

以磁電阻量測探討微米級鎳平板線之磁異向性

學生：王惠潔

指導教授：許世英 副教授

國立交通大學電子物理系

大綱

本研究工作主要在以磁電阻量測，探討鎳微米平板線之磁異向性，及微結構中的磁矩翻轉性質。樣品的尺度和形狀在鎳平板線之磁性行為中有重要的影響性，因此實驗中以微影技術製作三種系列線長分為20、30，及60微米的樣品，線寬範圍由0.18微米變化至10微米，厚度則為25或30奈米。

鎳微米平板線之飽和磁電阻可用考量s-d軌域自旋軌道耦合的異向性磁阻描述，因而針對三種系列的鎳平板線，可以平行膜面方向之磁場量測其磁電阻，並透過磁力顯微影像掃描樣品在室溫下，外加磁場平行鎳平板線的殘磁態磁區影像，以了解樣品內部之磁異向性及磁矩翻轉行為。令人驚訝的是，實驗結果顯示根據異向性磁電阻效應，微米級鎳平板線之磁易軸趨近於樣品線之短軸，而非隨樣品線之形狀異向性而位於其長軸方向。

線寬大於2微米之鎳平板線呈現較混亂的典型多磁區結構，其磁區翻轉形態為已知的磁區擴張。而樣品線寬在1微米以下之樣品依據磁電阻變化形式可分為另外兩種類型；線寬在0.6微米以上之鎳平板線，其在兩高磁場往零磁場方向掃取之磁電阻曲線時在大磁場下呈現同調翻轉（Coherent rotation），於殘磁態則展現一不可逆之交錯形式，在曲線之不可逆部分形成四個區間；線寬在0.6微米以下之鎳平板線，在大磁場下也同樣呈現同調翻轉的形式，在殘磁態附近之磁電阻

展現出類似蝴蝶翅膀的圖形。

為了解線寬在 1 微米以下之鎳平板線其樣品形狀異向性的貢獻，文中分析樣品之殘磁態電阻以及 Coherent rotation 部分磁電阻形態與其長寬比之關係；並對一系列不同線寬 ($w=0.2\sim 4.9\mu\text{m}$)，長度約為 $21\mu\text{m}$ 的鎳平板線陣列，在殘磁態進行室溫磁力影像 (Magnetic Force Microscope, MFM) 掃描。透過掃描影像確定磁易軸偏向短軸，證實本系列鎳平板線的形狀異向性無法將磁易軸轉向長軸。推論鎳平板線磁易軸趨近於短軸的可能原因為磁彈性異向能，其來自於樣品與 SiN/Si 基板間因晶格常數不同而產生的晶格錯位。



Magnetic Anisotropies of Patterned Ni planar wires by Magnetoresistance Measurement

Student : Hui-Chieh Wang

Advisor : Dr. Shih-Ying Hsu

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University
Hsinchu, 30010, Taiwan

Abstract

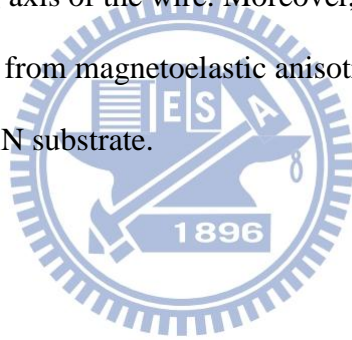
The main purpose of this research is to investigate the magnetic properties of patterned sub-micrometric Ni planar wires, including the magnetic anisotropies and microstructure inside. The geometry of the wire plays an important role in these magnetic behaviors. Therefore, in this work, individual Ni wires with different geometries (width $w=0.2\sim 10.0\mu\text{m}$, length $L=20\sim 60\mu\text{m}$, and thickness $t=25$ or 30nm) were systematically investigated to explore their magnetic properties.

We have measured the in-plane magnetoresistance of a series of sub-micrometric nickel planar wires at $T=10\text{K}$ to study the magnetic anisotropy, and scanned the magnetic force microscopic images to find out the microstructure of the wires. Strikingly, demonstrated by anisotropy magnetoresistance effect, our results indicate that samples have the strong transverse magnetic anisotropy despite the enhancement of longitudinal shape anisotropy.

The wires of large width ($w > 2\mu\text{m}$) have typical multi-domain structure. The magnetization reversal is via the well-known domain expansion and all behaviors are under expectation. Furthermore, the narrow wire with $w < 1\mu\text{m}$, according to their behaviors near the remnant state, are cataloged into two regions. For larger width with $w > 0.6\mu\text{m}$, the magnetoresistance (MR) curves exist coherent rotation background at

large field, but the curve scanned from positive to negative magnetic field and the opposite ones cross near the remnant states, forming four packets for the irreversible part; for wire width with $w < 0.6\mu\text{m}$, however, existing the butterfly shoulder-shaped near the remnant states.

To find out the influences of shape anisotropy in the narrow wires with $w < 1.0\mu\text{m}$, the configurations near remnant state and the form of the coherent rotation, namely, the reversible part of the MR curves, are analyzed in details. Also, a series of magnetic force microscope images of Ni planar wires ($L = 21\mu\text{m}$, $w = 0.2 \sim 4.9\mu\text{m}$) were taken at the remnant state at room temperature. Our results demonstrate that the easy axis tends to lie along the short axis of wire. The strong shape anisotropy is not able to turn the easy axis to the long axis of the wire. Moreover, the transverse direction of the easy axis can be resulted from magnetoelastic anisotropy due to the lattice mismatch between Ni and SiN substrate.



誌謝

在低溫物理實驗室裡摸索，跌跌撞撞轉眼就是四年。如今能將經驗出版成論文，心中懷有無盡的感恩。

一路以來，總有實驗室裡的大家長許世英老師照顧組裡的大小蘿蔔頭，不僅訓練我們的實驗技術，更注重實驗的精神與態度；老師總是教導我們以正面積極樂觀面對研究過程中的每一個挫折，並捲起衣袖，和我們一起在實驗系統前並肩作戰。她說：「既然要做，就應該把事情做好才離開。」是這樣的堅持讓我當初決定加入低溫實驗室，也是這句話在學習的旅途上陪伴我直到現在，一輩子受用。

從大二暑假進實驗室，多虧鍾廷翊學長的指引，滿足我在實驗時的每一個好奇心；讓我從對實驗室完全不熟悉開始，逐漸成長茁壯；以及林子諒學長主動犧牲夜晚睡眠時間做實驗，讓我得以在白天時間使用系統；宗霖也在指導我製程技術時傳授了許多小秘訣；郭昌洋學長畢業後甚至特地回實驗室指導我熟悉低溫系統操作。直至進入碩士班時，又有廖碧珊學姊一起討論研究中產生的想法，有柯昇協助製作樣品，以及智鈞一道做同領域的研究；讓我在求知的道路上獲得許多幫助，並深刻體會到自己並不孤單。

也幸虧有低溫量子組的林欣毅學長、莊勝豪學長、馨慧在實驗室生活的陪伴。那些大家一起在實驗系統運轉噪音中談笑風生的日子，以及實驗進行時的狂熱和源源不絕的想法討論，一直是我在實驗室中最快樂的時光。

我很幸運，實驗室外還有最支持我的父母親及家人，保我衣食無虞得以專心研究；並有關心我的學長姐學弟妹，以及社團的朋友們；做為我在挫折時生活上最得力的支援，心靈上最堅固的依靠。

由衷地感謝每一個人，感謝天；因為種種緣分聚足而使此篇論文得以順利生產。如果讀者能從中得到一點收穫，無論是研究內容或者對於這份研究的熱誠，讓這個脈絡傳承下去，成為社會的墊腳石；那就是這篇論文生產的意義，也是我最大的快樂，和繼續邁開腳步前進的理由。

目錄

中文摘要	I
英文摘要	III
誌謝	V
目錄	VI
圖目錄	VIII
表目錄	XI
第一章 緒論	1
第二章 理論背景	3
2.1 鐵磁性材料的磁區結構及磁矩翻轉	3
2.2 磁性相關能量	6
2.2.1 靜磁能 (Magnetostatic energy)	7
2.2.2 交換能 (Exchange energy)	10
2.2.3 晶格異向性能 (Crystalline anisotropy energy)	10
2.2.4 磁致伸縮效應與磁彈性能 (Magnetoelastic energy)	11
2.2.5 茲曼能 (Zeeman Energy)	12
2.3 低維度鎳線的相關研究背景	12
第三章 實驗方法	16
3.1 樣品製作流程及微影技術	16
3.3.1 光微影製程	17
3.3.2 電子束微影製程	21
3.2 磁電阻量測與 He ⁴ 低溫系統	22

3.2.1	He ⁴ 低溫系統	-----	22
3.2.2	磁電阻量測	-----	24
3.3	磁力顯微鏡	-----	24
第四章	實驗結果與討論	-----	26
4.1	鎳材料的基礎特性及電阻-溫度關係	-----	26
4.1.1	鎳的材料特性參數	-----	26
4.1.2	鎳平板線的電阻-溫度特性	-----	27
4.2	以低溫磁電阻歸納鎳平板線之磁性行為	-----	28
4.2.1	形狀異向性主導之單一磁區結構所展現的磁電阻	-----	28
4.2.2	形狀異向性主導之單一磁區結構所展現的磁電阻	-----	29
4.2.3	三種類型之磁電阻曲線特性	-----	31
4.3	形狀異向性對鎳平板線磁性行為之影響	-----	34
4.3.1	異向性磁阻效應與磁矩翻轉情形	-----	34
4.3.2	樣品長寬比對 Coherent rotation 磁阻背景曲線的影響	-----	36
4.3.3	樣品長寬比與殘磁態電阻之關聯	-----	44
4.3.4	極小線寬之磁性行為	-----	47
4.4	殘磁態下鎳平板線之磁力影像	-----	48
4.4.1	殘磁態的鎳平板線磁力影像	-----	48
4.4.2	由磁電阻曲線及磁力影像推斷磁矩翻轉	-----	49
4.5	鎳平板線不同區間之磁區翻轉差異	-----	52
第五章	結論與未來研究方向	-----	56
	參考文獻	-----	58

圖目錄

圖 2.1	圓盤狀及平板線的樣品常見的磁區結構與其樣品尺寸大小的關係[16]	3
圖 2.2	磁矩方向翻轉 180 度時，依序偏離原平面，經過垂直平面然後再依序轉回的 Bloch wall	4
圖 2.3	Aharoni 模型針對鎳（右）及鎳鐵合金（左）在最低自由能時的殘磁態所做的單一磁區及多磁區的尺寸分界預測	5
圖 2.4	單一磁區鐵磁性樣品在外加磁場大小改變時的磁矩翻轉形式；（a）為 Coherent rotation，（b）為 Buckling rotation，（c）為 Curling rotation	6
圖 2.5	長型橢球樣品半徑與內部磁矩翻轉形式的關係	6
圖 2.6	扁長型橢球（左，Prolate spheroid）與細長型橢球（右，Slender spheroid）之模型示意圖；及其在各軸向上的去磁參數（Demagnetizing factor）與樣品尺寸之關係	9
圖 2.7	直徑 60nm，線長 6000nm 之鎳奈米線在室溫下，外加磁場與樣品線夾角分別為 $\theta = 15^\circ$ 及 $\theta = 45^\circ$ 之磁電阻曲線[5]	13
圖 2.8	線寬為 70nm 的鎳線在 $T=5K$ （左）和 $T=300K$ （右）之外加磁場方向平行線軸（ \parallel ）與垂直線軸（ \perp ）的遲滯曲線[11]	14
圖 2.9	鎳在各溫度下的遲滯曲線[12]	15
圖 3.1	樣品製作流程圖	17
圖 3.2	左方為經由光微影製程製作之外圍放射狀金電極。右方為樣品之掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）影像	18
圖 3.3	晶圓經光阻塗佈後的側視圖	19
圖 3.4	晶圓曝光時的側視示意圖	19
圖 3.5	顯影步驟完成後，晶圓與光阻的側視情形	20
圖 3.6	在晶圓上蒸鍍 100Å 厚的鈦及 600Å 厚的金之後的側視圖	21

圖 3.7	晶圓經過舉離過程洗除光阻後，剩下表面設計圖案的金屬電極 -----	21
圖 3.8	^4He 低溫系統內部構造[28] -----	23
圖 4.1	鎳平板線樣品電阻隨溫度變化之關係圖 -----	28
圖 4.2	$w=5.0\mu\text{m}$, $L=60\mu\text{m}$, $t=30\text{nm}$ 鎳平板線於不同 θ 下展現的磁阻曲線 ---	29
圖 4.3	鎳鐵合金平板線 ($w=0.21\mu\text{m}$, $L=20\mu\text{m}$, and $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$ 時的磁電阻圖形[28] -----	30
圖 4.4	鎳鐵合金平板線 ($w=0.2\mu\text{m}$, $L=20\mu\text{m}$, and $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$, $\theta=45^\circ$ 時的單向磁電阻圖形[28] -----	31
圖 4.5	$w=0.55\mu\text{m}$, $L=60\mu\text{m}$ 之鎳平板線在 $T=10\text{K}$ 之磁電阻曲線 (左) 與未飽和磁電阻擬合圖形(右) -----	35
圖 4.6	微米鎳平板線之飽和磁電阻與 $\cos^2\theta$ 關係 -----	36
圖 4.7	鎳微米平板線 ($w=0.18\mu\text{m}$, $L=60\mu\text{m}$, $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$ 之磁阻圖形 -----	37
圖 4.8	類別 C 系列中數種線寬之鎳平板線在 $\theta=30^\circ$ 與 $\theta=60^\circ$ 時，於 $L=20\mu\text{m}$, $L=30\mu\text{m}$, $L=60\mu\text{m}$ 下展現的磁電阻特性 -----	39
圖 4.9	$L=20\mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品於 $\theta=15^\circ$ 時，在不同線寬下所展現之磁電阻曲線 -----	40
圖 4.10	$L=20\mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品在外加磁場 H 與線長軸夾角 $\theta=45^\circ$ 、 70° ，與 75° 下，於 $H=1000\text{ Oe}$ 時之磁電阻變化率隨樣品線寬之分布 ----	41
圖 4.11	$L=30\mu\text{m}$ 及 $L=60\mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品在外加磁場 H 與線長軸夾角 $\theta=45^\circ$ 與 $\theta=75^\circ$ 下，於 $H=1000\text{ Oe}$ 時之磁電阻變化率隨樣品線寬之分布 -----	43
圖 4.12	$L=60\mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品在外加磁場 H 與線長軸夾角 $\theta=15^\circ$ 與 $\theta=75^\circ$ 時，不同線寬下所展現之磁電阻曲線 -----	44
圖 4.13	$L=20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 與 $60\mu\text{m}$ 之樣品在不同線寬下，殘磁態電阻變化率和外加磁場與樣品線夾角 θ 之分布關係 -----	46

圖 4.14	$\theta = 15^\circ$ 時樣品之殘磁電阻變化率隨長寬比分布關係	-----	47
圖 4.15	$L = 21\mu\text{m}$ ，不同線寬之鎳平板線樣品之及 AFM (左) 及 MFM (右) 掃描影像	-----	49
圖 4.16	依圖 4.15 之 MFM 影像推測類別 B (左) 及類別 C (右) 之鎳平板線樣品內部磁矩排列情形	-----	50
圖 4.17	類別 B 之鎳平板線 ($w = 1.0\mu\text{m}$, $L = 20\mu\text{m}$, and $t = 30\text{nm}$) 在 $T = 10\text{K}$ ， $\theta = 15^\circ$ 與 $\theta = 90^\circ$ 時之磁電阻圖形	-----	50
圖 4.18	類別 C 之鎳平板線 ($w = 0.6\mu\text{m}$, $L = 30\mu\text{m}$, and $t = 30\text{nm}$) 在 $T = 10\text{K}$ ， $\theta = 15^\circ$ 及 $\theta = 90^\circ$ 時之磁電阻圖形	-----	52
圖 4.19	鎳平板線及跨越其上的金電極	-----	53
圖 4.20	$w = 0.38\mu\text{m}$ ， $L = 20\mu\text{m}$ 及 $L = 30\mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品分別在 $\theta = 30^\circ$ 、 60° 及 75° 時，平板線不同區段間之磁電阻差異	-----	55



表目錄

表 3.1	樣品熱蒸鍍金屬時使用的環境條件	20
表 4.1	鎳塊材的各項基礎特性參數	27
表 4.2	類別 A、B 及 C 之磁電阻曲線變化形式及對應的樣品系列	33



第一章 緒論

微米尺度以下的磁性物質近年來在自旋電子學領域，以及資料儲存（例如：隨身碟、硬碟、磁阻式隨機存取記憶體（(Magnetoresistive random access memory, MRAM)）……等固態元件）有非常廣泛的應用；在這些應用中，磁性行為扮演非常重要的角色。而奈米結構製作技術的快速發展導致新的物理機制及磁性行為不斷地被發現，進而刺激了許多相關的理論及應用上的研究。[1]-[4]

在多數的低維度磁性結構中，同調翻轉（coherent rotation）及螺旋狀翻轉（curling rotation）兩種物理機制主導了磁矩翻轉形式[2]-[5]；此兩種機制與磁異向性能量深切相關，而磁異向性能又細分為形狀異向性能、晶格異向性能，及磁彈異向性能。本實驗室先前的研究及相關文獻[3],[4]中，鎳鐵合金的高長寬比微米線主要由形狀異向性能主導，後兩項異向性可忽略不計；然而對鎳微米線而言，其磁性行為眾說紛紜；根據先前的研究成果[5]-[7]，形狀異向性能主導導致磁易軸在鎳微米線的長軸，但更新的研究發現[8]-[12]，對於特定製程製作的鎳微米線，磁彈異向性能可能導致易軸方向及磁性行為的改變。於是乎，鎳微米線的磁性行為與其結構及形狀究竟有何相關？成為一個十分有趣的議題！

此次研究過程裡，我們製作一系列不同長寬比的鎳微米平板線，透過磁電阻量測的方式探討樣品內部的磁矩翻轉行為；並進一步研究形狀異向性及磁彈異向性兩種不同物理機制對鎳微米線磁性行為所產生的影響。

接下來的第二章節中，基礎理論背景介紹影響低維度磁性系統內磁區結構的相關能量；包括上述所提的各種磁異向性能。在對樣品進行理論分析時，將平板線近似於橢球模型進行磁矩翻轉形式的討論。

不同的樣品製程影響了磁性物質的磁矩翻轉行為，因此第三章將說明鎳微米平板線樣品的形成，其中包含微影技術，及蒸鍍舉離步驟。本章節也將介紹樣品的量測機制和方法；為了降低磁性樣品受溫度的影響，實驗中使用 ^4He 低溫系統

對樣品進行降溫，本章節除描述此套低溫系統外，尚包含低溫磁電阻量測及磁力顯微鏡（MFM）影像。

實驗結果及討論，將詳細呈現於第四章節。本章一開始說明磁性材料鎳的基本特性，並透過量測樣品的電阻－溫度關係檢視其金屬性，確認樣品無明顯之無序性或缺陷；隨後以低溫磁阻量測結果分析數種長寬比的鎳微米平板線所展現的磁性行為，並依照其曲線形式將其歸納為三大類別；進一步分析樣品的形狀異向性對此三大類別之樣品在磁電阻曲線展現之可逆部分 **Coherent rotation** 以及不可逆部分之殘磁電阻所造成的影響，並和先前的研究及文獻比較磁性行為上的差異；最後探討鎳微米平板線各區間磁矩翻轉情形的不同。

第五章將針對本次研究工作做總結，並建議未來可繼續研究的方向和題材。



第二章 理論背景

磁性材料內部的磁區微結構以及磁矩翻轉行為，是一連串磁性相關能量互相抗衡的結果。材料內部的磁矩暫態即為最低能態。[1][13]本章將分為三個小節，第一節將針對鐵磁性材料說明其內部的磁區微結構，其與磁性樣品尺寸的關係，以及對應的樣品內部磁矩翻轉形式；第二節介紹幾種常見的磁性相關能量，包含靜磁能 (Magnetostatic energy)、交換能 (Exchange energy)、晶格異向性能 (Crystalline anisotropy energy)、磁彈性能 (Magnetoelastic energy) 以及茲曼能 (Zeeman Energy)，以能量觀點切入談論鐵磁性材料的磁性行為；第三節則介紹近期與本實驗中微米級鎳線的磁性行為相關之研究工作。

2.1 鐵磁性材料的磁區結構及磁矩翻轉

鐵磁性塊材中，最小的磁矩單位為原子。每個磁矩排列方向在外在環境影響下，有許多種不同形式的排列。根據材料內部的能量分布狀態而使某些區域的磁矩統一指向一個方向，即稱為磁區 (Magnetic domain) [14][15]。

磁區的大小一般約為微米等級，隨著樣品的形狀不同，其內部的磁區結構也有許多變化。例如存在於特定尺寸平板線中的封閉磁區 (Closure domain)、圓盤中的漩渦磁區 (Vortex) (圖 2.1)，及磁矩排列為葉片狀的磁區 (Leaf state) 等等。

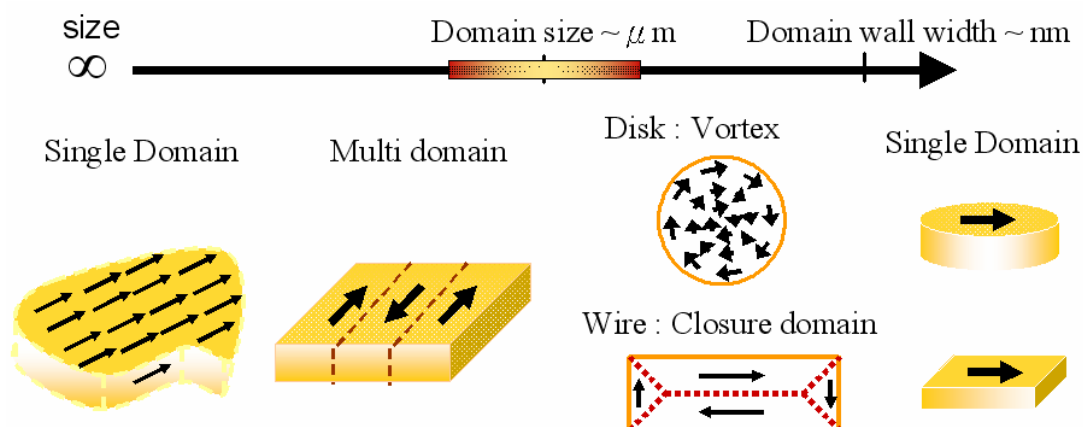


圖 2.1 圓盤狀及平板線的樣品常見的磁區結構與其樣品尺寸大小的關係[16]。

在有多個磁區（Multi-domain）的磁性樣品中，磁區之間存在磁矩的翻轉過渡，稱為磁壁（Domain wall）；一般磁壁厚度約為奈米等級。不同磁區間的磁壁中，磁矩翻轉也有特定的形式；最經典的兩種磁壁分別為 Bloch wall（圖 2.2）以及 Néel wall。

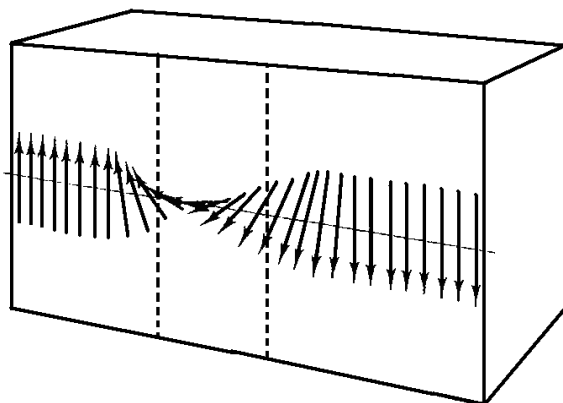


圖 2.2 兩磁區磁矩方向翻轉 180 度時，磁矩分布從一邊界依序偏離原平面，經過垂直平面然後再依序轉回另一邊界；圖為 Bloch wall。

樣品的尺寸大小，決定了內部可存在多個磁區（multi-domain）或單一磁區（single domain）。針對本次研究工作的鎳微米平板線，以長型橢球作為樣品近似的 Aharoni 模型[17]在最低自由能的殘磁態（Remanence）時，對單一磁區的樣品尺寸有以下預期：

$$R \leq R_{critical} = \frac{q}{M_s} \sqrt{\frac{C}{N_a}} \quad (2-1)$$

其中 R 為橢球短軸半徑， $R_{critical}$ 為單一磁區的橢球尺寸上限， M_s 為單位體積的飽和磁矩大小， C 為交換常數（Exchange constant）， N_a 則為橢球長軸的去磁參數（Demagnetizing factor）； q 是 m （Aspect ratio）的函數，表示為：

$$q = 1.8412 + 0.48694/m - 0.11381/m^2 \quad (2-2)$$

由 Aharoni 模型，計算出以特定樣品尺寸為分界，樣品分別存在單一磁區與多磁區的特性。圖 2.3 為鎳及鎳鐵合金材料的特性參數代入 Aharoni 模型計算後的單一磁區的橢球尺寸上限 $R_{critical}$ 與其長寬比 (Aspect ratio) 的關係。

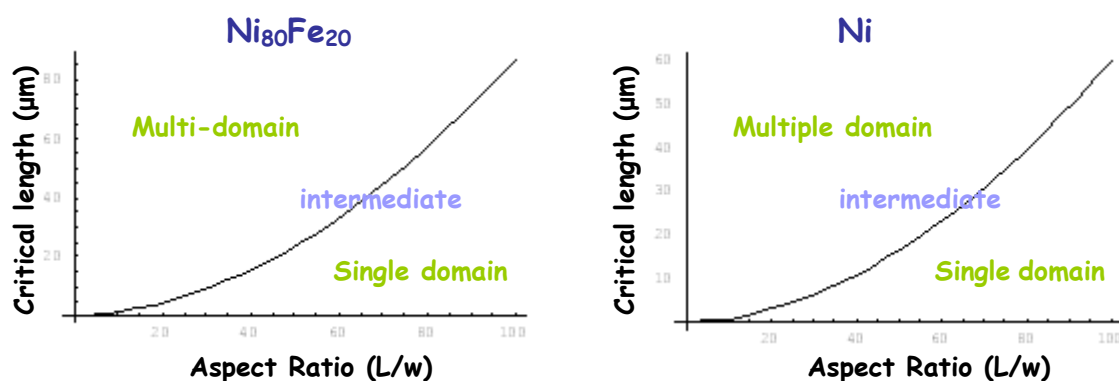


圖 2.3 Aharoni 模型針對鎳 (右) 及鎳鐵合金 (左) 在最低自由能時的殘磁態所做的單一磁區及多磁區的尺寸分界預測。

尺寸在微米等級以下的鐵磁性樣品，擁有單一磁區的特性；根據布朗靜態方程式 (Brown's static equation)，其樣品內的磁矩隨著外加磁場大小做翻轉時有數種不同的形式。在先前的研究中也證實，最常見的幾種翻轉過程為 Coherent rotation、Buckling rotation、Curling rotation[18][19]，如圖 2.4。

對長型橢球而言，其翻轉形式和樣品尺寸範圍存在如圖 2.5 所示的關係[20]。對單一磁區而言，交換長度 (Exchange length, $l_{ex} = \sqrt{C / Ms}$) 決定樣品內部的磁矩隨外加磁場改變而翻轉之形式。當橢球半徑 R 大於交換長度時，樣品以 Curling 形式翻轉，反之則為 Coherent rotation；而 R 為交換長度時則出現 Buckling rotation，此種翻轉形式僅出現在另兩種形式間很小的範圍內，不易觀察。

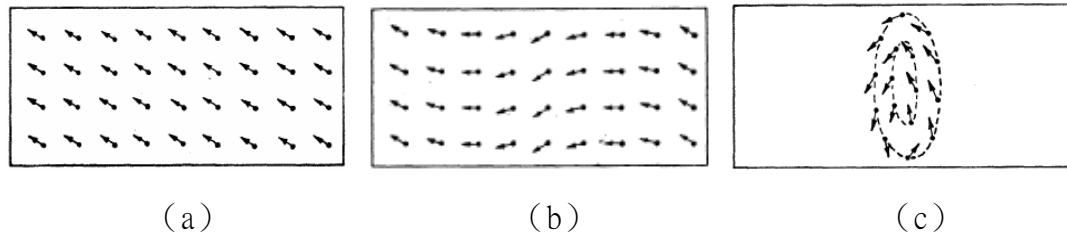


圖 2.4 單一磁區鐵磁性樣品在外加磁場大小改變時的磁矩翻轉形式；(a) 為 Coherent rotation，(b) 為 Buckling rotation，(c) 為 Curling rotation。

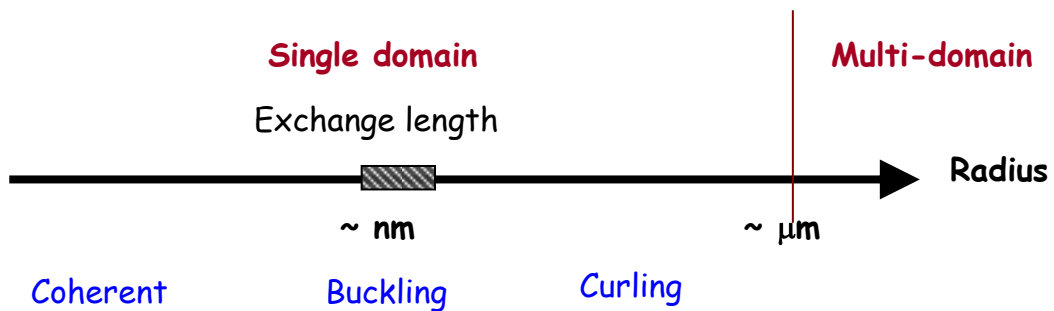


圖 2.5 長型橢球樣品半徑與內部磁矩翻轉形式的關係。

2.2 磁性相關能量

鐵磁性樣品內部的磁矩排列方式，係依據各項磁性相關能量總和為最小值時的狀態呈現。本章開頭提到的幾種常見磁性相關能量皆影響微米鎳平板線樣品內部的磁矩排列方式[21][22]。

本次研究工作所製做之一系列微米鎳平板線之長寬比 (Aspect ratio) 多數皆在 50 以上，最大值為 330。因此在眾多能量項中，形狀異向性能 (Shape anisotropy energy) 主導特性清楚地顯現在磁電阻曲線當中，飽和磁電阻與外加磁場和樣品夾角的關係。

2.2.1 靜磁能（去磁能）(Magnetostatic energy, Stray field energy, or Demagnetizing energy)

靜磁能源自於磁偶極間的交互作用力（Dipole-dipole interaction）。根據馬克斯威爾方程式（Maxwell's equations），均勻的鐵磁性材料存在一磁化向量 \bar{M} ，必有外漏磁場（Stray field，或稱去磁場；demagnetizing field H_d ）。磁化向量之散度（Divergence）不為零，產生磁位能 ϕ ：

$$\nabla^2 \phi = -\nabla \cdot \bar{H} = \nabla \cdot \bar{M} \quad (2-3)$$

計算上式，得磁位能之解為：

$$\phi(r) = -\frac{1}{4\pi} \int_v \frac{\nabla \cdot \bar{M}(r')}{|r-r'|} dv + \frac{1}{4\pi} \int_s \frac{\bar{n} \cdot \bar{M}(r')}{|r-r'|} ds \quad (2-4)$$

由兩磁偶極 Mdv 與 H_d 間的交互作用力所產生之靜磁能可以下列形式表示：

$$E_{mag} = -\frac{1}{2} \int_v \bar{M} \cdot \bar{H}_d dv \quad (2-5)$$

現考慮一均勻磁化之橢球，三軸分別為 a ， b ，及 c ；其外漏磁場

$$H_d = -N_d M_s \quad (2-6)$$

N_d 為去磁張量（Demagnetizing tensor）。令三軸方向的去磁參數分別為 N_a 、 N_b 、 N_c ，其形式可寫為[23]：

$$N_a = 2\pi abc \int_0^\infty \frac{(a^2 + \eta)^{-1}}{\sqrt{(a^2 + \eta)(b^2 + \eta)(c^2 + \eta)}} d\eta \quad (2-7)$$

同理寫出 N_b 、 N_c ，可計算出三軸方向之去磁參數總和恆為定值：

$$N_a + N_b + N_c = 4\pi \quad (2-8)$$

根據三軸 a 、 b ，及 c 的不同關係，橢球有以下三個特例[24]；分別為球體 (Sphere)、扁長型橢球 (Prolate spheroid)，及細長型橢球 (Slender spheroid)，後兩者如圖 2.6。上述三個特例其三軸方向的去磁參數分別如以下說明：

1. 球體 (Sphere)， $a=b=c$

$$N_a = N_b = N_c = \frac{4\pi}{3} \quad (2-9)$$

2. 扁長型橢球 (Prolate spheroid)， $c \gg a=b$

$$N_a = N_b = 4\pi \frac{m}{2(m^2-1)} \times \left[m - \frac{m}{2(m^2-1)^{\frac{1}{2}}} \times \ln \left(\frac{m + (m^2-1)^{\frac{1}{2}}}{m - (m^2-1)^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \quad (2-10)$$

$$N_c = 4\pi \frac{1}{m^2-1} \times \left[\frac{m}{2(m^2-1)^{\frac{1}{2}}} \times \ln \left(\frac{m + (m^2-1)^{\frac{1}{2}}}{m - (m^2-1)^{\frac{1}{2}}} \right) - 1 \right]$$

3. 細長型橢球 (Slender spheroid)， $c \gg a > b$

$$\begin{aligned} N_a &= 4\pi \frac{b}{a+b} - \frac{1}{2} \frac{ab}{c^2} \ln \left(\frac{4c}{a+b} \right) + \frac{ab(3a+b)}{4c^2(a+b)} \\ N_b &= 4\pi \frac{a}{a+b} - \frac{1}{2} \frac{ab}{c^2} \ln \left(\frac{4c}{a+b} \right) + \frac{ab(a+3b)}{4c^2(a+b)} \\ N_c &= 4\pi \frac{ab}{c^2} \left[\ln \frac{4c}{a+b} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2-11)$$

本研究中的鎳微米平板線有高長寬比 $m > 10$ 。在對樣品作理論分析時，使用

扁長型橢球作為近似：令鎳平板線長 $20\ \mu\text{m}$ 為 $2c$ ，厚度 $300\ \text{\AA}$ 為 $2b$ ；且 $N_a = 2\pi$ ， $N_c = 0$ 。此能量項與樣品形狀明確相關，故又稱為形狀異向性能(Shape anisotropy energy)。

計算 (2-5) 與 (2-6) 式，得去磁能 E_d 為：

$$E_d = \frac{1}{2} N_d M_s^2 \quad (2-12)$$

故得一均勻磁化的扁長形橢球中，兩軸方向的形狀異向性能差值為：

$$K_u = \Delta E_d = E_a - E_c = \frac{1}{2} (N_a - N_c) M_s^2 = \pi M_s^2 \quad (2-13)$$

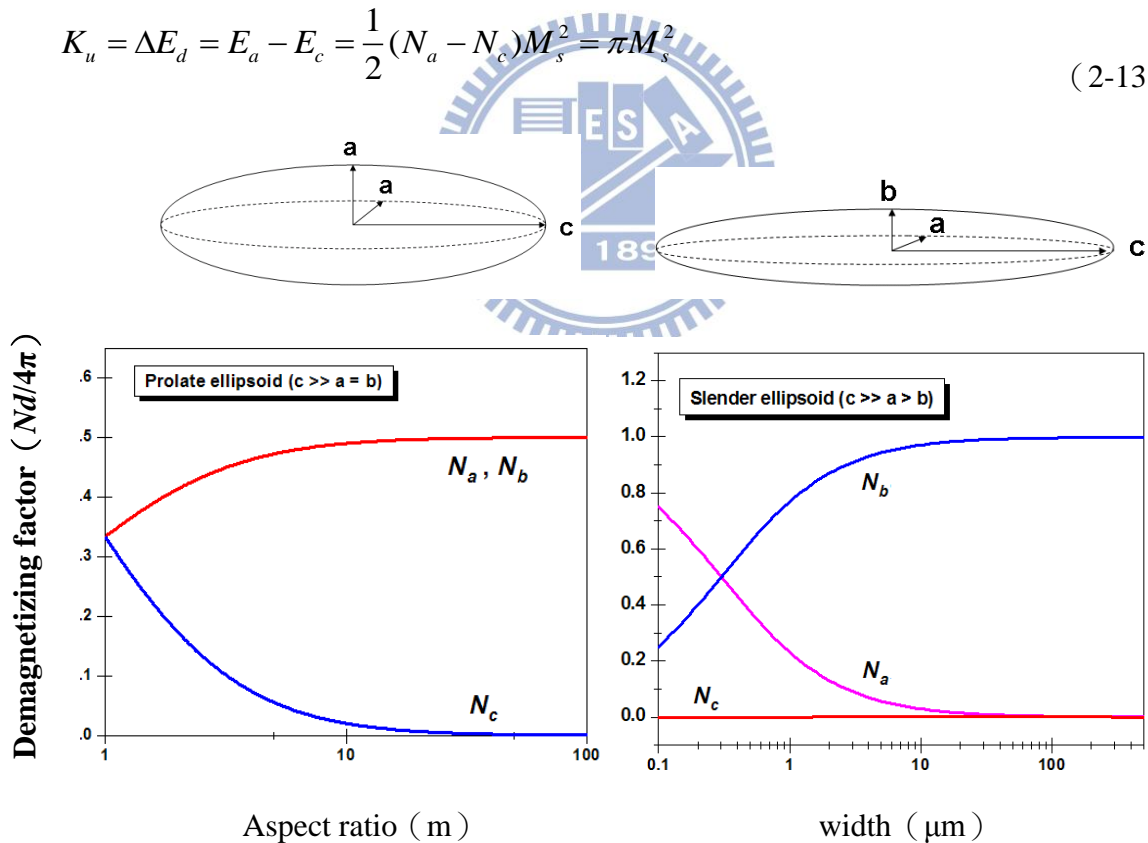


圖 2.6 扁長型橢球 (左, Prolate spheroid) 與細長型橢球 (右, Slender spheroid) 之模型示意圖；及其在各軸向上的去磁參數 (Demagnetizing factor) 與樣品尺寸之關係。其中扁長型橢球的長寬比 (Aspect ratio, m) 定義為 $m = c/a$ ；細長型橢球的寬度 $\text{width} = 2a$ 。

2.2.2 交換能 (Exchange energy)

磁性材料的磁矩來自電子對原子的軌道角動量、電子的自旋角動量，以及上述兩者間的交互作用力 (Exchange force)；此交互作用力產生的能量，即為交換能。考慮海森堡模型 (Heisenberg model) 中，鄰近兩個原子的交換能可寫成[22]：

$$U_{ij} = -2J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (2-14)$$

其中 S_i 及 S_j 分別為兩相鄰原子所貢獻的自旋角動量， J_{ij} 為交換積分； $J > 0$ 為鐵磁性材料， $J < 0$ 則為反鐵磁材料。

自旋角動量間的交互作用力有效範圍稱為交換長度 (Exchange length)，其只存在於兩原子之間，因此磁性樣品的總交換能可視為各原子間交換能的總和：

$$E_{ex} = -2 \sum_{i>j} J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j = -2 \sum_{i>j} J_{ij} S^2 \cos \phi_{ij} \quad (2-15)$$

ϕ_{ij} 為鄰近兩原子自旋軌道間之夾角。

2.2.3 晶格異向性能 (Crystalline anisotropy energy)

磁性材料的晶格結構為影響磁性能量的因素之一。因不同的晶軸方向的原子間距不同，自旋軌道角動量的耦合強度也不同；造成各晶軸方向上能量的差異。在單晶結構之鐵磁性材料中，當磁矩方向沿著某個晶軸排列時，有能量最小值；其晶格異向性能 E_{ca} 可寫為[22]

$$E_{ca} = \nu [K_0 + K_1 (\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2 \cos^2 \theta_3 + \cos^2 \theta_3 \cos^2 \theta_1) + K_2 \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 \cos^2 \theta_3 + \dots,] \quad (2-16)$$

其中 K_0 、 K_1 、 K_2 、..... 為晶格異向性常數，單位 erg/cm^3 ， v 是體積， θ_1 、 θ_2 則是指晶軸與磁矩間的夾角。在做晶格異向性能分析時，不同晶軸上的 K_0 值相同，且 $K_2 \ll K_1$ ；因此分析時可忽略 K_0 與 K_2 。

不同磁性材料有其對應的 K_1 。而鎳的塊材 $K_1 = -5.0 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3 < 0$ ，且磁晶格之磁易軸（Easy axis）為 $\langle 111 \rangle$ 。

2.2.4 磁致伸縮效應與磁彈性能（Magnetoelastic energy）

磁彈性能（Magnetoelastic energy）源自於磁性材料的磁致伸縮效應（Magnetostrictive effect）；此效應是由於在外加磁場下，磁性材料內部磁矩的磁化狀態改變引發本身的形變而起，其大小以長度的變化表示，稱為磁致伸縮係數：

$$\lambda = \Delta l / l \quad (2-17)$$



Δl 為樣品長度變化。磁場達到飽和時之 λ 有最大值；此時稱作飽和磁致伸縮係數，以 λ_s 表示。對磁性材料外加一應力使其發生形變，其內部磁矩的磁化狀態亦隨之改變。若 $\Delta l > 0$ ，則 $\lambda_s > 0$ ，例如鎳鐵合金（Permalloy）；若 $\Delta l < 0$ ，則 $\lambda_s < 0$ ，例如鎳。

磁彈性能（Magnetoelastic energy）與單位體積磁性材料發生的形變有關，以立方晶系而言，其磁彈性能可寫為（2-18）式：

$$F_{ms} = B_1 \sum_i A_{ii} (\alpha_i^2 - \frac{1}{3}) + 2B_2 \sum_{i \neq j} A_{ij} \alpha_i \alpha_j \quad (2-18)$$

B_1 、 B_2 為磁彈性係數， α_i 、 α_j 為原子磁矩的方向餘弦。

2.2.5 茲曼能 (Zeeman Energy)

茲曼能 (Zeeman Energy) 係樣品內部磁矩與外加磁場的交互作用能量。當樣品內部磁矩平行外加磁場方向時，有最小茲曼能。故其能量型態寫為：

$$E_z = -\int_v \vec{H} \cdot \vec{M} dv \quad (2-19)$$

其中 \vec{M} 為樣品內部磁矩， $\vec{H}_{\text{external}}$ 為外加磁場， v 為物體體積。

2.3 低維度鎳線的相關研究背景

鎳的磁性行為受其自身材料特性影響，在不同的外界溫度、外加磁場，或鎳線的尺寸、形狀，以及不同的樣品製作方式下，展現出不同的磁性暫態及磁性行為。即使材料成分單純，針對鎳微米線特性的研究成果展現卻非常多元。

對於研究單一鐵磁性材料奈米線的磁性行為，量測其磁電阻為已確知的有效方法。1999 年 J-E. Wegrowe 等人[5]量測線徑 $D=60 \text{ nm}$ ，線長 $L=6000 \text{ nm}$ ，在多孔薄膜成長之多晶結構 (Polycrystalline) 的單一鎳及鈷奈米線在室溫下之磁電阻曲線，外加磁場和樣品線長軸夾角分別為 15° 及 45° (圖 2.7)。曲線分為由正負兩方向高磁場掃往零磁場過程的可逆過程 (Reversible part) 及零磁場附近之不可逆過程 (Irreversible part)。可逆部分曲線中實線為磁矩以 Curling 形式翻轉模型所做的理論預測，與量測所得非常接近，觀察出鎳奈米線的翻轉形式屬於 Curling rotation。圖中內插部分為外加磁場和樣品線長軸夾角 15° 之不可逆過程曲線放大圖；其在殘磁態時之電阻趨近於最大值，以異向性磁阻效應描述，代表其磁易軸 (Easy axis) 平行線之長軸。而對稱於殘磁態兩端有兩個下垂的針尖，在針尖尾端電阻值有一斜率為無窮大之變化，代表樣品線內的磁矩做了瞬間翻轉使電阻值瞬間改變，此為單一磁區的典型特性。

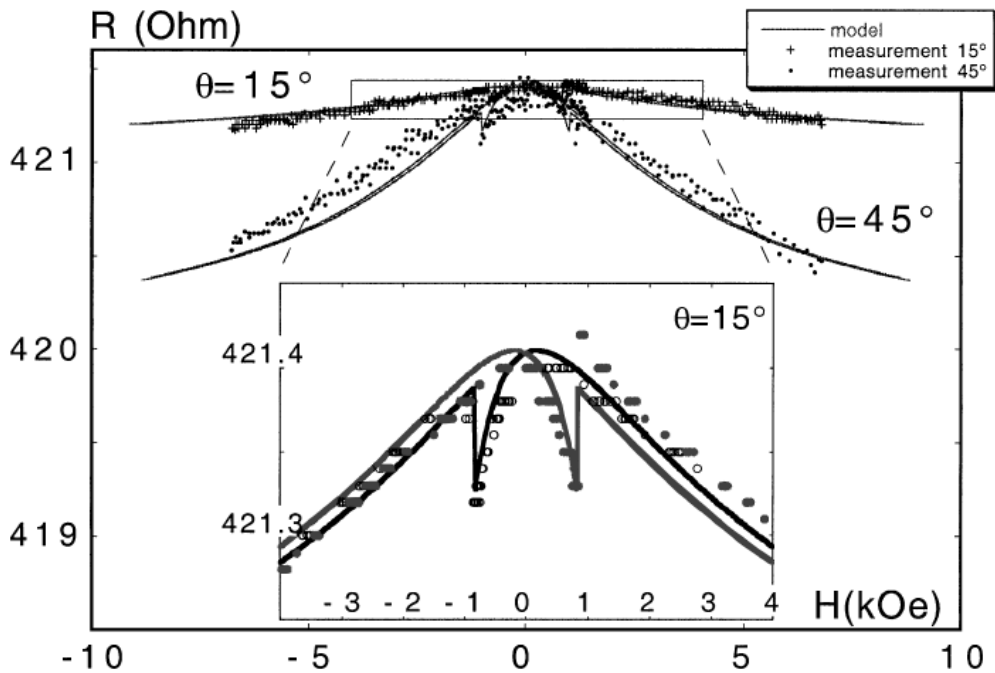


圖 2.7 直徑 60 nm，線長 6000 nm 之鎳線在室溫下之磁電阻曲線，外加磁場與樣品線夾角分別為 $\theta = 15^\circ$ 及 $\theta = 45^\circ$ ；實線為 Curling rotation 之模型預測，點狀部分為量測所得電阻值。內插圖為 $\theta = 15^\circ$ 時磁電阻曲線中央的放大圖形[5]。

針對線徑 $D = 30$ nm 和 200 nm 之單一鎳奈米線 [25]，Y Rheem 等人利用磁電阻量測對其做磁性傳輸研究，指出鎳奈米線的磁矩翻轉機制在 $T = 10$ K 時為 Curling rotation。鎳奈米線磁性傳輸行為與磁性薄膜相似；僅於 D 很小時，奈米線之平行方向磁阻（Longitudinal magnetoresistance，LMR）與垂直方向磁阻（Transverse magnetoresistance，TMR）與磁性薄膜之電阻值不同。同樣的情形在線長 $L = 1$ μm ，厚度 $t = 35$ nm，線寬 w 介於 50~500 nm 間之鎳平板線的磁電阻量測也被觀察出；而 Y Rheem 等人的研究表示，這樣的差異可能來自於溫度變化時，鎳奈米線與矽基板因熱膨脹係數不同發生的晶格錯位所造成。

對於鎳薄膜表面的磁彈性耦合現象（Magnetoelastic coupling）早有研究發現其磁彈性耦合係數（Magnetoelastic coupling coefficients， B^{eff} ）中含有兩個不同的項：與膜厚無關的塊材項（Bulk term， B^b ）以及與膜厚有關的表面項（Surface term， B^s/t ）。1995 年 O.S. Song 等人利用穿透式電子顯微（Transmission

electron microscopy, TEM) 掃描鎳鐵合金和鎳薄膜的磁性微結構[26]，發現材料表面之磁彈性耦合現象與薄膜表面的不連續或其組織的改變無關。

上述的研究成果當中，無論以何種方法探討低維度之鎳線，皆透露了其磁易軸傾向平行於線長軸的特性；事實上針對鎳的磁易軸方向的研究，有許多成果都展現出非常有趣的現象。1998 年的研究中，針對在 InP (001) 基板上以 2 \AA/s 之鍍率蒸鍍的鎳線陣列 ($\sim 10^4$ 條)，線與線間距為 200 nm 的樣品分別在 $T=5 \text{ K}$ 及 $T=300 \text{ K}$ 量測其平行線軸 (\parallel) 與垂直線軸 (\perp) 的遲滯曲線如圖 2.8 [11]。由圖 2.8 觀察出，鎳微米線在室溫 ($T=300 \text{ K}$) 下，其在平行線軸時之殘磁態磁矩有最大值，且矯頑場 (Coercive field, $H_c = H (M/M_s = 0)$) 較垂直線軸方向的矯頑場來的大，表示其磁易軸 (Easy axis) 平行鎳線長軸；而在低溫 ($T=5 \text{ K}$) 下，情況剛好相反，在垂直線軸的方向上有較大的殘磁磁矩，且期矯頑場遠大於平行線軸方向，表示在低溫時其磁易軸垂直鎳線長軸。其中的原因推論可能為鎳線和 InP 基板因熱膨脹而產生的晶格錯位所致。2001 年，針對電化學沉積所製做的側剖面為鑽石形之鎳長直線 ($D=120 \text{ nm}, L=5 \text{ \mu m}$)，其磁易軸之方向亦與溫度相關，在 $80 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$ 時之磁易軸平行鎳樣品線長軸 [9]；這樣的成果引發許多研究更直接地由能量觀點切入探討小尺寸鎳線的磁性行為。

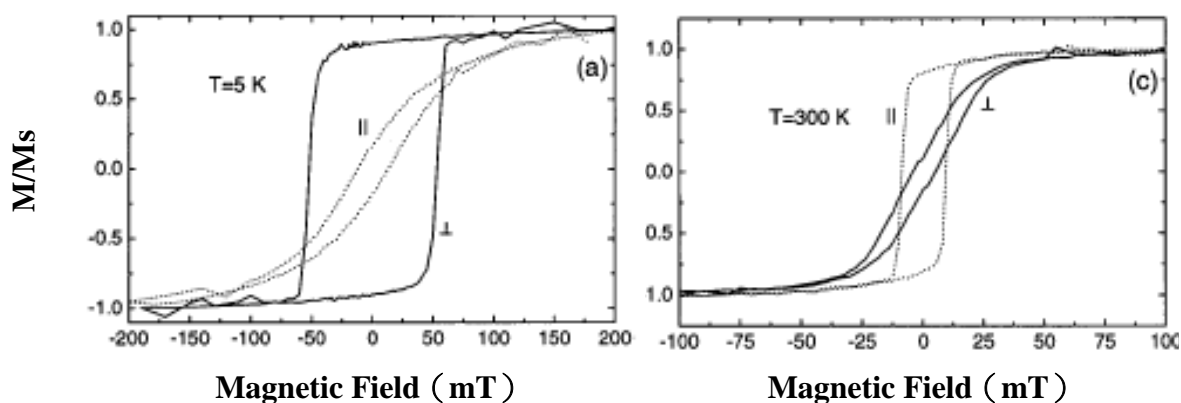


圖 2.8 線寬為 70 nm 的鎳線在 $T=5 \text{ K}$ (左) 和 $T=300 \text{ K}$ (右) 之外加磁場方向平行線軸 (\parallel) 與垂直線軸 (\perp) 的遲滯曲線[11]。

2010 年，J G S Duque 等人明確指出次微米級鎳線樣品，其易軸軸向和溫度有關[12]。圖 2.9 為其微影及濺鍍技術製作的鎳線陣列，鎳線厚度為 300 Å，線寬為 0.7 μm，線與線間隔 700 nm，總面積為 1 cm² 之樣品在不同溫度下，外加磁場方向為平行長軸的遲滯曲線；圖中每個溫度的遲滯曲線在殘磁態的磁矩大小隨溫度下降而減少，表示磁矩平行線軸分量減少，磁易軸方向偏離線長軸。明顯說明了鎳線的磁易軸和溫度有關。然而鎳鐵合金（Permalloy）並沒有相同情形，其磁易軸在 2 K < T < 300 K 皆為長軸。

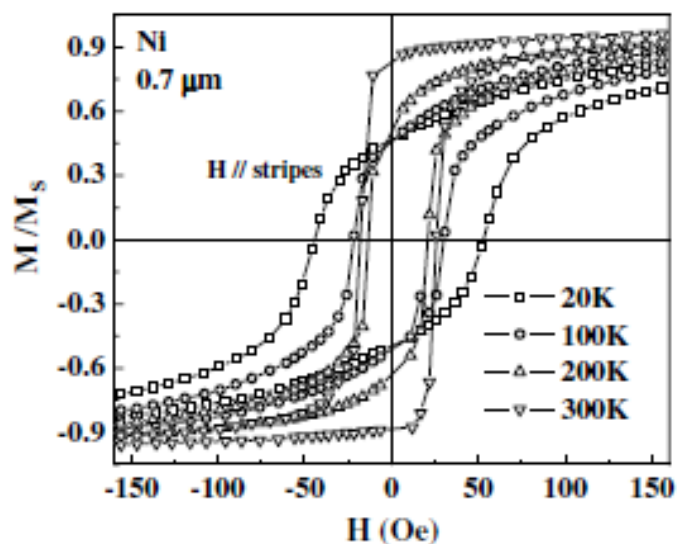


圖 2.9 鎳在各溫度下的遲滯曲線，顯現出磁易軸隨溫度改變的現象[12]。

2000 年，S. Dubois 等人量測存在於多碳孔洞的鎳陣列之遲滯曲線，及其 X 光繞射圖形（X-Ray diffraction, XRD），發現在室溫時主導能量項為形狀異向性能，而低溫時於鎳線長軸方向有很強的磁致伸縮（Magnetostrictive）效應產生磁彈性能；相同的結果可見於 2008 年，對其做 FMR (Ferromagnetic resonance) 量測，發現鎳與多碳孔洞模板在溫度變化時發生晶格錯位（Lattice mismatch）而在 4.3 K ≤ T ≤ 300 K 時皆產生磁彈性異向能[10]；少部分的鎳線磁彈性能甚至可與形狀異向性能競爭。

有鑒於低維度鎳線的磁性行為研究如此多元，本實驗將以磁電阻量測的方式，在低溫下 ($T = 10$ K) 展開一連串不同線寬之微米鎳平板線磁性行為之探究。

第三章 實驗方法

本次研究報告所討論的是一系列不同長寬比成長於 SiN / Si (100) 基板上之微米級鎳平板線，透過四點量測法量測鎳平板線的磁電阻，了解其磁異向性和樣品內部的磁矩翻轉行為。為了降低外界環境的溫度擾動，實驗時將樣品溫度控制在 $T=10\text{K}$ 。

為了量測鎳平板線磁電阻，實驗中設計數個銜接在鎳平板線上的金電極做為電流通過與量測電壓的接腳。鎳平板線樣品與金電極分別透過電子束微影及光微影製作，再經熱蒸鍍與舉離製程完成；而後再由樣品最外圍的 $200\ \mu\text{m}$ 寬的金電極外接金線至 $1\ \text{mm}$ 寬的金電極上，外接至 LR750 即可供應樣品電流，量測其電壓即可得樣品電阻值。

為更直接了解微米級鎳平板線內部的磁矩翻轉行為，以電子束微影另外製作一系列的不同線寬的鎳平板線陣列。樣品在室溫經過平行樣品長軸方向的飽和磁場(約 0.7T) 磁化後，再回到零磁場下(Remnant state)；藉由磁力顯微鏡(Magnetic Force Microscopy, MFM) 掃描出的磁力影像探知樣品內部的磁性行為。

本章 3.1 節說明整體樣品的製作流程及製程條件，3.2 則介紹磁電阻量測技術，及實驗中使樣品溫度控制在 10K 所使用的 ^4He 低溫系統；3.3 簡單介紹磁力顯微鏡之機台類型及運作原理。

3.1 樣品製作流程及微影技術

微影技術是製做小尺寸元件時常用的方法。依據製做元件尺寸的大小，所適用的微影製程又可分為光微影及電子束微影。本實驗中光微影技術所使用的汞光燈源，其紫外光波長在 365nm 附近，可製做微米級大小之元件；而電子束微影中之曝光源電子束，電子波長約在 0.008nm ，可用於製作次微米級或奈米等級以下之元件。因此在本實驗中，樣品外圍之金電極（最小線寬 $5.0\ \mu\text{m}$ ）由光微影

技術製作，內圈鍍平板線（最小線寬 $0.18\ \mu\text{m}$ ）及連接在其上之金電極（最小線寬 $0.3\ \mu\text{m}$ ）則以電子束微影來完成。圖 3.1 說明了樣品的整體製作流程。

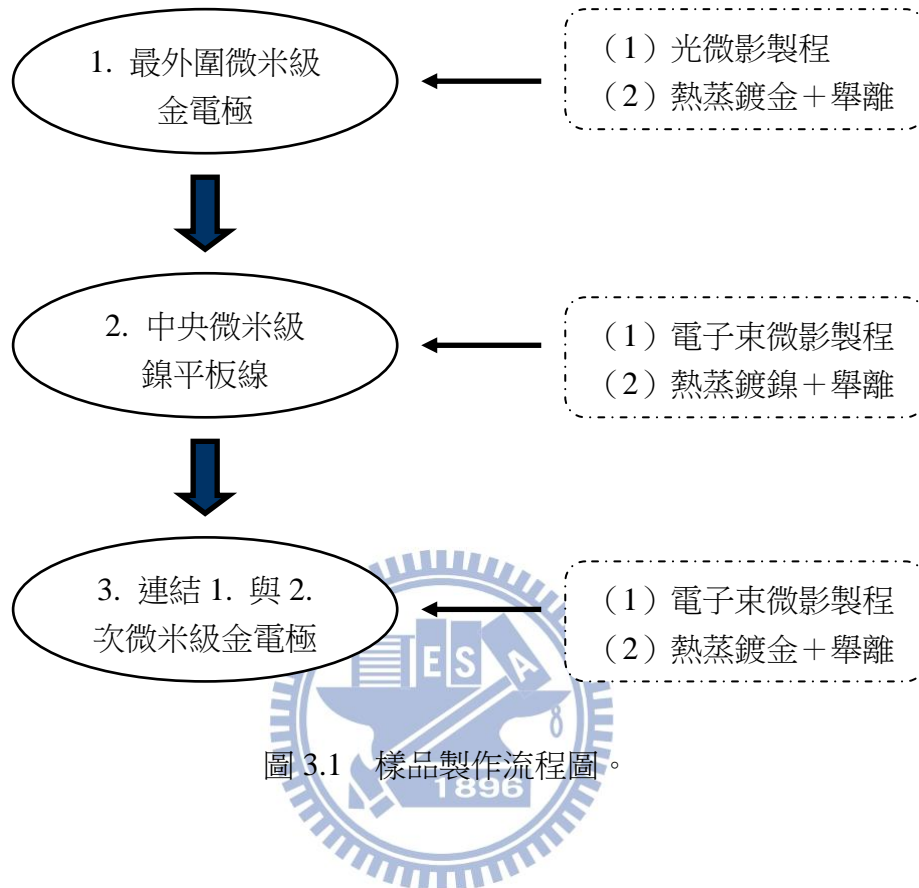


圖 3.1 樣品製作流程圖。

3.1.1 光微影製程

光微影技術是半導體製程中常用標準的量產製程。將設計的微米級元件或電路圖案，透過光罩大量轉移到晶圓上，稱做光微影。主要作法為在基板或晶圓上塗佈光阻材料，利用光阻劑受光而改變鍵結狀況的特性，以光罩圖案選擇曝光區域。經由與光阻材料配套的顯影劑進行顯影程序，將光罩圖案透光部分的光阻去除，即可在晶圓上呈現所設計的微米級元件或電路圖樣。圖樣的解析度受到曝光源波長的限制，而本實驗之曝光源為波長 365nm 之紫外光，其解析度足以用來製作最小線寬為 $5\ \mu\text{m}$ 之金電極。

本次研究工作中，樣品最外圍微米級金電極即使用光微影技術製作在切割成 6mm×6mm 的 SiN/Si 晶圓上。微米級金電極最外圍寬度約 200 μm ，中央金電極最細部分寬度則約為 5 μm ，如圖 3.2。

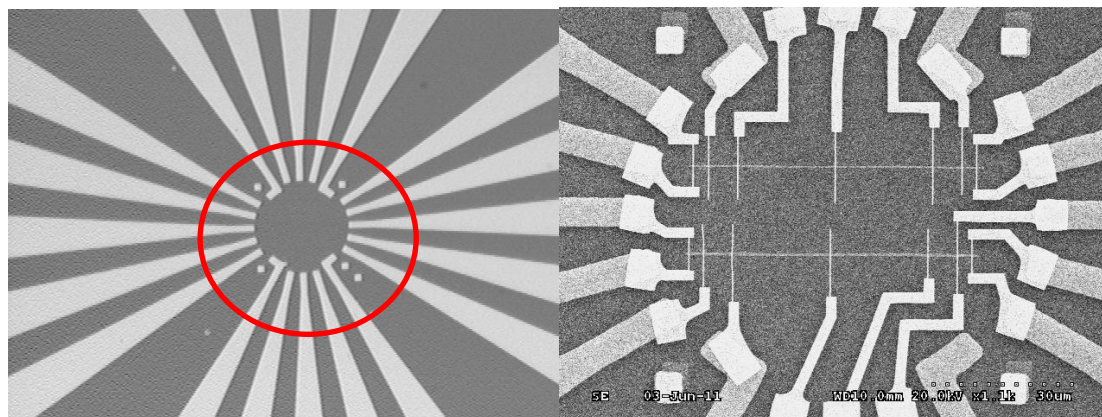


圖 3.2 左圖為經由光微影製程製作之外圍放射狀金電極。電極中央最細線寬為 5 μm 。圈起部分為鎳平板線樣品及與其相連的電流接腳所在位置。右圖為樣品之掃描式電子顯微鏡影像。位於中央的兩條平板線即為鎳平板線樣品，線寬分別為 $w=0.35\mu\text{m}$ 及 $w=0.55\mu\text{m}$ ，線長 $L=60\mu\text{m}$ ，厚度 $t=30\text{nm}$ 。

光微影製程主要包含以下六個程序：塗佈光阻 → 軟烤 → 曝光 → 硬烤（反轉烤） → 反轉曝光 → 顯影，之後再進行蒸鍍和舉離。不同的樣品有不同的製程條件需求，以下針對本研究工作所需的金電極製程、製程目的及所需條件進行說明。

1. 塗佈光阻

將切割好的晶圓置於光阻塗佈機中央的真空吸孔上方。滴上數滴光阻 AZ5214E，以前 10 秒 1000±5 rpm，後 40 秒 5000±50 rpm 的轉速進行旋塗。旋塗出的光阻厚度約為 1 μm ，且均勻的光阻厚度可在晶圓上呈現出完整的牛頓環。旋圖後晶圓側視圖如圖 3.3，邊緣會累積較厚的光阻。

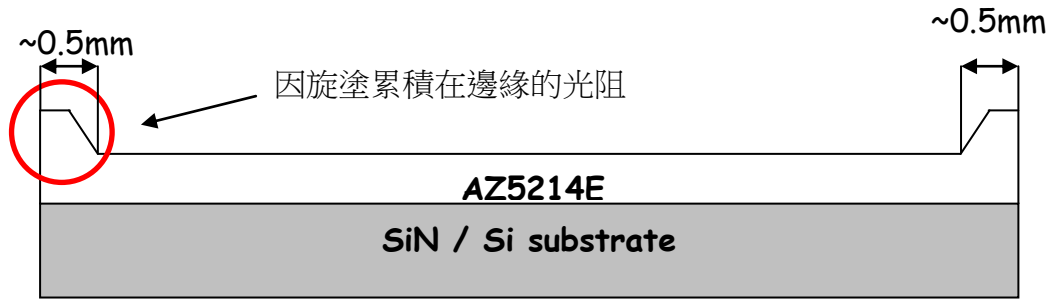


圖 3.3 晶圓經光阻塗佈後的側視圖；在邊緣有因旋塗而累積的光阻材料。

2. 軟烤

旋塗光阻後的晶圓放到加熱器上，以 90°C 軟烤 90 秒將光阻劑及晶圓上累積的濕氣烤乾。

3. 曝光

曝光是將設計圖案印製在晶圓上的關鍵步驟。將烤乾後的晶圓送進曝光對準機 (Mask aligner) 蓋上光罩，即可準備進行曝光。本實驗所使用的曝光對準系統為 ABM Model 60 DUV/MUV/NearUV，曝光模式為「接觸式曝光」(contact mode)。系統的汞光燈源為波長約 365nm 的紫外光，以功率約 500W，約 20mW/cm² 的光源強度曝光 0.8 秒。

接觸式曝光模式的優點在於晶圓與光罩可密切貼合，使得光罩設計圖案印製在晶圓上時不易失真。如圖 3.4 所示，曝光前用棉棒刮除晶圓邊緣凸起的光阻，可使晶圓上的光阻材料與光罩做更緊密的貼合。

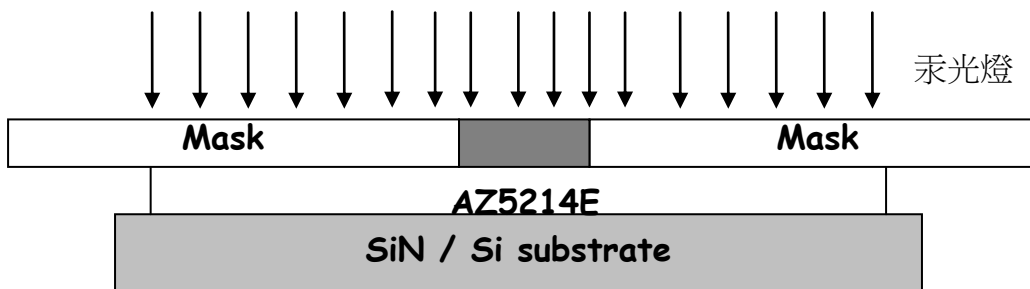


圖 3.4 晶圓曝光時的側視示意圖。光罩 (Mask) 灰色部分為光罩設計圖案中不透光的部分。

4. 硬烤（反轉烤）

光阻經過第一次曝光反應後，放置於加熱器上以 120°C 硬烤 90 秒；目的在於將曝光後的圖案定型，以及將光阻劑極性由正轉負。

5. 反轉曝光

反轉烤後的晶圓再以相同強度及波長的汞光燈源在不加光罩的情況下曝光 20 秒。

6. 顯影

完成反轉曝光後的晶圓，泡入 AZ5214E 的顯影劑 AZ400 溶液中，以超音波震盪器震盪 25 秒，此時不透光部分的圖案，光阻化學性質經反轉後溶於顯影液當中，即可看見光罩設計的圖案顯現在晶圓上；取出晶圓，隨即再將其泡入去離子水約 10 秒完成定影。定影完後的晶圓用氮氣吹乾。圖 3.5 為其側視圖。



圖 3.5 顯影步驟完成後，晶圓與光阻的側視情形。

7. 蒸鍍

將顯現元件圖案的晶圓送進熱蒸鍍系統，先後鍍上厚度 100Å 的鈦及 600Å 的金；蒸鍍後的樣品情況如圖 3.6。蒸鍍的環境條件由下表所示：

蒸鍍金屬材料	鈦 (Ti)	金 (Au)
真空腔壓力	$\sim 1.5 \times 10^{-6}$ torr	$\sim 3.4 \times 10^{-6}$ torr
鍍率	~ 0.5 Å/s	~ 5 Å/s
通過錫舟電流	~ 125 A	~ 110 A
金屬厚度	100 ± 0.5 Å	600 ± 5 Å

表 3.1 樣品熱蒸鍍金屬時使用的環境條件。

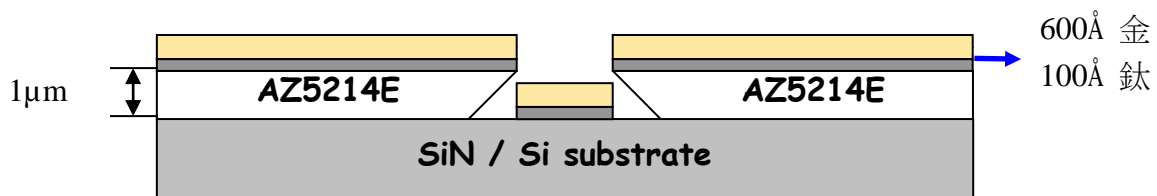


圖 3.6 在晶圓上蒸鍍 100Å 厚的鈦及 600Å 厚的金之後的側視圖。

8. 舉離

熱蒸鍍完成，待樣品冷卻後由腔體取出。泡丙酮以超音震盪器震盪約 10 秒，洗除晶圓上的光阻，即可看見晶圓上鍍金的電極圖案。再將其泡入去離子水將晶圓上的丙酮洗除後用氮氣吹乾，樣品側視情況如圖 3.7。



圖 3.7 晶圓經過舉離過程洗除光阻後，剩下表面設計圖案的金屬電極。

經過上述步驟，章節初流程圖中的 1. 最外圍微米金電極即告完成。

3.1.2 電子束微影製程

電子束微影技術和光微影目的皆為透過特定的波源和配套的阻劑材料反應，將元件圖案轉移至晶圓上。其做法和製程原理與光微影相同，主要包含三個程序：塗佈 → 曝光 → 顯影，之後再進行蒸鍍和舉離。而電子束微影的曝光源為電子束，配套電子阻劑為 Polymethyl Methacrylate, PMMA。

本實驗的曝光源電子束使用掃描式電子顯微鏡（Scanning electron Microscope, SEM）來產生，其電子束源為鎢絲。經電流加熱的鎢絲發射出電子，經由外加 25KV 的電壓，可使電子加速經過數個線圈組合成的電磁透鏡，藉由羅倫茲力（Lorenz force）進行聚焦。經過聚焦後的電子束，打在樣品上的直徑大小 (spot size) 約為 10nm。掃描式電子顯微鏡電子波長約為 0.008nm，解析度遠高於以紫外光（波長約在 265~365nm 附近）為波源的光微影製程。元件製作時，

受光微影技術限制的次微米級元件圖案可利用電子束寫出，本實驗研究之鎳平板線樣品（最小線寬 $0.18\mu\text{m}$ ）及其和外圍微米金電極連結的電流腳（最小線寬 $0.3\mu\text{m}$ ）皆由專題生柯昇利用電子束微影技術製作。

顯影後的樣品，經過蒸鍍與舉離步驟可使設計的圖案鋪上金屬材料。其中金電極厚度為 1200 \AA ，主要磁性材料鎳平板線厚度則為 300 \AA ，另外鍍上 30 \AA 的金防止樣品線氧化。

3.2 磁電阻量測與 He^4 低溫系統

經微影製程完成樣品後，即可進行低溫磁電阻量測，探討鎳平板線內部在低溫下的磁性行為。為了降低外界環境溫度擾動影響，實驗時須利用 He^4 低溫系統將樣品溫度降至 10K ，再以四點量測法，以不同的外加磁場大小及方向做磁電阻量測。以下分別介紹 He^4 低溫系統及磁電阻量測技術。

3.2.1 ^4He 低溫系統

^4He 低溫系統是由一套內含數層真空夾層及樣品空間的杜瓦瓶、一台溫度控制器 LTC11 及一架機械幫浦組合而成的低溫系統。透過將液態氦及液態氮輸入杜瓦瓶可使樣品溫度降至 4.2K ；此時啟動機械幫浦降低樣品空間中壓力使空間內液態氦揮發，可再帶走部分熱量，使樣品溫度下降至 1.5K 附近。圖 3.8 為 ^4He 低溫系統內部構造。以下介紹本實驗式低溫系統的結構，並說明其降溫的運作機制與過程[28]。

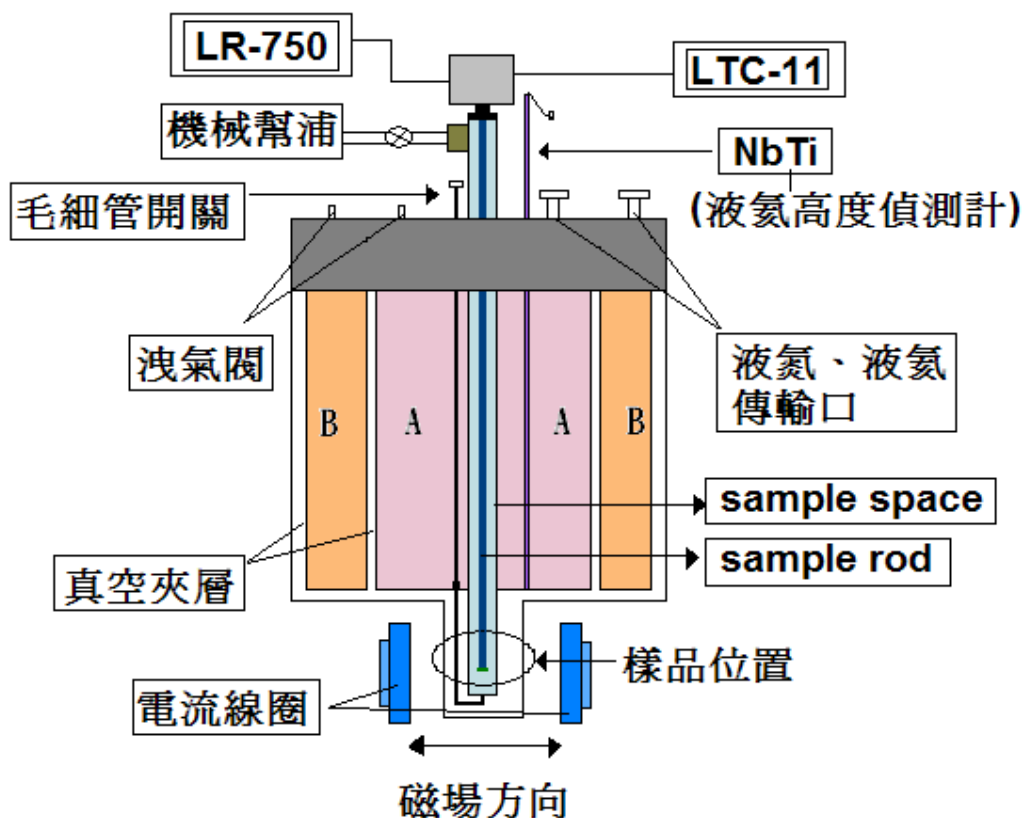


圖 3.8 ^4He 低溫系統內部構造[28]。

系統進行磁電阻量測時，A 容器（Container）內盛裝的是液態氦，B 容器（Jacket）則為液態氦；兩容器其間的真空夾層可防止熱量經傳導和對流方式與外界能量進行交換。B 容器（Jacket）灌液態氦目的為減少外界室溫與 A 容器（Container）透過熱輻射作能量交換以降低內部液態氦的消耗。A 容器內有一毛細管與樣品空間連結，其針閥開關位於杜瓦瓶上方；量測時，旋開針閥可讓容器內液態氦透過毛細管流入樣品空間，再加上啟動和樣品空間連結的機械幫浦強迫樣品空間內液氮揮發而降溫，可有效控制液態氦流量使樣品降至低溫。

為精準地將控制溫度在 $10\text{K}\pm 0.1\text{K}$ ，實驗時使用溫度控制儀 LTC-11；利用其中兩個溫度控制頻道，分別控制系統兩個溫度感應器：GaAlAs 二極體（接近樣品所在位置）及 Si 二極體（位於連結樣品空間的液氮進氣口）。兩二極體在不同溫度時有其電流-電壓關係。LTC-11 給予兩二極體電流，藉由量測到的二極體電壓值可得所在位置之溫度。樣品和 GaAlAs 二極體間由熱的良導體無氧銅連

結，其溫度可即時由已精密校正的 GaAlAs 偵測。而在連結樣品空間的毛細管液氮口附近有一電阻器，透過液氮流入降溫和加熱電阻器適量地加熱可將樣品台溫度平衡在 10K。

3.2.2 磁電阻量測

磁電阻量測技術是已確知可用於探究磁性樣品內部磁區變化情形的一種有效方式。量測樣品磁電阻之儀器為應用惠斯同電橋的高精密電阻量測器 LR750，以四點量測法量測樣品磁電阻。LR750 透過樣品上的電流接腳給予微米鎳平板線一微小電流 ($\sim 10\mu\text{A}$)，此時量測樣品待測區段兩端電極間的電壓，可得該線段之電阻值。透過四點量測法，可避免量測到樣品以外的接線及接點電阻，精確地得到量測區域之電阻大小。

樣品接腳與 LR750 連接後，對樣品外加磁場進行磁電阻量測。低溫系統內的樣品位置位於兩電磁鐵線圈所包裹之軟鐵的 5.5 cm 間隙中心。透過 KEPCO POWER SUPPLY 供應線圈電流可控制磁場大小，其值透過校正的 Hall sensor 判讀。旋轉樣品台則可改變磁場方向與鎳平板線夾角；此時利用 LR750 以四點量測法量測樣品電阻，即得該特定外加磁場下之電阻值。本電磁鐵在樣品位置可達最大磁場強度約為 2600 Oe。為減低外界環境溫度的影響，量測時利用 ^4He 低溫系統將樣品溫度控制在 10K。

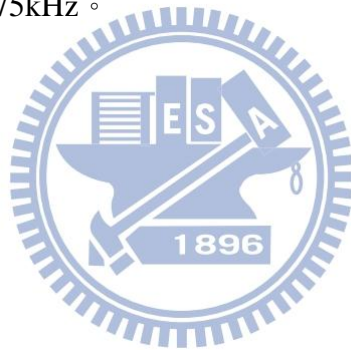
3.3 磁力顯微鏡

為了更直接了解微米級鎳平板線內部的磁矩翻轉行為，藉由磁力顯微鏡 (Magnetic Force Microscopy, MFM) 掃描鎳平板線陣列在室溫下外加磁場平行樣品長軸之殘磁態的磁力影像。磁力顯微鏡是利用磁性材料原子之間的磁力 (Magnetic Force) 作用來呈現樣品內部的磁區結構；當顯微鏡的磁針與樣品外漏磁場同向或反向時，磁力影像會分別顯現亮區及暗區，由此即可知樣品內部磁

矩排列方向。

依照顯微鏡磁針工作時與樣品接觸的模式，可分為三種：接觸模式（**contact mode**）、非接觸模式（**non-contact mode**），與輕敲模式（**Tapping mode**）。接觸模式即磁針緊貼樣品表面掃描其磁力影像。雖有高解析度，但容易傷害樣品表面；因此發明了非接觸模式的掃描方式；此模式雖然不會傷害樣品，然而掃描解析度不足；因而有輕敲模式的誕生。輕敲模式為掃描時磁針在垂直樣品表面方向來回震盪，偵測樣品外漏之磁力線得到磁力影像，比起非接觸模式的解析度高，且不易傷害樣品表面。

本實驗中所使用的磁力顯微鏡為 SPA300，掃描磁針表面材料為鈷，針尖曲率半徑 $< 50\text{nm}$ ，橫向解析度（**Lateral resolution**） $< 100\text{nm}$ 。磁針固定在一懸臂上，輕敲模式震盪頻率為 75kHz 。



第四章 實驗結果與討論

在分析討論實驗結果之前，本章第一節會先介紹磁性材料鎳的基礎特性，以及所量測出鎳平板線樣品的電阻隨溫度之變化。第二節以本實驗中所製作線寬在 $2\mu\text{m}$ 以上之大尺寸鎳平板線為例，說明鎳為大尺寸薄膜時展現之磁性行為，隨後針對線寬低於 $1\mu\text{m}$ 之高長寬比 (Aspect ratio, $m > 50$) 樣品的低溫磁電阻量測結果進行討論；並依所展現磁電阻曲線之形式，將其歸納為三種類型：線寬在 $2\mu\text{m}$ 以上之大尺寸鎳平板線為類別 A，屬於多磁區；線寬低於 $1\mu\text{m}$ 之高長寬比樣品則歸類為 B 及 C 兩種，展現不同類別之磁性行為。

第三節當中，將針對上述三種不同類型樣品展開一系列詳細探討其所展現之磁性行為與樣品之幾何形狀的關聯性。本節又分為四部份，第一部份介紹樣品所展現之異向性磁電阻效應 (Anisotropic Magnetoresistance effect, AMR)，第二及第三部份分析樣品所展現之磁電阻曲線特性與幾何形狀之關聯。最後，針對本研究工作中極小線寬 ($w=0.18\mu\text{m}$ 、 $w=0.19\mu\text{m}$) 之樣品特例磁電阻行為進行說明。

為更直接了解磁電阻特性曲線中所反映之樣品線磁區結構，實驗時另外製作一系列不同線寬 ($w=0.2\sim 4.9\mu\text{m}$)，長度約為 $21\mu\text{m}$ 的鎳平板線陣列，進行磁力影像 (Magnetic Force Microscope, MFM) 掃描；配合磁力影像剖析樣品內部的磁矩翻轉行為，於第四節描述。在最後一節中，探討樣品線不同區段間，因磁矩翻轉行為不同而造成磁電阻曲線形式之差異。

4.1 鎳材料的基礎特性及電阻-溫度關係

4.1.1 鎳的材料特性參數

鎳塊材有許多基礎的鐵磁性材料特性，影響其在外加磁場下的表現出的磁性行為；其中包括了磁晶格結構 (Magnetocrystalline constant, K_1)、飽和磁化強度 (Saturation Magnetization, M_s)、居禮溫度 (Curie Temperature, T_c)、以及磁致伸縮常數 (Magnetostriction constant, λ) (表 4.1)

晶格異向性 (Magnetocrystalline constant, K_I) 決定於材料之晶格結構，而鎳的晶格結構為面心立方；壓力之異向性 (stress anisotropy) 則決定於外加壓力大小。對鎳而言，當外加壓力大小為 10^9 dyne/cm^2 [27]時，壓力異向性可與晶格異向性競爭。

磁晶格結構 K_I	$-5.0 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$
室溫飽和磁化強度 M_s	485 emu/cm^3
居禮溫度 T_c	627 K
磁致伸縮常數 λ_{100} 、 λ_{111}	-66 ppm 、 -29 ppm
交換長度[27] λ_{ex}	24 nm

表 4.1 鎳塊材的各項基礎特性參數。

4.1.2 鎳平板線的電阻-溫度特性

鎳為一金屬材料，其電阻和溫度變化之關係應呈現金屬性特有行為。為確認本實驗製作之鎳平板線樣品為高純度鎳，而非有缺陷、雜質以及氧化成分存在，量測鎳平板線樣品電阻隨溫度的變化。

圖 4.1 為量測一系列不同長寬比之鎳平板線方塊電阻 R_0 隨溫度之變化。其中 $R_0 = R/n$ ， R 為量得樣品之原始電阻值，方塊數 n 為量測區塊之兩電壓端間距除以通過電流之區段寬度。

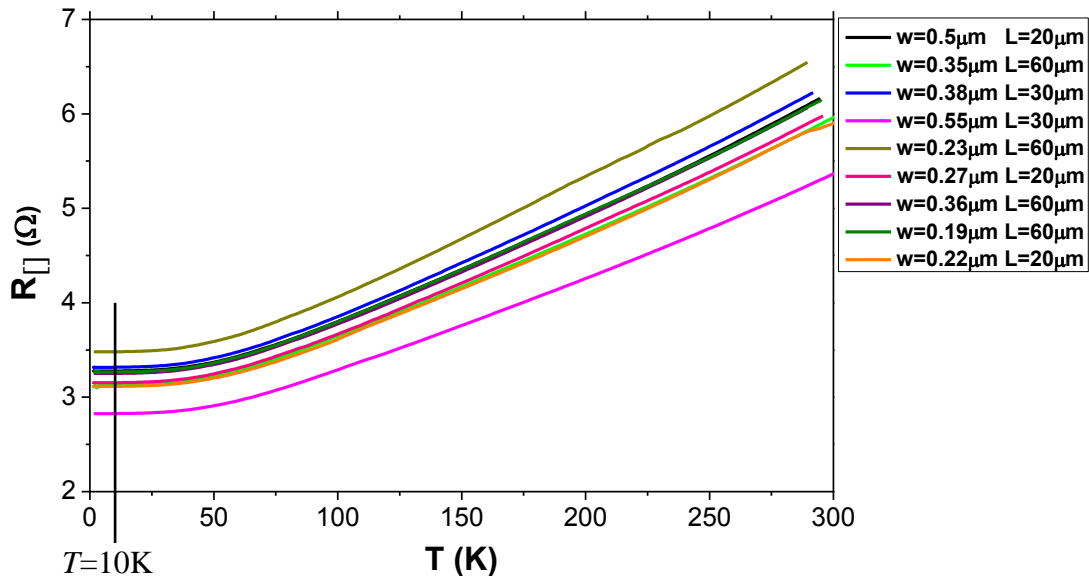


圖 4.1 鎳平板線樣品電阻隨溫度變化之關係圖。

觀察圖 4.1 可知， $T > 100\text{K}$ 時樣品之方塊電阻值隨溫度下降成線性遞減， $T < 100\text{K}$ 時遞減趨勢漸緩，最終趨近飽和；此電阻與溫度關係說明鎳平板線樣品展現其金屬性，而無明顯之缺陷或雜質造成之無序性。

一般純鎳條在室溫下之電阻率約為 $9.6 \mu\Omega\text{cm}$ ，而本實驗一系列之鎳平板線於 10K 時電阻率約為 $9\sim 11 \mu\Omega\text{cm}$ ，且方塊電阻值介於 $2.9\Omega\sim 3.5\Omega$ 間，當樣品溫度在 $T = 10 \pm 0.1\text{K}$ 範圍時，方塊電阻變化率 $\sim 2.2 \times 10^{-5} (\Omega/\text{K})$ ；實驗時將控溫精確度控制在 $\pm 0.1\text{K}$ 內，即可忽略環境溫度擾動對樣品線之磁電阻值所產生的干擾。

4.2 以低溫磁電阻歸納鎳平板線之磁性行為

4.2.1 多磁區結構展現之磁電阻變化

在本節中，將介紹鎳為大尺寸薄膜時的磁性行為。事實上高線寬 ($w > 1\mu\text{m}$) 之微米鎳平板線，其磁性行為和薄膜一致。本研究中所製作一系列不同長寬比之樣品中，發現含有線寬為 $2.0\mu\text{m}$ 以上之鎳平板線，其磁性行為近似於鎳薄膜。

圖 4.2 中，鎳平板線樣品展現了與薄膜類似之典型多磁區結構應有的磁性行為。 $\theta = 0^\circ$ 時，外加飽和磁場使樣品內部磁矩皆沿平行外加磁場方向排列，形

成單磁區 (Single domain)；此時鎳平板線有磁電阻最大值，且有最大靜磁能。當外加磁場強度逐漸降低時，樣品內的部分磁矩開始脫離磁場控制而偏離平行磁場方向，造成電阻值下降；其內部形成磁區 (domain) 以及磁區間的磁壁 (Domain wall) 來降低靜磁能，是為多磁區 (Multi-domain) 之狀態。

當外加磁場 $H=0$ ，鎳平板線之殘磁態 (Remnant state) 展現其在無外加磁場下傾向之多磁區結構；隨後磁場轉為逆向逐漸增強，磁電阻仍處於下降趨勢。過了磁電阻最小值，電阻隨漸強的逆向磁場開始逐漸增加，說明樣品內部之磁區中，磁矩方向逐漸再度偏轉為平行磁場方向，最終達飽和。圖 4.2 中，各個角度之磁電阻曲線皆發生遲滯現象，矯頑場 (Coercive field, H_c) 在各不同磁場相對線長軸夾角 θ 下大致相同，約為 240 Oe。

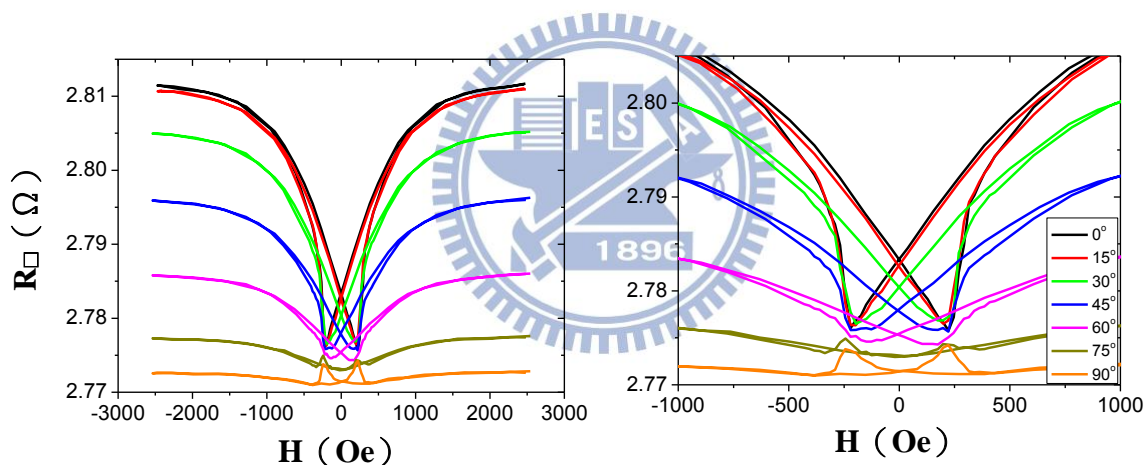


圖 4.2 $w=5.0\mu\text{m}$ ， $L=60\mu\text{m}$ ， $t=30\text{nm}$ 之鎳平板線於不同 θ 下所展現的磁電阻圖形；右為曲線靠近外加磁場 $H=0$ 之殘磁態 (Remnant state) 的細部放大圖。

4.2.2 形狀異向性主導之單一磁區結構所展現的磁電阻

第二章中介紹過，當磁性材料之維度低於其特徵長度 (Critical length) 時，即展現出單一磁區 (Single domain) 之特性。對於一般鐵磁性材料，如鈷 (Co) 及鎳鐵合金 (Py) 之高長寬比平板線，其磁易軸 (Easy axis) 受形狀異向性能 (Shape anisotropy energy) 主導而平行於平板線長軸方向。圖 4.3 是具有單一磁區結構之鎳鐵合金高長寬比平板線所展現出的磁電阻變化情形。

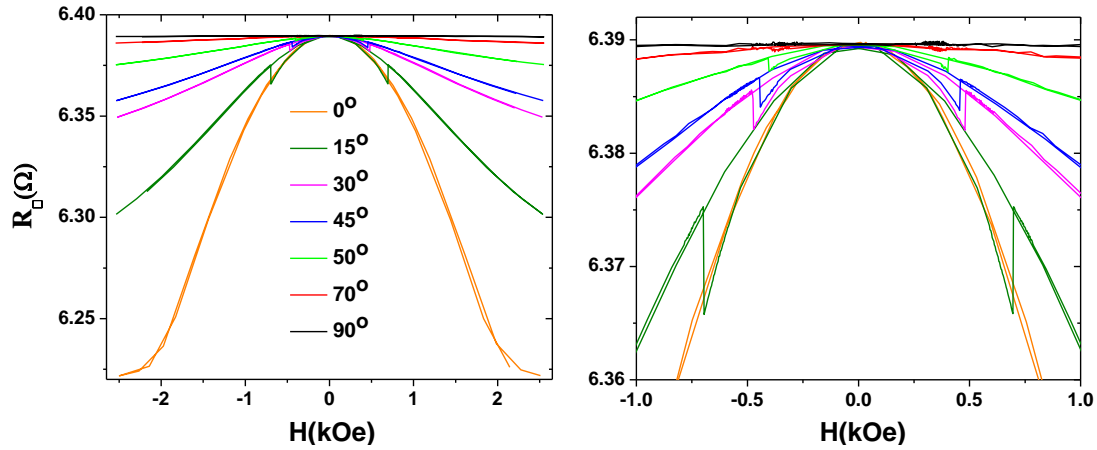


圖 4.3 鎳鐵合金平板線 ($w=0.2\mu\text{m}$, $L=20\mu\text{m}$, and $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$ 時的磁電阻圖形[28]。

觀察上圖可知典型單一磁區結構樣品在不同 θ 下所展現之磁電阻特性。在 $\theta=0^\circ$ 之情況，外加磁場強度由飽和逐漸降低後，磁電阻仍持續維持在最大值且其殘磁態電阻與飽和磁電阻值相同；毫無疑問地說明樣品為單一磁區結構且磁易軸 (Easy axis) 受形狀異向性能 (Shape anisotropy energy) 主導而平行於平板線長軸。任意 θ 下的磁電阻曲線皆滿足殘磁態電阻與 $\theta=0^\circ$ 之飽和磁電阻相同的特性；以 $\theta=45^\circ$ 為例，鎳鐵平板線的磁電阻曲線在各磁場區間 ((1) ~ (7)) 所對應的磁矩翻轉情形如圖 4.4 所示。鎳平板線磁矩與電流方向 (同樣品線長軸) 夾角 ϕ 可由磁電阻變化率決定。當與長軸夾 45° 之外加磁場大於正向飽和磁場 ($H_{\text{sat}} \geq 2600 \text{ Oe}$)，全體磁矩會一致排列在 45° ；隨著磁場減弱，經過 (1)、(2)，磁矩同調性地偏轉， ϕ 漸減， $\phi_{(2)} < \phi_{(1)} < 45^\circ$ ；當磁場降為零，磁矩全躺平在長軸上， $\phi = 0^\circ$ ，此時磁電阻有最高值。隨著磁場往負向 45° 增加，磁矩也同步以順時針方向偏離長軸， $\phi < 0$ ， $\phi_{(5)} < \phi_{(4)} < 0^\circ$ ，但可從磁電阻值知 $|\phi_{(5)}| < \phi_{(2)}$ ，其偏轉角度遠小於 45° ，直到翻轉場 (6) 時，磁矩瞬間做了大角度變化，轉向接近負磁場方向，其形式可為 Curling 或 Buckling；最終當磁場達到負向飽和時，樣品內部磁矩又一致回到與水平反向夾角 45° 的位置。

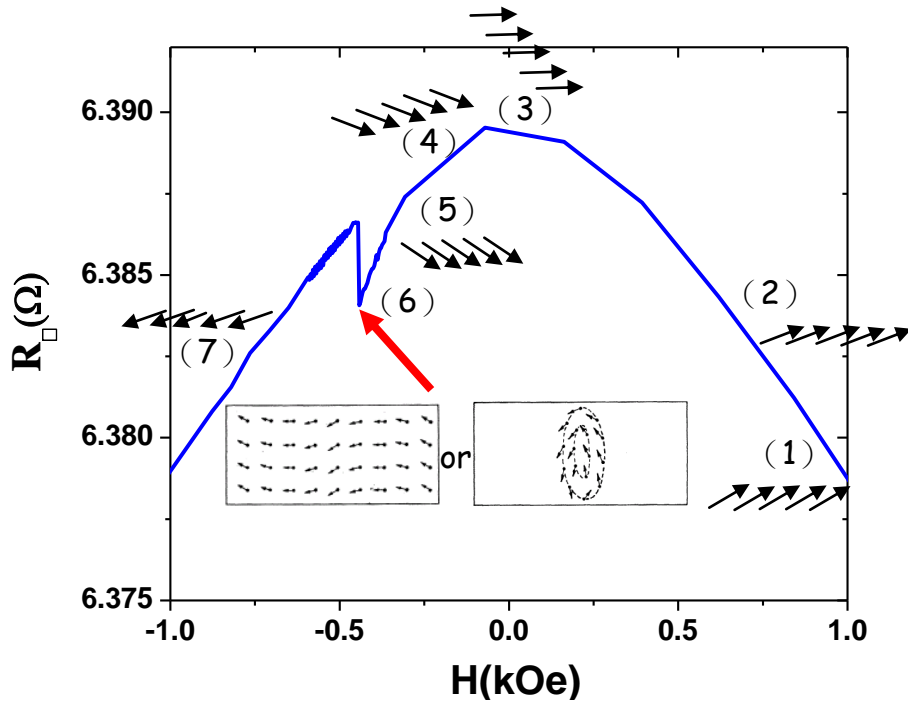


圖 4.4 鎳鐵合金平板線 ($w=0.2\mu\text{m}$, $L=20\mu\text{m}$, and $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$, $\theta=45^\circ$ 時的單向磁電阻圖形[28]。

翻轉場的存在為單一磁區結構之重要特徵，也是與多磁區結構最大的區別。翻轉場的定義為磁電阻曲線中斜率最大值所在之外加磁場，如圖 4.4 (6)，即為樣品內部磁矩在達此磁場時 ($\Delta H < 2\text{ Oe}$) 瞬間大角度翻轉，其間無穩定之磁區或磁壁結構；此現象展現在磁電阻曲線中不可逆變化的部分。圖 4.3 中 $\theta < 90^\circ$ 之磁電阻曲線皆存在此種情況。

當 $\theta=90^\circ$ ，外加磁場強度由飽和逐漸降低時，樣品內部磁矩即受磁易軸平行線長軸之特性影響，立即開始偏離飽和磁場方向而漸沿平行線軸方向排列；且殘磁態電阻與 $\theta=0^\circ$ 之飽和磁電阻相同。外加磁場轉為逆向並逐漸增強時，磁矩又隨磁場漸偏轉為垂直樣品長軸方向，造成磁電阻值下降，形成鐘罩型 (Bell-shaped) 之可逆式磁電阻特性曲線。

4.2.3 三種類型之磁電阻曲線特性

針對本實驗一系列鎳平板線所量得之磁電阻曲線，其展現的特性依照變化形式可分為三種類型，分別為 A，B，及 C；類別 A 為典型多磁區結構，其變

化形式已於 4.2.2 節詳述，其對應的鎳平板線系列為 $L=20\mu\text{m}$ ，線寬 $w=5.0$ 、 $10.0\mu\text{m}$ ，及 $L=60\mu\text{m}$ ，線寬 $w=2.0$ 、 $5.0\mu\text{m}$ 。

類別 B 之磁電阻於兩相反高磁場方向往零磁場掃取之曲線於交錯於殘磁態，之後往另一方向高磁場掃取時逐漸遠離殘磁態回到可逆部分（Reversible part）前磁電阻先下降至最小值後平滑上升直至超越其下降時之背景值後才又下降，形成四個波包區間；如表 4.2 的中左圖所示。其對應之樣品系列為：線長 $L=20\mu\text{m}$ ，線寬分別為 $w=0.8$ 、 1.0 、 $1.25\mu\text{m}$ ； $L=30\mu\text{m}$ ， $w=0.6$ 、 $0.8\mu\text{m}$ 及 $L=60\mu\text{m}$ ， $w=0.7$ 、 $0.8\mu\text{m}$ 之鎳平板線。

類別 C 之磁電阻曲線，在從高磁場往殘磁態掃取直至其附近之特性為具有一 Coherent rotation 的背景曲線，且 θ 為高角度時，其殘磁電阻皆與 $\theta=90^\circ$ 之飽和電阻值相近；有此表現形態之樣品為線長 $L=20\mu\text{m}$ ，線寬分別為 $w=0.21$ 、 0.22 、 0.27 、 0.38 、 0.4 、 $0.5\mu\text{m}$ ； $L=30\mu\text{m}$ ， $w=0.33$ 、 0.35 、 0.36 、 0.38 、 $0.5\mu\text{m}$ 之樣品及 $L=60\mu\text{m}$ ， $w=0.18$ 、 0.19 、 0.23 、 0.35 、 0.36 、 0.55 、 $0.6\mu\text{m}$ 之樣品。

類別 A、B 及 C 之磁電阻曲線變化形式及對應的樣品系列歸納於表 4.2。由表中示範樣品之磁電阻圖形可明顯觀察出鎳平板線之磁性行為不同於鎳鐵或鈷等鐵磁材料平板線，後者的細長線可以形狀異向性主導展現其磁易軸為長軸之單一磁區結構；而透過改變平板線之長寬比找出多磁區結構與單一磁區結構之樣品尺寸分界（Aharoni 模型，圖 2.3）。類別 A 線寬較寬之鎳平板線確實呈現類似薄膜之多磁區結構，然而類別 B 及 C 則不同於圖 4.3 高長寬比鎳鐵平板線所展現之磁電阻曲線形式，其在零磁場下之磁電阻皆趨近於最低電阻值。根據異向性磁阻理論描述，此情形意味著鎳平板線之磁易軸傾向於短軸方向。

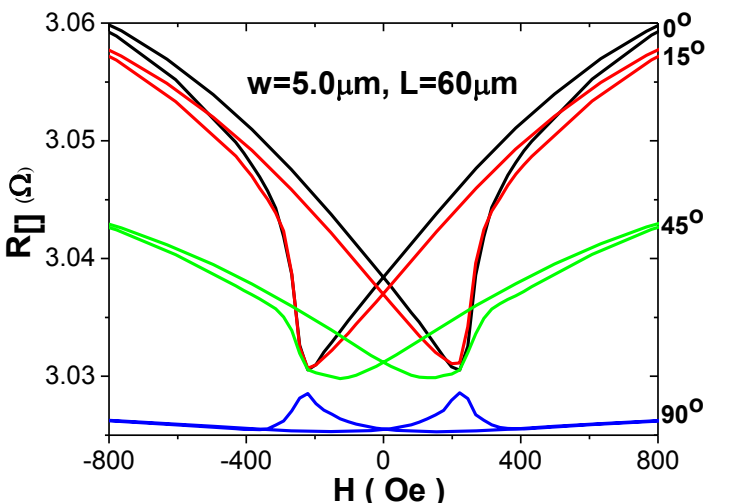
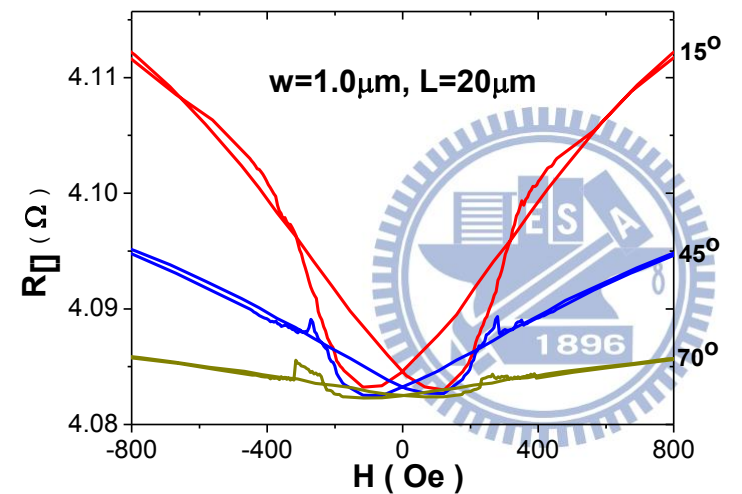
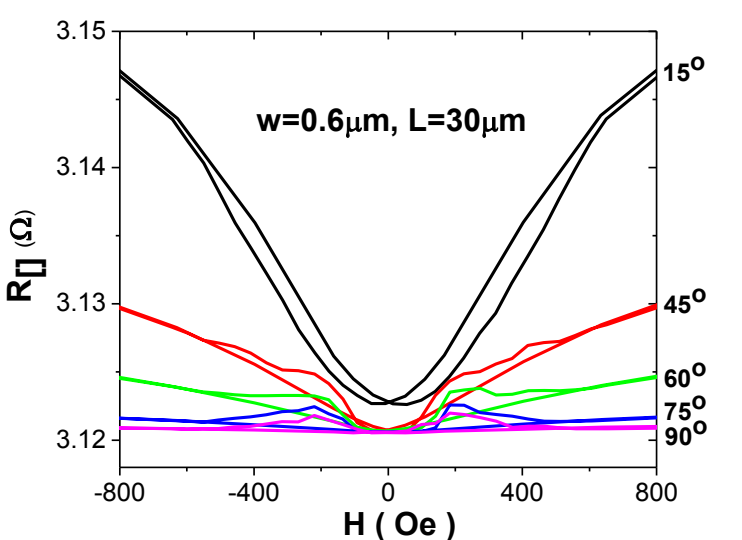
<p>類別 A 代表圖</p>  <p>$w=5.0\mu\text{m}, L=60\mu\text{m}$</p>	<p>對應樣品系列</p> <p>$L=20\mu\text{m}$ $w=5.0、10.0\mu\text{m}$</p> <p>$L=60\mu\text{m}$ $w=5.0\mu\text{m}$</p>
<p>類別 B 代表圖</p>  <p>$w=1.0\mu\text{m}, L=20\mu\text{m}$</p>	<p>對應樣品系列</p> <p>$L=20\mu\text{m}$ $w=0.8、1.0、1.25\mu\text{m}$</p> <p>$L=30\mu\text{m}$ $w=0.8\mu\text{m}$</p> <p>$L=60\mu\text{m}$ $w=0.7、0.8、2.0\mu\text{m}$</p>
<p>類別 C 代表圖</p>  <p>$w=0.6\mu\text{m}, L=30\mu\text{m}$</p>	<p>對應樣品系列</p> <p>$L=20\mu\text{m}$ $w=0.21、0.22、0.27、0.38、0.4、0.5\mu\text{m}$</p> <p>$L=30\mu\text{m}$ $w=0.33、0.35、0.36、0.38、0.5、0.6\mu\text{m}$</p> <p>$L=60\mu\text{m}$ $w=0.18、0.19、0.23、0.35、0.36、0.55、0.6\mu\text{m}$</p>

表 4.2 類別 A、B 及 C 之磁電阻曲線變化形式及對應的樣品系列。

4.3 形狀異向性對鎳平板線磁性行為之影響

在 4.2.3 節中提到，鎳平板線即使在高長寬比下，也不同於上述鈷和鎳鐵合金所展現之磁電阻特性；其磁電阻曲線為一開口朝上的彎曲曲線，看起來就像是鎳鐵合金的磁電阻圖形做 180°之上下翻轉；且 $\theta > 15^\circ$ 之磁電阻曲線的殘磁態電阻均與 $\theta = 90^\circ$ 之飽和磁電阻值相同。根據異向性磁阻效應理論之描述，代表鎳平板線所展現的磁易軸在線之短軸方向。

為探討形狀異向性對鎳平板線磁性行為的影響，實驗時製做了一系列不同長寬比之樣品，在後續章節中分析其磁電阻特性隨樣品尺寸的變化。

4.3.1 異向性磁阻效應與磁矩翻轉情形

異向性磁阻效應 (Anisotropic Magnetoresistance Effect, AMR) 忠實地反映在飽和磁電阻與外加磁場角度的關係。異向性磁電阻可表示為：

$$R(H, \phi) = R_{\perp} + \Delta AMR \cos^2(\phi(H, \theta)) \quad (4-1)$$

其中 ϕ 為鎳平板線磁矩與電流方向 (同樣品線長軸) 夾角， $\Delta AMR \equiv R_{\parallel} - R_{\perp}$ ， R_{\parallel} 與 R_{\perp} 分別為樣品內所有磁矩排列在平行與垂直於電流 (長軸) 方向之飽和磁電阻。當外加磁場大於各角度之飽和磁場時，樣品內部磁矩即被強迫排列在磁場方向上，此時 $\phi = \theta$ ，(4-1) 式之飽和磁電阻 R 和 θ 有 $\cos^2\theta$ 關係式。在外加磁場 H 平行電流方向 (樣品長軸方向)，也就是 $\theta = 0^\circ$ 時，樣品有最大飽和磁電阻值； $\theta = 90^\circ$ 時則有最小飽和磁電阻。

為證明磁電阻量測為探討樣品內部磁矩翻轉形式之可行方法，首先須確認樣品之飽和磁電阻是否完全決定於受異向性磁阻效應，而滿足 $\cos^2\theta$ 關係。圖 4.4 左為一典型高長寬比 ($w=0.55\mu\text{m}$ ， $L=60\mu\text{m}$) 之鎳平板線在不同角度外加磁場下的磁電阻特性曲線。圖中顯示，在高磁場區之磁電阻仍緩慢隨磁場強度增加而增

加，顯示實驗中所使用之電磁鐵可到達之最大之磁場~2600 Oe，無法在所有 θ 將樣品飽和磁化；因此在磁電阻曲線靠近飽和磁場之尾端，以 (4-2) 式擬合至飽和值：

$$R(H) = R_0 e^{-\frac{H}{H_0}} + R_{sat} \quad (4-2)$$

其中 R_0 、 H_0 和 R_{sat} 為可調變數；如圖 4.5 右為樣品之未飽和磁電阻擬合情況。黑線部分為原始電阻圖形，紅線部分則為 (4-2) 式對尾端約 1000 Oe 至 2600 Oe 範圍數據處擬合而後外插至 5000 Oe 的結果。如此可得各 θ 下之飽和磁電阻。

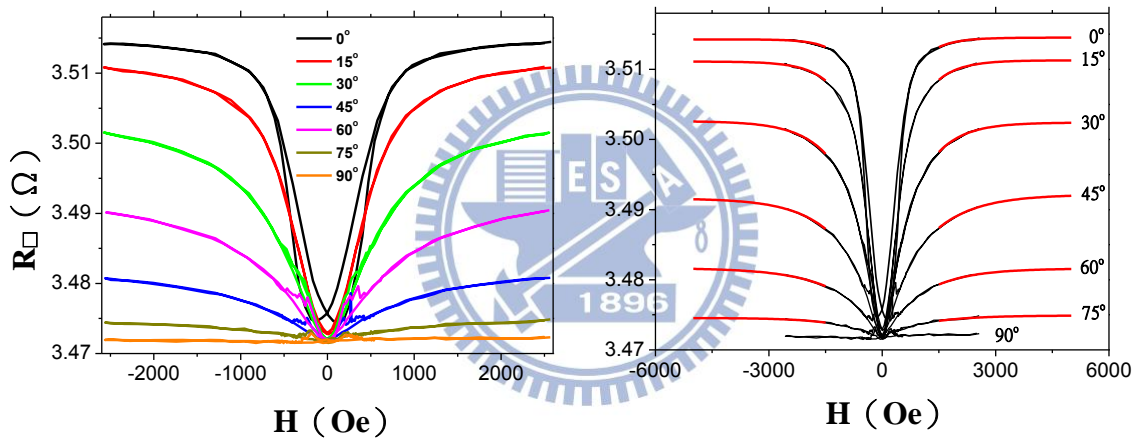


圖 4.5 $w=0.55\mu\text{m}$ ， $L=60\mu\text{m}$ 之鎳平板線在 $T=10\text{K}$ 之磁電阻曲線（左）與未飽和磁電阻擬合圖形（右）。

將所量得之鎳平板線樣品在不同 θ 下之飽和磁電阻值對 $\cos^2\theta$ 作圖如圖 4.6，呈現很好的線性關係；說明鎳平板線之磁性行為受到了異向性磁阻效應主導。

因此後續皆以磁電阻變化率 $\frac{\Delta R}{\Delta \text{AMR}}$ 來探討樣品內部的磁矩翻轉情形。磁電阻變

化率 $\frac{\Delta R}{\Delta \text{AMR}}$ 定義為：

$$\frac{\Delta R}{\Delta \text{AMR}} = \frac{R(H) - R_{\perp}}{\Delta \text{AMR}} \quad (4-3)$$

其中 $R(H)$ 為量測所得之樣品電阻值。由上式可知，當 $\Delta R/\Delta AMR=0$ ，表樣品內部磁矩皆沿垂直長軸 ($\theta=90^\circ$) 方向排列， $\Delta R/\Delta AMR=1$ 則表所有磁矩平行長軸。 $\Delta R/\Delta AMR$ 由 1 至 0 即代表了內部磁矩逐漸偏離長軸的程度。

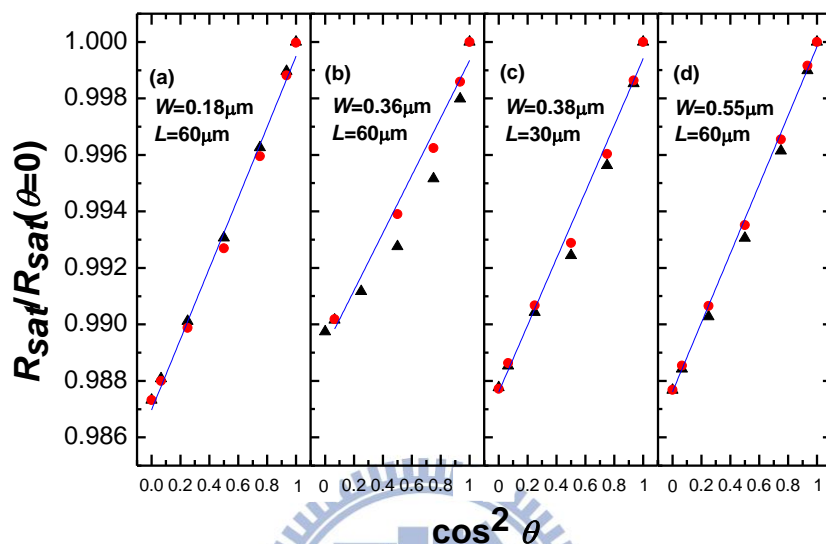


圖 4.6 四條微米鎳平板線之飽和磁電阻與 $\cos^2\theta$ 關係圖；線的幾何條件如圖所示，厚度為 30 nm。●：經擬合過後之飽和電阻值。▲：實驗時最大外加磁 (~2600 Oe) 場下之電阻值。藍線部分為飽和磁電阻值對 $\cos^2\theta$ 之線性擬合。

4.3.2 樣品長寬比對 Coherent rotation 磁阻背景背景曲線的影響

由圖 2.3 之 Aharoni 模型，圖 4.7 展示之鎳平板線樣品維度 ($w=0.18\mu\text{m}$ ， $L=60\mu\text{m}$) 應歸類為單一磁區 (Single domain) 結構。然而不同於鈷和鎳鐵合金所展現之磁電阻曲線形式 (圖 4.3)；磁電阻曲線為一開口朝上的鐘罩型，看起來就像是鎳鐵合金的磁電阻圖形做 180° 之上下翻轉；且 $\theta > 15^\circ$ 之磁電阻曲線的殘磁態電阻均與 $\theta = 90^\circ$ 之飽和磁電阻值相同。根據異向性磁阻效應理論之描述，雖然樣品具有高度形狀異向性 (長寬比 $m = 330$)，所展現的磁易軸卻趨近於短軸；表示高形狀異向性能無法將樣品之磁易軸改變至長軸方向。

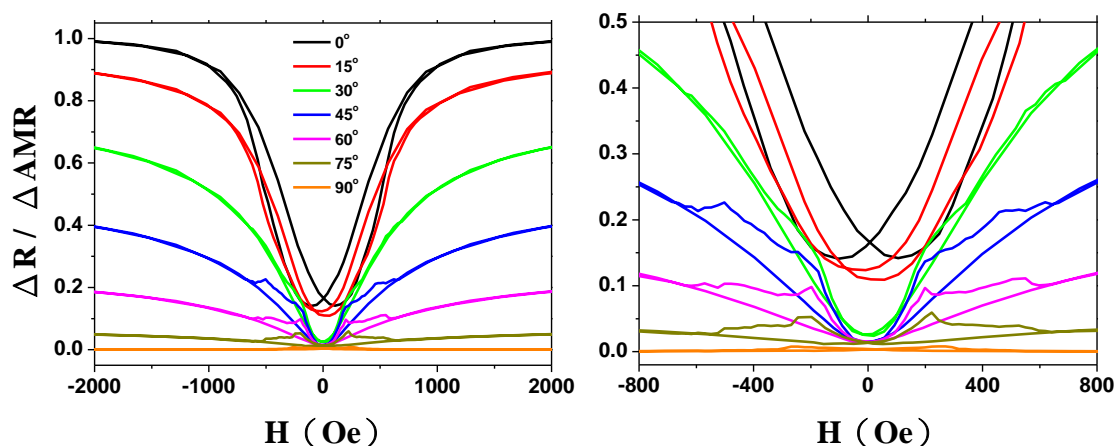


圖 4.7 鎳微米平板線 ($w=0.18\mu\text{m}$, $L=60\mu\text{m}$, $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$ 之磁電阻圖形，右圖為左方磁電阻圖形在外加磁場靠近 $H=0$ 之殘磁態的放大。

觀察圖 4.7 可知， $\theta > 15^\circ$ 時，其鎳平板線之磁電阻特性可分為兩部分：磁場大於 600 Oe 之可逆磁電阻圖形及磁場範圍小於 600 Oe 之不可逆性變化。當外加磁場強度由飽和值開始降低時，樣品內磁矩隨即脫離磁場控制而傾向偏轉為鎳平板線之短軸方向，造成電阻值逐漸下降。此部分磁電阻曲線為可逆，此時磁矩翻轉形式為 *Coherent rotation*。

繼續減小磁場，電阻延續下降情形至殘磁態 (*Remnant state*)，此時電阻有最小值；代表樣品內部磁矩沿樣品短軸方向排列。當磁場轉為逆向並逐漸增強時，磁電阻開始快速上升。說明樣品內部之磁矩方向再度偏離平板線短軸。以 $\theta = 45^\circ$ 為例，磁電阻上升趨勢在 200 Oe 附近減緩，而後隨漸強的逆向磁場，樣品內部隨其進行翻轉之磁矩比例逐漸上升，造成磁區的改變；外加磁場於 600 Oe 附近時，樣品內部磁矩之偏轉方向逐漸平行外加磁場而偏離電流方向，造成電阻值的下降；再度回到 *Coherent rotation* 的翻轉形式直至飽和。此部分磁電阻行為不可逆。在本實驗研究範圍的樣品系列中，不可逆部份之曲線所包括的磁場範圍皆位於 $\pm 600\text{ Oe}$ 內。

在不可逆之磁電阻曲線中，並未發現如同 *Aharoni* 模型所預期的單一磁區結構所應展現之特性。圖 4.7 所展現出的磁電阻曲線說明磁矩隨外加磁場為連續性

的偏轉，而非在小磁場範圍內完成瞬間翻轉動作；代表此維度之鎳平板線並非具有單一磁區結構，而是有多磁區結構的存在。

為了解改變鎳平板線之形狀異向性是否影響樣品之磁易軸方向，實驗時研究一系列不同長寬比之樣品，希望以高形狀異向性能將平板線之磁易軸轉移至樣品長軸。鎳平板線展現在磁電阻特性曲線中的兩種重要指標：Coherent rotation 之曲線可逆部分（Reversible part）之磁電阻變化率和回升趨勢，以及不可逆部分（Irreversible part）的殘磁電阻值。稍後兩節將針對此兩項重要指標和樣品尺寸的關係做討論。

* 相同線寬下不同線長之樣品

圖 4.8 為數條高長寬比之鎳平板線在 $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 與 $\theta=60^\circ$ 時，展現的磁電阻特性。在磁場由兩方向高磁場掃向零之磁阻背景曲線皆展現一相對零場對稱，開口向上的彎曲行為。由圖中可看出，線寬小於 $0.4\mu\text{m}$ 樣品之 Coherent rotation 背景曲線開口隨長寬比增加而變窄，即在相同磁場下，線長越長之鎳平板線有越高的 $\frac{\Delta R}{\Delta AMR}$ 值，代表較長之樣品含有較多平行長軸的磁矩分量；此結果吻合預期中長寬比值增加導致形狀異向性能上升。雖然並不像鎳鐵或鈷平板線在高長寬比下，磁易軸在長軸，且有單一磁區結構的特性，但形狀異向性仍隨著長寬比增加而影響其 Coherent rotation 之磁阻背景曲線；然而 $w \geq 0.5 \mu\text{m}$ 之樣品，並未觀察出此明顯背景變化趨勢。對於鎳平板線而言，樣品的高長寬比仍無法將其磁易軸改變為長軸；其零磁場之電阻仍顯示鎳平板線之磁易軸為短軸。

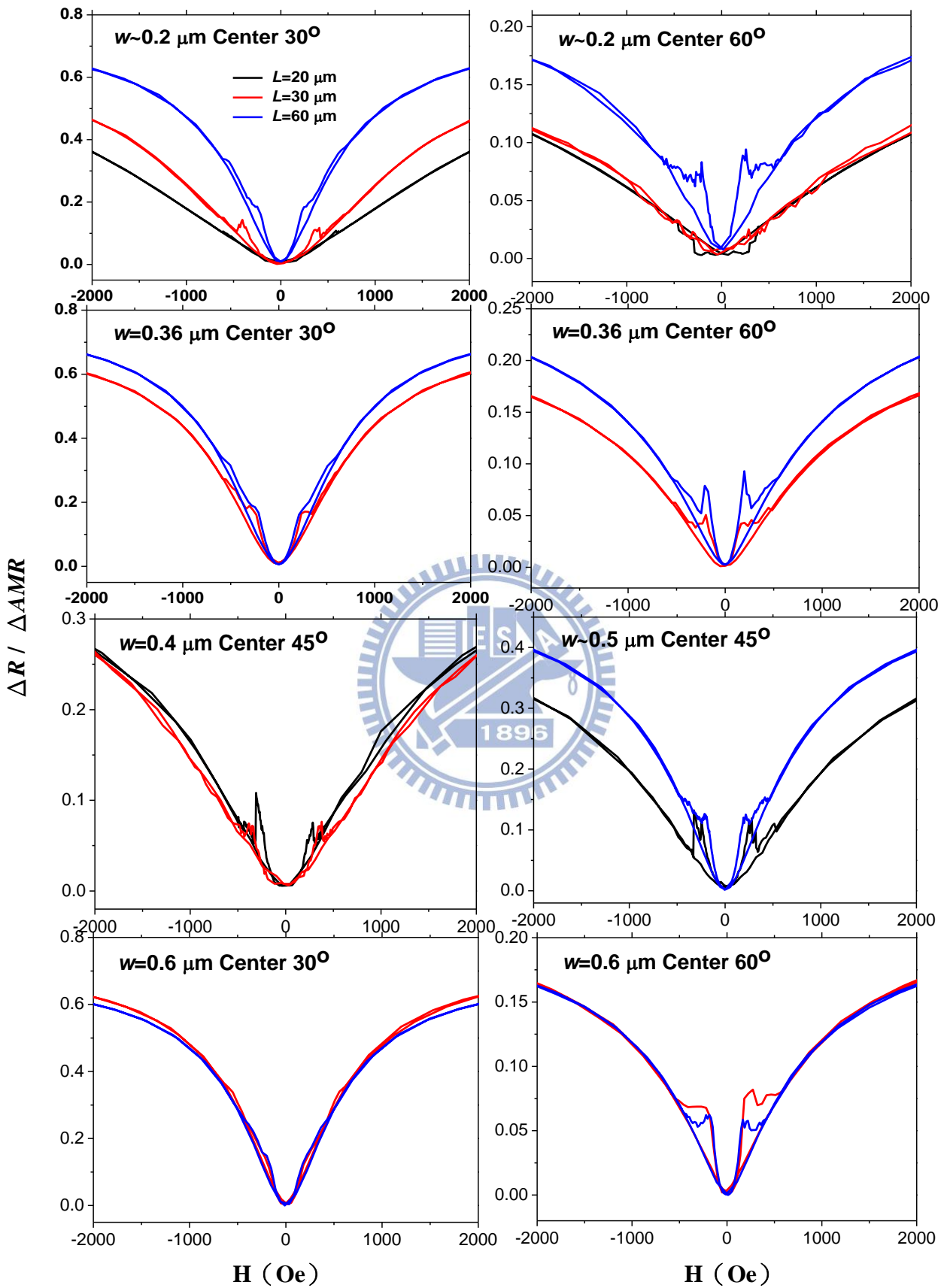


圖 4.8 類別 C 系列中數種線寬之鎳平板線在 $\theta = 30^\circ$ 與 $\theta = 60^\circ$ 時，於線長

— : $L = 20 \mu\text{m}$, — : $L = 30 \mu\text{m}$, — : $L = 60 \mu\text{m}$ 下展現的磁電阻特性。

* 相同線長下不同線寬之樣品

圖 4.9 為 $L=20\ \mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品於 $\theta=15^\circ$ 時在不同線寬下所展現之磁電阻曲線。其在殘磁態時電阻皆趨近於最小值；由異向性磁阻理論，可知其磁易軸趨近於平板線短軸。 $0.4\ \mu\text{m} \leq w \leq 1.0\ \mu\text{m}$ 以下之樣品，如上段所言寬度稍寬樣品之 Coherent rotation 背景曲線開口並未隨長寬比增加而有預期趨勢。且由圖 4.9 可知， $w=0.8\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 樣品與 $w=0.4\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 之樣品有不同磁電阻形式，因此表 4.2 將前者歸類為 B，後者則歸類為 C。

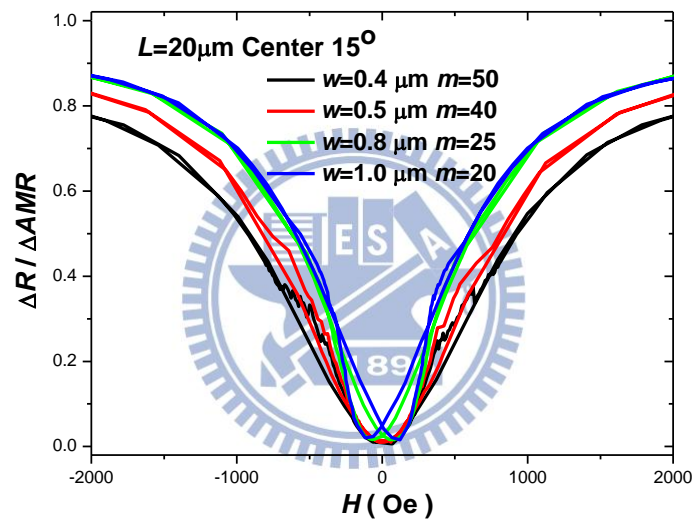


圖 4.9 線長 $L=20\ \mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品於 $\theta=15^\circ$ 時，在不同線寬下所展現之磁電阻曲線。

為了清楚觀察磁電阻變化率隨線寬之變化趨勢，分析類別 B 與 C 之樣品時統一選擇外加磁場 $H=1000\ \text{Oe}$ 時之磁電阻變化率，圖 4.10 為 $L=20\ \mu\text{m}$ 之樣品在此外加磁場與樣品線夾角 (a) $\theta=45^\circ$ (b) $\theta=70^\circ$ 與 75° 時其磁電阻變化率隨不同線寬大小之分布情形。不同之幾何形狀標示分別代表不同批電子束微影製程所製做之樣品，其鎳平板線厚度有些微差異，約在 $1\ \text{nm}$ 以內。 $0.4\ \mu\text{m} \leq w \leq 1.0\ \mu\text{m}$ 之鎳平板線在相同外加磁場下，磁電阻變化率 $\frac{\Delta R}{\Delta \text{AMR}}$ 隨線寬減小而下降；代表線寬較窄之樣品含有較多垂直長軸的磁矩分量；顯示雖然樣品之長寬比值增加導

致形狀異向性能上升，其磁易軸卻更趨近於短軸。而類別 C 之 $w < 0.4 \mu\text{m}$ 之樣品則無觀察出規律性變化，說明主導類別 B 與 C 中之樣品磁矩翻轉機制不同。

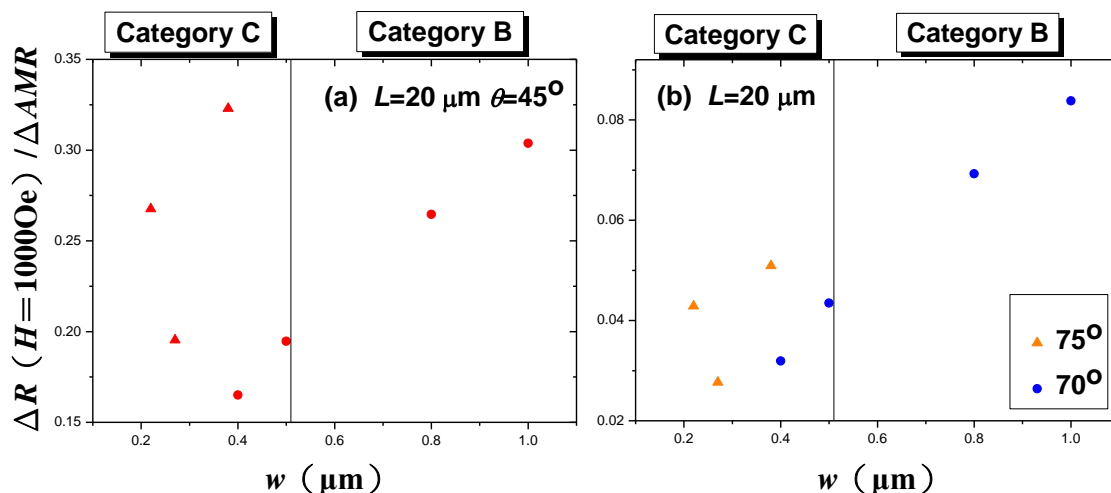


圖 4.10 $L=20\mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品在外加磁場 H 與線長軸夾角 (a) ●▲ $\theta=45^\circ$ ，(b) ● $\theta=70^\circ$ ，▲ $\theta=75^\circ$ ，下，於 $H=1000 \text{ Oe}$ 時之磁電阻變化率隨樣品線寬之分布。●和▲分別代表不同批電子束微影製程所製作之鎳平板線。

線長增為 $30 \mu\text{m}$ 時，樣品在 $H=1000 \text{ Oe}$ 下磁電阻變化率如圖 4.11 (a) $\theta=45^\circ$ 和線寬分布關係，可知 $w < 0.8 \mu\text{m}$ 之樣品，其分布關係已無規律性；但在接近短軸方向的 $\theta=75^\circ$ 時 (圖 4.11 (b)) 磁電阻變化率隨樣品線寬下降也呈現下降之分布趨勢。顯示此時線寬較窄的樣品，其內部的磁矩有較多平行於線短軸之分量。

圖 4.12 為 $L=60 \mu\text{m}$ (a) (c) 類別 C 與 (b) 類別 B 鎳平板線樣品在外加磁場 H 與線長軸夾角 $\theta=15^\circ$ 和 $\theta=75^\circ$ 時，不同線寬下所展現之磁電阻曲線。

$\theta=15^\circ$ 時，類別 B 及 C 之樣品所展現之磁電阻形式皆非常類似，雖仍有遲滯現象且在兩類別稍有不同，但由兩方向之高磁場掃至零磁場之磁阻曲線是非常相近的；接近於一可逆形態之磁電阻曲線，且在殘磁態時電阻皆趨近於最小值。根據異向性磁阻理論描述可知，此二系列之樣品磁易軸傾向於線之短軸。此外類別 C 中在零磁場下之電阻變化率隨線寬減少而稍微增加，顯示樣品中某些區域磁矩已偏離短軸。且相較於類別 B，其磁阻變化率在零磁場附近隨著磁場變化較快。

探討外加磁場與樣品長軸夾角接近於短軸的 $\theta=75^\circ$ ，如圖 4.11(b) $L=30\ \mu\text{m}$ 樣品於 $H=1000\ \text{Oe}$ 時之磁電阻變化率隨樣品線寬之分布所示，類別 C 樣品之隨著線寬越寬，殘磁態有越高之電阻值，且各線寬樣品之殘磁態電阻脫離最低點之情形較圖 4.11(d) $L=60\ \mu\text{m}$ 的類別 B 樣品更為明顯，顯示此時隨著線寬減少而增加的形狀異向性能使得樣品在殘磁態時平行樣品長軸的分量增加，導致電阻值上升。而對於 Coherent rotation 之背景曲線，類別 C 樣品於各線寬下無太大差異；而類別 B 樣品和 $L=20\ \mu\text{m}$ 情況相同；由圖中可看出，類別 B 樣品之 Coherent rotation 背景曲線開口隨長寬比增加而變寬；即在相同磁場下，線寬越寬之鎳平板線有越高的 $\frac{\Delta R}{\Delta \text{AMR}}$ 值，代表較長之樣品含有較多平行長軸的磁矩分量；顯示雖形狀異向性能的增加造成圖 4.11(b) $L=30\ \mu\text{m}$ 類別 C 樣品在 $H=1000\ \text{Oe}$ 之磁電阻變化率上升，其在 Coherent rotation 之磁阻背景曲線表現形式仍顯示異向性能非唯一的能量主導原因。鎳平板線之殘磁態電阻值與其形狀異向性的關聯性於稍後一小節探討。



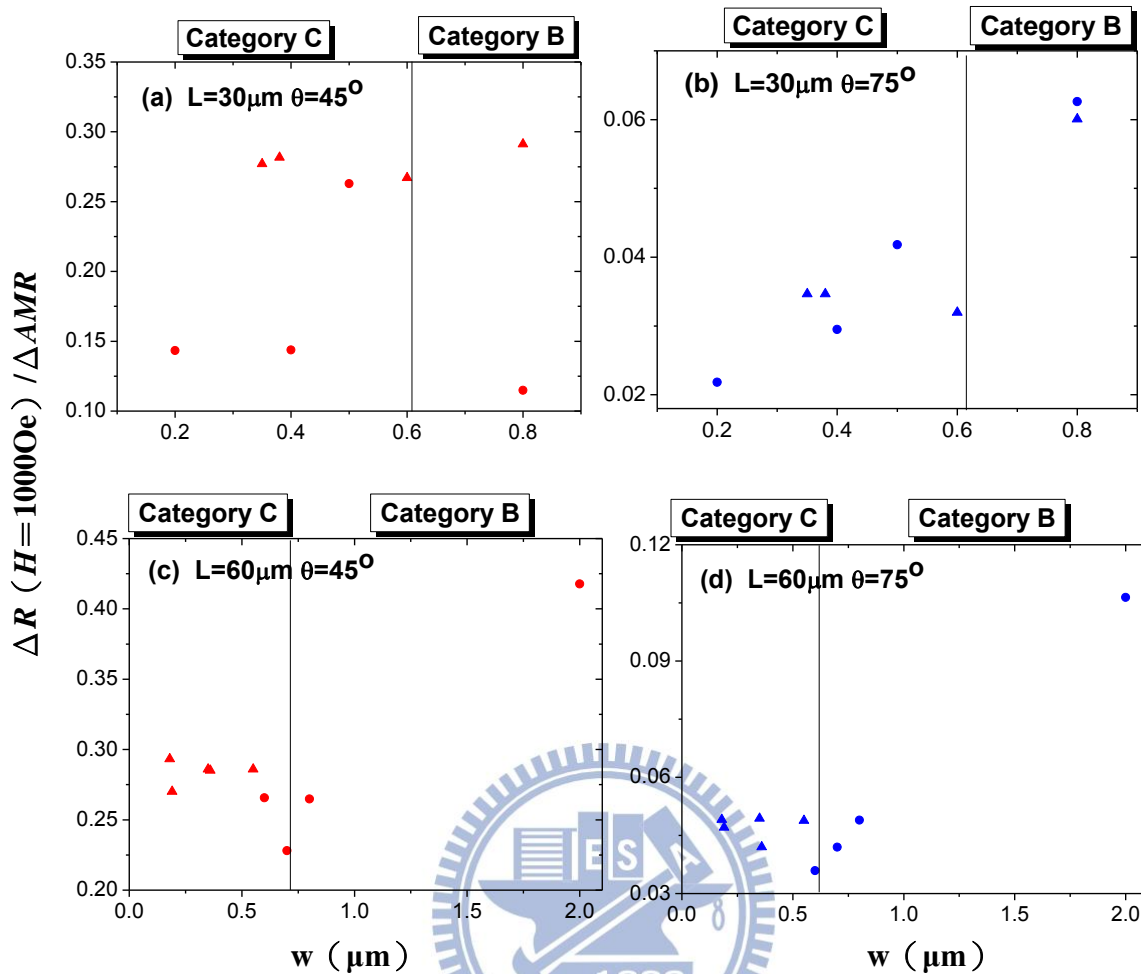


圖 4.11 線長為 (a) (b) $L=30\ \mu\text{m}$ 及 (c) (d) $L=60\ \mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品在外加磁場 H 與線長軸夾角 θ \bullet \blacktriangle $\theta=45^\circ$, \bullet \blacktriangle $\theta=75^\circ$ 下, 於 $H=1000\ \text{Oe}$ 時之磁電阻變化率隨樣品線寬之分布。 \bullet 和 \blacktriangle 分別代表不同批電子束微影製程所製作之鎳平板線。

觀察圖 4.11 (c) 和 (d) 可發現 $L=60\ \mu\text{m}$ 鎳平板線在 $H=1000\ \text{Oe}$ 時之磁電阻變化率隨線寬在類別 B 與 C 中出現了與 $L=20\ \mu\text{m}$ 樣品 (圖 4.10 (a) (b)) 相同的分布關係：類別 B 樣品, 其磁電阻變化率隨線寬增加而遞增；而類別 C 之樣品其磁電阻變化率隨線寬並無規律分布, 說明主導 $L=20\ \mu\text{m}$ 與 $L=60\ \mu\text{m}$ 兩系列樣品之機制相同。

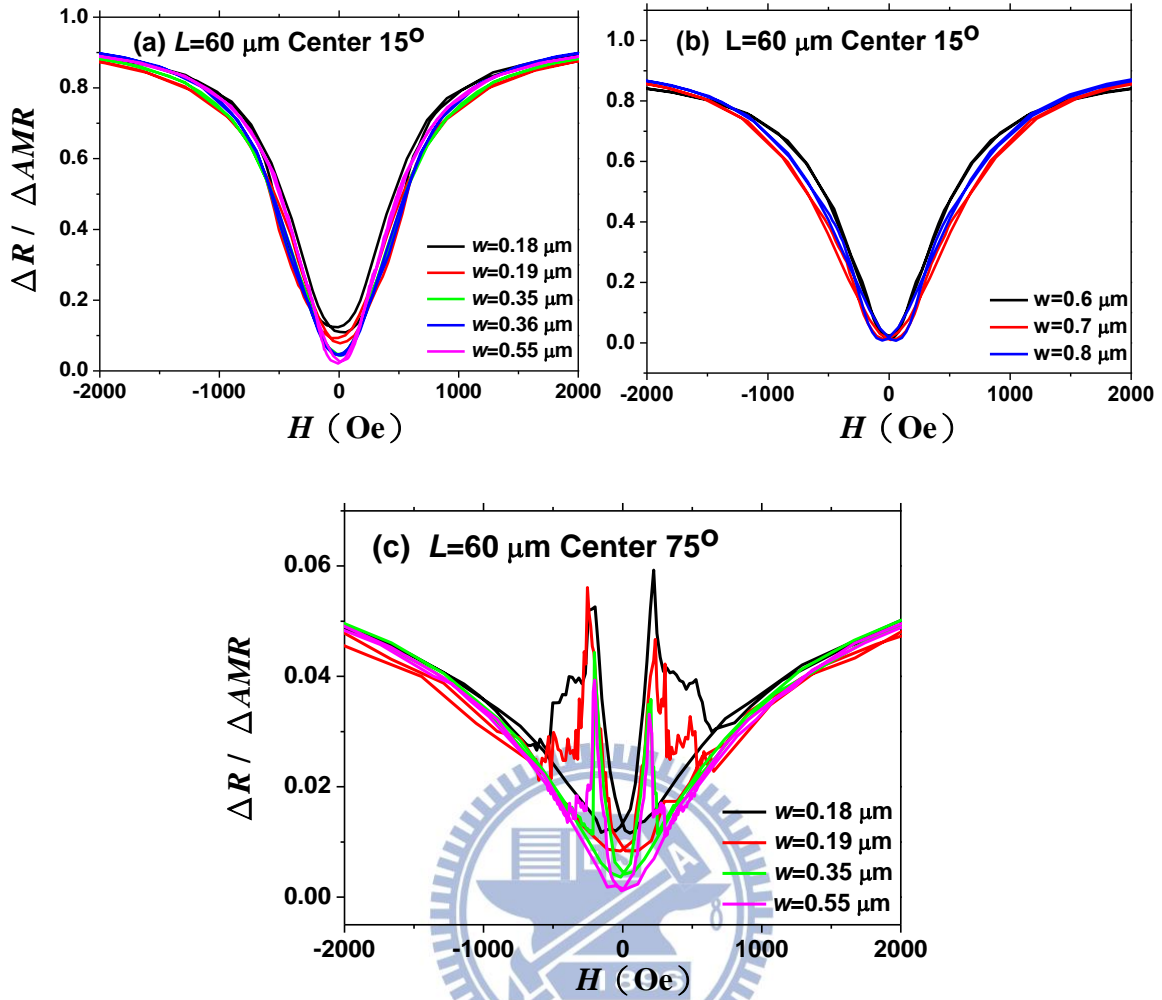


圖 4.12 線長 $L=60 \mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品在外加磁場 H 與線長軸夾角 (a) (b) $\theta=15^\circ$ 和 (c) $\theta=75^\circ$ 時，不同線寬下所展現之磁電阻曲線。

4.3.3 樣品長寬比與殘磁態電阻之關聯

根據異向磁阻的描述，由實驗結果可知，鎳平板線之磁易軸趨近平行於線之短軸；此特性由磁電阻曲線中，各 θ 之殘磁態電阻與 $\theta=90^\circ$ 之飽和磁電阻值相同所展現出。由此可知樣品之殘磁態電阻值受到其形狀異向性能影響，和樣品尺寸大小有關。鎳平板線之磁易軸開始偏離短軸時，將由小角度開始，其殘磁電阻開始偏離 $\theta=90^\circ$ 之飽和磁電阻值；因此觀察各線寬在 $\theta=0^\circ$ 及 $\theta=15^\circ$ 時之殘磁態電阻值可知樣品所展現之磁異向性和其幾何形狀之關聯。

圖 4.13 為 (a) $L=20\ \mu\text{m}$ (b) $L=30\ \mu\text{m}$ (c) (d) $L=60\ \mu\text{m}$ 之樣品在各外加磁長與樣品線夾角 θ 下之殘磁態電阻變化率。觀察 (a) 圖中 $L=20\ \mu\text{m}$ 系列之樣品在 $\theta=0^\circ$ 及 $\theta=15^\circ$ 時各線寬的殘磁電阻變化率，可知線寬在 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下之樣品，雖有較高的形狀異向性，但其殘磁電阻值卻較線寬為 $0.8\ \mu\text{m}$ 以上之樣品來的低，顯示磁易軸較傾向於平行樣品短軸，形狀異向性能不足以致使樣品之磁易軸轉移至樣品長軸。單看線寬在 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下之類別 C 樣品，結果和其殘磁態之 MFM 影像（見 4.4 節）顯示之磁區結構一致；當線寬越小時， $\theta=0^\circ$ 之殘磁態有較多的磁區分佈於平板線內部，導致殘磁電阻變化率因磁壁貢獻的電阻 (Domain wall resistance) 而升高。而觀察類別 B 之樣品， $w=0.8\ \mu\text{m}$ 比起 $w=1.0\ \mu\text{m}$ 之樣品有稍高之形狀異向性，但卻有較小之殘磁電阻，代表此時樣品磁易軸更傾向於短軸。同樣的情形在圖 4.13 (b) 中 $L=30\ \mu\text{m}$ 系列之類別 B 中， $w=0.6\ \mu\text{m}$ 與 $w=0.8\ \mu\text{m}$ 樣品。而圖 4.13 (b) 中線寬在類別 C， $w=0.5\ \mu\text{m}$ 以下樣品相對於類別 B 之 $w=0.6\ \mu\text{m}$ 與 $w=0.8\ \mu\text{m}$ 仍有較小之殘磁電阻值，顯示主導 $L=20\ \mu\text{m}$ 與 $L=30\ \mu\text{m}$ 類別系列樣品中磁矩翻轉機制的一致性。

圖 4.13 (c) 與 (d) 分別為 $L=60\ \mu\text{m}$ ，線寬在 $0.55\ \mu\text{m}$ 以下及以上之兩批不同次電子束微影製作之樣品。觀察圖 4.13 (c) 中 $w<0.6\ \mu\text{m}$ 之類別 C 系列樣品在 $\theta=0^\circ$ 及 $\theta=15^\circ$ 之殘磁電阻值，發現其隨著線寬降低而增加。吻合上述線寬越窄，磁壁貢獻之電阻越大的情形；另一原因為隨著線寬減小，長寬比增加而上升的形狀異向性能使得平行線軸方向之磁矩分量增加，而致使殘磁電阻逐漸上升。而線寬 $w>0.6\ \mu\text{m}$ 之各樣品皆屬於類別 B 的磁電阻行為，因此在圖 4.13 (d) 所展現之分布形式並無太大差異。

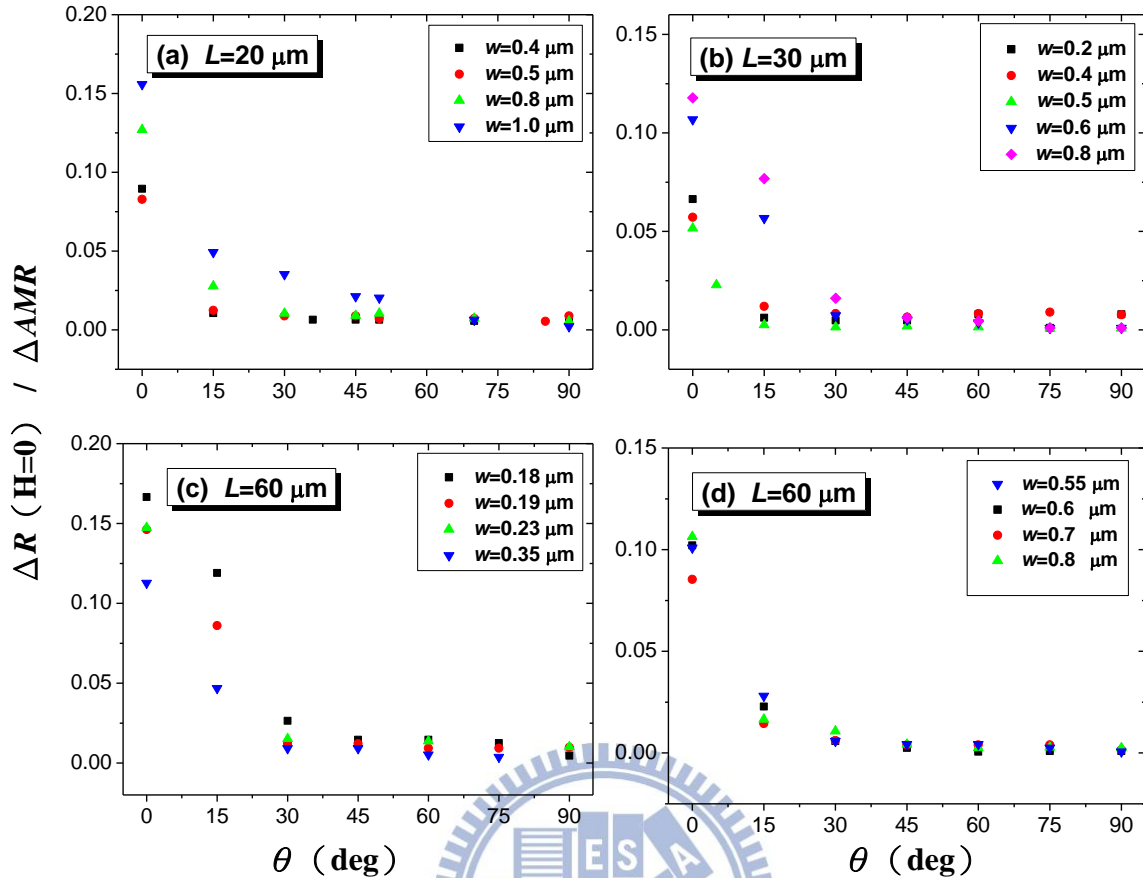


圖 4.13 (a) $L=20 \mu\text{m}$ (b) $L=30 \mu\text{m}$ (c) (d) $L=60 \mu\text{m}$ 之樣品在不同線寬下，殘磁態電阻變化率和外加磁場與樣品線夾角 θ 之分布關係。

圖 4.14 為 $\theta=15^\circ$ 殘磁電阻值隨樣品長寬比分布關係，說明了樣品隨形狀異向性增加造成在殘磁態時內部磁矩平行樣品長軸之分量增加的影響隨長寬比之分界。當 L/w 在 15 以下，樣品之磁性行為與磁性材料薄膜雷同，在外加磁場為零之殘磁情況下，內部有著較為混亂的多磁區結構以及磁區間分布的磁壁構造，造成其與電子之散射 (Domain wall resistance) 而有較高的殘磁電阻值，如類別 A。類別 B 與 C 之樣品皆位於 $L/w > 15$ 區段，其長寬比較大之樣品有較小之殘磁電阻值，說明鎳平板線內部磁矩在殘磁態時有較大垂直樣品長軸之分量；此時形狀異向性能的貢獻尚不足以使樣品之磁易軸偏離於線之短軸。樣品形狀異向性由類別 B 進入 C 之過渡區間，其磁電阻曲線在殘磁態附近，於兩方向掃取之曲線交錯而形成的四個波包區間，此時逐漸回到類別 C 之磁電阻形式，在殘磁態附近之特性為具有一可逆性 Coherent rotation 的背景曲線，且 θ 為高角度時，其

殘磁電阻皆與 $\theta=90^\circ$ 之飽和電阻值相近。當 $L/w > 100$ 時樣品磁性行為皆屬於類別 C，其高度形狀異向性使得樣品在殘磁態時內部磁矩有較多平行長軸之分量，導致殘磁態電阻值上升，磁易軸之方向逐漸偏離短軸。且於 $\theta=15^\circ$ 之殘磁態時其磁區數量隨著 L/w 增加而增加，而有較高磁壁電阻之貢獻。此兩項主導之機制造成具有高長寬比的樣品，其殘磁電阻的再度上升。

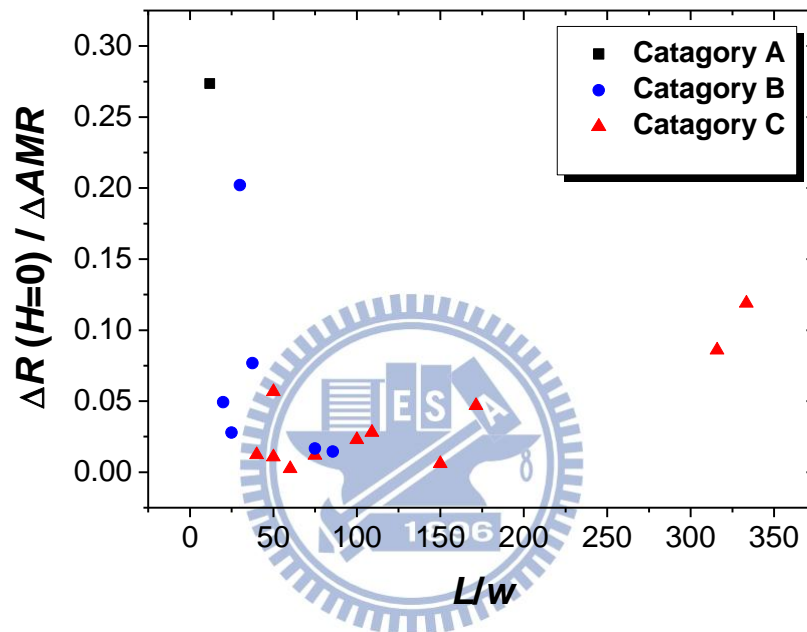


圖 4.14 $\theta=15^\circ$ 時樣品之殘磁電阻變化率隨長寬比分布關係，不同類別系列之樣品分別以不同幾何形狀標記。

4.3.4 極小線寬之磁性行為

圖 4.12 (c) 展示即為本研究中最小線寬之樣品，線寬 $w=0.18 \mu\text{m}$ 、 $0.19 \mu\text{m}$ 時，於 $\theta=75^\circ$ 之磁電阻曲線。其顯示磁電阻不可逆部分之磁電阻形態與其他線寬有明顯之差異；在極小線寬下，由於形狀異向性能造成之影響顯著，磁矩平行長軸分量較大，使殘磁態電阻因內部磁矩偏離短軸而升高。其不可逆部分磁電阻曲線歷經之磁場範圍較大，期間之磁電阻變化率也皆較高，造成磁電阻波包面積遠大於其他線寬；說明外加磁場克服極小線寬樣品之高形狀異向性能過程中，有許多微磁區及磁壁的形成貢獻的電阻值。在形狀異向性及磁壁貢獻所造成的效應

下，磁矩須歷經較寬的不可逆磁電阻曲線所含之磁場範圍區間，以及變化較大的磁阻變化率，才回到平行外加磁場方向排列。

4.4 殘磁態下鎳平板線之磁力影像

4.4.1 殘磁態的鎳平板線磁力影像

鎳平板線之磁阻曲線於不可逆部分 (Irreversible part) 皆未展現預期中在磁矩方向平行於長軸的單一磁區結構。為確定此結果，本實驗也利用電子束微影技術在 SiN/Si 基板上製作一系列線長 $L=21\ \mu\text{m}$ ，線寬由 $0.2\ \mu\text{m}$ 變化至 $5\ \mu\text{m}$ ，厚度 t 同為 $30\ \text{nm}$ 的鎳平板線陣列，進行室溫下磁力影像 (Magnetic Force Microscope, MFM) 掃描。掃描前先於樣品長軸方向施予一大磁場 ($\sim 7000\ \text{Oe}$) 將樣品飽和磁化；隨後將樣品挪離外加磁場使其回到殘磁態，再進行掃描動作。限於貴儀實驗設備之使用限制，本實驗僅對樣品做了外加磁場與長軸方向平行之殘磁態的掃描。觀看 MFM 影像時，可同步檢視樣品線之原子力顯微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) 影像，確認平板線表面之粗糙情形。掃描結果顯示，樣品表面粗糙程度約在 $2\ \text{nm}$ 之內。

圖 4.15 為幾種不同線寬之鎳平板線樣品之及 AFM (左) 及 MFM (右) 掃描影像。右圖於鎳平板線 MFM 影像中，暗與亮分別代表穿出和穿入樣品之兩種不同的磁力線行進方向。圖中最下方線寬為 $5.0\ \mu\text{m}$ 之樣品，並無特殊磁區分布之形式，呈現不規則的亮暗區域，可視為多磁區結構。而線寬在 $0.8\ \mu\text{m}$ 以下之樣品則在其長軸兩端呈現亮暗交替之區塊；且線寬較寬之樣品中央區段顯示均勻之暗色。此圖非常恰當地說明鎳平板線之磁易軸平行於樣品線之短軸，並解釋了磁電阻曲線於殘磁態時趨近於小電阻值；其擁有多磁區結構，且有著有規律的磁區分布；不同於線寬為 $5\ \mu\text{m}$ 之樣品。

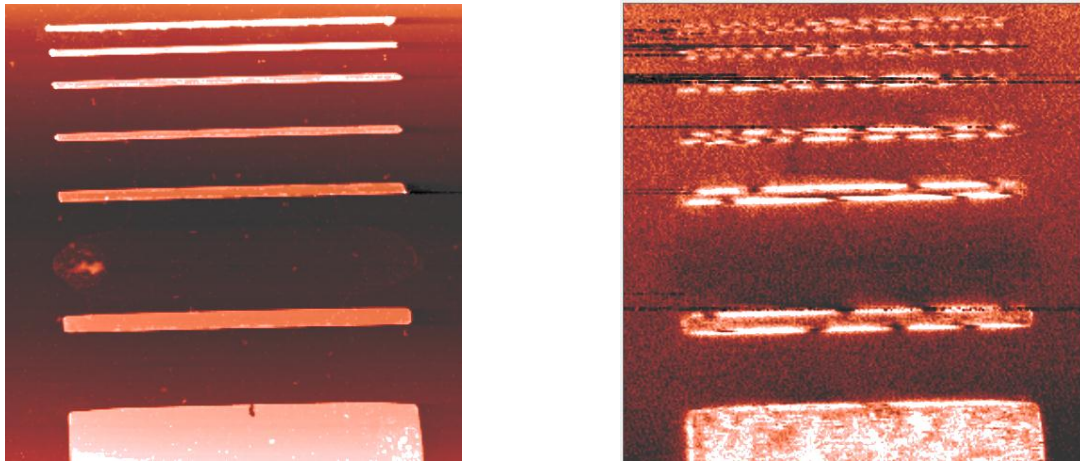


圖 4.15 不同線寬之鎳平板線樣品在室溫下之 AFM (左) 及 MFM (右) 掃描影像。線長為 $21\ \mu\text{m}$ ，線寬由上至下依序為 $w=0.25\ \mu\text{m}$ ， $0.31\ \mu\text{m}$ ， $0.40\ \mu\text{m}$ ， $0.48\ \mu\text{m}$ ， $0.69\ \mu\text{m}$ ， $0.8\ \mu\text{m}$ ，與 $5.0\ \mu\text{m}$ 。

上圖中，線寬小於 $0.5\ \mu\text{m}$ 的樣品所展現之磁電阻圖形歸類於類別 C， $0.5\ \mu\text{m}$ 以上則歸於類別 B。圖中顯示，當樣品由長軸方向之飽和磁場回到殘磁態時，線寬越窄的樣品線內所含之磁區數越多，表示磁矩傾向脫離長軸的情況越為明顯；說明了磁易軸越傾向平行於短軸的特性。此時在樣品在殘磁態，磁壁所貢獻的電阻 (Domain wall resistance) 也越大。因此圖 4.10 在小角度中，類別 C 樣品所含有的高電阻變化率可視為樣品內部磁壁所貢獻；觀察圖 4.10 (b) 之類別 C 的殘磁態電阻值變化率較圖 4.10 (a) 同類別樣品來的低，這是因為樣品之磁易軸近平行於短軸，因此在高角度時之殘磁態磁壁所貢獻之電阻值較小。

4.4.2 由磁電阻曲線及磁力影像推斷磁矩翻轉

透過圖 4.15 在室溫下所得之殘磁態 MFM 影像顯現的亮暗區域，可推測鎳平板線在 $T=10\text{K}$ 時，類別 B 與類別 C 樣品在殘磁態時，磁矩在鎳平板線內部之排列情形，如圖 4.16。樣品中的明暗區域代表了垂直膜面的磁矩方向；磁矩並非完全垂直膜面，而是有一傾斜角。類別 B 樣品內部磁矩相較於類別 C 有較多平行平板線的分量。有了殘磁態時磁矩在鎳平板線內部之排列情形，即可推測整條

磁電阻曲線中，樣品在各外加磁場下內部的磁矩翻轉，如圖 4.17 與圖 4.18。

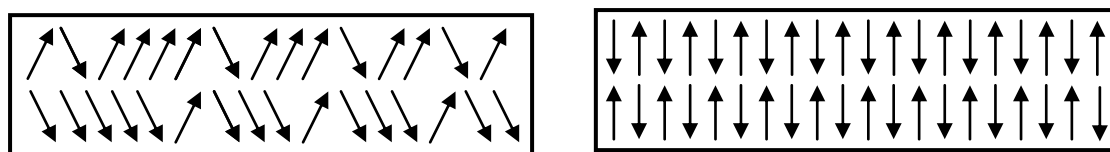


圖 4.16 依圖 4.15 之 MFM 影像推測類別 B (左) 及類別 C (右) 之鎳平板線樣品內部磁矩排列情形。

圖 4.17 為類別 B 之鎳平板線 ($w=1.0\mu\text{m}$, $L=20\mu\text{m}$, and $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$, $\theta=15^\circ$ 及 $\theta=90^\circ$ 時之磁電阻圖形；推測樣品內部磁矩在各外加磁場下的翻轉情形標示在圖中單向磁電阻圖形 (實線部分) 中，相對應的磁場大小。

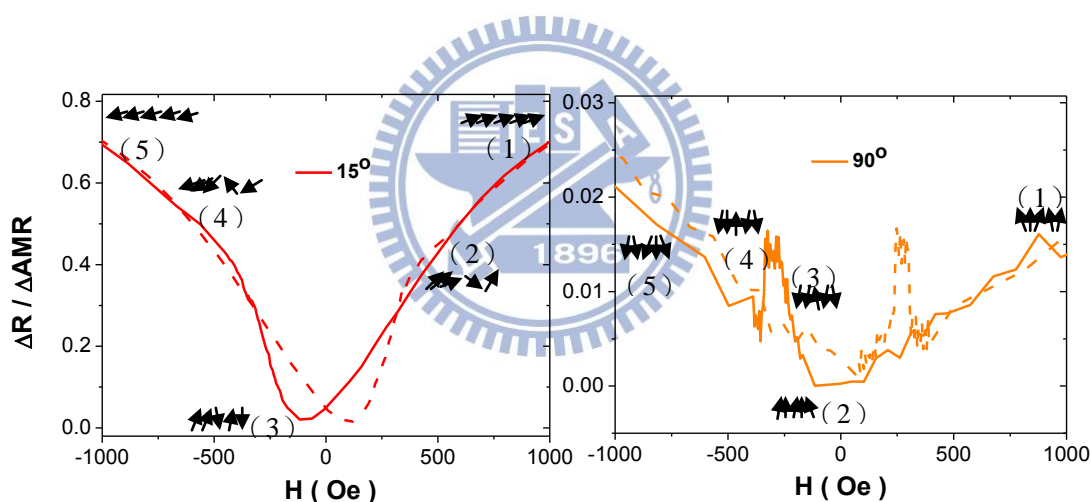


圖 4.17 類別 B 之鎳平板線 ($w=1.0\mu\text{m}$, $L=20\mu\text{m}$, and $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$, $\theta=15^\circ$ (左) 及 $\theta=90^\circ$ (右) 時之磁電阻圖形。實線為由正磁場掃至負磁場的磁電阻，虛線部分則為負磁場掃至正磁場的磁電阻。(1) ~ (5) 代表實線部分的各磁場區間所對應的磁矩翻轉形式。

在圖 4.17 (左) 中，外加磁場強度由飽和逐漸降低至殘磁態 ((1) ~ (2)) 時，磁矩由原先一致地排列在 $\theta=15^\circ$ 開始有部分的磁矩往 $\theta=90^\circ$ 的方向偏離，導致磁電阻連續性地下降，到 (2) 時樣品內部磁矩和電流夾角 ϕ 約為 50° ；當外加磁場強度由飽和逐漸降低至殘磁態時，由圖 4.15 不同線寬之鎳平板線樣品在室溫下之 MFM 掃描影像所推測的內部磁矩排列情形如圖 4.16 左方所示，此時

磁電阻並非最小值；比較圖 4.16 左右兩圖中，左圖的類別 B 較右圖的類別 C 樣品有較低的交換能，可說明殘磁態時類別 B 樣品磁矩比類別 C 樣品有較高的平行長軸分量，磁電阻變化率也較高。

當磁場往負向漸增加強度，有更多的樣品內部磁矩方向交錯排列；到達磁電阻最小值 (3) 時，樣品內部磁矩 $\phi \sim 90^\circ$ 。當樣品內部磁矩平行長軸分量漸增 ((4) ~ (5))；最終當磁場達到負向飽和時，樣品內部磁矩又一致回到與水平反向夾角 15° 的位置。

當 $\theta = 90^\circ$ 時，如圖 4.17 (右) 所示，在大外加磁場時，磁電阻並非最小值，顯示在飽和磁場時樣品內部磁矩方向並非完全垂直於線長軸，在 1000 Oe (1) 時 $\phi \sim 83^\circ$ ；磁電阻最小值出現在殘磁態 (2)，此時磁矩垂直長軸分量有最大值， $\phi \sim 90^\circ$ 。

當負向磁場開始漸增 ((3) ~ (4)) 時，磁矩的平行分量有微幅的上升後再下降，但改變量小於 2%，也就是磁矩的在平行膜面上的翻轉角度 $\Delta \phi < 8^\circ$ 。

圖 4.17 中可知在小角度時，樣品內部磁矩在平行膜面方向有連續性的偏轉，然而在大角度時，磁電阻圖形並未顯示出相同情形。推測樣品在大角度的外加磁場下，內部磁矩翻轉 180° 時是在垂直膜面方向，以 Bloch wall (圖 2.2) 的形式進行；因此量測平行膜面上的磁電阻無法觀察出內部磁矩隨外加磁場連續翻轉的過程。

圖 4.18 為推測類別 C 之鎳平板線 ($w = 0.6 \mu\text{m}$, $L = 30 \mu\text{m}$, and $t = 30 \text{nm}$) 內部磁矩隨外加磁場翻轉的過程；左圖為 $\theta = 15^\circ$ ，右圖為 $\theta = 90^\circ$ 。在小角度時類別 C 與類別 B 樣品內部磁矩翻轉過程類似，磁矩在平行膜面方向有連續性的翻轉；到殘磁態 (3) 時，磁矩有最大垂直長軸分量，此時樣品中有最大交換能 (圖 4.16 右方) 而有較低的磁電阻變化率。在大角度時，圖 4.18 (右) 顯示在 1000 Oe (1) 時，樣品內部磁矩 $\phi \sim 84^\circ$ ；但當負向磁場持續增加時，平板線內部磁矩的平行分量持續增加至超越 3%，也就是磁矩偏轉角度 $\Delta \phi$ 超過 10° ，其變化率大於飽和時的磁電阻變化率，和類別 B 樣品情況不同。

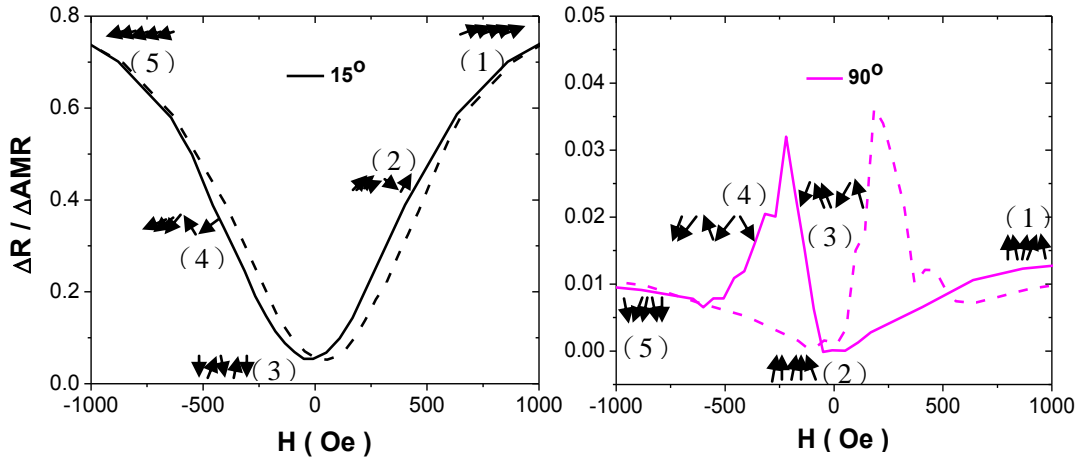


圖 4.18 類別 C 之鎳平板線 ($w=0.6\mu\text{m}$, $L=30\mu\text{m}$, and $t=30\text{nm}$) 在 $T=10\text{K}$ ， $\theta=15^\circ$ (左) 及 $\theta=90^\circ$ (右) 時之磁電阻圖形。實線為由正磁場掃至負磁場的磁電阻，虛線部分則為負磁場掃至正磁場的磁電阻。(1) ~ (5) 代表實線部分的各磁場區間所對應的磁矩翻轉形式。

4.5 鎳平板線不同區間之磁區翻轉差異

本次研究工作，即藉由量測低溫磁電阻探討一系列不同長寬比（線寬 $w=0.2\sim 10\mu\text{m}$ ，線長 $L=20、30、60\mu\text{m}$ ）的微米鎳平板線內部不同區域的磁性行為。樣品設計區間為左右對稱，平板線的左半部 (Left) 和右半部 (Right) 分別以 L 和 R 表示，同時利用電極將鎳平板線分為幾個部份：平板線尾端 (end)、中端 (inter-medium) 及中央 (center) (圖 4.19)；而不同線長之樣品，所分區段長度也不同。 $L=60\mu\text{m}$ 之樣品區段長度設計為 1 : 3 : 6 : 20 : 20 : 6 : 3 : 1， $L=30\mu\text{m}$ 則設計為 1 : 2 : 4 : 8 : 8 : 4 : 2 : 1，而 $L=20\mu\text{m}$ 有兩種不同之區段長度設計，分別為 1 : 2 : 4 : 3 : 3 : 4 : 2 : 1 以及 1 : 1 : 2 : 6 : 6 : 2 : 1 : 1。線長 $L=30\mu\text{m}$ 之樣品分區設計圖形如下圖所示。

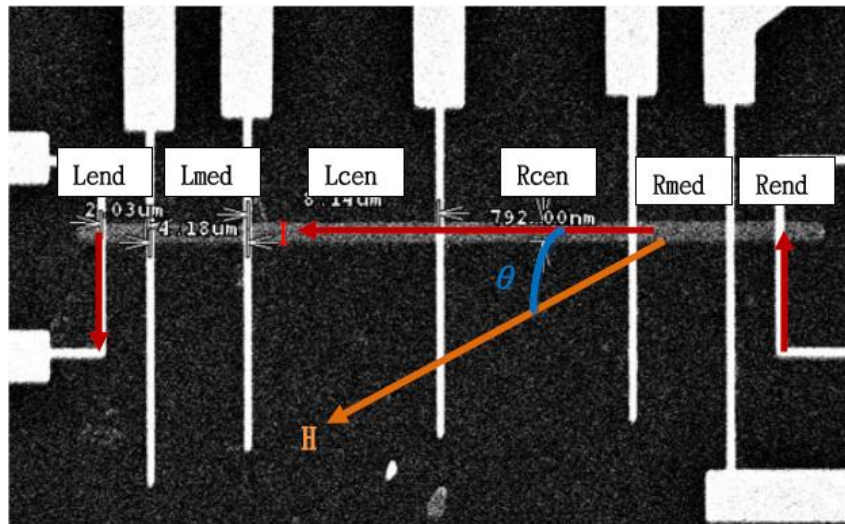
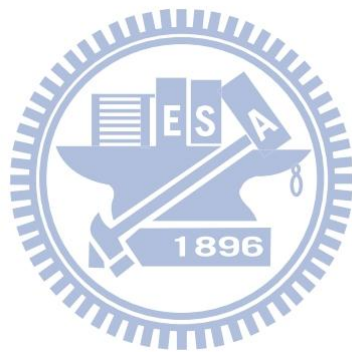


圖 4.19 鎳平板線及跨越其上的金電極。鎳線為中央紅線標示電流流過部份。圖中樣品線寬為 $0.8 \mu\text{m}$ ，全長 $30 \mu\text{m}$ ；金電極將樣品由左而右劃分為八份，長度各為 $1:2:4:8:8:4:2:1$ 。 H 為外加磁場， θ 為其與鎳平板線夾角。

隨著樣品區段不同，其所展現之磁電阻行為也有規律性的差異。外加一飽和磁場至樣品線長軸，磁場強度逐漸減小時，樣品之尾端（end）部分磁矩較中端（inter-medium）及中央（Center）部分先進行翻轉，翻轉過程中隨外加磁場增加在樣品尾端形成小磁區及磁區間之磁壁，造成不可逆部份之磁電阻曲線呈現數個階段作小磁場範圍內瞬間翻轉之階梯式變化。樣品中央所展現之磁電阻變化於低角度時為連續性的波包。當外加磁場與樣品線夾角 $\theta > 45^\circ$ 之高角度時，在低磁場範圍內，磁矩做連續之翻轉，磁電阻值隨外加磁場強度做連續性的上升；而發生明顯的遲滯現象。磁場持續增加到一定大小時，由鎳平板線之磁易軸位於短軸的特性，樣品內磁矩在小磁場範圍內發生一瞬間偏轉造成電阻值突然下降，隨後回歸至 Coherent rotation 之翻轉形式，形成左右兩端對稱且變化之波峰。而樣品中端（inter-medium）之不可逆部分磁電阻曲線則可同時觀察到中央（Center）區段的波峰和尾端（End）所展現之階梯式變化的磁電阻特性。且樣品左右兩端的樣品行為對稱。

圖 4.20 左為 $w=0.38 \mu\text{m}$ ， $L=20 \mu\text{m}$ 及 $L=30 \mu\text{m}$ 之樣品在不同 θ 下，各區段所展現之不可逆磁電阻特性差異。為了清楚觀察圖形，右圖中將各區段樣品之

曲線做約 5% 的平移將其分以便探討。由圖中觀察出，樣品中端之磁電阻曲線在外加磁場剛轉為逆向時有與中央（Center）段落相同的連續性偏轉波包或波峰，隨後逆向外加磁場逐漸增強時則具有和尾端（End）部份相同之階梯式變化特性。在逐漸趨於飽和的外加磁場下，樣品中央段磁矩經連續性偏轉後首先回到 Coherent rotation 之翻轉形式，此時樣品尾端仍在進行數個階段的瞬間偏轉；因此樣品尾端之磁電阻不可逆磁場範圍常大於樣品中央部分。樣品各區段所具有的差異現象普遍存在於本實驗所製作之一系列不同長寬比鎳平板線中。



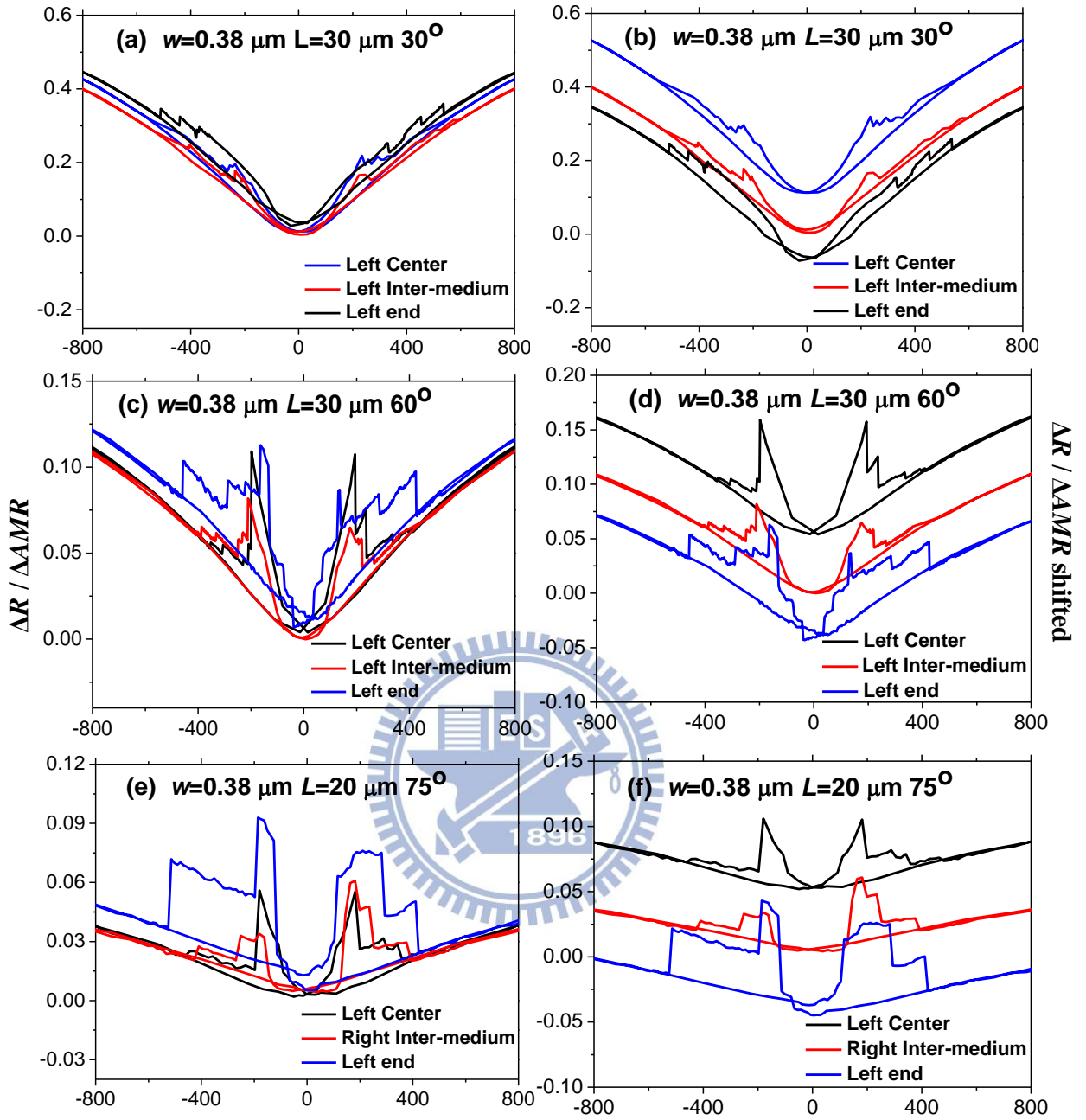


圖 4.20 $w=0.38 \mu\text{m}$ ， $L=20 \mu\text{m}$ 及 $L=30 \mu\text{m}$ 之鎳平板線樣品分別在 $\theta=30^\circ$ 、 60° 及 75° 時，平板線不同區段間之磁電阻差異。

第五章 結論與未來研究方向

本研究工作針對一系列不同長寬比之微米級鎳鐵平板線研究其磁性行為，其結果歸納為兩個部份。第一部分是根據不可逆部分之磁電阻圖形所展現的形態，將樣品磁性行為歸類為三大類型；第二部分則由磁電阻曲線可逆過程之 **Coherent rotation** 電阻值的上升趨勢以及殘磁態電阻值探討線寬在 1 微米以下樣品之形狀異向性對三大類別系列樣品所造成之影響。

第一部份將樣品磁性行為歸納為 A, B, C 三大類別。所有樣品皆滿足異向性磁阻效應之描述。磁電阻曲線呈現一開口向上之彎曲行為，且在殘磁態電阻趨近於最小值。由異向性磁阻效應描述，可知微米級鎳平板線之磁易軸趨近平行於樣品線之短軸；且由曲線不可逆部分之磁電阻形式可斷定樣品屬於多磁區結構。

類別 A 為線寬 2 微米以上類同薄膜材料之多磁區結構，其磁矩翻轉行為屬於典型的磁區擴張；線寬 1 微米以下之鎳平板線以線寬 0.6 微米為分界；線寬較寬的類別 B 樣品，其在兩方向掃取之磁電阻曲線於殘磁態展現一不可逆之交錯形式，而線寬在 0.6 微米以下之樣品為類別 C，其在殘磁態附近之磁電阻呈現出 **Coherent rotation** 之可逆背景形態。

利用 Aharoni 模型分析應為單磁區結構之高長寬比鎳平板線，觀察磁電阻變化形式，為非預期內之多磁區結構。為了解形狀異向性對線寬在 1 微米以下的樣品所產生的影響，第二部份分析了樣品的幾何形狀與磁電阻曲線展現的特性相關性：包含曲線可逆的 **Coherent rotation** 部分，磁電阻變化率隨磁場增加而上升的趨勢，以及殘磁電阻值的變化；並在室溫下針對樣品曾磁化於平行樣品長軸的外加磁場之殘磁態進行磁力影像掃描。

當樣品線寬在 0.6 微米以下時，**Coherent rotation** 部分之磁電阻曲線隨線長增加而有較小的開口，及相同外加磁場下，有較高的磁電阻變化率。這代表樣品受形狀異向性能之影響，在曲線表現出外加磁場大小遠離殘磁態的過程中有較多的磁矩偏離樣品短軸方向。而在樣品線長分別為 20、30 及 60 微米時在外加磁場與樣

品長軸夾角為接近短軸的75度情況，皆發生Coherent rotation部分之磁電阻曲線隨長寬比增加而開口變小之情形。

分析其外加磁場與樣品長軸夾角為 15 度下殘磁態電阻值與樣品長寬比的關係顯示，低長寬比時樣品因有類同薄膜之多磁區結構，而有高磁電阻變化率；長寬比在 100 以下的類別 B 樣品，其尺寸與類別 A 較接近，也具有多磁區結構；其長寬比較大之樣品有較小之殘磁電阻值，此時形狀異向性能的貢獻尚不足以使樣品之磁易軸偏離於線之短軸；此範圍內之類別 C 系列樣品亦如是。樣品形狀異向性由類別 B 進入 C 之過渡區間，其磁電阻曲線在殘磁態附近，逐漸回到類別 C 之磁電阻形式。當 $L/w > 100$ 時樣品磁性行為皆屬於類別 C，觀察室溫下外加磁場平行樣品長軸之殘磁態的磁力影像掃描，發現屬於類別 C 之線長 21 微米樣品內部磁區數量隨線寬漸少而增加，造成內部磁壁與電流之散射貢獻了較多比例的磁電阻。因此，類別 C 樣品的高度形狀異向性及高磁壁電阻之貢獻導致具有高長寬比的樣品，其殘磁電阻的再度上升。

考慮鎳平板線樣品雖具有高形狀異向性，其磁易軸卻在短軸的原因，應為一遠高於形狀異向性能之能量主導項所造成；此主導項推論為鎳的晶格異向性或磁彈異向性；後者為鎳平板線和SiN/Si基板間因晶格常數不同造成晶格錯位而產生；而實驗中的鎳平板線為熱蒸鍍而成，應無晶格異向性之存在。未來可以高解析度之X光譜分析，或穿透式電子顯微鏡觀察其晶格形態，或挑選和鎳晶格常數較為接近之基板材料進行後續研究。

參考文獻

- [1] L. Sun, Y. Hao, C.-L. Chien, and P. C. Searson, *IBM J. Res. & Dev.* 49, 79 (2005).
- [2] A. Ahroni, *J. Appl. Phys.* 82, 1281 (1997).
- [3] S. Goolaup, N. Singh, A. O. Adeyeye, V. Ng, and M. B. A. Jalil, *Euro. Phys. J. B* 44, 259 (2005).
- [4] T. Y. Chung and S. Y. Hsu, *J. Appl. Phys.* 103, 07C506 (2008).
- [5] J. E. Wegrowe, D. Kelly, A. Franck, S. E. Gilbert, and J. Ph. Ansermet, *Phys. Rev. Lett.* 82, 3681 (1999).
- [6] Y. Jaccard, Ph. Guittienne, D. Kelly, J. E. Wegrowe, and J. Ph. Ansermet, *Phys. Rev. B* 62, 1141 (2000).
- [7] K. H. Xue, G. P. Pan, M. H. Pan, M. Lu, and G. H. Wang, *Superlattices and Microstructure* 33, 119 (2003).
- [8] S. Dubois, J. Colin, J. L. Duvail, and L. Piraux, *Phys. Rev. B* 61, 14315 (2000).
- [9] L. Sun, P. C. Searson, and C. L. Chien, *Appl. Phys. Lett.* 79, 4429 (2001).
- [10] J. D. L. T. Medina, M. Darques, and L. Piraux, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41, 032008 (2008).
- [11] J. Jorritsma and J. A. Mydosh, *J. Appl. Phys.* 84, 901 (1998).
- [12] J. G. S. Duque, W. O. Rosa, W. C. Nunes, A. E. P. de Araujo, P. G. Pagliuso, L. Cescato, M. Knobel, L. M. Socolovsky, and R. D. Zysler, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43, 025001 (2010).
- [13] C. L. Dennis, R. P. Borges, and L. D. Buda, *J. Phys.: Condens. Matter* 14, 1175 (2002).
- [14] S. Thomas, F. Josef, K. J. Kirk, and J. N. Chapman, *J. Magn. Magn. Mat.* 175, 193 (1997).

- [15] R. D. Gomez, T. V. Luu, A. O. Pak, K. J. Kirk, and J. N. Chapman, *J. Appl. Phys.* 85, 6163 (1999).
- [16] T. Y. Chung, Ph.D. Thesis, Natl. Chiao Tung University, Taiwan (2009).
- [17] A. Aharoni, *J. Appl. Phys.* 63, 5879 (1988).
- [18] C. A. F Vaz, M. Kläui, L. J. Heyderman, D. David, F. Nolting, and J. A. C. Bland, *Phys. Rev. B* 72, 224426 (2005).
- [19] X. Liu, J. N. Chapman, S. Mc Vitie, and C. D. W. Wilkinson, *Appl. Phys. Lett.* 84, 4406 (2004).
- [20] W. F. Brown, Jr., *Phys. Rev.* 105, 1479 (1957).
- [21] M. Kläui and C. A. F. Vaz, *Magnetization Configurations and Reversal in Small Magnetic Element*, Universiteit at Konstanz, Germany, 2007.
- [22] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.
- [23] B. Leven and G. Dumpich, *Phys. Rev. B* 71, 64411 (2005).
- [24] J. A. Osborn, *Phys. Rev.* 105, 1479 (1957).
- [25] Y Rheem, B-Y Yoo, W. P. Beyermann, and N. V. Myung., *Nanotechnology* 18, 015202 (2007).
- [26] O. S. Song, C. K. Kim, and R. C. O'Handley, *J. Appl. Phys.* 79, 3141 (1996).
- [27] B. D. Cullity & C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, 2nd Edition, Addison-Wesley, 1972.
- [28] P.S. Liao, Master thesis, Natl. Chiao Tung University, Taiwan (2010).