

# 非揮發性FRAM記憶技術原理及其應用初探

Ramtron

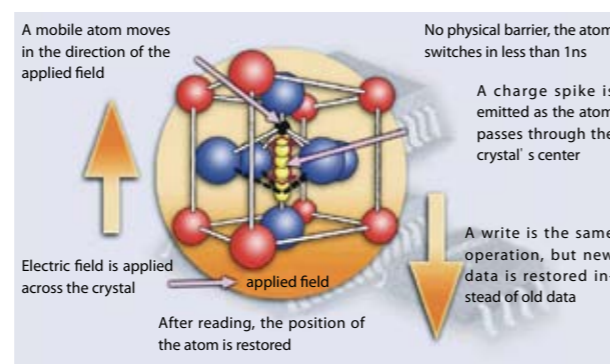
FRAM是以RAM為基礎、運用鐵電效應、並使用浮動閘技術作為一個儲存裝置。鐵電結構是基本的RAM設計，電路讀取和寫入簡單而容易。FRAM不需要定期更新，即使在電源消失的情況下，仍能儲存資料。業界已經在鐵電儲存裝置陣列裡，消除對一個內部參考電容在每一晶元陣列內的電容需要。1T1C架構有效地把晶元面積減半，新架構相當有效的晶片改進手段，降低了FRAM 記憶產品的生產成本。快速的寫入操作、次數多的寫入壽命、以及低電壓消耗，是FRAM的三大技術優勢與特徵。

現今已經被確定的記憶技術可分成兩種，首先是非揮發性記憶體。一般而言，系統應用非揮發性記憶體來純粹讀取或者大部份以讀取為主的記憶功能，因為非揮發性記憶體較為困難寫入。這些記憶體都是以ROM 技術為基礎的衍生物，包括EPROM、EEPROM以及快閃 EPROM。

第二種則是非揮發性記憶體，這些記憶體屬於RAM 裝置，其中包括SRAM和DRAM。由於非揮發性記憶體容易寫入，因此RAM 就常被應用於儲存經常改變的數據資料。不過當使用者能容易地將數據寫入RAM 時，其很容易揮發的性質，若在電源喪失的情況下儲存大量的數據資料，技術上對於工程師來說是一項挑戰。鐵電隨機存取記憶體（FRAM），被業界認為是理想的非揮發性記憶體。FRAM 記憶體具有容易寫入的優點，並且非揮發性的特性，使其十分適合作為喪失電源時儲存數據的記憶體。供貨數量有限的FRAM 產品已經問世數年，技術現正迅速發展，逐漸引導成為記憶體的主流。以下的技術註解，將提供簡短的操作解釋，並簡單概述其開發現況。

## 何謂FRAM記憶？

FRAM是以RAM為基礎、運用鐵電效應、並使用浮動閘技術作為一個儲存裝置。比起其他非揮發性記憶體，FRAM是一個 完全截然不同的裝置。鐵電效應是在一種材料中沒有應用電場而能儲存電極的能力，一個FRAM儲存元件，是透過鐵電材料結晶中的沈澱薄膜與兩電極間形成一電容器而成，這電容器的架構，非常類似於DRAM的電容器。不同的是，DRAM需對電容器充電才能儲存數據資料，而鐵電記憶則是鐵在結晶狀架構內儲存數據，如(圖一)所示的 Perovskite鐵電結晶結構，其能保持二元穩定狀況的「1」或「0」。



圖一 Perovskite 鐵電結晶結構示意圖  
註：資料來源：Ramtron

由於鐵電結構是基本的RAM設計，電路讀取和寫入簡單而容易。但是與DRAM不同的是，數據的狀態是穩定的，因此FRAM不需要定期更新，即使在電源消失的情況下，仍能儲存資料。一般人通常對專有名詞 Ferroelectric產生誤解，Ferro意味著鐵或者磁性，ferroelectric也易與磁鐵混淆，不過事實上，鐵電儲存記憶體並沒有使用鐵或者磁性的原理，且不會受到外部磁場的干擾，因為FRAM和一般的DRAM一樣，均採用電磁場的原理。

FRAM的記憶技術原理是，當一電場加到鐵電結晶體時，中心的原子隨著電場方向移動，由於原子的移動在其結晶體內，它通過能量障礙而產生一電壓尖峰（charge spike），內部的電路感應到電壓尖峰並且確定記憶。如果電場被從結晶體除去，中心的原子停留在適當位置，保護記憶的狀況。

## FRAM 操作模式

圖一所示的簡單鐵電晶體架構，晶體架構中間有一個移動的原子，若外施加一個電場原子，則會沿著電場的方向移動，如施加逆向電場，原子則朝向相反方向移動。由於原子在晶體頂部和底部的的位置是穩定的，因此極化方向也是穩定的，電場消失後仍會繼續保持。作為一種記憶單元，鐵電可提供理想的數位儲存模式，包含兩種穩定的狀態，讀寫速度快，功耗低，抗干擾能力強。

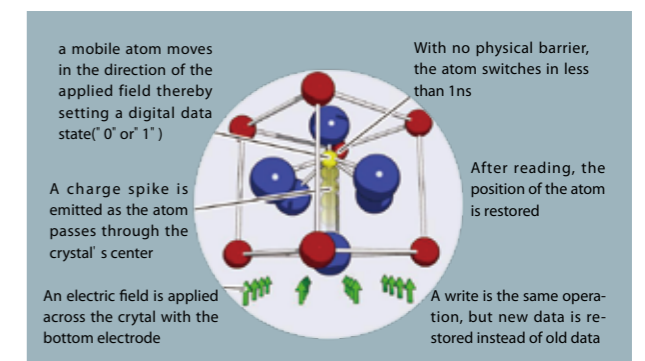
## 讀取操作

雖然記憶元件也是屬於一個電容器，但當線形充電時並不儲存資料。為了讀取FRAM儲存元件，因此有必要檢測出原子在Perovskite 晶體中的位置，不過目前在技術上，這些位置並不能直接檢測得到。

FRAM 讀取操作過程是，當一個電場加到鐵電跨越電容器兩端時，如果原子已經不在適當的位置，

移動的原子將沿電場的方向穿過晶體。在晶體的中間，高能狀態將在沒有電場的情況下，保持原子在適當的位置。當原子穿過高能狀態時，便會產生電荷尖峰值，電路則會釋放電場產生的電荷，並把其與一個參考的電荷相比較。

電容器的原子分為兩種：轉變狀態的原子和不轉變狀態的原子。轉變狀態的電容器所釋放的電荷，比不轉變狀態的電容器釋放的電荷大。不轉變狀態的電容，只釋放普通的DRAM電荷，而轉變狀態的電容，不僅釋放DRAM電荷，並且釋放鐵電電荷。儲存電路必須檢測哪個電容轉變了狀態，轉變的電荷則允許電路決定儲存單元的狀態。



圖二 FRAM記憶原理與晶體架構示意圖  
註：資料來源：Ramtron

一般而言，狀態轉變在1ns內發生，進入整個電路只需不到70ns的時間，儲存單元無效的時間則少於50ns。因為記憶體的讀取涉及到一個狀態的改變，線路自動恢復儲存狀態，因此每次讀取時，都伴隨著一個預先充電的操作以恢復儲存狀態。

## 寫入操作

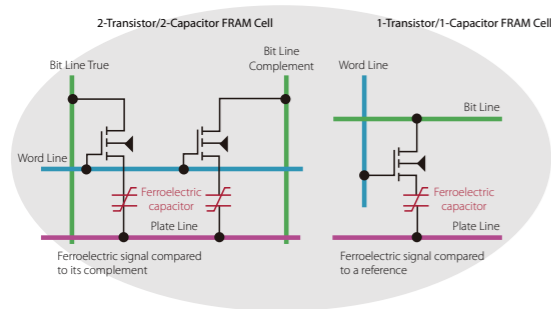
一次寫入操作非常類似於一次讀取操作。與其他非揮發性儲存記憶體技術不同的是，FRAM的寫入操作，非常簡單，並且不需要系統協助，電路直接寫入資料到鐵電電容器。若有必要，更新資料只需簡單地轉變鐵電晶體的狀態。與讀取操作一般，狀

態改變只需不到一秒的時間，完全進入只需不到70ns的時間，寫入操作亦需要一個預先充電的動作。

### FRAM產品架構演變

最初FRAM 記憶架構需要一個兩只晶體管以及兩個電容器的記憶架構，亦即2T2C架構。2T2C儲存單元為每個資料位元提供一個單獨的類似參考，根據編程的資料狀態，一個電容器在讀取的時候處於轉變狀態，而另一個則不會轉變。「1」和「0」的狀態賦值，在記憶體設計的時候是任意的，給一個近似值，記憶體線路可以精確測量轉變和非轉變電容器之間的差額。透過為每個位元提供一個不同的信號，便可除去電容器穿過記憶體陣列而產生的變化。

2T2C儲存元件提供了穩固的數據儲存可靠性，這在早期證明非揮發性儲存裝置技術優勢的階段非常重要。不過2T2C導致相對大的晶元尺寸，在ferroelectric材料最新的技術發展方面，業界已經在鐵電儲存裝置陣列裡，消除對一個內部參考電容在每一晶元陣列內的電容需要。例如Ramtron的新式單晶體管和單容器的晶元架構（1T1C），像DRAM一樣使用一個電容器，作為在記憶陣列裡每根柱子的參考。1T1C與2T2C架構相比，新架構能把晶元面積減半，成為有效的 晶片改進手段，並且降低FRAM 記憶產品的生產成本。



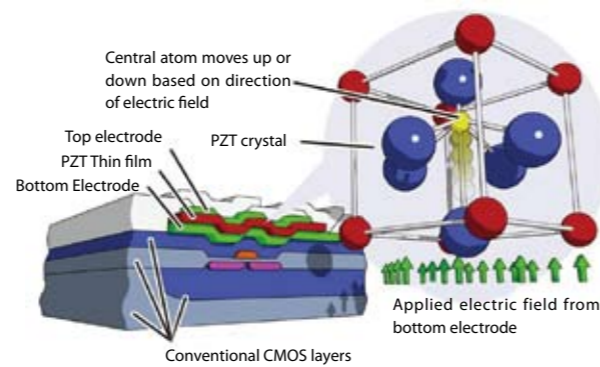
圖三 2T2C與1T1C儲存元件比較示意  
註:資料來源: Ramtron

### FRAM的發展前景

從應用面層面來看，FRAM 記憶技術的發展已經進入普及到我們的日常生活當中，從辦公室影印機、高階的伺服器設備到車用電子的氣囊和娛樂系統，FRAM 記憶技術正於一系列的革新產品，滿足符合人們的日常儲存記憶需求。

目前Ramtron也正在進行更微細化的技術節點遷移，以增加FRAM儲存元件的成本效益。Ramtron的FRAM 產品以0.5微米生產製程為主，現在則遷移至0.35微米的生產過程。與早期的0.5微米生產比較，新進的製程能降低操作的功耗，並且增加晶圓的產能。

FRAM 記憶技術與工業標準CMOS生產過程相容，ferroelectric薄膜被放在CMOS 基礎層上，並且在兩個電極之間夾在中間，以進行金屬相互連接和鈍化完成過程。



圖四 FRAM CMOS製程示意圖  
註:資料來源: Ramtron

### FRAM和ROM產品技術比較優勢

FRAM記憶體類產品的特徵與ROM比較概括如下：

- 讀取和寫入周期需要相同的時間；
- 執行大量的寫入操作；
- 讀取和寫入具有相同的功率；
- 系統設計簡單化。

除了揮發性質不同之外，RAM和ROM的根本差

別是ROM不能進行寫入操作。一般的非揮發性記憶體具備難於寫入的浮動邏輯門設計，例如，若要對EEPROM進行寫入，在設計上必須將電子穿過晶體閘極，這需要使用大功率高電壓。並且EEPROM需要較長毫秒級的寫入時間，而目前FRAM寫入時間均少於70ns。

再者，ROM類型的晶片限制少量有限的寫入操作次數，這是因為寫入操作的高應力狀態，浮動邏輯門晶片在100000或1000000次寫入操作之後就會破損，無法滿足大量多媒體資料擷取的應用趨勢。FRAM記憶體能進行超過10000000000寫入操作，未來這個數目隨著技術革新還會大幅度地增加。

此外，浮動邏輯門架構還會引起系統故障，一旦出現晶片損壞之後，相應地會減少寫入週期次數。與浮動邏輯門記憶體不同，FRAM寫入操作不需要增壓充電幫浦，結合較長的寫入週期和高電壓，可使浮動邏輯門記憶體寫入操作無須大量能量消耗。簡言之，快速的寫入操作、次數多的寫入壽命、以及低電壓消耗，是FRAM的三大技術優勢與特徵。

### FRAM應用優勢

早期DRAM製造廠商為了提供降低DRAM成本的RAM解決方案，使用了複用定址，以節省接腳和降低封裝成本，並有意使用初期快閃記憶體產品的可編程特性，升級替代EPROM記憶體。後期快閃記憶體產品進入記憶體應用領域後，出現了新的介面，這種模式更適合於FRAM產品。為了促進業界採用FRAM產品，早期的FRAM產品設計應用於改進已有的記憶體，考慮到初期FRAM產品的容量密度有限，於是在技術上不斷革新，朝向設計替代已有的EEPROM記憶體並提升相關性能，如以16KB容量的FRAM直接替代串列EEPROM產品。第一代的元件使用EEPROM



表一 Ramtron與其合作夥伴發展FRAM進程與未來藍圖

| 年份   | 發展FRAM進程  |
|------|---|
| 1984 | Ramtron成立並開始發展FRAM 技術。  |
| 1989 | Ramtron 第一個工廠 成立。   |
| 1993 | 第一個FRAM商業產品導入4Kbit鐵電技術，並開始量產。   |
| 1996 | 16Kbit FRAM 記憶體開始量產。  |
| 1998 | 在1.0um 的製程上開始生產FRAM 第一個MCU w / 嵌入式64Kb FRAM 原型。   |
| 1999 | 在 0.5um 的製程上開始量產 64Kb 以及256Kb FRAM。   |
| 2000 | 3V操作FRAM 產品正式問市。  |
| 2001 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 256 Kb 1T 1C FRAM 開始生產。</li> <li>• 第一次使用兩層的金屬FRAM嵌入式產品開始生產。</li> <li>• 3V產品進入量產階段。</li> <li>• 以0.35um 製程的FRAM產品線開始生產。</li> </ul> |
| 2002 | 256 Kb 的1T1C FRAM w / Real 時鐘開始生產。  |
| 2005 | 0.35um 製程兩線式串列FRAM + RTC 開始生產。  |
| 2006 | 1Mb 2T2C FRAM 0.35um 製程開始運作。  |
| 2007 | TI 0.13um 製程 4Mb 2T2C 製程開始運作。   |

資料來源: Ramtron

相同的介面，便不論記憶體的工藝性質差異。總而言之不管介面如何，FRAM記憶體的內部設計及操作，在某種意義上來說更相似於DRAM，具有類似於DRAM的讀寫操作性能。

### 系統擷取應用

當前FRAM記憶體產品的應用可分為二大類型，第一是資料擷取，在這種應用中，FRAM在系統內部收集並儲存資料，最終的系統可能是一個資料擷取產品，也可能是一個基於內部資料擷取功能為核心的其他系統類型。FRAM記憶體的特點有時允許系統收集到在以前曾經丟失的資料。

### 改進性能降低成本

第二是用戶透過應用FRAM改進系統性能和降低生產成本，較短的寫入時間能讓用戶快速地在系統中或在裝配線上編程晶片。在系統中，FRAM可以簡化系統及軟體設計，使得新產品更快地進入市場；在裝配線上，由於EEPROM長的初始編程時間會增加成本，因此FRAM的優勢便更加明顯。

### FRAM在資料擷取系統應用優勢

在資料獲取系統應用中，透過FRAM快速的寫入能力，系統性能會得到提升，系統可以選擇收集更多的資料類型、或以更高頻率收集資料。此時一些記憶體的優點會轉變為直接而明顯的系統優點，例如快速的寫入週期能讓系統在更短的時間內收集到更多的資料，不過系統的一些優點也不會那麼明顯。

以下簡要說明在資料獲取應用中FRAM系統的優點：

#### 供電故障

任何非揮發性記憶體能儲存配置資料。然而，配置資料改變和供電故障同時發生是可能的，此時FRAM更高的寫入壽命，將可不受限制地記錄變化的資料，任何時候系統狀態的變化，FRAM均能寫下

系統新的狀態，這樣就可以讓系統還能於喪失電源時、在有限的短時間內將資料寫入記憶體。

#### 高雜訊環境應用

在雜訊環境中寫入EEPROM時，操作會變得很複雜。當嚴重雜訊或電源波動出現時，EEPROM較長的寫入操作時間，會在寫入過程中產生抗干擾能力低的時間間隙，導致寫入操作遭到破壞。FRAM的快速寫入操作能在100ns內完成，相對於雜訊和電源波動，這個寫入時間特別地短，因此並不會干擾到。

#### RF/ID

在非接觸式記憶體應用領域，FRAM可提供不錯的解決方案。一旦RF/ID記憶體透過射頻（RF）電場供應電源，FRAM記憶體可作為合適多功能晶片RF/ID（無線智慧卡）的搭配產品。

#### 診斷與維修

在複雜系統中，營運的歷史資料和發生故障期間的系統狀態資料，都是重要的內容。當這些資訊被記錄下來後，尋找修理故障和維護的作業流程會加速進行。由於FRAM具備次數多的寫入能力，能夠滿足繁瑣的系統記錄需求，從工作站到工業處理控制等不同的系統，都能從FRAM中獲得益處。

#### 結論

FRAM是一項能滿足下一代儲存需求的技術。在接下來幾年，幾個新的供應商將會進入市場，儲存密度也將不斷持續提升。FRAM更廣泛的應用領域正在擴展當中。越來越多的例子顯現出，FRAM將成為儲存主流之一，逐漸替換現有的記憶體，並且增加和改進資料的讀取與寫入技術。FRAM正提供了其他記憶體解決方案無法滿足的優勢。

# 微水刀雷射晶圓切割技術探微

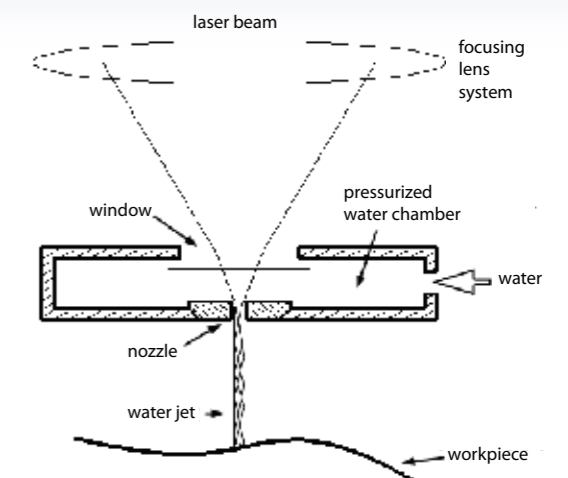
## 以不同距離、進刀速度和傾斜角度切割金屬薄板之研究

Jyria Porter、Yrjo Louhisalmi、Jussi Karjalainen

此項研究討論使用微水刀雷射、以不同距離、進刀速度和傾斜角度，切割金屬薄板。微水刀雷射制程中，雷射光束被聚焦到水射流中，藉由水流將光束能量傳遞到工件上。因此無需任何聚焦控制。然而，其大部分應用為平面切割，故此優勢並未得以體現。就討論中的雷射參數、水射流壓力及直徑而言，50毫米的數值被認為是切割普通以及傾斜表面之切割距離的相對可靠上限。除了水射流吸收部分雷射光束能量外，發現水射流易受干擾之影響。水射流引起的試樣振動也阻礙了切割的延續性。

在傳統雷射切割中，切割頭距離工件的距離必須保持正確的遠近以確保雷射光束的聚焦以及切割氣體的有效傳送。為此，需要一個聚焦控制系統和數個運動軸來跟隨工件運動。微水刀雷射以一種截然不同的方式完成切割工作。雷射光束穿過加壓水腔聚焦，並被導入水射流中，如(圖一)所示。水射流通過內部全反射將雷射光束引導至工件上，從而使切割在一定的距離之外進行，無需Z軸運動。這樣的話，沿Z軸方向較高高度的三維元件，在處理時無需使用五軸雷射光束控制頭或聚焦控制系統[1]。

髮絲粗細的水射流，與傳統切割頭不同，擁有觸及狹窄凹縫的優勢。此外，即使遇到沿Z軸方向突然的突起時，也沒有與工件相撞的危險。然而，該發明大部分應用在平面切割，水射流僅用於冷卻和廢料排除。除了切割矽晶圓以外，目前在金屬切割方面的應用為PCB板錫膏印刷鋼網，鐵氧體磁芯開氣隙，和用來擴張堵塞血管的醫療支架。製造商已在很多會議論文和出版文字中作過這些說明。此項獨立工作研究以各種不同距離、進刀速度和傾斜角度



圖一 微水刀雷射之工作原理

切割金屬薄片；為處理已成形金屬物件，如機械零件等必須知道的變數[2, 3]。

#### 原理

微水刀雷射使用脈衝性質良好的Nd:YAG雷射。製造商認為當雷射接觸工件時，雷射脈衝形成等離子，立即將高壓水射流從工件上分離開。每個脈衝過後，水射流冷卻表面，並用相對切割氣體而言更