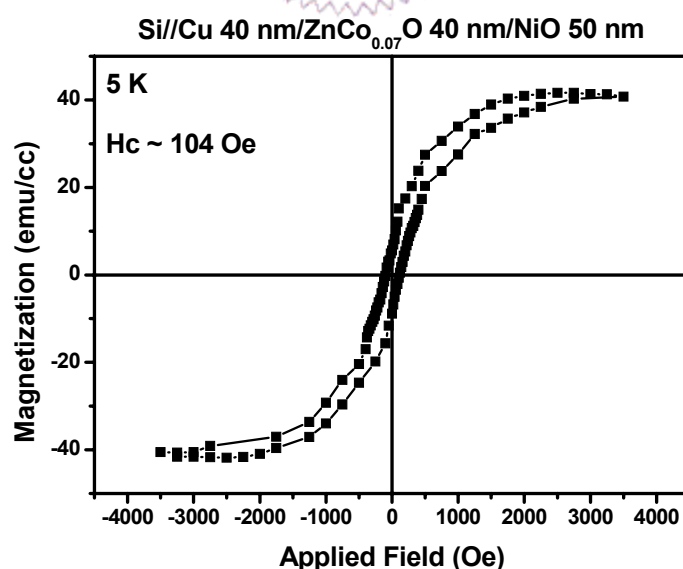


圖 4-15 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品的零場冷 5 K 磁滯曲線圖

接下來將討論場冷對樣品的影響，首先將樣品升溫到 350 K，接著沿著樣品膜面方向分別施加 - 2 Tesla 和 + 2 Tesla 的磁場，然後維持磁場大小並將樣品降溫到 5 K 後，再觀察其低溫磁滯曲線，結果如圖 4-16 (a)所示，圖 4-16 (b)則是其小場放大圖。從圖中可以看出，在 FC - 2 Tesla 的情況下，磁滯曲線有往正場方向做偏移的趨勢，也就是偏移方向是和場冷時所施加的場方向相反，再觀察 FC + 2 Tesla 的磁滯曲線發現其是往負場方向做偏移。因此由量測到之磁滯曲線的偏移方向與其場冷時所施加磁場方向的關聯，我們可以初步地驗證樣品經過場冷效應後是有交換場現象的存在，且其矯頑場以及交換場大小分別如圖 4-16 (a)及圖 4-16 (b)所示。

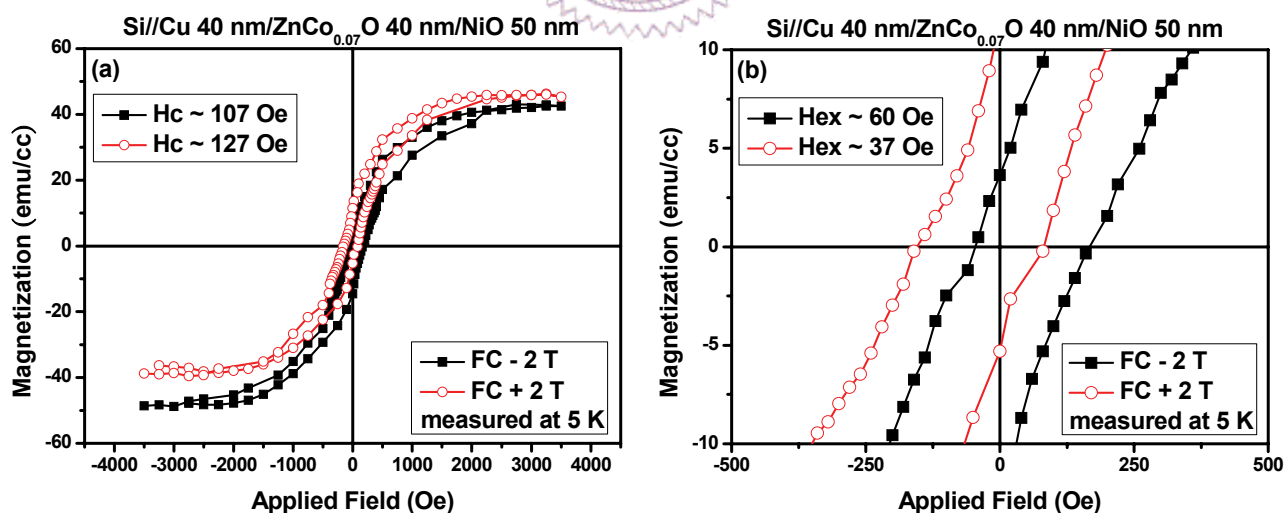


圖 4-16 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品受到不同場冷方向後的(a) 5 K 磁滯曲線圖以及(b)其小場放大圖

除了交換場的現象之外，從圖 4-16 (a)中也發現樣品經過場冷後會引起其磁滯曲線的磁化量偏移(magnetization shift or vertical shift)，也就是磁滯曲線會有縱向的偏移，並且此偏移的方向也和場冷時所施加的磁場方向有關。關於這部分的討論將在後面章節中繼續探討。由上述的實驗結果說明了在 ZnCoO/NiO 的系統中，利用場冷的方式，可以有效地設定 ZnCoO/NiO 系統中的交換異向性方向，進而使樣品貢獻出交換場的表現。



為了更嚴謹地驗證在對樣品場冷後的量測結果中所發現的交換場現象的確是由反鐵磁層 NiO 的引入所造成的貢獻，因此接下來將探討 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 的樣品在經過同樣的場冷效應之後，是否能夠觀察到磁滯曲線橫向以及縱向的偏移。同樣地，以 FC - 2 Tesla 的方式，將樣品從 350 K 冷卻到 5 K 後，觀察其磁滯曲線，結果如圖 4-17 (a)所示，圖 4-17 (b)則為其小場放大圖。從圖中可以發現，樣品經過場冷之後在低溫下並沒有觀察到磁滯曲線有橫向或是縱向偏移的現象，且其矯頑場接近 95 Oe。由上述的實驗結果可以驗證，當反鐵磁層 NiO 引入之後，利用場冷的方式可以有效設定 ZnCoO/NiO 的交換異向性方向，並且使其在低溫下貢獻出交換場的表現。

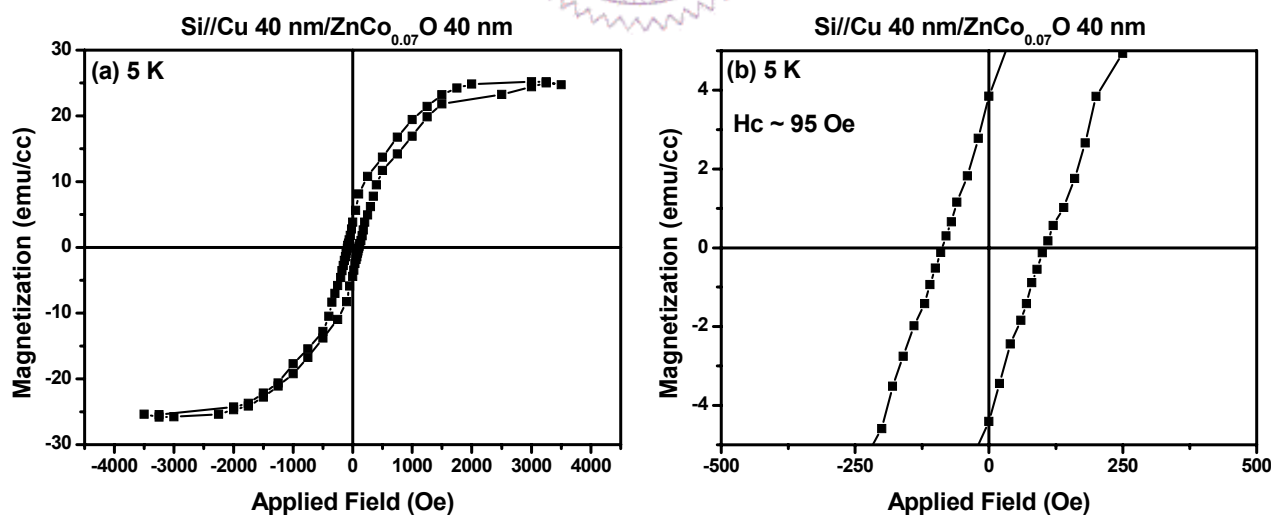


圖 4-17 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品受到 FC - 2 Tesla 的(a) 5 K 磁滯曲線圖以及(b)其小場放大圖

驗證了 NiO 對樣品交換場的貢獻之後，接下來將探討量測場對於所觀察到的 ZnCoO/NiO 交互耦合現象的影響。首先將樣品從 350 K 做零場冷到 5 K，隨後施加 + 2 Tesla 的外加磁場，維持 60 秒之後接著開始量測樣品的低溫磁滯曲線圖，其結果示於圖 4-18 (a)，圖 4-18 (b) 是其小場放大圖。從圖中並沒有發現磁滯曲線有明顯的交換場以及磁化量偏移的現象，這表示雖然將樣品做零場冷之後再施加一足夠大的磁場，也是無法設定 ZnCoO/NiO 的交換異向性方向，所以觀察不到磁滯曲線橫向以及縱向的偏移。這個量測結果某種程度上也說明了在 ZnCoO/NiO 系統中所觀察到的磁滯曲線偏移，的確是因為對樣品做場冷所引起的現象，而並不是由其他因素所造成。

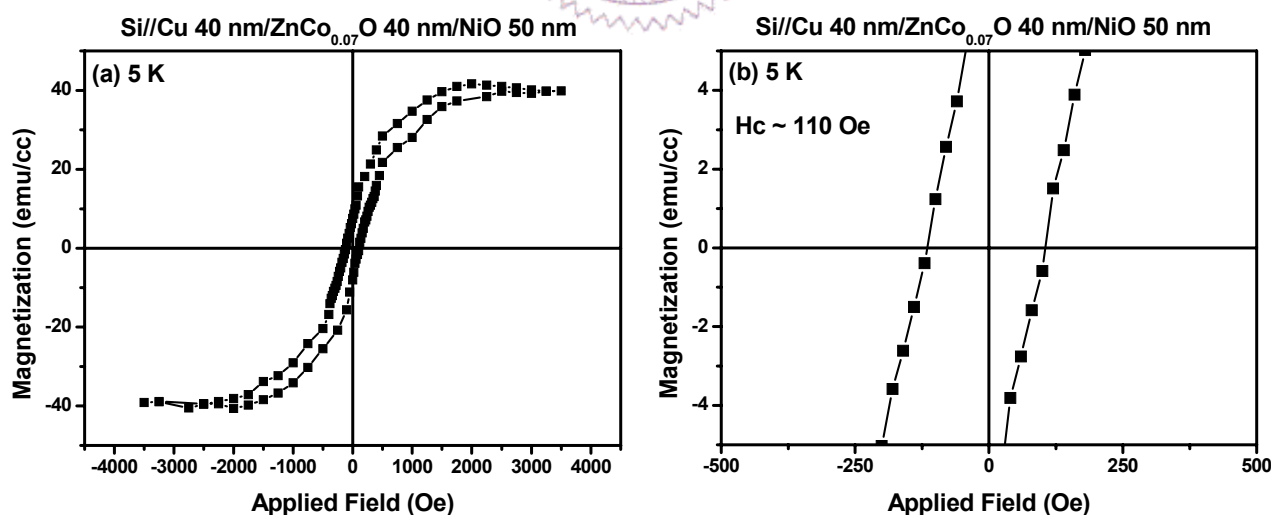


圖 4-18 將 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品零場冷後，再施加的 + 2 Tesla 的外加磁場，隨後量測其(a) 5 K 磁滯曲線圖以及(b)

其小場放大圖

接下來對樣品從 350 K 做 FC - 2 Tesla 到 5 K，接著連續量測兩次樣品的磁滯曲線圖，其結果示於圖 4-19 (a)，圖 4-19 (b)是其小場放大圖。從圖中可以看出經過場冷之後的樣品在低溫下可以觀察到磁滯曲線的橫向以及縱向偏移，其矯頑場接近 110 Oe，交換場則有 52 Oe 左右。在第一次磁滯曲線量測完成後，緊接著第二次磁滯曲線的量測，從圖 4-19 (a)中可以看出前後兩次量測的結果十分接近。這說明在 ZnCoO/NiO 系統中，利用場冷效應引起的交換場現象，在溫度為 5 K 下，並沒有顯著的 training effect，也就是在接連兩次的量測中，沒有發現隨著量測次數的增加，交換場有減弱的趨勢。在某種程度上，這樣的結果表示了 ZnCoO/NiO 系統經過 FC - 2 Tesla 到 5 K 之後，其磁性質是處在一個相對穩定的狀態。

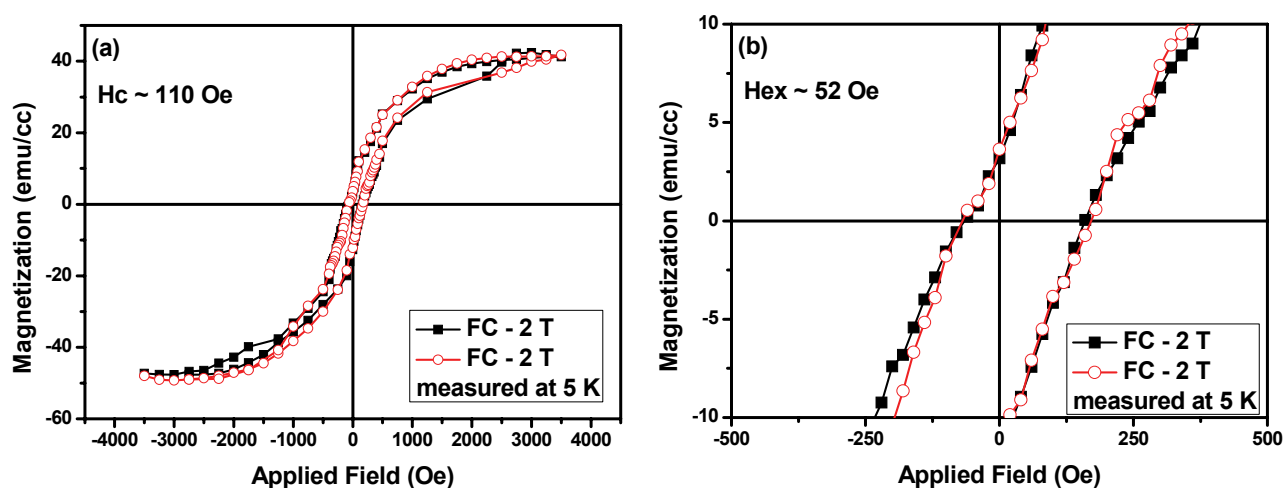


圖 4-19 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品受到 FC - 2 Tesla 後的(a) 5 K 磁滯曲線圖以及(b)其小場放大圖

### 4-2-3 場冷強度以及溫度效應

從前面章節的討論中，可以發現利用場冷的方式能有效設定 ZnCoO/NiO 系統的交換異向性方向，因此使其能貢獻出交換場的表現。在此章節當中則是要來探討，在場冷過程中，所施加的磁場大小對樣品在低溫下磁滯曲線表現的影響。我們改變在場冷過程中對樣品所施加的磁場大小，觀察樣品在經過 FC - 5000 Oe、- 10000 Oe、- 20000 Oe 以及 - 30000 Oe 之後的 5 K 磁滯曲線圖，其結果示於圖 4-20。從圖中可以看出樣品經過不同強度的場冷後，其磁滯曲線都會有橫向及縱向的偏移現象。另一方面，我們也將不同場冷強度下樣品的矯頑場以及交換場整理並示於圖 4-21。從圖 4-21 中可以看出，場冷時施加磁場大小的改變對於樣品的矯頑場影響並不大，其矯頑場都維持在 115 Oe 附近。反觀在交換場的部分，隨著場冷強度的增加，交換場則有顯著的上升，尤其在 FC - 30000 Oe 的條件下，樣品的交換場更高達 80 Oe 左右。這樣的實驗結果說明在 ZnCoO/NiO 系統中，交換異向性的強度與場冷強度有密不可分的關聯。當場冷強度越強時，ZnCoO/NiO 系統可以貢獻出越高的交換異向性能量，當此能量越高時，ZnCoO 的磁矩就越能被有效地牽制並且沿著此異向性方向，也就是沿著場冷時所施加的磁場方向做排列，因此 ZnCoO/NiO 系統能貢獻出來的交換場也就會越大。

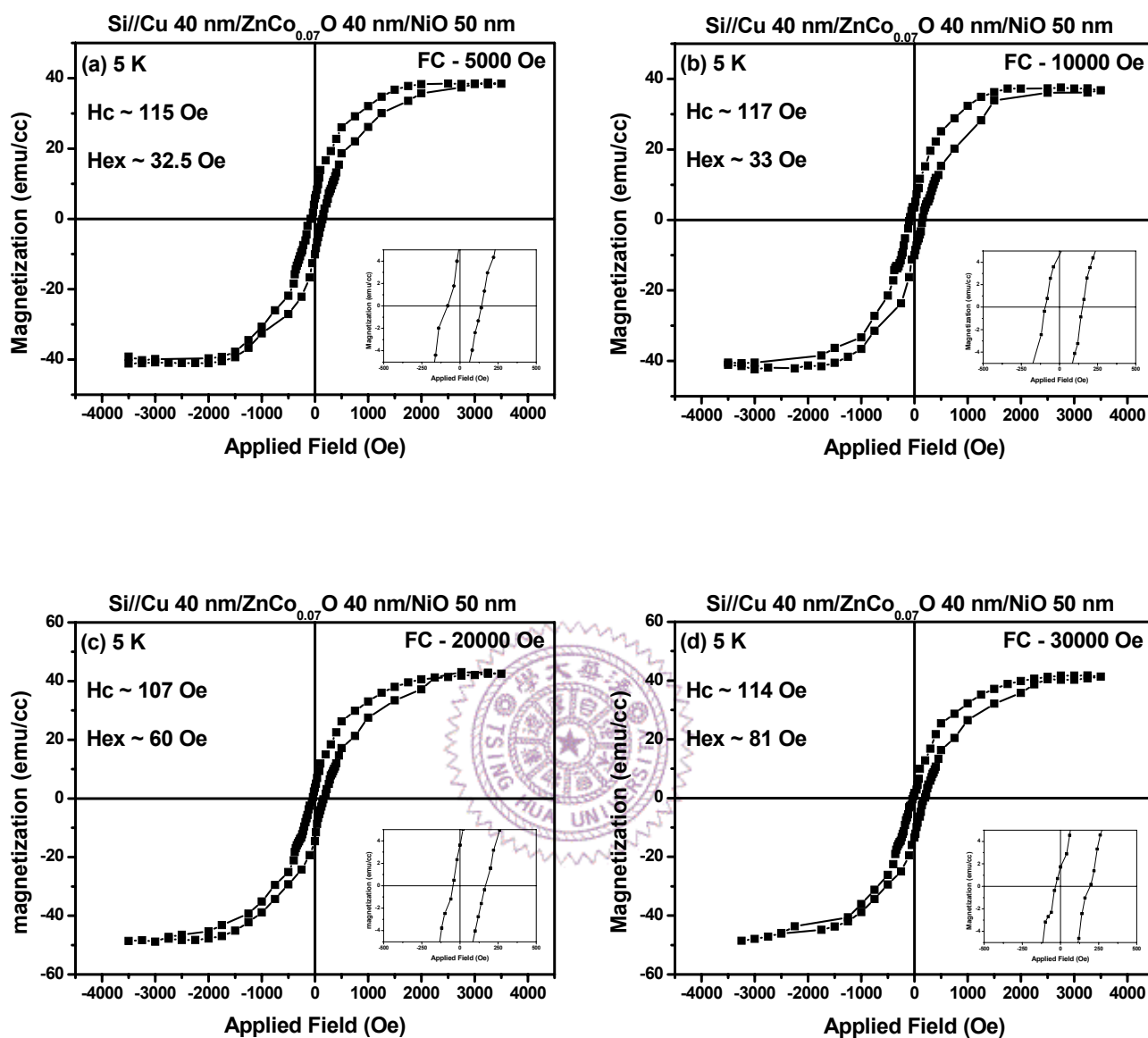


圖 4-20  $\text{Si//Cu 40 nm/ZnCo}_{0.07}\text{O 40 nm/NiO 50 nm}$  樣品經過不同強度的場冷(a) FC - 5000 Oe； (b) FC - 10000 Oe； (c) FC - 20000 Oe 以及(d) FC - 30000 Oe 後的 5 K 磁滯曲線圖。附圖為各個磁滯曲線的小場放大圖

在上一章節中有提到，當樣品經過場冷後，在低溫除了可以看到交換場的表現之外，同時磁滯曲線也會有垂直方向的偏移，也就是樣品的磁化量會產生偏移的現象，並且此偏移的方向和場冷時外加磁場的方向有關。以 FC - 2 Tesla 為例，此時樣品的磁滯曲線會產生向下的偏移現象。圖 4-21 中也顯示了此磁化量偏移對場冷強度的關係，如圖中的空心圓圈所示。此處的 $\Delta M$  定義為樣品的正負飽和磁化量差值的絕對值，表示磁滯曲線的上下偏移量。很明顯的， $\Delta M$  隨著場冷強度的增加而有上升的趨勢，而且此趨勢和交換場與場冷強度的關係相當類似。這表示了 $\Delta M$  和交換場之間存在著某種相關聯性，而兩者間的相關聯性必須藉由對樣品的場冷過程來引發。

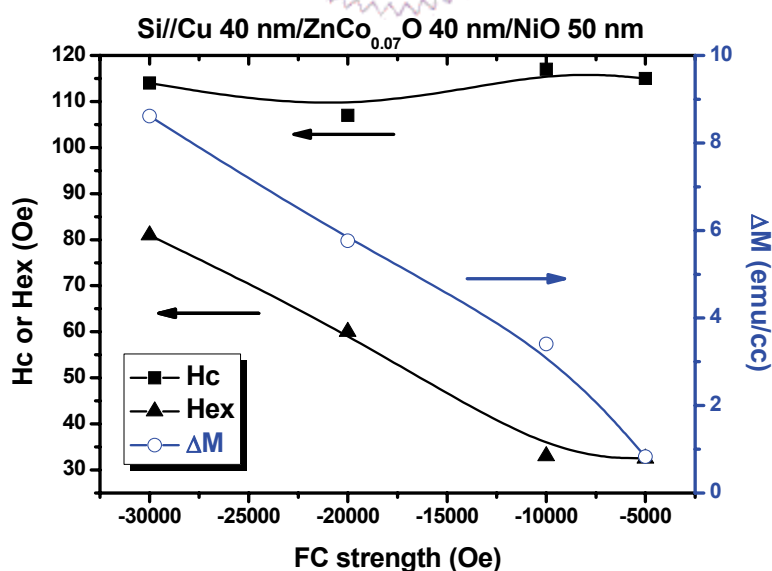


圖 4-21 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品的矯頑場、交換場以及磁化量偏移( $\Delta M$ )對場冷強度的關係圖

接下來將探討量測溫度對樣品矯頑場、交換場以及 $\Delta M$ 的效應，首先以 FC - 2 Tesla 的方式將樣品冷卻到 5 K，隨後開始將樣品逐漸升溫，並且量測不同溫度下樣品的磁滯曲線，最後將其矯頑場、交換場以及 $\Delta M$ 對溫度的關係分別整理於圖 4-22 (a)以及圖 4-22 (b)。從圖 4-22 (a)中可以發現，矯頑場和交換場隨著溫度的升高，在 50 K 以內的範圍會有急遽的下降，而在 50 K 以上的溫度範圍內，矯頑場和交換場隨著溫度上升而下降的趨勢較為平緩。在圖 4-22 (b)中，比較交換場和 $\Delta M$ 對溫度的關係可以發現，兩者有相似的溫度相關性，特別是在溫度小於 50 K 的範圍內，兩者對於溫度的提升有著極為相近的下降趨勢，這再次說明了在 ZnCoO/NiO 系統中，交換場和 $\Delta M$ 之間的關連性是密不可分的。

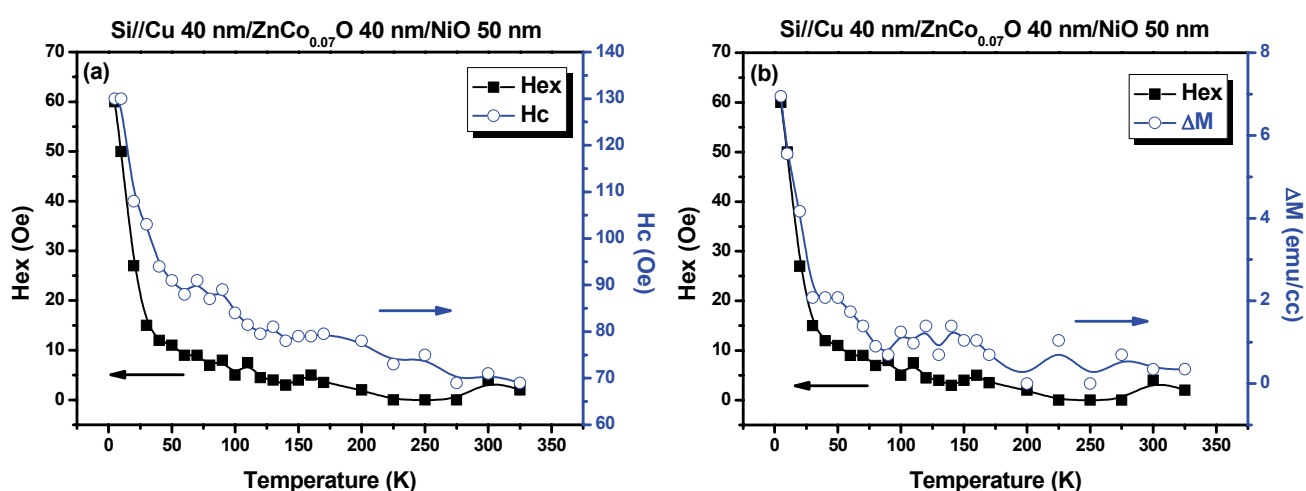


圖 4-22 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品經過 FC - 2

Tesla 之後的(a)矯頑場及交換場；(b)交換場及 $\Delta M$ 對溫度的關係圖

#### 4-2-4 7 Tesla 量測場效應

利用場冷的方式，觀察 ZnCoO/NiO 系統的低溫磁滯曲線發現其同時具有交換場以及磁化量偏移的現象，並且磁滯曲線偏移的方向和場冷時所施加的磁場方向有關。造成這個現象的原因之一，有可能是在量測上，樣品的量測磁場範圍不夠大，導致只量得樣品的未飽和磁滯曲線(hysteresis minor loop)，則有機會同時觀察到樣品磁滯曲線的橫向及縱向偏移。為了驗證在 ZnCoO/NiO 系統中，樣品經過場冷效應後所觀察到的磁滯曲線偏移是否為量測上的因素所造成，因此接下來我們將對 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 的樣品做大範圍的磁場量測。首先將樣品從 350 K 做 FC - 2 Tesla 到 5 K，接著量測其磁滯曲線，且量測場範圍為正負 7 Tesla，量測結果如圖 4-23 所示。

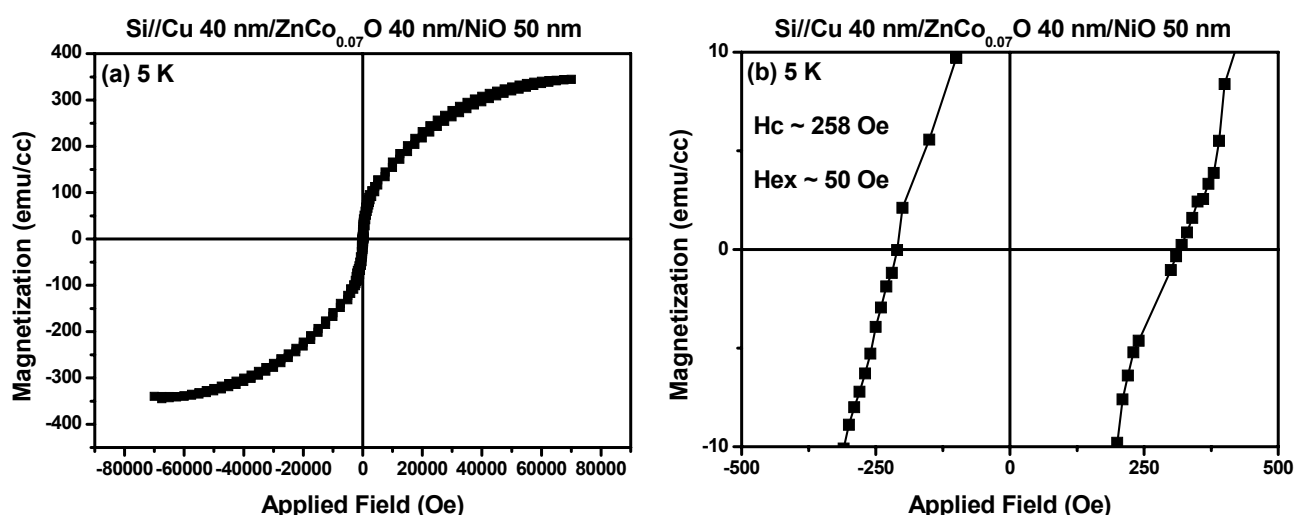


圖 4-23 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品經過 FC - 2

Tesla 之後的(a) 5 K 磁滯曲線圖及(b)其小場放大圖

從圖 4-23 中可以看出樣品經過 7 Tesla 量測場後，其矯頑場接近 258 Oe，而其交換場也有 50 Oe 左右。在樣品的量測場強度大於場冷強度的狀態下，能夠在低溫下觀察到樣品仍然會有交換場的現象，這樣的結果表示了樣品經過場冷過程後，是處於一個相對穩定的狀態。根據前述的想法，若是將樣品場冷後所觀察到的磁滯曲線橫向以及縱向偏移現象是由於量測的磁場範圍不夠大所引起，那麼當量測磁場範圍變大，且量測到樣品的飽和磁滯曲線(hysteresis full loop)時，此時樣品的磁滯曲線應該不會有磁化量偏移的現象。從圖 4-23 (a)的磁滯曲線圖中，我們並沒有觀察到明顯的磁化量偏移，並且由圖 4-23 (b)中可以觀察到樣品在正負 7 Tesla 的量測場範圍內仍然可以表現出明顯的交換場，因此藉由這樣的結果，我們可以初步地驗證在 ZnCoO/NiO 系統中，磁滯曲線的橫向偏移現象並不是因為量測場範圍所造成的，而在 ZnCoO/NiO 系統中存在著某些機制，使得樣品經過場冷後會同時表現出磁滯曲線的橫向以及縱向偏移現象。而在圖 4-23 (a)中樣品，我們另外也發現了其飽和磁化量值較之前量測結果增加許多，關於造成這個現象的原因將接著在之後的討論中敘述。

為了和前面的實驗結果做一個對照，接下來將同一個樣品從 350 K 做零場冷到 5 K，然後量測其正負 3 Tesla 範圍的磁滯曲線，其結果如圖 4-24 所示。從圖 4-24 (a)可以看出將樣品零場冷後所量到的磁滯曲線和將樣品場冷後所量到的磁滯曲線兩者都表現出巨大的飽和磁化量值，另外從圖 4-24 (b)中可以看出樣品的矯頑場將近 174 Oe。這樣的結果說明了即使對樣品做零場冷後，量測到的磁滯曲線和對樣品做場冷後所量測到的磁滯曲線，都可以觀察到飽和磁化量值增加，這說明了樣品的飽和磁化量增加跟樣品受場冷或零場冷的關連性相對是較小的，其主要的影響因素是來自於量測場的效應，也就是隨著量測場的增大，飽和磁化量值的增加也就越顯著。

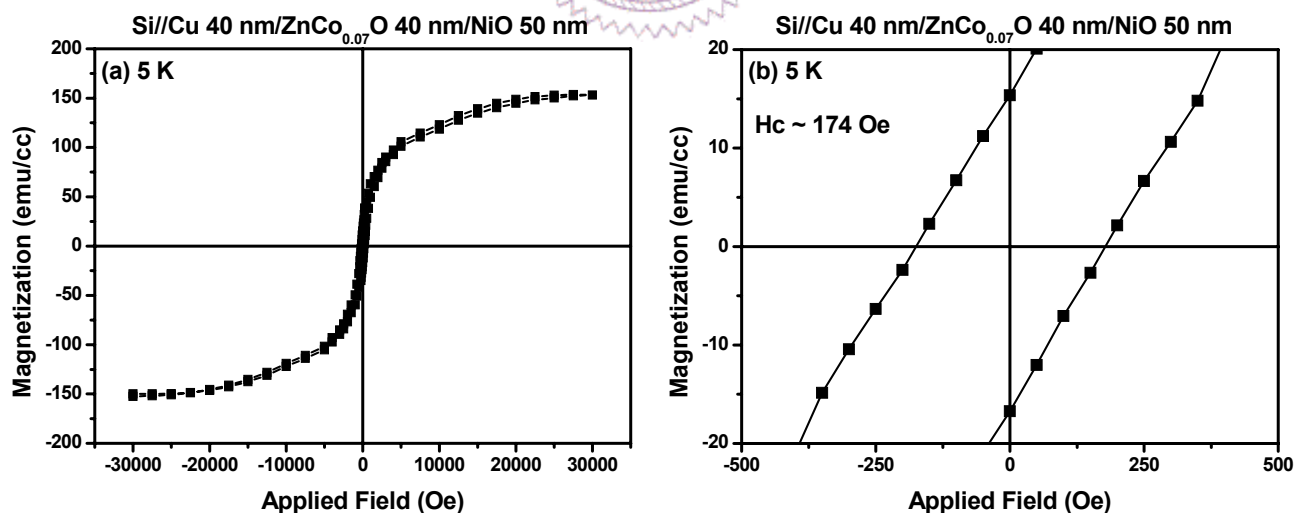


圖 4-24 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品經過零場冷之後的(a) 5 K 磁滯曲線圖及(b)其小場放大圖

圖 4-23 (a)和圖 4-24 (a)中，當量測的磁場範圍變大時，我們可以發現樣品的飽和磁化量值展現驚人的增加，為了更進一步探討造成此現象的原因，接下來我們將量測樣品在不同溫度下的大範圍量測磁場的磁滯曲線，其結果如圖 4-25 所示。

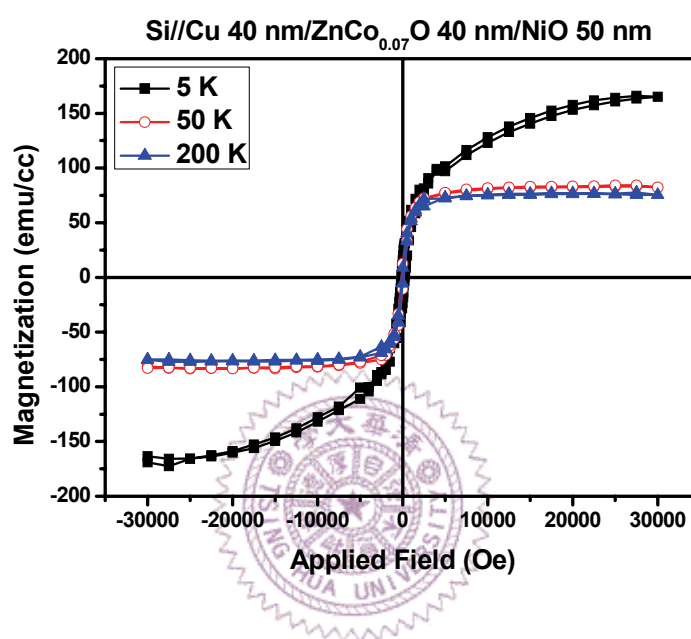


圖 4-25 比較 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品在不同溫度下的磁滯曲線

比較樣品在 50 K 和 200 K 的磁滯曲線可以發現，兩者相對於 5 K 的磁滯曲線，其飽和磁化量值有明顯的降低，類似的結果在文獻中也有相關的報導[46]。這結果表示了在系統中存在著順磁相或是自旋玻璃相(spin glass)的貢獻。接下來將針對單純的 Si//Cu 40 nm 樣品做同樣的量測，其結果如圖 4-26 所示。從圖中可以發現樣品在大範圍量測磁場下也會有很大的磁訊號表現，比較圖 4-24 (a)，說明了在低溫

下，對樣品施加較大量測磁場的同時，Si//Cu 對於整個系統會有磁化量值的貢獻，這樣的結果合理解釋了之前所觀察到樣品的巨大飽和磁化量現象。另一方面，雖然發現在樣品中的磁化量有 Si//Cu 的貢獻，但是此效應在量測磁場較小以及量測溫度較高時，其效應是相對不顯著的，且此效應對於之前利用場冷的方式所觀察到樣品的磁滯曲線橫向及縱向偏移是沒有定性上的影響的，因為此效應對於磁滯曲線的正負磁化量值的影響是等效的。

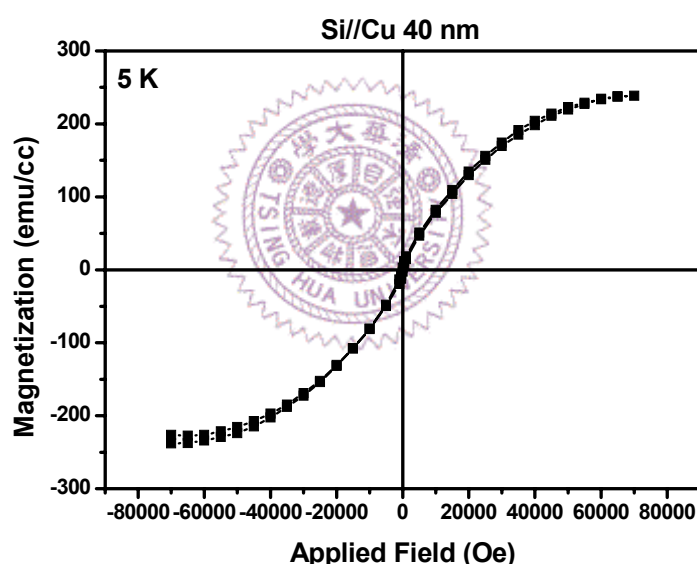


圖 4-26 Si//Cu 40 nm 樣品 5 K 下的磁滯曲線圖

回到圖 4-25，在 50 K 和 200 K 的磁滯曲線呈現了飽和狀態，並且因為量測溫度的提升，排除了系統中的 Si//Cu 貢獻。但此時兩者的飽和磁化量值，接近 75 emu/cc，相較於之前樣品在 5 K 下的量測結果有明顯的增加。由於這個不尋常的結果，接下來我們重新確認了樣

品經過零場冷和場冷之後的磁滯曲線，並且和之前的量測結果做比較，分別示於圖 4-27 (a)以及圖 4-27 (b)。從圖中可以發現樣品的飽和磁化量有明顯的增加，在 7 Tesla 量測前後樣品分別能貢獻出  $1.05 \mu_B/\text{Co}$  以及  $1.66 \mu_B/\text{Co}$  的磁化量值。在零場冷的量測中，樣品的矯頑場將近 164 Oe，而場冷的量測結果顯示其矯頑場將近 235 Oe，且其交換場更高達 120 Oe，這些數值皆較之前的量測結果有顯著的增加。由圖 4-27 的結果顯示，樣品經過 7 Tesla 的量測後，樣品在本質上似乎產生了變化，造其成飽和磁化量、矯頑場及交換場有增加的現象。

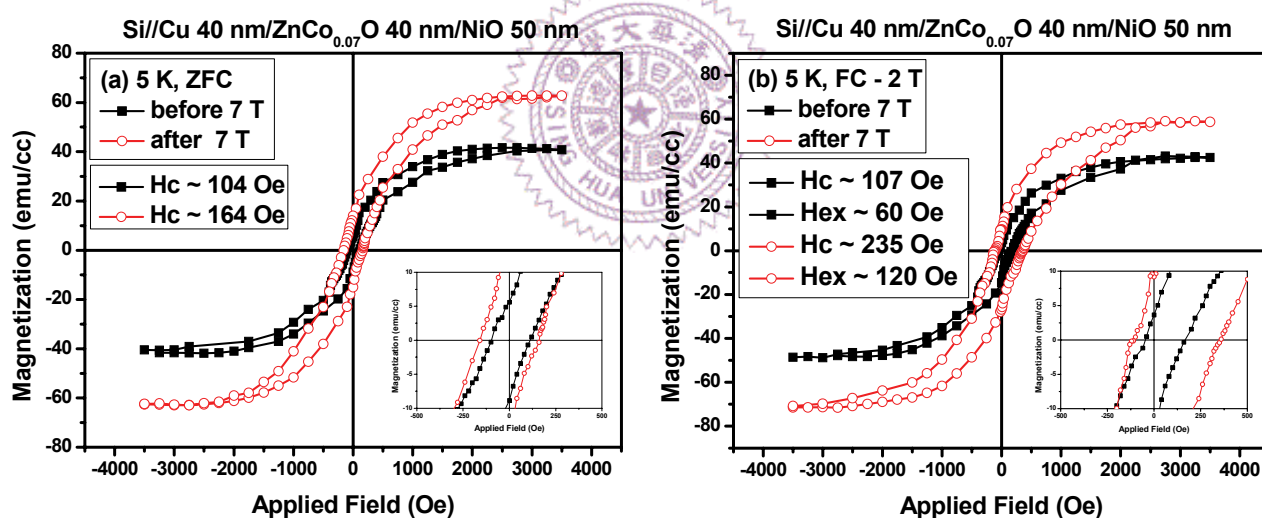


圖 4-27 比較 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品在 7 Tesla 量測前後的 5 K (a)零場冷以及(b)場冷磁滯曲線

為了進一步釐清造成此現象的原因，接下來我們以同樣的量測方式量測 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 的樣品，觀察其經過 7 Tesla 量測後，是否會有類似的現象發生。圖 4-28 是比較 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O

40 nm 樣品在 7 Tesla 量測前後所得到的 5 K 磁滯曲線圖，從圖中可以看出兩者的飽和磁化量以及矯頑場都沒有明顯的差異，說明了在此沒有 NiO 的樣品中，7 Tesla 量測對於其不會產生之前所觀察到的效應，因此從這個結果可以初步地判斷在 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 的樣品中，經過 7 Tesla 量測之後所造成的現象與系統中 NiO 的存在與否有很密切的關聯。

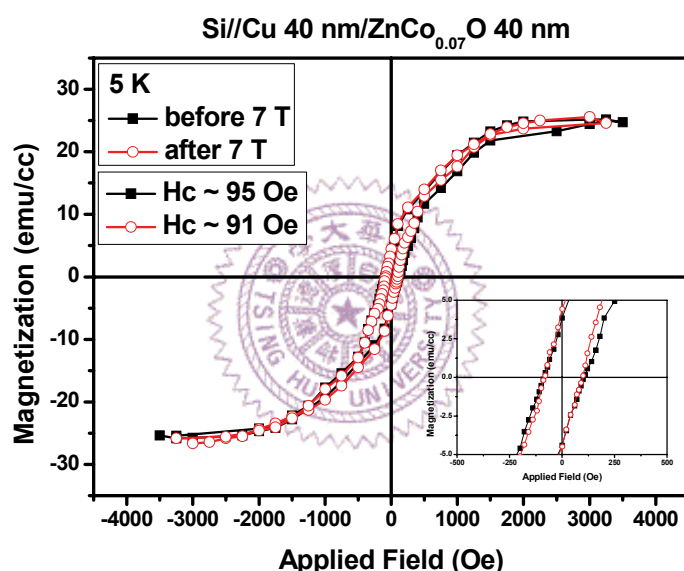


圖 4-28 比較 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品在 7 Tesla 量測前後的

### 5 K 磁滯曲線圖

另一方面，我們也可以從 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品以及 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品，兩者在 7 Tesla 量測前後的磁化量對溫度關係圖中看出一些關聯性，如圖 4-29 及圖 4-30 所示。我們可以看到在 7 Tesla 量測前後，Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm

樣品的磁化量對溫度關係圖並沒有明顯變化，如圖 4-29 所示。反觀

在 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品中，經過 7 Tesla 量測

後，其磁化量對溫度關係圖有著明顯的差異，如圖 4-30 所示。

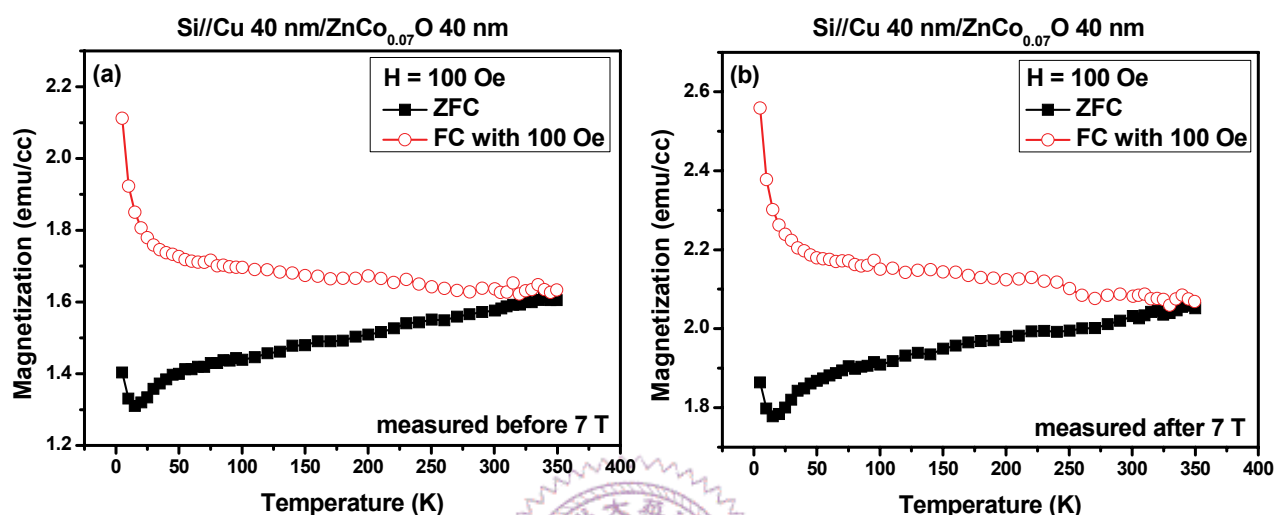


圖 4-29 比較 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品在(a)7 Tesla 量測前以及(b) 7 Tesla 量測後的磁化量對溫度關係圖

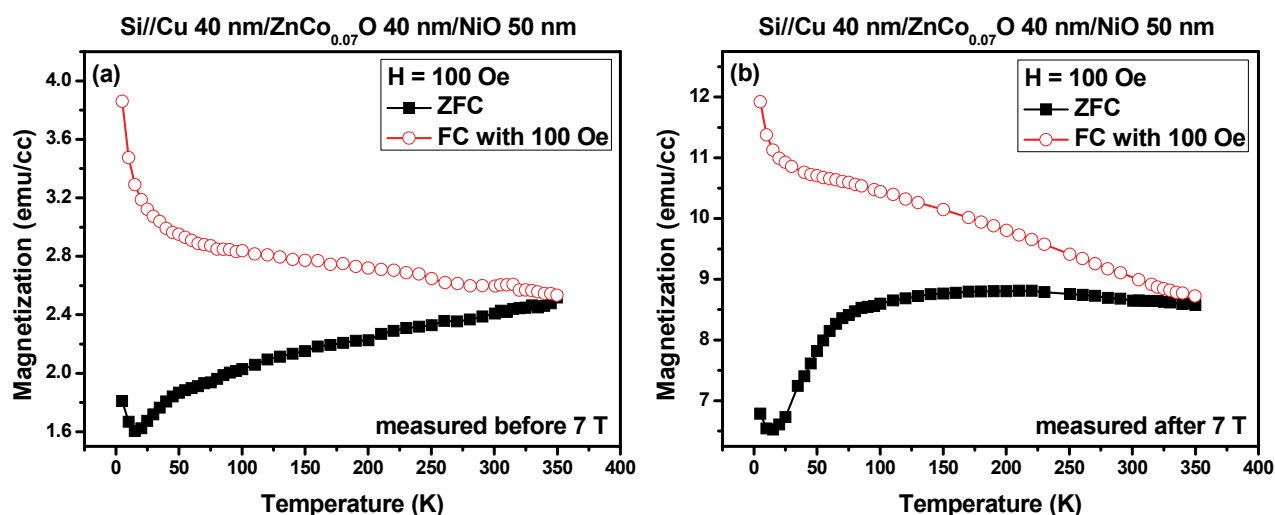


圖 4-30 比較 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品在(a)7 Tesla 量測前以及(b) 7 Tesla 量測後的磁化量對溫度關係圖

從圖 4-30 的兩個磁化量對溫度關係圖中，我們可以發現兩者的 ZFC 曲線有很顯著的差異。從 5 K 開始，兩者皆隨著溫度上升而樣品的磁化量值會先有一下降，接著隨著溫度的上升，兩者的磁化量值表現則截然不同，在 7 Tesla 量測之後，樣品的 ZFC 曲線不同於 7 Tesla 量測之前的 ZFC 曲線，明顯有一個類似於飽和的平台出現，這個結果驗證了樣品經過 7 Tesla 量測後，產生了本質上的變化。根據前述的實驗結果，對於 ZnCoO/NiO 系統在 7 Tesla 量測之後其飽和磁化量、矯頑場以及交換場的增加，我們初步的推測是由於樣品中有部分的 Co 彼此之間是以反鐵磁性排列(antiferromagnetic coupling)的狀態存在，當 ZnCoO/NiO 系統經過場冷到 5 K 之後，此時 NiO 在 ZnCoO/NiO 介面處會提供出較大的異向性能，因此而牽制住 ZnCoO 的磁矩。當樣品經過 7 Tesla 量測之後，原本在 ZnCoO/NiO 系統中部分以反鐵磁狀態排列的 Co，因為受到極大的外加磁場影響，使其之間轉換成鐵磁性排列(ferromagnetic coupling)，而此一狀態的維持可藉由 NiO 所提供的異向性能來達成，因此在單純的 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm 樣品中，經過 7 Tesla 量測後，仍然無法觀察到飽合磁化量以及矯頑場的變化。

#### 4-2-5 磁滯曲線偏移的機制來源

在前面章節的討論中，我們發現 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品在經過 7 Tesla 量測之後，其飽和磁化量、矯頑場以及交換場有定量上的變化。為了確認樣品在定性上是否同樣受到 7 Tesla 量測效應的影響而有所改變，因此接下來我們將重新確認樣品的磁性質表現。首先探討樣品受到場冷之後，其磁性質上的表現，圖 4-31 顯示了樣品分別經過 FC + 2 Tesla 以及 FC - 2 Tesla 之後的 5 K 磁滯曲線圖。從圖中可以發現場冷效應對於樣品的磁性表現影響跟之前的量測結果一致，也就是其磁滯曲線會有磁化量偏移以及交換場表現，並且兩者的偏移方向和場冷時對樣品所施加的磁場方向有關。

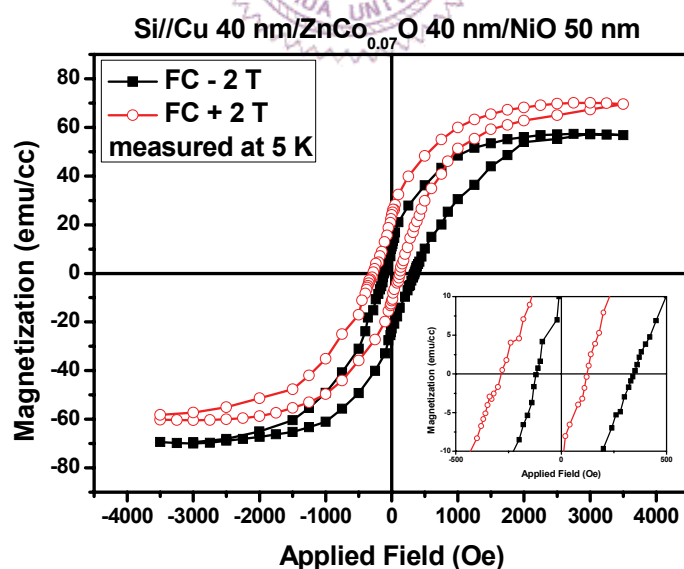


圖 4-31 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品受到不同場冷方向後的 5 K 磁滯曲線圖

初步確認了樣品對於場冷效應的表現之後，接下來我們改變對樣品的場冷強度，分別討論當樣品受到不同場冷強度時，對樣品的磁化量偏移、矯頑場以及交換場的影響。同樣地，將樣品從 350 K 做場冷到 5 K，而所使用場冷強度分別是從 -100 Oe 到 -50000 Oe，隨後量測樣品在 5 K 時的磁滯曲線圖，並且將其矯頑場以及交換場對場冷強度的關係整理於圖 4-32。從圖中可以看出，隨著場冷強度的增加，樣品的矯頑場以及交換場會先有一急遽的增加，隨後當場冷強度增加到 -5000 Oe 之後，樣品的交換場的增加幅度開始趨於平緩，而其矯頑場則是沒有太大的變化。

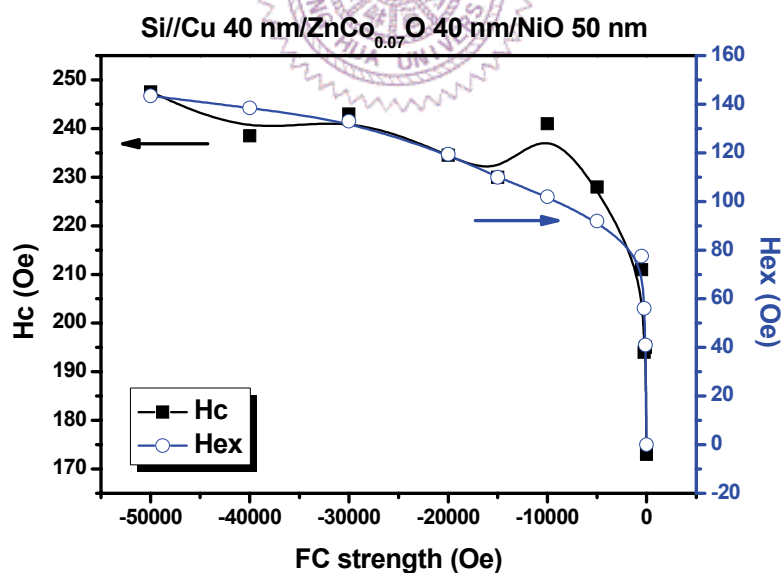


圖 4-32 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品經過 FC - 2

Tesla 之後，其矯頑場及交換場對溫度的關係圖

比較圖 4-21 以及圖 4-32 的量測結果，在之前的場冷強度對樣品矯頑場及交換場的關係圖中，我們發現矯頑場對於場冷強度的變化沒有太顯著的改變，但是和圖 4-32 的量測結果比較之後，我們可以判斷在圖 4-21 的量測中，矯頑場對於場冷強度的關係應該是已經處在一個接近飽和的狀態下。

接下來我們將比較樣品經過不同場冷強度後，其交換場以及磁化量偏移，也就是 $\Delta M$ ，對場冷強度的關係，其結果整理於圖 4-33 (a)。從圖中可以看出交換場和飽和磁化量偏移對於場冷強度的變化有著極為相近的趨勢，而將在不同場冷強度下，樣品磁滯曲線的(磁化量偏移)<sup>1/2</sup>對交換場作圖，結果如圖 4-33 (b)所示。從圖中可以發現，兩者的關係在實驗誤差範圍內是相當接近於線性關係的，而在文獻中也有類似的相關報導[47]，兩者的線性關係暗示著樣品經過場冷效應後而產生的磁滯曲線橫向以及縱向偏移，也就是交換場以及磁化量偏移，是由 ZnCoO/NiO 系統中的低溫冷凝磁矩(low temperature frozen spins)的貢獻，當其受到場冷效應降到低溫後，這些冷凝磁矩會沿著場冷時的磁場方向排列，並且在低溫下這些磁矩會具有很高的異向性能量，使其能維持自身的磁矩方向，也就是說，樣品經過場冷效應後，這些磁矩將隨著場冷強度的不同而有不同程度的序化。因此這些磁矩一方面就會貢獻到樣品整體的磁化量值表現，如此可以合理地解釋當

樣品經過場冷後，其飽和磁化量會因為不同場冷方向而有相對應的偏移方向，也就是說樣品會在沿著場冷時的磁場方向有一小的飽和磁化量值增加，因為有額外的磁矩也排列在這個方向上。另一方面，這些在低溫下極為不易隨著量測磁場改變而翻轉的冷凝磁矩會形成所謂的牽制中心(pinning site)，而這些牽制中心在微觀上會對 ZnCoO 中容易隨著量測磁場翻轉的磁矩產生交互作用，使其在翻轉上的困難度增加，所以此時就需要更大的外加磁場來使這些磁矩翻轉，因此就會使樣品在巨觀上產生磁滯曲線的橫向偏移，也就是有交換場的表現。此外，在 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40nm 的樣品經過場冷後，並沒有發現其磁滯曲線有偏移的現象，這在某種程度上說明了在 ZnCoO/NiO 中，低溫冷凝磁矩的來源和 NiO 之間存在著一定的關聯性。

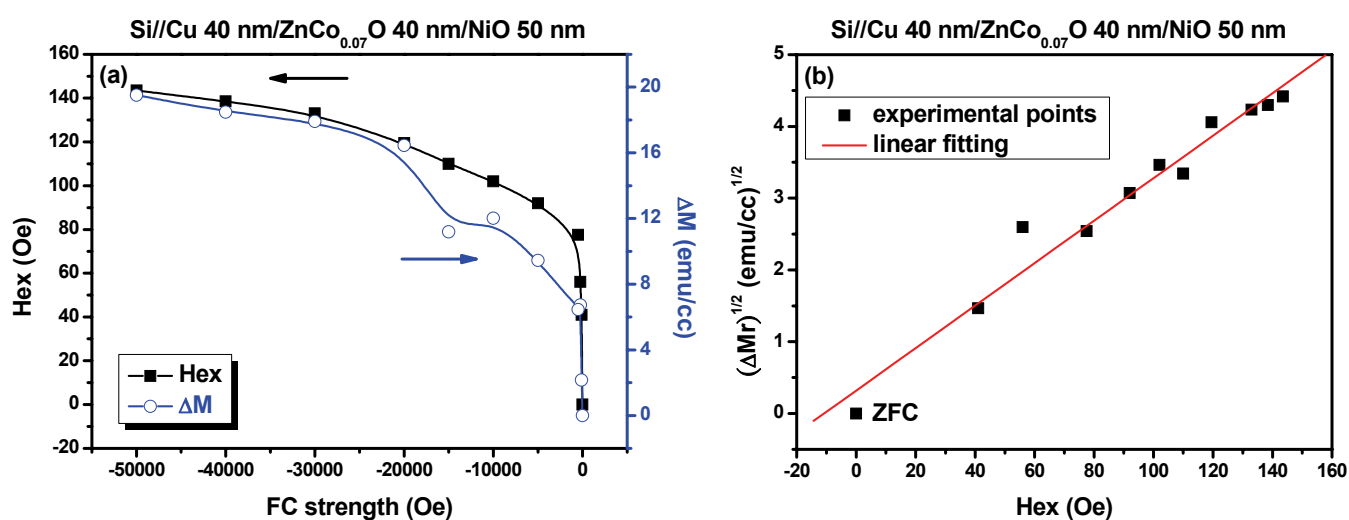


圖 4-33 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品在不同場冷強度下的(a)交換場與 $\Delta M$ 對場冷強度的關係及(b)交換場對 $\Delta M$ 的關係

為了更進一步地了解系統中的這些低溫冷凝磁矩，我們將樣品從 350 K 做了兩段式的冷卻過程到 5 K，並觀察其磁滯曲線的表現。圖 4-34 (a) 為樣品從 350 K 做 FC - 2 Tesla 到 50 K，再從 50 K 做零場冷到 5 K 後所量到的磁滯曲線圖，圖 4-34 (b) 為其小場放大圖。從圖中可以看出樣品的矯頑場接近 164 Oe，其交換場也有 41 Oe 左右，但是從圖 4-34 (a) 中並沒有看到明顯的磁滯曲線縱向偏移，這樣的結果一方面說明了要使系統中這些低溫冷凝磁矩產生序化現象，樣品必須利用場冷的方式降溫到至少 50 K 以下。另一方面，此結果也說明了系統中除了序化後的磁矩能使其產生磁滯曲線的偏移外，另外還有一般鐵磁/反鐵磁系統的交換場表現，也就是由 NiO 的反鐵磁異向性 (antiferromagnetic anisotropy) 所貢獻出的磁滯曲線橫向偏移。

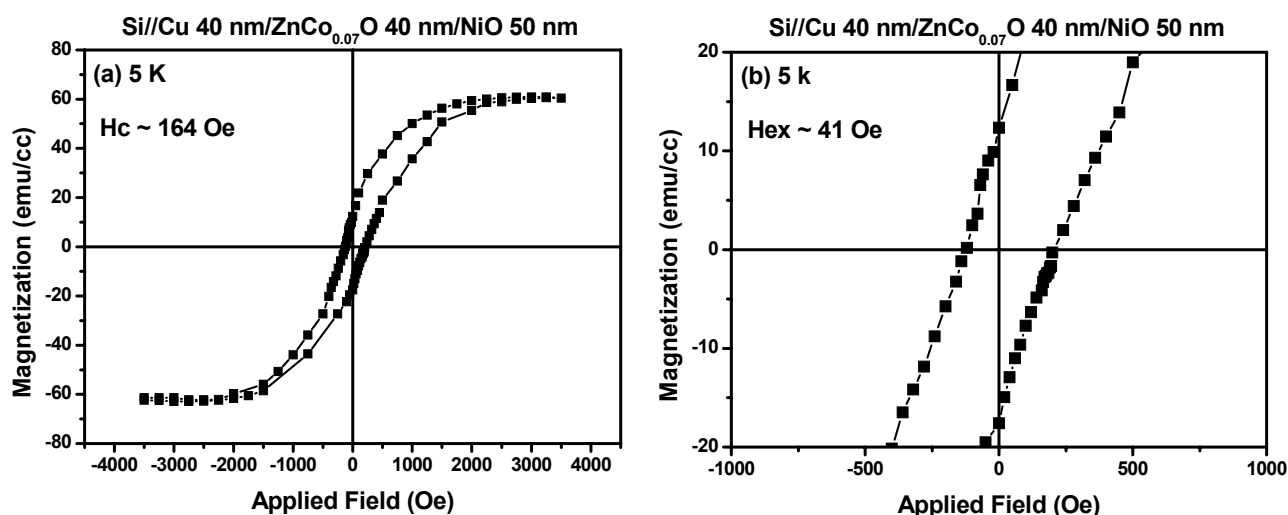


圖 4-34 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品經過兩段式冷

卻之後的(a) 5 K 磁滯曲線圖及(b)其小場放大圖

接下來我們將討論溫度對樣品的磁化量偏移、矯頑場以及交換場的效應，首先將樣品從 350 K 做 FC - 2 Tesla 到 5 K 後，隨後逐漸將樣品升溫，並且量測不同在溫度下樣品的磁滯曲線圖。圖 4-35 整理了樣品的矯頑場以及交換場對溫度的關係，從圖中可以看出，隨著溫度的上升，樣品的矯頑場以及交換場都有下降的趨勢，其中交換場在低溫段的部分，也就是溫度小於 50 K 的範圍內，隨著溫度的上升，交換場有急遽的下降趨勢，而在矯頑場方面，隨著溫度的升高，其在低溫段的變化趨勢不若交換場急遽，且其下降的趨勢則是比較接近指數衰退(exponential decay)。

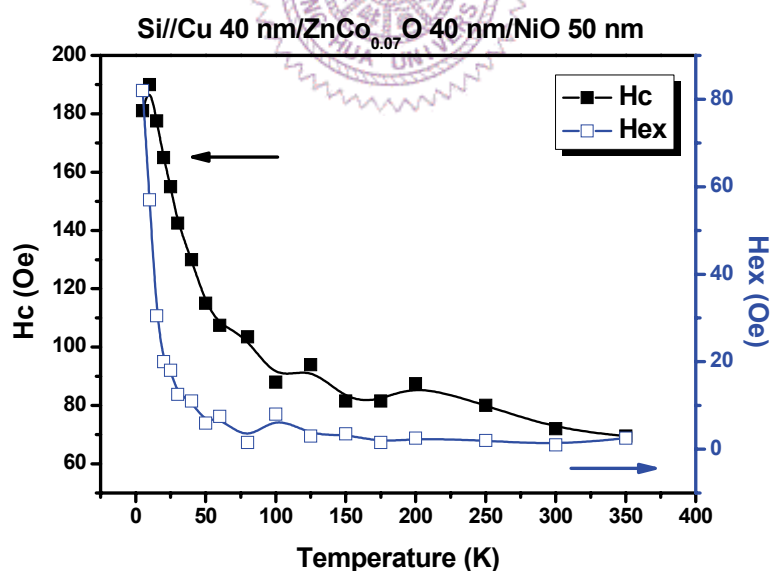


圖 4-35 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品經過 FC - 2 Tesla 之後的矯頑場及交換場對溫度的關係圖

延續前面的討論，圖 4-36 (a)則是比較在不同溫度下，樣品的交換場以及 $\Delta M$ 對溫度的關係，從圖中可以看出兩者對於溫度有相近的趨勢，尤其是在低溫段的部分兩者的趨勢更是接近，這表示了在低溫下，樣品的交換場和 $\Delta M$ 兩者有著密切的關聯。圖 4-36 (b)則是在 50 K 以內，樣品的 $\Delta M$ 對交換場的關係圖，從圖中可以看出兩者呈現接近線性的關係，同樣的現象在文獻中也有類似的報導[48]、[49]。而樣品在不同溫度下的交換場及 $\Delta M$ 的線性關係，說明了系統中存在著一些額外的低溫冷凝磁矩，當這些磁矩受到場冷作用後才會貢獻出作用，並且隨著樣品溫度的升高，這些磁矩受到熱擾動的影響，逐漸減弱其異向性的強度以及其成為牽制中心的效應，並且開始呈現散亂的排列狀態。圖 4-36 (b)的結果再次驗證了從圖 4-33 (b)所得到的結論。

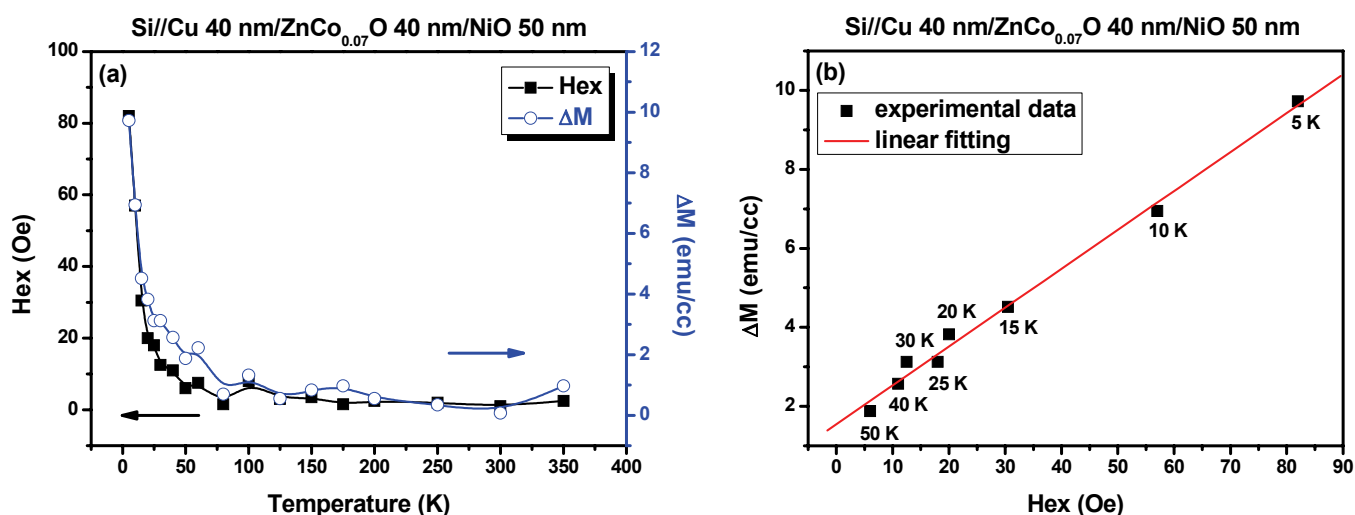


圖 4-36 Si//Cu 40 nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50 nm 樣品經過 FC - 2

Tesla 之後的(a)交換場與 $\Delta M$ 對溫度的關係及(b)交換場對 $\Delta M$ 的關係

總結由前面實驗結果所得到的結論，我們可以合理地推測，當 Si//Cu 40nm/ZnCo<sub>0.07</sub>O 40 nm/NiO 50nm 的樣品經過場冷到低溫後，在 ZnCoO/NiO 系統中存在著兩種造成磁滯曲線偏移的可能機制，如圖 4-37 所示。當樣品經過場冷到低溫後，其中的低溫冷凝磁矩將會沿著場冷方向排列，並且成為系統中的牽制中心，因此將同時貢獻出磁滯曲線的橫向以及縱向偏移。另一方面，場冷效應也會設定樣品中 NiO 層的反鐵磁異向性，並且使得 ZnCoO/NiO 系統貢獻出交換異向性，進而使其磁滯曲線產生橫向的偏移，也就是使樣品有交換場的表現。

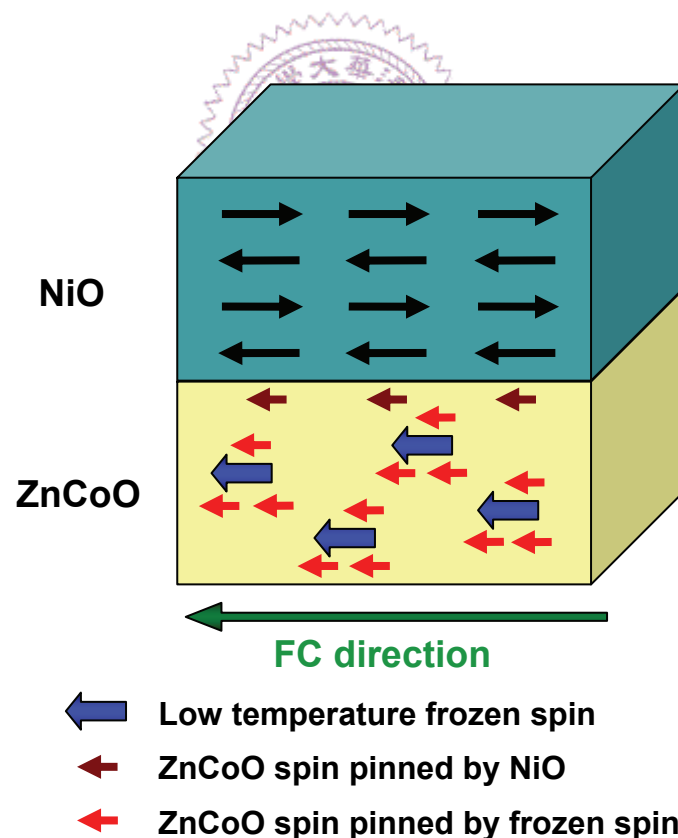


圖 4-37 ZnCoO/NiO 系統經過場冷效應後其磁矩狀態示意圖