

# 下一世代磁性記憶體的挑戰 與機會

## The Next Generation Magnetic Random-Access Memory: The Opportunities and Challenges

李柏緯、林柏宏、賴志煌

Po-Wei Lee, Po-Hung Lin, Chih-Huang Lai

利用自旋軌道矩 (spin-orbit torque) 作為寫入技術的磁性記憶體 (magnetic random access memory)，具有更快的寫入速度、更低的消耗功率、更高的耐久度，是極有發展潛力的下一代非揮發性記憶體。本文將介紹磁性記憶體的優勢和原理，以及自旋軌道矩的產生和其如何翻轉磁矩，並帶出現在面臨的挑戰—如何在無外場下仍可造成磁矩翻轉及降低所需的翻轉電流，最後則介紹除了記憶體的應用之外，其在多階儲存和類神經元計算相關的發展潛力。

The magnetic random access memory (MRAM) that utilizes the spin-orbit torque as the writing method possess a lot of advantages. Faster writing speed, lower power consumption and higher endurance are its merits. Thus it is a highly potential candidate for the next-generation non-volatile memory. In this article, we will introduce the advantages and working principle of MRAM, how to generate the spin-orbit torque and how it switches the magnetic moment. The main challenges for the development of next generation SOT-MRAM are two folds: how to switch the magnetic moment without the external magnetic field and how to further reduce the switching current. Finally, besides its application for memory, we talk about its applications on the multi-level storage and neuromorphic computing.

### 一、前言

隨著摩爾定律微縮愈趨極限，傳統半導體式記憶體包含：動態／靜態隨機存取記憶體 (DRAM/SRAM)，快閃記憶體 (Flash) 之性能改善也面臨挑戰。因此大家把目光放在其他形式的新興記憶體。其中最受矚目之一的技術為磁性記憶體 (magnetic random access memory, MRAM)，其利用原子的磁矩作為記憶單元，為非揮發性的記憶體，可降低元件的功耗。且其讀和寫速度也夠快。另外也可藉由調控膜層性質，使對應的 MRAM 可以取代或互補 DRAM、SRAM、Flash。在現在互聯網、行動裝置、邊緣計算的應用中，具有極大的發展

潛力。本文將特別介紹 MRAM 最新世代的寫入技術-用自旋軌道矩 (spin-orbit torque, SOT) 翻轉磁偶矩，此新穎寫入方式有別於上一世代的寫入技術自旋轉移矩 (spin-transfer torque, STT)。本文將就新世代 SOT-MRAM 所面臨的挑戰和未來發展的機會，做一介紹。

## 二、磁性記憶體的優點

為強調發展 MRAM 所能帶來的產業革新，以下將對其各項的優勢與特性做詳細介紹。

### 1. 非揮發性

電腦常用之揮發性記憶體 DRAM/SRAM 在系統關機後，位元資訊亦將隨之消失而無法保留，不利於裝置達到快速啟動。而非揮發特性記憶體最大的優點，便是即使電力意外中斷，元件的記憶狀態亦不會消失，因此要成為新世代記憶體，幾乎都必須具備此性能。此外，若實現用非揮發性記憶體來取代 DRAM 等主流記憶體，也會衝擊到現有記憶體管理的思維。整個電腦的運作模式變成常時處於關閉的狀態，僅需讀取記憶體資料時才進入開啟狀態，而不需要做虛擬記憶體的調度設計。既有的檔案系統也會產生改變，不須再透過繁雜的寫入 DRAM 程序來更動記憶內容，存取的邏輯能變得更有效率。因此發展 MRAM 所帶來的改變不只是硬體端的革新，更是引領資訊產業躍進的引擎。

### 2. 無待機功耗

非揮發特性帶來的另一項最大優點，便是在待機時間不會消耗能量。過去在我們所使用的桌上型電腦，記憶體在閒置時的耗電量，佔全系統的比重並不高。但隨著近十年進入行動世代，筆記型電腦及手機都使用了省電特性的元件，唯獨記憶體模組在能量效率上，並沒有特別的進步，以至於在耗能上，比例相對的提高，其耗能比例可以達到與螢幕相同的比例，因此記憶體可說是決定續航力的關鍵因素之一。將 MRAM 導入未來手機及穿戴式裝置，便能延長使用時間，同時不需再增加電池的容量而可以進一步減小裝置的尺寸，能拓展更多應用的可能性。

### 3. 高讀寫次數上限

目前 flash 記憶體做資料寫入時，需施高電壓使電子穿過絕緣層以進出浮閘。每次執行此步驟時，都會對絕緣體層造成傷害，直至絕緣體層失去隔絕電子的能力而無法再保存資料。而目前自旋轉移矩 (STT)-MRAM 利用電流，經磁穿隧偶合翻轉鐵磁層的方法，實務上可達  $10^{15}$  的寫入次數，遠遠大於市面記憶體產品，並且相對於其他新興記憶體，如相變化記憶體 (PCRAM) 的熱相變結晶與電阻式記憶體 (RRAM) 的絲狀體機制，現今 MRAM 的運作模式具有更高的可靠度與擴展性。因此也能看到 MRAM 的讀寫耐用度也大於其他新世代非揮發性記憶體，未來若能成功的應用自旋軌道矩 (SOT) 進行寫入，更可達真正無上限次數的寫入。

### 4. 極快的存取速度

MRAM 目前的存取速度已能做到非常高，在 2016 年 Everspin 推出的 256 Mbit DDR3 STT-MRAM 其運作速度即達 667 MHz (1.5 ns)，除大幅領先 DRAM (30 ns) 之外，也相當的

接近操作頻率高且接近處理器核心的 SRAM 範圍。另外，也有類似於固態硬碟的 nvNITRO 儲存加速器在 2017 年推出。因 MRAM 的機制具有高讀寫上限，不需要如同市面 NAND flash 做耗損平均分配資料寫入區塊，來延長使用壽命卻限制了寫入速度。其延時可達約為 6 微秒，是 NAND flash 的 40 倍快。

### 三、磁性記憶體的讀取

磁性記憶體的基本記憶單元稱作磁穿隧接面 (magnetic tunnel junction, MTJ)。這是一個由兩層鐵磁性薄膜，夾著一層絕緣材料的三明治結構，如圖 1。MTJ 的基本運作原理，為操作在穿隧層 (tunneling barrier) 的兩側鐵磁層 (ferromagnetic layer) 的磁化方向。實際運作在讀取資訊時，稱為自由層 (free layer) 的磁化方向若與釘扎層 (pinned layer) 相同，稱為「平行狀態」，於通入小的讀取電流時，在 MTJ 的上下電極所量測到的電阻值較小；反之，若磁化方向相反，則電阻較大，此電阻的變化量，稱作穿隧磁阻 (tunneling magnetoresistance, TMR)，定義為  $(R_{\text{反平行}} - R_{\text{平行}})/R_{\text{平行}}$ 。其在室溫時通常可以超過 100%，使得 MTJ 成為磁性記憶體的標準元件結構；寫入方面，在不影響釘扎層的情形下翻轉自由層，使之成為預期的平行或反平行狀態，即可達到紀錄二元訊息的目的。

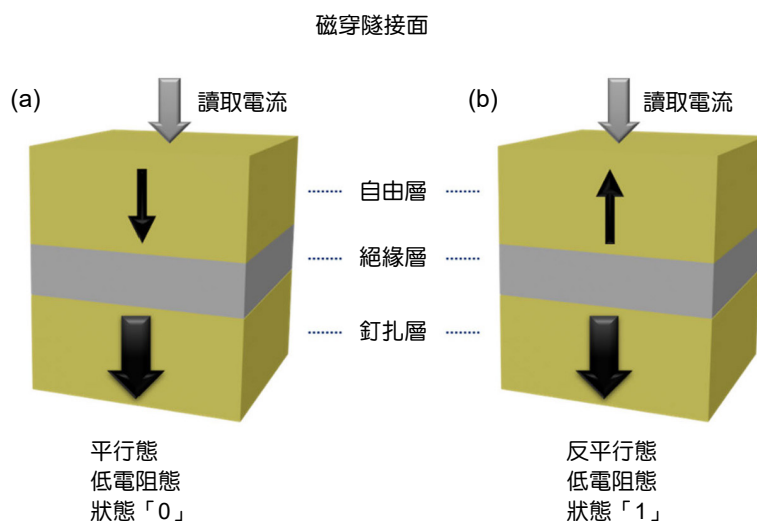


圖 1. 磁穿隧接面的結構。(a) 當上下兩層鐵磁層的方向互相平行時，其電阻較低。(b) 當上下兩層鐵磁層的方向互相反平行時，其電阻較高。

### 四、磁性記憶體的寫入：自旋轉移矩 (STT) 和自旋軌道矩 (SOT)

圖 2 是一個近代 MRAM 的發展史簡圖<sup>(1)</sup>，主要是在寫入技術上的不同而演進，從早期設計小電磁鐵通電，以通電流產生磁場的方式去翻轉記憶體，寫入 0 跟 1。但因為高密度和電路設計的需求，而需要有其他翻轉磁矩的寫入方式。自旋轉移矩 (spin-transfer torque, STT) 的發現對 MRAM 的寫入方式有著跨時代的突破，而有了第一次的 MRAM 革命。

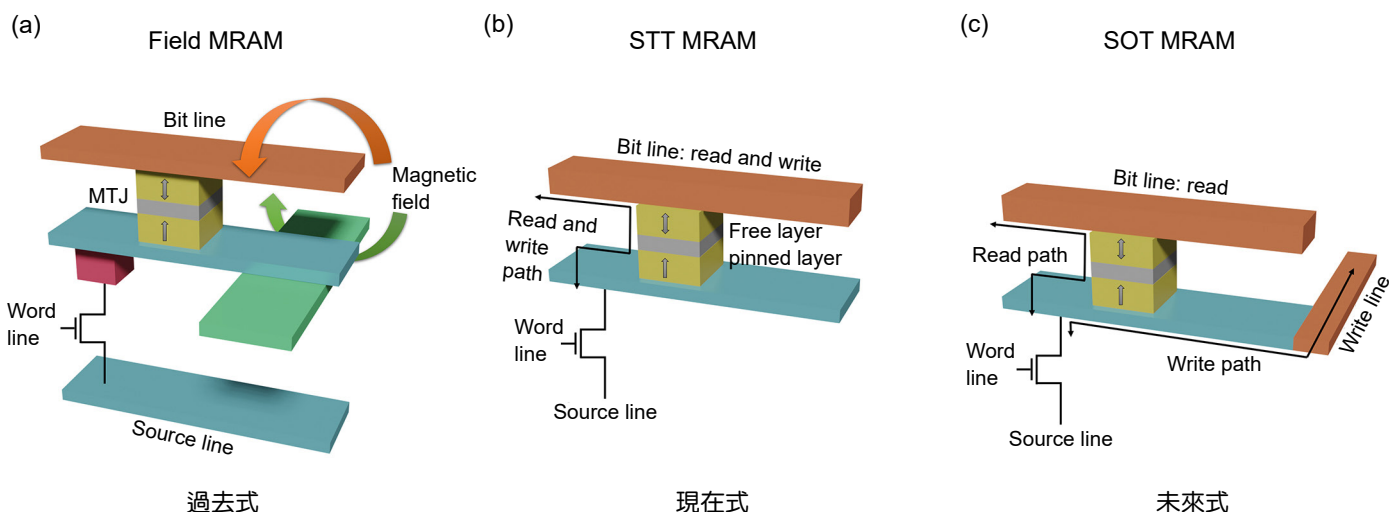


圖 2. MRAM 技術演進上的三個世代，(a) 第一代為磁場驅動翻轉式 MRAM，主要為利用小電磁鐵 (通電流產生磁場) 翻轉磁矩，達到寫入的動作。(b) 第二代為全電流驅動的自旋轉移矩 (STT)，此結構不受尺寸維度的限制，成為高密度 MRAM 的轉折。(c) 第三代為自旋軌道矩 (SOT)，此為一未來式 MRAM 寫入技術，是一個讀寫分離的 MRAM 寫入技術，通常需要一個三端 (three terminal) 的結構達成。本圖參考自文獻<sup>(1)</sup>。

STT-MRAM 的理念，是希望藉由電流直接對磁矩進行操作，而非間接地產生磁場再去翻轉磁矩，因此必須藉由電子自己所帶的自旋角動量直接對磁矩造成影響。材料之所以能表現出磁化方向，是因為位於費米能階的上下自旋電子數量的不平衡，無法互相抵銷，而帶有淨自旋。若將普通電流流入，其受到磁矩影響，此時也會帶著淨自旋，成為自旋極化電流 (spin polarized current)。將自旋極化電流注入另一個磁化方向不同鐵磁層時，極化電流之自旋所帶的角動量會轉移到磁性層上，產生影響磁矩自身角動量的力矩，稱為自旋轉移矩 (spin transfer torque, STT)，不斷通入自旋極化電流後，該鐵磁層的磁化方向將會被同化。圖 3 為運用自旋轉移效應之 MTJ 的元件構造圖，說明如何進行磁性自由層翻轉以切換正/反平行組態。在圖 3(a) 中，若當前 MTJ 的磁矩組態為反平行排列，欲重新寫入成平行阻態，則需將電子流以釘扎層 → 自由層的方向通入，當電子流通過釘扎層時，多數自旋方向會被其磁矩同化，少數則被散射，電流會成為淨自旋向左的極化電流。當極化電流抵達自由層時，將自身的角動量轉移到磁矩上，當電流密度足夠時，磁矩便翻轉，成平行組態完成寫入。若已是平行態時，持續從釘扎層 → 自由層通入之電子流因極化方向與自由層磁矩方向相同，無法翻動磁矩。若是要進行反轉需將電子流由自由層反向通入。電子流進入自由層會發生極化時，原先少量的非同向自旋，發生散射反彈回到了自由層，並對其發生角動量轉移，當有足夠多的反向自旋反射回自由層，會使得磁矩生翻轉，MTJ 便由平行組態變成反平行組態。這種藉由少數自旋反彈造成磁矩運動的現象，於圖 3(a) 的情況也會發生，但由於元件製作時，釘扎層會被做到足夠穩定，不會因此而翻轉。

利用 STT 的寫入方式，有一個較為麻煩的議題需要克服，就是在寫入的時候因為是利用高電流通過磁穿隧界面去強迫磁矩發生改變，所以對於材料結構而言，STT 伴隨的是可靠度以及讀寫次數的問題。長時間密集的使用，會使磁穿隧界面造成崩潰而失效。這個問題也促進了以自旋軌道矩 (spin orbit torque, SOT) 為主的第三代 MRAM 研究。而 SOT 與 STT

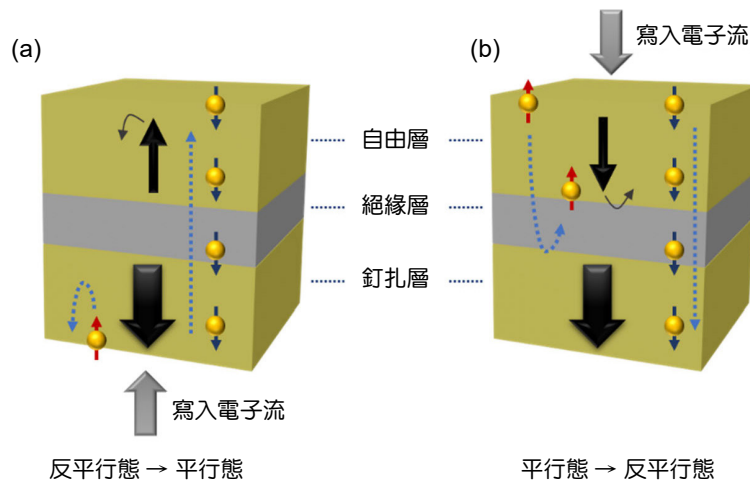


圖 3. 自旋轉移矩的寫入機制。

最大的不同點，在於它是讀寫分離的特性，在 SOT 的基本電路設計上，寫入是透過通電流經過底電極去翻轉自由層磁矩，這種寫入技術無須通入高電流進入穿隧絕緣體界面，故這種寫入技術在實務上幾乎沒有使用年限的問題，而讀取上如同 STT 一般，仍然可以使用小電流去進行穿隧磁阻的判讀，此為一個 SOT 的基本結構。

SOT 與 STT 最大的差異在於自旋流產生的機制是源自於重金屬材料的自旋霍爾效應 (spin Hall effect, SHE)，如圖 4 所示。圖 4(a) 為一般的霍爾效應，原理是當電流在材料內傳輸的過程中外加一垂直電場的磁場，帶電的電荷 (電子、電洞) 會受到相反的勞倫茲磁力 (Lorentz force) 而偏折，累積在材料的邊界上，此時兩端便會產生一個偏壓稱為霍爾偏壓 (Hall voltage)，這個效應為霍爾效應。而在磁性材料內部因為有淨磁矩，在材料內部形成一類似內建磁場的效應，可以在無外加磁場的條件下，使電荷產生一樣分離偏折的效果，此時材料的兩端點一樣可以量測到一個電壓差，此稱為異常霍爾效應 (anomalous Hall effect, AHE)，如圖 4(b)。而在近幾年內，有一個新的霍爾家族成員被發現，於具有強自旋軌道耦合的材料內，例如重金屬，在這種材料內部通入電流，此時兩種不同的自旋電子會因為受到相反的自旋軌道耦合效應，產生偏折而累積在材料的兩端，稱為自旋霍爾效應，如圖 4(c)。這種現象不若前兩種霍爾效應能夠在材料兩端量測到電壓差，因為累積的是自旋方向相反的電子，故在電荷累積上是等量的，所以無法在橫向上產生電壓差，但是會產生所謂的自旋電壓差。這種壓差無法用電的訊號去判讀。但如同前一節所提到的，當自旋流產生的時候，可對磁性材料的磁偶矩產生翻轉，這也是利用 SOT 寫入的基本運作原理。

自旋軌道矩 (SOT) 最初是由鐵磁 (FM) / 普通金屬 (NM) 界面處的自旋積累給出的，自旋電流的進一步細節是從微觀角度由自旋軌道耦合 (spin-orbit coupling, SOC) 產生。兩個主要的 SOC 來源是自旋霍爾效應 (SHE) 和界面 Rashba-Edelstein 效應，這將導致自旋積累並發出純自旋電流。首先，SHE 利用普通金屬中的 SOC 將充電電流轉變為自旋電流。能帶結構 (本徵) 或在塊狀 SOC 的正常金屬中添加高 SOC 雜質 (外在)，都可能導致自旋依賴性，這將導致導電電子的不對稱散射。這種不同的散射現象會導致自旋向上和自旋向下電子以相反的方式偏轉，導致橫向自旋電流。一般電流行經方向、自旋電流行程方向和自旋電流極化方向，這三個方向將相互正交。因此，我們可以通過以下等式來定義自旋霍爾效應 SHE：

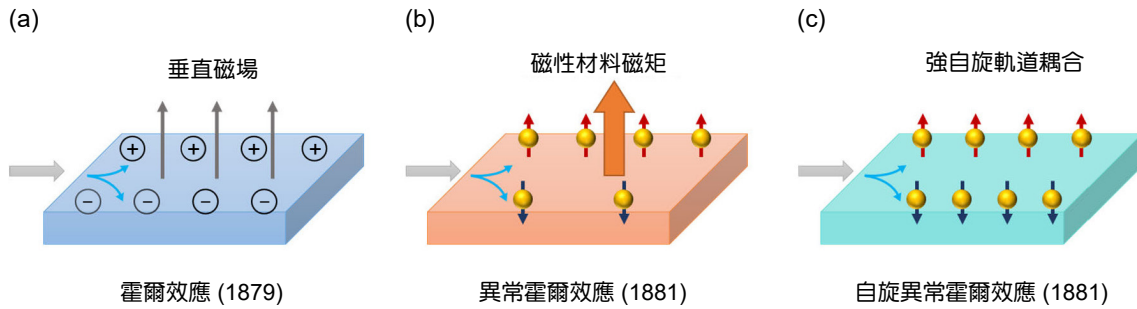


圖 4. (a) 霍爾效應，通電流於材料內部時同時施加一垂直磁場，因勞倫茲磁力使不同帶電粒子產生相反的偏折路徑，累積在材料兩端而產生一個電位差的現象。(b) 異常霍爾效應，發生於磁性材料內部，因材料磁矩於內部產生一類似內建磁場而分離兩種自旋方向相反的電子累積，且兩者數量不同，於材料兩端(類霍爾效應)。(c) 自旋霍爾效應，產生於強自旋軌道耦合的材料，如重金屬鉑、鈦，當電子流經此材料內部時，因自旋軌道耦合分離兩種自旋方向相反的電子，而累積在材料兩端，由於自旋上、下是等量分離，故無端電壓的產生，而此種自旋累積的現象對磁性材料相當敏感，為自旋軌道矩的基本概念。

$$J_s = \frac{h}{2e} \theta_{SH} (J_q \times \sigma)$$

$J_s$ ：自旋電流， $J_q$ ：電流， $\sigma$ ：自旋電流極化方向， $\theta_{SH}$ ：自旋霍爾角， $h$ ：普朗克常數， $e$ ：電荷單位

這裡，自旋霍爾角是自旋電流產生的效率指標。它是普通金屬的固有特性。自旋霍爾角的大小可以量化了通入電流產生的自旋電流密度，符號給出了自旋電流極化方向在金屬界面方向的資訊。

其次，Rashba-Edelstein 效應，被稱為反自旋電流效應，起源於界面 SOC。這種現象出現在破壞反轉對稱性的特定結構中。破壞對稱性將引起沿對稱方向的內部電場  $E$ 。因此，動量為  $p$  的導電電子將在與  $E$  的界面附近移動，並感受到  $E \times p$  方向的有效場。Rashba-Edelstein 效應產生的自旋電流來自於纖鋅礦半導體和二維電子氣 (2DEGs)，在此背景下提出的界面 SOC。隨著時間的推移，人們開始將這個概念擴展到普通的金屬和鐵磁體雙層結構。

而現在大多數團隊於 MRAM 的設計上，為達到高密度與高熱穩定性(其定義為磁矩翻轉的能障/熱能)，選擇使用垂直磁矩，如圖 5(a) 所示。不用水平磁矩的原因是垂直磁矩的熱穩定性較高。水平磁矩的水平異向性 (即磁矩偏好躺在水平面) 來源是來自其元件的長寬比，這樣的穩定性無法很高，較容易被環境的熱能干擾而被翻轉，即其儲存的資訊不見了。而垂直磁矩的垂直異向性來源是來自其材料介面產生的界面異向性，其數值通常較高，因而熱穩定性也較高，如圖 5(a) 所示。根據物理學上的模擬與解釋，要翻轉高垂直異向性的鐵磁層，光是靠 SOT 等效磁場產生的力矩無法成功達成翻轉，只能使磁矩轉移到平面，此後磁矩隨機選擇回到易軸 (即垂直膜面方向) 上的任意方向 (此狀態稱為去磁態，demagnetized state)，如圖 5(b) 所示。以往運作 SOT 翻轉機制時，唯一的解決方式，都是在要翻轉時於水平膜面方向外加一定強度的磁場，改變垂直異向性的平衡態，使得 SOT 的現象可以完整

並如預期的發生，如圖 5(c) 所示。該外加磁場沿與電流相同的方向施加，目標在打破對稱性，並實現完全的磁矩翻轉。然而，當涉及到實際應用時，這個附加額外場對於合併到更精密的製程中，並不易達成。因此，很多研究都致力於擺脫這個束縛。我們將回顧不同的方法，並從實際實現的角度討論它是否可行。

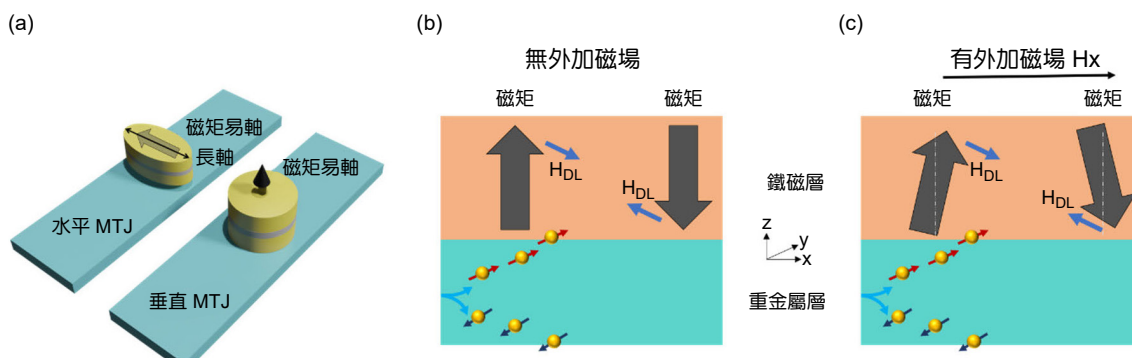


圖 5. (a) 水平和垂直 MTJ 的結構，磁矩各自在其易軸方向。(b) 無外加磁場下，SOT 的效應，其磁矩上翻下和下翻上的機率一樣，無法產生確定的磁矩翻轉。(c) 有外加磁場下，磁矩稍微傾斜，產生對稱性破壞。入射電子產生的自旋電子流可以將磁矩從上翻到下，但卻無法讓磁矩從下翻到上。

## 五、實現零場翻轉的方式

### 1. 反鐵磁體造成的水平有效場

正如上一節所討論的，我們希望消除 SOT 翻轉中對額外附加場的依賴。第一種方法利用了反鐵磁體的交換偏置或層間耦合。如圖 6 所示，提出了多種方案來實現垂直異向性系統中確定性的零場 SOT 轉換。在圖 6(a) 中，交換偏置場來自反鐵磁 (AFM) 材料 PtMn，其界面的磁矩，所產生的交換偏置場，對相鄰的鐵磁層而言，提供了內建磁場，達成零外場的 SOT 翻轉。此外，PtMn 本身可以自己提供自旋電流，因此它們在此系統中擔當了 SOT 的兩個角色。對於圖 6(a) 中 PtMn/[Co/Ni] 的情況<sup>(2)</sup>，這是使用 AFM 的開創性工作，它顯示了面內有效場來幫助切換。它還發現，通過設計交換偏差，系統可以表現出類似憶阻器的行為。這種性能具有應用於神經形態計算的巨大潛力。

### 2. 層間耦合的水平有效場

利用來自層間交換耦合 (interlayer exchange coupling, IEC)，上層水平 CoFe 通過 Ru 層，產生水平有效場，達到零場翻轉<sup>(3)</sup>。

### 3. 楔形結構設計

實現零場 SOT 轉換的另一種方法是使用楔形結構在 SOT 器件的不同膜層中給出破壞對稱性條件。如圖 7(a) 所示，Ta (5nm)/CoFeB (1nm)/TaO<sub>x</sub><sup>(4)</sup> 中楔形氧化物結構。由於楔形形狀，氧化程度和垂直異向性的強度沿橫向 (樣品中的 y 軸) 變化，此系統不僅存在常規的 SOT 有效場，而且在系統中發現了額外的垂直有效場 ( $H_z^{FL}$ )，這給出了額外的對稱破壞項，達成零場翻轉。

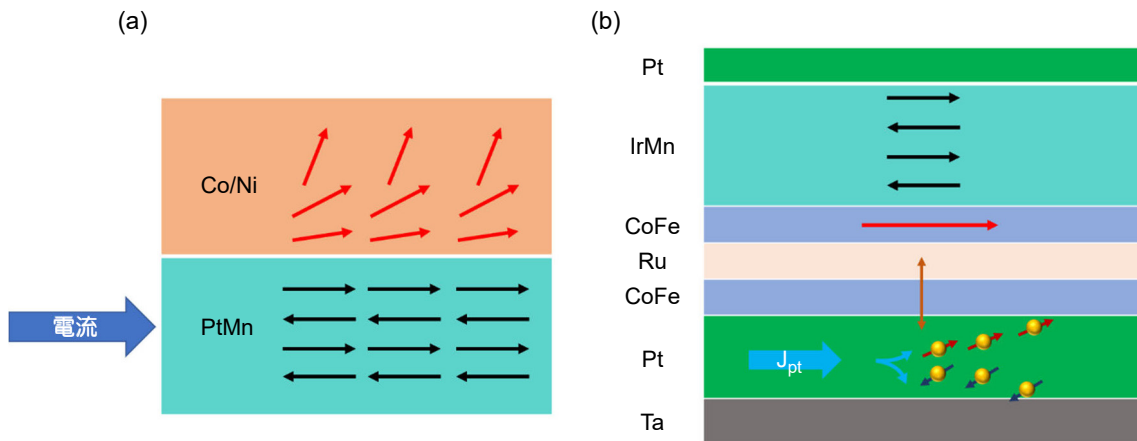


圖 6. (a) 利用 PtMn 在元件內形成有效水平磁場 (b) 利用層間耦合產生水平有效場。

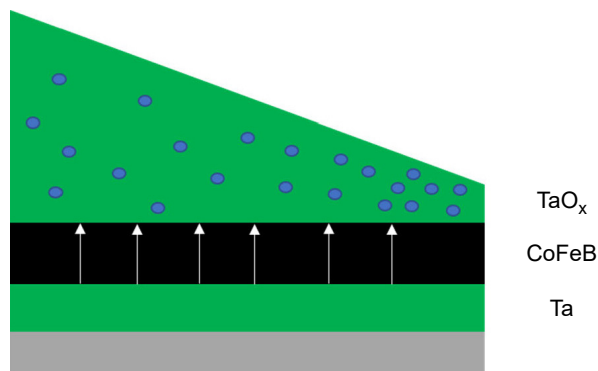


圖 7. 利用楔形結構設計達成的零場翻轉。

#### 4. 具垂直膜面分量的自旋電子流自旋組件

通常當電流通過時，SOC 效應將在正常金屬 (NM)/鐵磁體 (FM) 界面處產生平面內的極化自旋。直到最近，有研究聲稱存在由 NM/FM 界面產生的垂直膜面 (out-of-plane, OOP) 自旋分量。與水平分量的自旋相比，OOP 自旋可以提供對稱破壞項並實現零場翻轉，圖 8 給出了這個概念的結構設計。在圖 8 中，於界面處 FM (NiFe 或 CoFeB) 和 Ti 的組合，可以產生自旋電流和 OOP 自旋分量。報導中使用磁滯迴線測量和數值模擬，證實了該系統中確實

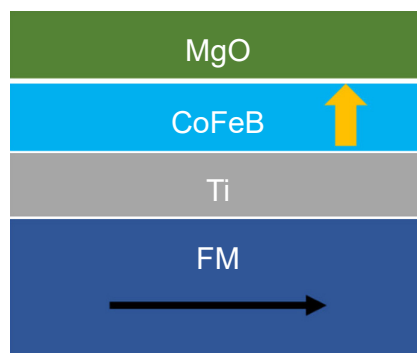


圖 8. 具垂直膜面分量的自旋電子流膜層設計。



存在垂直膜面的自旋分量。儘管這一發現相當令人興奮，但背後更深層次的物理機制似乎仍存在爭議，需要進一步解釋。

### 5. STT 輔助的 SOT 翻轉

在垂直鐵磁系統中，要達成零場翻轉必須要有一類似水平磁場的因子來破壞對稱性。這個方法是利用在讓電流通過磁穿隧接面 (MTJ) 時的產生自旋轉移矩 (STT) 來破壞對稱性，因而達成零場翻轉，如圖 9 所示<sup>(5)</sup>。

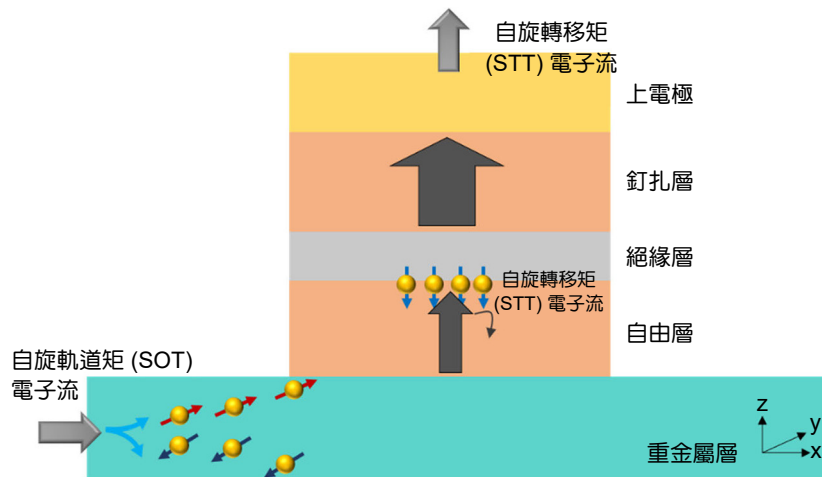


圖 9. 利用 STT 輔助的 SOT 翻轉。SOT 和 STT 各自的翻轉機制請參考圖 3 及圖 5(b)、(c)。

### 6. 額外鐵磁層所產生的外漏水平磁場

可以在元件結構上另外蓋一層鐵磁薄膜，利用他產生的外漏磁場來當作 SOT 翻轉所需的水平磁場，如圖 10 所示。這是個非常直觀的想法，但要實際做成元件卻會遇到很多的困難，例如該額外的水平磁鐵也會被 SOT 影響。雖然如此，仍有研究團隊藉由適當的膜層設計，成功利用此方法達成零場翻轉<sup>(6)</sup>。

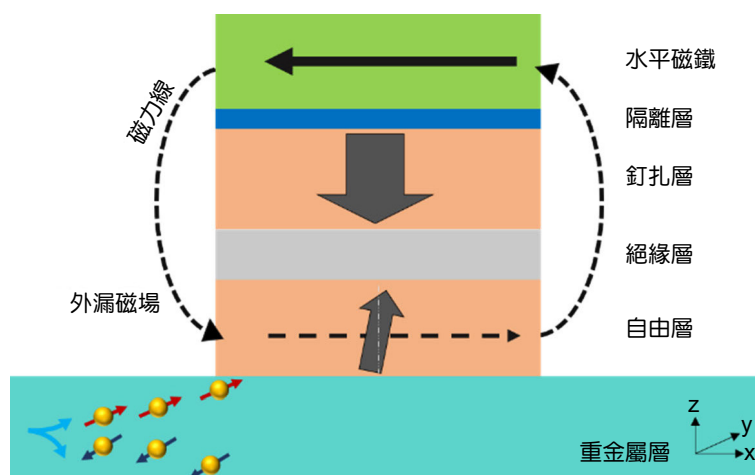


圖 10. 利用額外鐵磁層所產生的外漏水平磁場達成的零場翻轉。

## 六、降低翻轉電流

除了零場翻轉的挑戰外，如何降低元件的磁矩翻轉所需的電流，也是一大挑戰。現在的自旋軌道矩產生翻轉的臨界電流密度 (約為  $10^7 \text{ A/cm}^2$ )，比目前一般 STT 寫入的臨界電流 ( $10^6 \text{ A/cm}^2$ ) 大。翻轉電流太大的話，在記憶體設計裡用來控制電流脈衝的電晶體就無法做小，因為通過的電流大小和電晶體面積成正比。這樣即使磁穿隧界面 (MTJ) 做得很小，記憶體密度會因為較大的電晶體面積，而無法降低。在垂直磁矩系統裡 (PMA system)，臨界翻轉電流密度公式為  $J_c = \frac{2e M_s t_F}{\hbar \theta_{SH}} \left( \frac{H_{k,eff}}{2} - \frac{H_x}{\sqrt{2}} \right)$ <sup>(7)</sup>，其中  $e$  為電荷常數， $\hbar$  為普朗克常數， $M_s$  為飽和磁化量， $t_F$  為鐵磁層厚度， $\theta_{SH}$  為等效自旋霍爾角， $H_{k,eff}$  為垂直異向性場， $H_x$  為外加水平磁場。由上述公式可以知道，如果一個材料有較大的自旋霍爾角，即該材料可以很有效的將進入的電流轉換為自旋電子流。在一般的重金屬材料中，我們發現具有較高電阻的材料通常具有較大的自旋霍爾角，例如 beta 相的鉬 ( $\theta_{SH} \sim -0.12$ ) 和 beta 相的鎢 ( $\theta_{SH} \sim -0.33$ )。為了尋找具有非常大自旋霍爾角的材料，人們開始研究特殊的新穎材料，像是拓樸絕緣體、二維材料，因為他們特殊的能帶結構，導致他們可以有非常大的自旋霍爾角。但這些材料的缺點是相較於前述的重金屬材料，比較不容易整合於半導體製程，所以還有待持續的研究。

## 七、未來展望

### 1. 零場翻轉的在晶圓等級的實現

在上節介紹到的各式實現零場翻轉的技術，有些還在微米尺寸等級的元件，而有些則進展到磁穿隧界面 (MTJ) 搭配電晶體，且在晶圓等級上實現。其中「STT 輔助的 SOT 翻轉」<sup>(8)</sup> 和額外鐵磁層所產生的外漏水平磁場<sup>(6)</sup>，是非常有機會被實際應用的技術。

### 2. 新穎材料研究帶來的機會

一般 SOT 研究的重金屬材料大部分都是鉬、鎢和鉑。垂直的鐵磁層有鈷鐵硼、鈷鎳多層膜等。除了這些材料之外，許多新穎的材料，或是舊的材料，都被許多學者重新研究。例如具有超大自旋霍爾角潛力的拓樸絕緣體和二維材料。或是可以本身產生 SOT 翻轉自己的鐵磁、反鐵磁、亞鐵磁材料，這可以簡化元件的膜層設計。另外，曾經為磁光碟片材料主角的亞鐵磁材料，在 SOT 翻轉上具有翻轉速度快且易於讀取訊號的優勢，也吸引眾多研究者的目光。

### 3. 多階儲存及類神經元運算 (neuromorphic computing)

在前言中提到的磁性記憶體的應用，使用「0」和「1」二進位，因為磁性記憶體的非揮發性，速度快、功耗低等優點，在互聯網、AI、邊緣計算中有很大的優勢。但是在實際研究中，我們發現在一些材料系統中，磁矩翻轉並不是那麼單純，可以有多個穩定磁狀態的存在，這樣的現象，可以達成所謂的多階儲存，可以增加單顆磁穿隧元件的紀錄密度。其缺點則是多個紀錄狀態其實不好區分，若要能實際應用，需要更多的優化。

而利用所謂的磁矩緩慢變化，就能有「類比」訊號的輸入或輸出，這就和之前「0」、「1」的數位訊號不同。輸入的類比訊號無法將整組記憶位元都完全定義為黑（「1」）或是

白(「0」)，形成了類比訊號獨有的「灰色地帶」。由於這樣的運作方式和人類神經元的運算方式如出一轍，因此被稱為「類神經運算」。除了訊號的解讀跟輸出可以是具有「灰階漸層」的強大優點外，MRAM 所組成的類神經運算單元還可以藉由「學習」來改進訊號的準確性，因為 MRAM 本身是非揮發性的記憶體，前一次寫入的運算內容可以完整記憶下來；當多次輸入一樣的訊號時，解讀出來的結果會趨於精準的輸入值。總而言之，由於 MRAM 同時兼具了非揮發性、讀寫速度快的優點，使用 MRAM 建立的類神經元運算為下一代的處理器核心運算方式，帶來了全新的時代。

## 參考文獻

1. S. Bhatti et al., *Materials Today*, **20**, 530 (2017).
2. S. Fukami et al., *Nat. Mater.*, **15**, 535 (2016).
3. Y.-C. Lau et al., *Nat. Nanotechnol.*, **11**, 758 (2016).
4. Yu, G. et al., *Nat. Nanotechnol.* **9**, 548 (2014).
5. Wang, M. et al., *Nat. Electron.*, **1**, 582 (2018).
6. K. Garelo et al., *Proc. IEEE Symp. VLSI Technol.*, T194 (2019).
7. Lee, K. S. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **102**, (2013).
8. N. Sato et al., *Proc. Symp. VLSI Technol.*, **1** (2020)

## 作者簡介

李柏緯先生現為國立清華大學材料科學工程學系博士生。

Po-Wei Lee is currently a Ph.D. student in Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.

林柏宏先生現為國立清華大學材料科學工程學系博士生。

Po-Hung Lin is currently a Ph.D. student in Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.

賴志煌先生為美國史丹佛大學材料科學工程博士，現為國立清華大學材料科學工程學系清華講座教授兼工學院院長。

Chih-Huang Lai received his Ph.D. in Materials Science and Engineering from Stanford University, USA. He is currently a NTHU Chair Professor in Department of Materials Science and Engineering and Dean of College of Engineering at National Tsing Hua University.