

# Cell Characteristics and Operation Analysis of 2T RRAM

## 2T RRAM 元件特性與操作分析

專題領域：電子領域 組別：A191 指導教授：金雅琴 組員：陳志瑋

### Abstract

全球消費性電子產品的需求隨著積體電路製程的推進逐漸擴大，資料的儲存與運算在其中扮演著重要的角色。電子資料的儲存不再滿足於面積的微縮及結構密度的提升，與智能系統整合的性質與潛力更決定了前瞻晶片產品成為未來市場主流的重要原因。

2T RRAM(電阻式記憶體)元件與電路在目前 28nm 製程下已有初步的研究成果，其中 2T RRAM (電阻式記憶體)相容於邏輯製程，同時具有高密度且可低壓操作，滿足先進製程中邏輯非揮發記憶體(NVM)的需求。

近來 5G、物聯網的應用蓬勃發展，行動通訊與各種感測器都追求低功耗、高密度的方向。因此，作為相容於邏輯製程的 2T RRAM，在不需要增加光罩，並且可以在微縮 CMOS 製程下實現，擁有極大的應用潛力。

另外，在機器學習的應用中，2T RRAM 可以作為記憶體內運算(Computing in memory)的元件。若能精確的控制其元件的電阻值並實現多層單元(Multi-level cell)，就能在記憶體晶片上訓練類神經網路(On-chip training)，增加運算晶片的靈活性並能更輕易實現許多機器學習的應用。

因此本次實驗將研究元件記憶特性和不同元件間的變異性，更進一步的觀察在記憶體陣列中元件良率與可靠度、利用記憶體可重複化操作的特性以找出最適當的操作條件；並由元件與電路兩個面向討論，提出更優化的記憶體操作條件。

# 內容

## 一、元件結構介紹與操作機制說明

本次實驗應用了 28nm 邏輯製程下的雙位元 HKMG 電阻式記憶體(Twin-bit Random Access Memory , Twin-bit RRAM)。HKMG 電阻式記憶體的結構由一選擇電晶體及一做為記憶單元的電晶體組成。其阻態轉換層位於電晶體(NMOS)之金屬閘極與 N 型參雜之間。

而在量測上所使用的電路結構如圖 1，選擇電晶體的閘極(G)作為陣列操作時的選擇及限流機制，將源極端(S)低壓傳至兩儲存單元電晶體相連處(Y)，且控制設置時的電流低於選擇電晶體的飽和電流，來避免產生過度設置(Over-set)。操作時將電壓施加於儲存單元電晶體的汲極端(D1, D2)，由施加端點決定操作位元為 MR1 或 MR2。

利用電阻式記憶體具兩種互補阻態的特性，將雙位元分別操作在高阻態及低阻態，形成一個非揮發鎖存器(NVM latch)的結構。其主要流程為設置(Set)、寫入(Write)、讀取(Read)，以下會詳細介紹各流程的操作。

如同電阻式記憶體進行阻態轉換前須初始化，元件在寫入前亦先進行”設置(Set)”流程，意即將兩位元皆設置至低阻態，再透過重置其中一位元為高阻態進行”寫入(Write)”。若被重置為高阻態的位元是下方位元(MR2)，而上方位元(MR1)保持低阻態，則定義寫入 1；反之亦然。

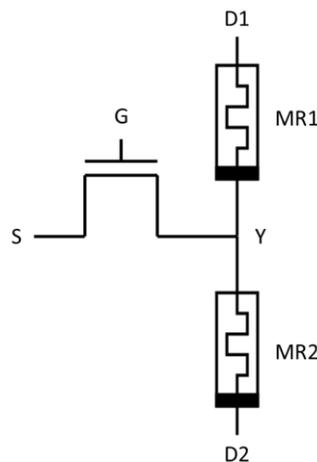


圖 1 雙位元 HKMG 電阻式記憶體電路圖

## 二、直流量測

為了更進一步的了解雙位元 HKMG 電阻式記憶體的元件特性，我們希望能藉由來回的循環操作，找到初始化、設置、重置的最佳操作條件。因此，以  $50\mu\text{A}$  和  $100\mu\text{A}$  的限制電流作為操作變因，分析多次循環後，阻態視窗(Memristance Window)和操作電壓的差異。

我們發現最佳操作，在限制電流為  $50\mu\text{A}$  的狀況下，設置電壓為  $3.18\text{V}$ 、重置電壓為  $2.85\text{V}$ ；在  $100\mu\text{A}$  的情況下，設置電壓為  $2.45\text{V}$ 、重置電壓為  $1.97\text{V}$ 。

從圖 2 中我們可以看到低阻態的最大值和高阻態的最小值在限制電流為  $50\mu\text{A}$  和  $100\mu\text{A}$  下，各自有 1.8 倍和 2.2 倍的差距，顯示其阻態視窗各自為 1.8 和 2.2 倍。

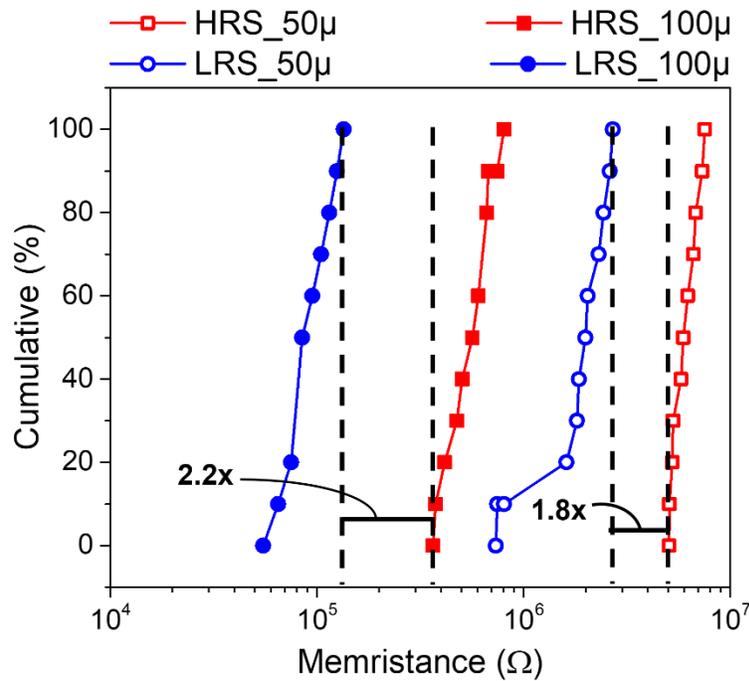


圖 2 限制電流  $50\mu\text{A}$  與  $100\mu\text{A}$  高低阻態累積分布

## 三、電路模擬分析

在電路模擬分析部分，經由 HSPICE 建構出 2T RRAM 的模型，使用兩個電阻類比為儲存單元的電晶體，將量測所得的高、低阻態進行擬合，並將擬合線的平均(mean)與標準差( $\sigma$ )輸入高斯函數作為電阻的阻值來進行蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)，得到在不同限制電流條件下儲存資料為 1 (LH)與儲存資料為 0 (HL)的操作視窗。

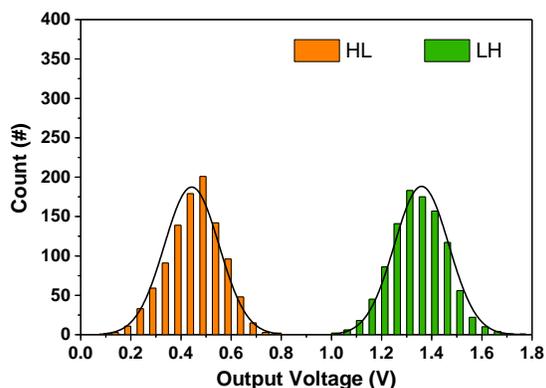


圖 3 在 50µA 下的操作視窗

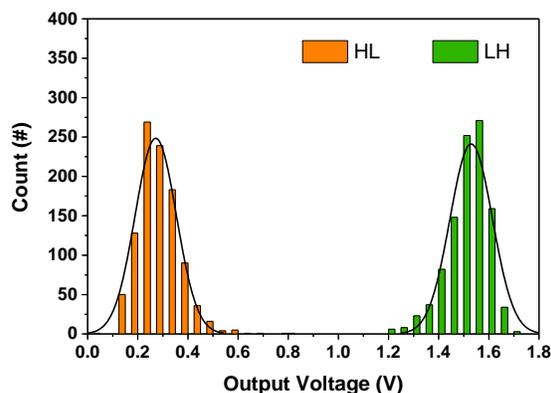


圖 4 在 100µA 下的操作視窗

比較圖 3、圖 4 可以看出 100µA 擁有較大的操作視窗，因此我們選定 100µA 進行更進一步的模擬嘗試優化操作視窗。

首先，我們嘗試改變選擇電晶體的閘極電壓(WL Voltage)觀察操作視窗大小變化，由圖 5 可以看出 WL 電壓小於 0.3V 時視窗大小幾乎相同，在 0.4V 時稍微縮減，而到 0.5V 時已經出現重疊(無法分辨 0 跟 1)。因此我們最終選擇 WL 電壓為 0.34V 為最佳解，以 5% 的操作視窗縮減幅度為代價，確保選擇電晶體保持開啟。

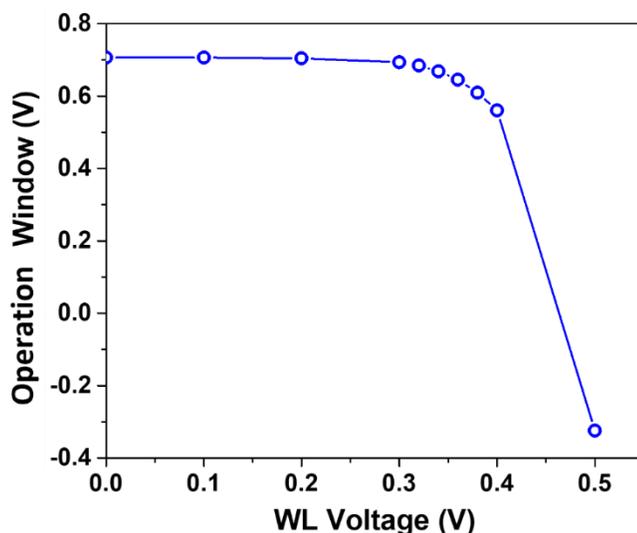


圖 5 不同 WL Voltage 下的視窗變化

接著我們測試了不同 Corner 與溫度下的視窗大小變化並記錄於表 1。由表中可以看出即使在極端條件 (SS 125°C 與 FF -40°C) 下，操作視窗的變化也都低於 1mV，證實此元件在不同 corner 與溫度下裕度十分充足。

| Corner | Temperature (°C) | Voltage Window (mV) |
|--------|------------------|---------------------|
| SS     | 125              | 706.18              |
|        | 25               | 706.28              |
|        | -40              | 706.35              |
| TT     | 125              | 706.25              |
|        | 25               | 706.31              |
|        | -40              | 706.35              |
| FF     | 125              | 706.30              |
|        | 25               | 706.29              |
|        | -40              | 706.33              |

表 1

## 四、結論

本次實驗再現了 RRAM 獨有之高低阻態的特性，同時透過循環的操作找到了最合適的重置與設置電壓。採用不同的限制電流進行操作則能得到不同的高低阻態分布，這將使 RRAM 在實際應用上更有彈性；此外，在兩種不同的限制電流下，針對 MR1 與 MR2 的接點進行蒙地卡羅的結果，從圖形上可得知，在 100 $\mu$ A 的限制電流下，邏輯 0 與邏輯 1 之間的視窗(window)相離越遠，這說明在該條件下，對於邏輯 0 與 1 的判斷將會更加精準。為了更進一步探討變因對辨認邏輯 0、1 的影響，在設定了不同的 WL 電壓與製程角落(SS/FF corner)下，前者指出了在 WL 電壓 0.3~0.4 之間存在一最適操作點；而後者則表明不同的製程角落並不影響辨認邏輯 0、1 之穩定性。

## 心得感想

陳志瑋：

透過這次的專題實作，我高興能藉此認識 RRAM 這個新型態的記憶體和許多記憶體相關知識。還記得在學期初，與老師 Meeting 時，老師時常會針對報告提出額外問題，來點出文章裡沒寫或是關鍵的部分，雖然時常無法給老師滿意的回答，不過在找尋答案的過程，我也常常藉此把很多的細節再認識的更透徹，因此我很喜歡這種引導式的學習。而在進行量測的過程中，雖然常常遇到許多無法解開的困境，不過在和組員和學長討論後，我們也總是能突破難關，所以在這邊也要特別謝謝他們，才能讓這次的專題有這樣的成果。最後，我想特別感謝金雅琴老師，在這將近 10 個月一次次的 Meeting 中，我從老師身上看到了做為師長的期待，如上述，老師是真的希望我們能學到東西，而要專題收尾時，也感受到老師設身處地的為我們著想，一次次的協助我們把報告和海報修訂最好的樣子。因為

有老師耐心的指導，才讓我們從這次專題學到這麼多，所以我想特別說聲：「謝謝老師。」

胡育嘉：

在一個半學期的專題實作裡，每個階段都令我收穫良多。一開始閱讀論文並向教授報告讓我補足背景知識的缺陷、精進口頭報告能力、習慣英文論文的架構也對最後製作專題報告非常有幫助。在量測階段時常會遇到各種意想不到的問題，而且由於是實驗室學長做的元件，所以也無法在網路上查到資料，必須用自己學過的原理加上經驗法則去改變實驗方法與參數才能成功量出理想的成果，也只有在那樣的狀況下才會快速了解課堂上所學的原理在實際上的應用。而電路分析的階段則讓我在處理數據與繪製圖表的能力上都有很大程度的提升，每當畫很久的圖表受到肯定時總是會讓我很有成就感。最後當然要感謝指導教授每一次開會都非常認真地給予我們最專業的建議，讓我們能夠持續進步最終完成專題實作。

蘇育頃：

在這一整年的過程中，從連讀原文論文都很有障礙的最一開始，一直到能熟悉整篇論文的內容，過程中很真切的感受到了自己有所成長，我認為專題目的不一定是真的要有什麼驚人的大發現，而是在過程中一步一腳印的提升自己以往不曾擁有過的能力；而在本學期實驗的環節，很感謝動輒在實驗室陪我們三五小時的學長，不厭其煩的替我們解決在量測過程中遭遇的問題，同時也很感謝我的組員，不管是在報告上還是資料的統整分析上，每一個人都在自己應該負責的部分全力以赴，才有這今天最後的成果展現。