

[研究新領域報導]

新世紀的電子傳輸方式 - 自旋相關傳輸

台灣大學物理學系 張慶瑞

摘要

由於奈米技術的進步，科學家現在可以選擇特定自旋方向的電子在固體內傳輸。下一世紀，自旋的應用將由於自旋電子學的成熟而出現在日常生活中，這大概是跨世紀時物理學家對人類最重要的貢獻。

前言

Dirac 大概無法想像他 70 年前發現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相關傳輸而在新世紀出現。自旋電子學的成熟被稱為是世紀末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，但很少人想過為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自旋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，一般稱為自旋相關傳輸。

發展歷史

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。在非磁性金屬上的成因是 Lorentz 力(常磁電阻, 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, AMR)。然而這些磁電阻的靈敏度一般較低，因此其應用價值也較有限，主要是作一些簡單感應器。較靈敏的異向磁電阻於室溫時在 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。

過去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(GMR)後，我們又很快的發現了超巨磁電阻(1992, CMR)與穿隧磁電阻(1995, TMR)。

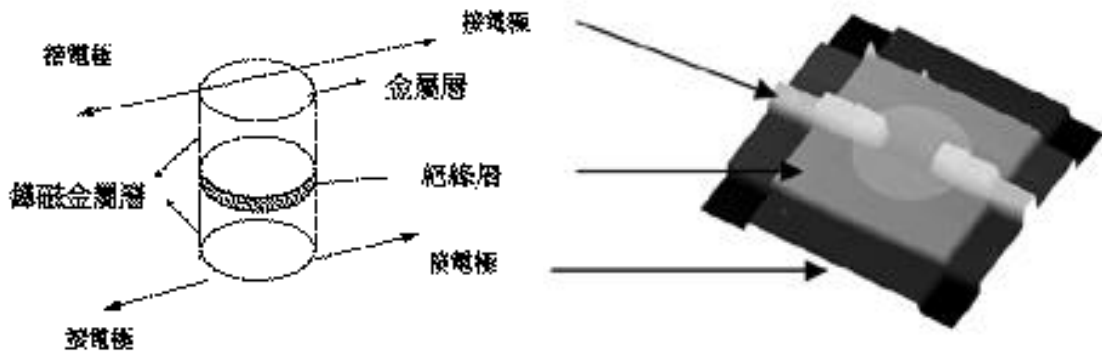
研究方向

從材料的觀點來看，自旋相關傳輸包含磁性物質和非磁性的物質。從製程來看，必須有奈米結構保證自旋記憶。從物理的角度來看，自旋相關傳輸必須考慮電子自旋特性。因為自旋不是宏觀世界中的物性，使得量子力學成為理解自旋相關傳輸的必要工具，也使得物理學家在自旋電子學中扮演者甚為重要的角色。

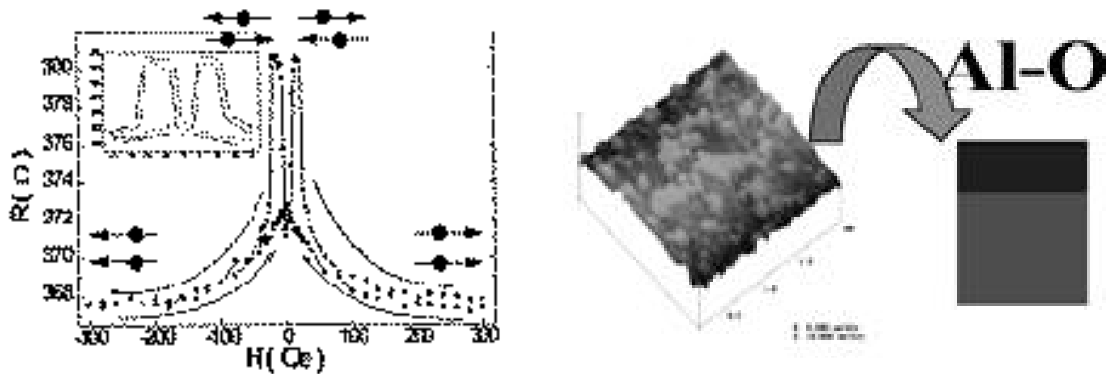
由於自旋電子傳輸是控制自旋而產生兩種新的載子，而磁場是控制自旋電子運動最佳的方法。因此聰明的物理學家很快的找出很多新的應用範圍與研究領域。過去的電子學多利用半導體內的能帶及能隙來製作元件，在電場控制下，電子與電洞兩種載子會在元件內運動而達成元件的功能。現在發現上旋與下旋電子相等於電子與電洞，而過去的電場現在可用磁場取代。在應用方面就出現了自旋電子學，但本文由於篇幅所限將只對自旋電子傳輸的基礎研究。

1. 新穎材料

- (1) 金屬材料：將磁性與非磁性金屬以多層膜或顆粒膜的形式製作是目前最成熟的研究。現在所有的自旋電子元件都是使用此種材料。目前很多人對半金屬材料和薄膜感興趣，如 CrO_2 。主要是因為 CrO_2 的自旋電子是 100% 的自旋極化。因為越高的自旋極化度所得到的磁電阻比值就越大，自旋極化度高的材料作為自旋電子源，在磁電阻效應上應該能得到極大的突破。



圖一 穿隧式磁電阻薄膜，絕緣層的性質極為重要，一般使用 15\AA 以下的 Al_2O_3 。右圖之 AFM 照片由彰化師範大學吳仲卿教授提供。



圖二 TMR 的 H-R 圖。氧化鋁的粗糙度與性質是非常重要的。圖片由自旋電子計劃-臺大物理系林敏聰教授與博士生何家驊提供，使用的材料為 $\text{NiFe}/\text{Co}(t)/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ 。

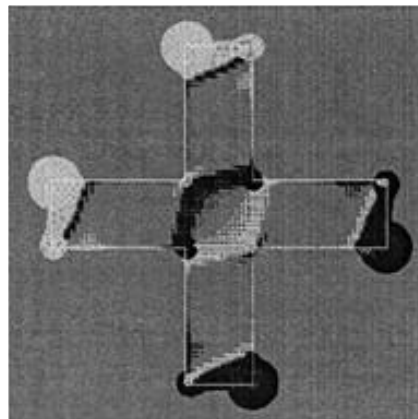
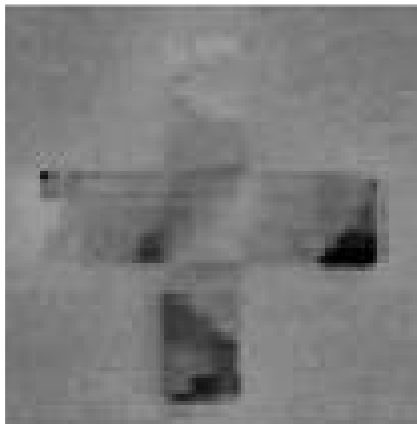
- (2) 氧化物：超巨磁電阻材料因為其巨大的磁電阻變化率而得名，但因為只能在大磁場和低溫的條件下才得到巨大變化率，所以距離應用還遠。但其中的物理機制相當複雜，有人認為或可透過研究 CMR 而更了解高溫超導機制。
- (3) 磁性半導體：磁性半導體的研究在最近幾年來尤其受到重視，許多磁性半導體的材料其鐵磁性的居禮溫度已超過液氮溫度，室溫鐵磁性半導體材料是努力的目標。室溫以上居禮溫度的鐵磁性半導體在理論上預測是有可能的，如 $(\text{GaMn})\text{N}$ 系統。磁性半導體有著半導體的電子能帶結構，晶格常數與一般半導體類似，在作電子元件時能夠和一般半導體有良好介面。

目前在材料最大的問題之一在於如何提高電子自旋極化與增大自旋記憶的傳輸距離，這

也是未來尋找自旋電子材料的重要方向之一。

2. 物理機制

- (1) 自旋相關傳輸：自旋相關傳輸是自旋電子學最重要的觀念。進一步了解上旋電子(洞)與下旋電子(洞)在固體中的特性是基礎研究領域相當重要的課題。目前研究的物理系統已逐漸由金屬發展至絕緣體，亦即衍生到半導體與半金屬。
- (2) 飛秒自旋動力學：自旋電子傳輸問題離不開動力學，目前是非常新穎而重要的問題。利用超快雷射(飛秒)的量測電子儀器，自旋動態行為的 10^{-9} 到 10^{-12} 秒內的基本物性可被探討，此時段範圍的物性是過去較少研究的。
- (3) 奈米尺寸的磁學：磁性在宏觀尺度時，磁區的概念甚為有效。但在中觀尺度到微觀尺度間，微磁學已在過去十年間被



圖三 微磁學模擬結果與磁力顯微術的照片對照圖。圖中的每一方形臂長 $1\mu\text{m}$ ，寬 $0.1\mu\text{m}$ ，MFM 照片由自旋電子計劃-彰化師範大學吳仲卿教授提供，模擬計算由自旋電子計劃-臺大物理系博士生衛榮漢提供。

證明是分析物性最有用的方法。瞭解中觀尺度下(10nm - $0.1\mu\text{m}$)的磁化分佈並與磁力顯微術的結果作量化比較以進而分析磁化分佈在自旋電子傳輸過程的影響是目前重要課題之一。小於 10nm 則可能需由自旋極化的 1st 能帶計算才能處理。

- (4) 自旋電子注射：雖然自旋電子注射的想法在應用上的前景相當吸引人，但實驗的成果卻是相當有限。二維電子氣(2DEG)的電子有高度的活動度與極低的自旋翻轉機率，一般相信電子在 2DEG 的運動中可以保持其自旋記憶甚至到橫向 1mm 長的距離。目前實驗研究成果卻與預期的結果有一很大的落差，不僅所量測到的自旋極化度遠低於理論值，工作溫度也都是極低溫 ($<10\text{K}$)。

應用前景與世界現況

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。磁性隨機記憶體(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。其優點為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，故其被認為是極具發展潛力的新穎磁性電子元件(見表一)。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。

近年來歐美日韓積極投入自旋相關傳輸研究。美國國防部在 1999 年投入了五千萬美金

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

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。目前自旋電子研究主要的發展以美國較領先，德國由 Infineon 領軍全力追趕，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帶頭。全世界在自旋電子元件的相關研究是如風起雲湧，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。自旋電子學只花費不到半導體的千分之一的投資就已發展出足以對抗矽半導體元件的自旋電子元件，目前的問題主要在於市場的接受度與經濟規模的成熟性。

臺灣現況

台灣在自旋電子傳輸雖有進步，但投入規模遠落後他國。尤其全國的整合性嫌不足，直至目前為止仍以自發性的零散基礎研究單位為主，並未見到產業及官方政策性參與，特別是電子領域的科研人才。目前在自旋電子傳輸領域的研究集中在物理與材料領域。除部份高溫超導人力投入 LaMnO 的氧化物研究外，目前仍以金屬材料為研究大宗，但也有半導體專才開始針對磁性半導體做分析。

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。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，依照目前科技趨勢來看，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。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，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。

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，電子專家可設計出實用的自旋電子元件，只有在新結構出現時，新的物理現象才可被實驗學家量測，而理論學家才可進一步分析與預測。目前磁電阻不但是基礎研究問題，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，那是以往物理學家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。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*, Vol. 48, pp. 26, Apr. 1995.
- [2] G. A. Prinz, "Magnetoelectronics", Vol. 282, pp. 27, *Sciences*, 1998.
- [3] *Wall Street Journal*, 10 November 1997, p.88.
- [4] 張慶瑞，中華民國磁性技術協會會訊十九期，1999。