

# 旋轉的新世紀

## -自旋電子傳輸與自旋電子學-

台灣大學物理學系

張慶瑞

### 摘要

Dirac 大概無法想像他 70 年前所發現的自旋在新世紀來臨後會使得人們旋轉起來，而自旋的掌控使得後高溫超導時代的凝態物理研究更加豐富有趣。自旋將變成如同電荷一樣重要，這也使得自旋電子學直接進入我們日常生活中，這大概是跨世紀時物理學家對人類最重要的貢獻。

### 前言

大多數人在學習的過程中都對物理與數學有畏懼感，即使是覺得自己有相當數理天份的人，在碰到 Dirac 相對論波動方程式時仍常會感到束手無策。除了程式中的等號與  $i$  外，對許多理工科的人而言，Dirac 方程式不具任何意義。大約 70 年前，英國物理學家 Paul Dirac 發表了綜合量子理論、微觀物理及 Einstein 的狹義相對論的方程式來描述電子的行為，這是理論物理皇冠上最璀璨的珠寶之一。Dirac 方程式證明了電子除了具有電荷外，還具有一個非古典的量子特性--自旋。自旋是量子理論所顯示的最詭異的性質之一，雖然可用電子的旋轉來幫助想像，但在日常生活中視絕無類似的現象存在。

Dirac 絕無法想像他的自旋在今天會變成科學家控制電子的新方式，嶄新的自旋電子學因為人們可以完美的控制自旋傳輸而在新世紀出現。自旋電子學的出現被稱爲是 1999 年物理界十大重大事件之一。幾乎所有人都知道電流是電荷載子流動造成

的，大部份的人也知道電荷載子是有兩種自旋方向的，但很少人想過爲何今天我們日常生活中使用的電子元件似乎只看到電荷的表徵而沒有發現是有兩種不同的電荷載子同時在線路中流動。這主要的原因是自旋能夠維持在一定方向的行進距離太短了，因此自旋在經過長距離的路徑後，由於自旋不斷翻轉後的平均效應導致兩種電荷載子無法分辨。但近年來這種情形有了轉變，人工合成的奈米結構的成熟，使得人們可確保自旋在前進的過程中維持一定方向，這兩種不同的電荷載子在電路中有不同的傳輸特性，而其分別對磁場的反應也不一樣，一般稱爲自旋相關磁電阻。近十年來所發現自旋相關磁電阻分三類：**巨磁電阻(GMR)**、**超巨磁電阻(CMR, Colossal Magnetoresistance)**與**穿隧磁電阻(Tunneling Magnetoresistance, TMR)**。這些自旋相關傳輸特性有共同的特性：磁電阻變化大、無方向性及負磁電阻變化行為。強大磁電阻的直接而明顯的應用有感應器，這些可將記錄密度朝向量子所容許的限度推進。但最令磁性界興奮的是自旋電子元件的成熟，

如自旋電晶體與磁性隨機記憶體(MRAM)的可能實現。由於 MRAM 有製程簡單、耗能低與抗輻射性的特質，使得其有可能在未來進入 DRAM 所長期壟斷的主記憶體市場，這可能是磁性電子元件揚眉吐氣的契機。這也是近些年來歐美日韓不斷積極投入研究的重要原因之一。單是美國國防部在 1999 年大約就投入了五千萬美金以上的科研經費，今年更是美國政府的主要研究投資方向之一，其它私人研發單位的投入金額則更可觀。

台灣在此方面近年來雖有長足進步，但人力投入規模不但比不上歐美日韓，甚至也比不上大陸。尤其全國的整合性稍嫌不足，目前自旋電子元件主要的發展以歐美較領先，韓國在 1999 年初成立一 Spintronics Institute 來整合全國磁性界力量，日本也於 2000 年整合各大公司及 12 個大學的研究人力成立對策研究小組，中國大陸也有兩個以上的全國性大型計畫由中科院及南京大學領銜。臺灣直至目前為止主要仍以自發性的零散單位研究為主，並未見到產業及官方的政策性參與，特別是電子領域的科研人才並未領悟到新世紀要開始旋轉了。目前跟台灣唯一有關的研發是聯邦半導體花了數十億台幣購買了 Cray 並引入 Honeywell 的 pseudo 自旋閥成果並有計畫在美國量產。全世界在自旋電子元件的相關研究是如風起雲湧一般，這股旋風與 1987 年時的高溫超導截然不同之處在於自旋電子元件的實用已是無庸置疑的，唯一的問題主要再於市場的接受度與經濟規模的成熟性。目前大多數的專家認為自旋電子學起飛的最大障礙不是來自技術層次，而是心理障礙。大多數的半導體專家不願參與這種"破壞性"的科技研發，一方面是因為他們從未聽聞過這種自旋電子學，另一方面是由於"非我族類"的矛盾心

結。但這種障礙只是暫時性的，因為自旋電子學以短短十年時間內只花費不到半導體的千分之一的研發投資就已發展出足以對抗矽半導體元件的自旋電子元件。經濟的效應將使得新世紀必然開始旋轉。

本文介紹內容主要將針對穿隧式磁電阻與自旋電子元件在感應器、電晶體及隨機記憶體的目前狀況做一簡介。

### 自旋相關傳輸

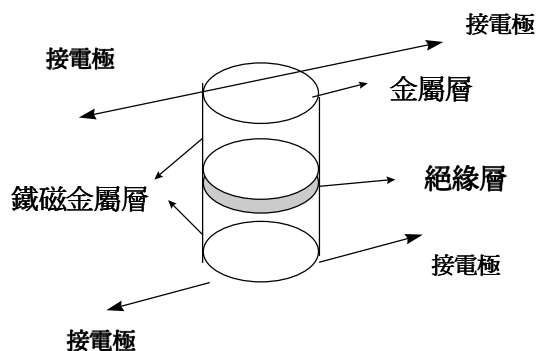
除了超導體中的古柏電子對外，任何導體中的電子在傳輸的過程中都會與原子核或其他電子碰撞而有能量的損耗。金屬物質上的電子傳輸過程中，也就是因為此原因會有能量損耗，這結果表現在電路上的測量值就是電阻。人們對電阻的發現與應用與電學的發現可說是同一年代，而法拉第發現磁與電可互相影響後，認知磁場可影響電子的運動，這可說是最早的磁電阻。早在一、二世紀前便知道外加磁場可改變電阻值的大小，在非磁性金屬上的成因是 Lorentz 力 (常磁電阻, Ordinary magnetoresistance, OMR)，而在磁性金屬上則主要是由於量子效應中的 Spin-orbital 效應所引起的(異向磁電阻, Anisotropy magnetoresistance, AMR)。然而這些磁電阻的零敏度一般較低，因此其應用價值也較有限，主要是作一些簡單感應器。較零敏的異向磁電阻在室溫時在 10Oe 的改變下約有 2% 的反應，這使得異向磁電阻式已可作為讀取磁頭與低密度的磁性隨機記憶體。

這種對磁電阻的認知在 1988 年 Baibich 等人在多層薄膜上發現一種巨大的負磁電阻效應之後，有了革命性的變化。從 Baibich 等人發現巨磁電阻後，我們又很快的發現了超巨磁電阻與穿隧磁電阻。本

文中將只介紹最有應用前景的穿隧式磁電阻。

### 穿隧磁電阻

穿隧磁電阻薄膜技術採用兩個磁性層間夾著數個原子厚的絕緣層的構造。TMR 的效應在 1970 年即被發現，但直到 1990 年代才被廣泛認知其高附加價值的用途，這主要是由於在室溫下，具有高 MR 比值的薄膜被開發出來。目前主要使用的絕緣層仍以 Al 膜氧化為主(如圖一)。若要實用，TMR 膜的電阻值需降低到可與元件中其它器件匹配。雖然絕緣層變薄，電阻值就隨之下降，但令人困擾的是，MR 比值也隨之下降而導致零敏感度降低。世界各大研發單位都致力開發如何降低電阻值到實用範圍而又能維持高 MR 比值的氧化技術。通常在實用上，加入反鐵磁層的自旋閥式的結構也被採用。有時為了確定自由層中是近於單磁區結構以提昇 MR 比值，也在自由層兩側加入硬磁層以提供偏壓場。近兩年內，適用於 MRAM 及硬碟讀取磁頭的 TMR 薄膜開發成功後，更使得 TMR 具有無限的遠景。



圖一 穿隧式磁電阻薄膜，絕緣層的性质極為重要，一般使用  $15\text{\AA}$  以下的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

IBM 使用六個磁控式的 UHV 濺鍍腔製作各種不同的結構與材料的 TMR。穿隧結製作時，用電腦

控制可放多至八種不同的金屬光罩。光罩可連續放置在晶圓的任一處上而只有  $40\mu\text{m}$  的誤差。使用不同的光罩，在每一晶圓上可製作 10 到 74 個  $80\times 80\mu\text{m}^2$  的 TMR，IBM 研究群目前所嘗試過的 GMR 與 TMR 樣本據稱已超過三萬種組合。TMR 的磁電阻比已有大於 50% 的報告，但其 MR 比值與氧化條件，界面情形與材料有極大關係。目前在臺灣以臺大物理系製作的 12% 的  $\text{NiFe/Co/AlO/NiFe}$  薄膜最佳。

### 磁性隨機記憶體

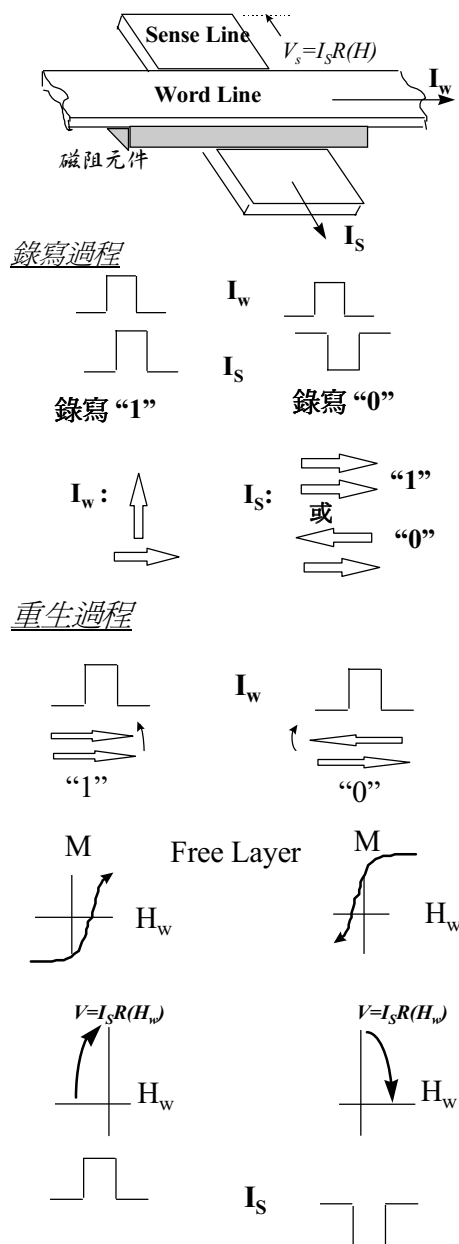
過去的電子學多利用半導體內的能帶及能隙來製作元件。在電場控制下，電子與電洞兩種載子會在元件內運動而達成元件的功能。現今的磁電阻實際上是利用自旋產生兩種新的載子，而利用磁場也可控制自旋電子的運動並在元件中達成其功能。自旋載子在金屬材料中的數目是半導體中載子數目的  $10^5$  次方倍，因此小於  $0.1\mu\text{m}$  以下的自旋電子元件遠比半導體元件容易製作。MRAM 是指以磁電阻特性儲存記錄資訊的非揮發性隨機記憶體。它的基本動作與硬碟的記錄媒體類似，也採用磁化的方向來記錄 0 與 1。只要外在磁場不改變，磁化的方向就不會變更，不像 DRAM 爲了要保持資料需讓電流不斷流動，MRAM 也不需 refresh 的動作。也就由於磁性的永久儲存特性，MRAM 是屬於非揮發性的隨機記憶體。其優點爲寫入與讀取時間的速度上可比美 SRAM，同時在記憶容量上可與 DRAM 相抗衡。原則上講，MRAM 的重複讀寫次數近乎可無限次，故其被認爲是極具發展潛力的新穎磁性電子元件。MRAM 最受業界注意的特性是非揮發性，雖然目前市場上已有 FLASH，然而 MRAM 的讀寫速度較快

且重複讀寫次數又高。IBM 與 Motorola 均不遺餘力投入 MRAM 研發工作，聲明五年內可商品化，進入後 DRAM 的競爭時代。最近在 2000 年台灣投資的聯邦半導體宣布成功研發出 1MB 的 pseudo 自旋閥式 MRAM，也表示了國人在此方面的研發不落人後。

MRAM 的概念並不新穎，最早期的磁蕊式記憶體就是一種 MRAM，但由於速度不快且體積太大，因此半導體出現後很快的就被淘汰掉了。過去幾十年來，有少部份廠商(如 Honeywell)也一直有特殊國防用途的 AMR 式 MRAM 在量產。也由於 MRAM 的名詞一直在記憶體界流傳著，因此很多半導體界的人也以為這次的 MRAM 是舊產品而不予注意。

新一代的 MRAM 主要是由於有強大新穎磁電阻的材料出現使得它可以與 DRAM 競爭。它的工作原理在 Pseuo 自旋閥式磁電阻(雙磁滯力磁電阻)、自旋閥式磁電阻與穿隧式磁電阻材料中均略有不同，但其結果是類似的，唯一的差別是記憶密度與讀寫速度。聯邦半導體在 2000 年所宣布的 1MB MRAM 是屬於 Pseuo 自旋閥式磁電阻的 MRAM。目前一般業界認為最有希望在未來進入市場與半導體 RAM 競爭的是穿隧式磁電阻。但本文中以目前技術較成熟的自旋閥式巨磁電阻的工作原理來說明。






錄寫機制利用傳統的 x-y 選取線路，自旋閥式磁電阻中的釘扎層在下，而金屬層為 Sense line 通過，上面為自由層，再上面塗覆一金屬的 Word line(如圖二)。當 Word line 通過一脈沖波時，自由



圖二：自旋閥式 MRAM 的錄寫與重生機制示意圖。

Honeywell 在 1997 年製作成原形展示，其密度約與 SRAM 等量，目前此方面的研發日新月異，最新式的產品已可與現今的動態隨機記憶體相抗衡，唯一有待評估的是經濟規模。一般相信 Si 製成的隨機記憶體在小於 0.1 微米時，由於熱生成的問題，將出現能隙太小的困擾，而此時會是 MRAM 擴張市場的最佳機會。

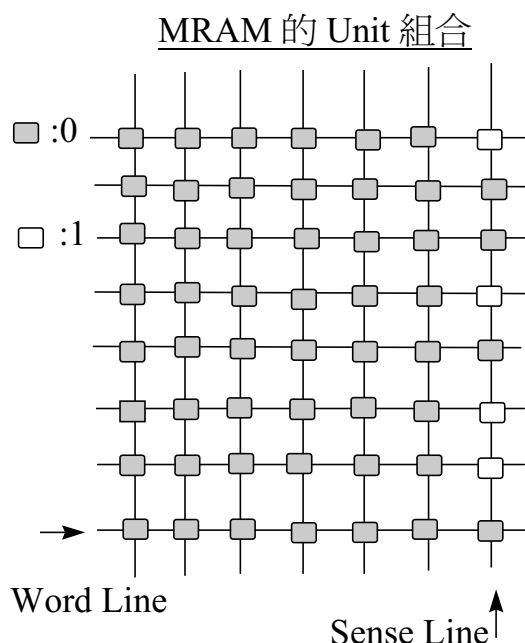
表一：各種隨機記憶體性質比較。

	MRAM	DRAM	EEPROM	SRAM	FRAM
非揮發性					
寫入時間	10-50ns	50ns	20ns	10ns	100-130ns
讀取時間	10-50ns	50ns	20-110ns	10ns	100-130ns
相對位元面積	1	1	0.8	4	1.3
重複讀寫次數	$10^{15}$	$10^{15}$	$10^5$	$10^{15}$	$10^{12}$
最大消耗電力	10-400mW	400mW	100mW	1100mW	2mW

層的磁化受到 Word line 上電流所產生的磁場影響而向外偏移。此時若 Sense line 也有一脈沖波通過時，則可依此 Sense line 上脈沖波的方向而錄寫一順向排列的磁化態(可令其為 1)或一反向排列的磁化態(可令其為 0)。當讀取時，Word line 上的脈沖波所造成的磁場將順向排列態中自由層上的磁化推向反向排列態，此時將導至磁電阻增加。反之，若原為反向排列態，則 Word line 上的脈沖波所造成的磁場將導致磁電阻降低。因此，Sense line 上也將隨之讀取出 1 或 0 的訊號。目前實驗已確定此種錄寫與讀取方式的可行性，且其讀取時間與半導體元件均為奈秒級。如將上述想法排成陣列則可形成所謂的 MRAM(圖三)，

由穿隧磁電阻薄膜製造的 MRAM 上所通過的電流遠較全是金屬的巨磁電阻薄膜製成的 MRAM 低，使其較適用於功率較低的攜帶是電子元件。然而穿隧磁電阻的 MRAM 具有高阻抗使得響應時間與雜訊都變差，這問題在元件面積縮小時更顯著，因為穿隧磁電阻的電流垂直薄膜，元件面積縮小，電阻也就跟著增加。MRAM 由於是金屬材料為主，因

此抗輻射能力遠較半導體材料強；又由於其是磁性材料，因此它是非揮發性的。此外，穿隧式磁電阻材料尚有一半導體材料所無法競爭的特色，那就是電阻值大，使得其元件的能損低，而這一特色在深次微米或奈米元件中是相當重要的。



讀取資料:



圖三：MRAM 陣列式位元工作示意圖。

## 展望

在短短十幾年間 GMR 已成功的用在微磁感測、磁記錄讀取頭，MRAM 等。電晶體是組成積體電路的細胞單元，自旋電子能否成為下世紀的新科技，要看自旋電子元件什麼時候可取代微電子，雖然自旋電晶體還在實驗室階段，但積體自旋電子電路已經不再遙不可及，依照目前科技趨勢來看，小

就是美，又自旋電子電路與半導體製程非常相容，若奈米尺度的蝕刻技術更趨成熟，這時自旋電子將會逐步取代微電子成為工業的主流。大部分的專家認為自旋電子元件除了可大量提昇磁性儲存的密度之外，併有可能在廿一世紀取代半導體而重新奪回其在電腦剛出現時的霸主地位。表一是自旋電子與微電子的特性比較，資料顯示這種企圖心不是完全虛幻的。半導體在下世紀碰到最大的問題除了熱以外，還有就是  $10^{19}$  1/cc 的載子數目將使得摩耳定律在未來五年內碰到瓶頸，而磁電阻材料的金屬內載子數目則可使元件依循摩耳定律繼續縮小。目前全世界在此方面的基礎研發與產品規劃正如火如荼的進行，五至十年後應是與微電子激戰的關鍵時刻。希望台灣的科研者現在就能開始注意到自旋新世紀已來臨了，而到時"矽島"也可以順利的轉化成"鐵島"。

除了可能的應用前景外，自旋相關傳輸在基礎研究方面的性質與材料的製作真是日新月異。物理方面，自旋相關電子在傳輸、穿隧的性質與非極化電子有甚為不同的結果。而 CMR 的 MnO 面間奇異行為更是吸引無數實驗與理論學家投入。化學與材料學家可提供新穎的材料與製程，因為實際上在各種奈米元件中，自旋相關傳輸都會發生，而如何了解以及如何製作新的材料，亟需跨領域的溝通。相對的只有在新結構出現時，新的物理現象才可被實驗學家量測，理論學家才可進一步分析與預測，而電子專家才可更進一步的設計出實用的自旋電子元件。目前磁電阻不但是基礎研究問題，但同時也是最現代而有經濟規模的千億位元記憶媒體及自旋電子學的問題。

今天，世界的潮流在往資訊為基礎的道路上運

動著，而許多有趣的研究題目也都與資訊關連著。自旋相關傳輸的出現提供了最好的機會與挑戰給科學家與產業界，那是以往磁學學者與產業界未曾遇過的機會。二十一世紀時進入奈米尺寸的技藝時，而那也將是嶄新的"自旋電子學"時代來臨的時候。目前全世界各地都摩拳擦掌的準備在自旋電子學時代來臨之後大展身手，希望本文的介紹可以使得台灣有更多的學者專家得以參與自旋電子世紀的降臨。

## 參考文獻

1. J. L. Simonds, "Magnetoelectronics-Today and Tomorrow", *Physics Today*, p.26, Apr. 1995.
2. G. A. Prinz, "Magnetoelectronics", p.27, vol. 282, Nov., 1998.
3. 張慶瑞，『微磁學與介觀尺度的磁性體』，物理雙月刊，十八卷四期，p. 491，1996 年八月。
4. 張慶瑞，『高分子磁性體與宏觀磁化穿隧』，物理雙月刊，十九卷二期，1996 年四月。
5. E. D. Dahlberg, Jian-Gang Zhu, "Micromagnetic microscopy and modeling", *Physics Today*, p.34, April, 1995.
6. Ching-Ray Chang, C. M. Lee, and J. S. Yang, "Magnetization curling reversal for an infinite hollow cylinder", *Phys. Rev.*, vol. 50, p. 6461, 1994. Ching-Ray Chang, and J. S. Yang, "Oscillatory switching under a high speed magnetic field", *ibid.*, vol. 54, 11957, 1996.
7. M. Baibich, et. al., *Phys. Rev. Lett.*, 2472, vol. 61, 1988.
8. J. M. Daughton, et. al., *IEEE Trans. Magn.*, 4608,

- vol. 30, 1994.
9. Wall Street Journal, 10 November 1997, p.88.
  10. "MRAM 最新現況", 39 頁, 磁性技術協會會訊廿三期, 中華民國 89 年一月。吳品賢翻譯自 "日經電子"1999 年 11 月 15 日(No.757)。
  11. 聯邦半導體於 2000 年七月十九日在台北市舉辦 1Mb MRAM 發表會。
  12. 張慶瑞, 磁性技術協會會訊十六期, 1997。
  13. 張慶瑞, 磁性技術協會會訊十九期, 1998。
  14. "穿隧式詞阻在記憶體與讀取頭上的運用與展望", 3 頁, 磁性技術協會會訊廿四期, 中華民國 89 年四月。吳品賢翻譯自 "日經電子"1999 年 12 月 23 日(No.759)。
  15. M. Johnson, "The all metal spin transistor", IEEE Spectrum, p.47, May 1994,
  16. G. A. Prinz, "Spin-polarized Transport", Physics Today, p.58, Apr. 1995.
  17. J. Barnas, A. Fert, Phys. Rev. Lett., **80**, (1998) p.1058.
  18. D.K. Ferry, S.M. Goodnick, "Transport in Nanostructure", Cambridge Univ. Press, 1997
  19. S. Datta, "Electronic Transport in Mesoscopic Systems", Cambridge Univ. Press, 1995
  20. J.H. Davies & A.R. Long (Ed), "Physics of Nanostructure", IOP, 1992

