

開啟記憶體產業的未來

垂直式自旋磁性記憶體技術

資訊設備與行動裝置的普及，使得記憶體的角色越加舉足輕重；而在快速、省電的要求和趨勢下，新世代的記憶體技術也成為眾所關注的發展方向。工研院「垂直式自旋磁性記憶體技術」的研發突破，不只掌握新世代技術，也為國內記憶體及資訊產業增添未來的競爭力。

文 魏茂國
攝影 蔡鴻謀

當前不論是電腦、手機，或是各種儲存裝置與資訊設備，都脫離不了記憶體的使用；像是電腦中做為緩衝的動態隨機存取記憶體（dynamic random access memory, DRAM），或是隨身碟與記憶卡採用的快閃記憶體（flash memory），還有可儲存大量資料的硬碟（hard disk drive, HDD）等。從設備運轉到資料儲存，這些記憶體都是不可或缺的角色，因此全球記憶體相關廠商與研發機構，也不斷投入記憶體技術的研發，以期能提升記憶體的效能。

工研院電光所副所長高明哲以人腦來比喻，最理想的記憶體除了運作速度要夠快、耗能要夠低之外，最重要的是能在沒有電流的供給下，仍能具有記憶保存資料的功能，就是儲存內容並不會因為電力中斷而消失，這也正是「非揮發性」（non-volatile）的記憶體特性。

以目前所使用的各種記憶體，從容量到速度，都有不同的特性與定位；例如HDD的儲存容量高，並且具有非揮發性，但存取速度上很慢，往往限制了整體系統的效能，即使是目前最新利用

快閃記憶體技術來加速的固態硬碟（SS），如與DRAM這類揮發性的記憶體相比，其存取速度上仍然相對較慢。而在電腦中央處理器（central processing unit, CPU）中提供緩衝功能的靜態隨機存取記憶體（static random access memory, SRAM），就具有相當快的速度，但卻是屬於揮發性的記憶體。

然而，新世代的「磁性記憶體」（magnetic random access memory, MRAM）的出現，則為記憶體的使用領域，帶來更優質的選擇。

雖然在主要的記憶體類型當中，MRAM的速度並非最快，容量也不是最大，卻能兼顧這二者的優點，且為非揮發性的記憶體，因此受到產業界相當大的重視；包括三星（Samsung）、海力士（Hynix）、美光（Micron）、東芝（Toshiba）等記憶體廠，與應用材料（AMAT）、威科儀器（Veeco）、優貝克科技（ULVAC）、東京威力科創（TEL）、佳能安內華（Canon Anelva）等設備商，還有比利時微電子研究中心（IMEC）、日本東北大學（Tohoku University）、IBM



讓技術產業化，是每一位工研菁英的追求，目前垂直式自旋磁性記憶體團隊與海外授權公司合作，尋求將MRAM技術推廣至IC設計與製造公司的機會。

等研究單位，以及台積電、格羅方德 (Global Foundries)、中芯國際 (SMIC) 等晶圓代工廠等皆競相投入研發，並認為將是取代部分 cache SRAM、DRAM、或甚至是 Flash 等記憶體的關鍵技術。

MRAM技術廣受重視

工研院從2001年起，就開始投入MRAM的研發工作，並於2002年組成研發團隊，至今已經超過十年。事實上自1995年，摩托羅拉 (Motorola) 公司就已經開始研發MRAM，後來更將其半導體部門轉成立為飛思卡爾 (Freescale) 公司，並在2004年提出量產計畫、於2006年正式銷售，容量為4Mb、讀寫速度為35ns (nanosecond, 奈秒)，售價為每片25美元。

不過這項階段性產品的性能表

現，並不符合眾人對於MRAM的期待，同時只供應車載或飛機使用等較特別的記憶裝置市場，並沒有打進消費性電子產品市場。甚至在2012年11月，由飛思卡爾集資成立、以MRAM為主要產品的Everspin Technologies公司，又再度提出以64Mb水平式自旋記憶體為主的新量產計畫，卻還是不受市場肯定。

工研院電光所經理王泳弘指出，雖然全球記憶體產業都認為MRAM是個相當不錯、值得發展的技術，而且有很多特點是其他記憶體做不到的，但至今仍無法提出夠好的規格並量產，最主要的原因就在於MRAM具有許多物理現象上的瓶頸，而且有些物理瓶頸是互相衝突的；也就是當其中一項性能表現良好時，就會導致另一項性能的低落。

因而到目前為止，還沒有一個研發團隊可以解決所有問題，也讓MRAM真正夠推廣普及的時程一再延後。

又如率先量產MRAM的飛思卡爾，因產品表現不如預期，反而讓大家對於MRAM有些失望，加上其他新記憶體技術也逐漸浮出檯面，例如電阻式記憶體 (resistive random access memory, RRAM)，使得當時MRAM的研發氣氛持平、甚至是往下滑的，而且有越來越多單位中止研發。

王泳弘提到，當工研院在2002年成立MRAM團隊時，就有人說三年內可以做得出來，可是三年後並沒有結果，於是就說再三年，沒想到就這樣一再「三年」直到今天：包括在2006至2009年間遇到很多製程上的問題，幾乎沒有產

生較好的研發成果。

不過到了2010年的國際電子元件會議 (International Electron Devices Meeting, IEDM) 上,三星與海力士二家公司不約而同地提出新的MRAM研發成果,而且頗受肯定,使得MRAM的研發氣氛又被炒熱起來。

王泳弘表示,以DRAM大廠三星所考量的,就是在2015年左右DRAM將會遇到技術瓶頸,由於元件體積過小而會有很嚴重的漏電問題,使得充電次數變得更頻繁,造成運作速度變慢,需要的電力也就變得更大。

優點多、挑戰也多

因此三星亟需尋找新的技術與產品,也認為MRAM最有機會能夠取代DRAM。王泳弘解釋,MRAM是一種磁性多層膜的堆疊結構,在早先的MRAM技術中,這二個磁性層的磁化方向為水平排列,並可由電流來控制旋轉方向;而目前MRAM則改為與膜面垂直(perpendicular)的磁化方向,也就是形成了工研院所開發的「垂直式自旋磁性記憶體技術」(p-STT MRAM)。王泳弘表示,p-STT MRAM除了具備MRAM原本的非揮發性、速度快、可無限次數讀寫等優點外,而且需要的電流低,體積也可以做得很小、密度更高,因此容量就可以做得更大。

當非揮發性的MRAM取代了DRAM與L2、L3後,由於記憶內容不會消失,開機時就不需要由硬碟開始一層層往上傳遞資料,能夠加快電腦的開機速度(instant-on),幾乎是開機後就能立即使用。同時在待機時MRAM不需供電(normally off),因此可以更省能,這些也都是p-STT MRAM關鍵的產業價值所在。

突破外漏磁場問題

雖然p-STT MRAM擁有許多好處,但以產業研發的觀點,從材料的開發選用及改善,使磁化方向改為垂直,並且在讀取時訊號更清楚、容易判斷,到降低寫入時需要的電流等問題,在過去幾年來一一地被解決,目前更專注在元件特性的研究,持續克服技術上的挑戰。以工研院在2012年IEDM中所發表的最新研發成果,就是針對垂直磁化時先天上的物理問題,受到異性相吸、同性相斥的影響,當自由層的磁化方向經翻轉後,和參考層的磁化方向不同時,就會基於本身磁性、也就是外漏磁場的影響,而想要翻轉成同個方向

在這樣的情形下,只要給予少許的電流,就可以輕易將自由層翻轉回來;相反地,若要由相同方向改為相反方向,就得要提供較大的電流才有辦法翻轉,這就

是「翻轉不對稱」。而在嚴重的狀況下,如果磁性層本身的作用力太大,即使是將電力切斷,或是沒有任何外在磁場及電流時,仍會自動翻轉回來,就會造成記憶失效而無法使用;尤其在元件越做越小的趨勢下,這種物理情況就越為嚴重。

工研院成功解決「元件變小時容易導致記憶體失效」的技術瓶頸,成為全球第一個不需要外在磁場,就能使MRAM具有對稱翻轉特性的技術,其他如電流、寫入速度等特性,也與目前國際研發水準相當。此外,基於採用半導體製程,p-STT MRAM在階梯狀的設計下,也已克服了製程中較困難的蝕刻問題,並且不會犧牲記憶體的面積,同時還申請了二項技術專利。工研院MRAM研發團隊更提出在p-STT MRAM階梯狀結構的上方,增加二層水平方向的磁性層,利用其磁力的交互作用,讓下方的垂直磁性層更容易翻轉,並減少寫入電流的加分設計。

為產業注入未來希望

提到研發p-STT MRAM的過程,王泳弘回想,當早年的半導體技術還沒有現在這麼先進時,工研院在MRAM的研發工作上做得還不錯,因為透過既有設備,就可以製成元件來測試。但是到了2006年之後,由於半導體技術不



左顧子琨表示，記憶體是關鍵零組件，尤其在巨量資訊的資趨勢下，記憶體的角色至關重要。右圖為RRAM，該項技術浮出檯面，讓更多單位對於投入研發具有許多物理現象瓶頸的MRAM更為保留，但工研院同仁抱著熱情、耐心與堅持，終於突破MRAM記憶體技術的種種困難。

斷翻新，加上MRAM的寫入方式也轉變為第二代的STT，元件必須做得更小，性能與效果才會更顯著，工研院在p-STT MRAM技術的創新主要是在材料及元件結構，同時也進行製程微幅創新。這項技術特點在於前端材料與元件結構創新後，廠商可以運用製程優勢，快速將p-STT MRAM的新製程開發出來，並迅速落實在生產，進行新世代的p-STT MRAM生產。

目前工研院也已和美國技術授權公司Rambus合作，簽訂先期技術評估合約，透過持續的研發與驗證，尋求將MRAM技術推廣至IC設計與製造公司的機會。像是p-STT MRAM的下一步，就希望能在降低寫入電流的同時，還能維持元件的熱穩定性；也就是寫入電流要越低越好，熱穩定性則是越高越好，是MRAM的技術挑戰之一。因為當寫入電流變小時，相對就需要使磁性層變得容易翻

轉，這麼一來卻也會使磁性層變得更不穩定；甚至在自然環境的溫度中，或是因運作而使得溫度上升時，就容易擾動磁性層，使熱穩定性變差。

在電流與熱穩定性的取舍中，產品用途也會是考量的因素，例如用做取代隨身碟或記憶卡的快閃記憶體時，就不能犧牲熱穩定性，否則資料就容易不見；當然目標是盡力做到最好，並且取得各項表現的最佳平衡與可靠性。王泳弘不諱言地說，MRAM技術能夠在工研院持續發展多年，可以說是相當難得，顯然大家都認為這是相當重要的技術，也希望能藉此協助產業創造競爭優勢。

但不只是在台灣或工研院，由於長年研發投入下進展有限，使得工研院也曾多次評估是否要延續MRAM的研發計畫。工研院電光所組長顧子琨以產業觀點指出，過去台灣DRAM產業因為缺乏自有關鍵技術，加上供需失衡，

使得不少廠商因虧損而退場，更不用說投資開發新世代的記憶體技術。然以目前台灣記憶體產業暫時穩定的狀況下，更需要思考2015年後的新挑戰；而工研院在國家支持下，持續投入記憶體的研發，正好能補足台灣產業在技術上的缺口，也有機會協助產業發展競爭優勢。

顧子琨表示，記憶體是關鍵零組件，尤其在巨量資訊 (big data) 等資訊發展趨勢下，記憶體的角色也越來越重要；雖然工研院在MRAM技術上剛有了初步成果，但還需要更多的進展，而且若是一般產業界所進行的計畫，可能早就被放棄了。

顧子琨也提到工研院MRAM研發團隊深具了「3p」精神，就是passion (熱情)、patience (耐心) 與persist (堅持)，因此能夠持續投入至今，也希望能夠藉此點燃台灣記憶體產業的火種，提升產業競爭力。