

高密度相變化記憶體的多階操作之探究

林秉謙¹、江孟學^{2*}

1. 國立宜蘭大學電子工程學系學生
2. 國立宜蘭大學電子工程學系教授

摘要

揮發性記憶體是現今記憶體市場上的一個重要指標，在過去的幾十年，行動產品愈是輕薄，並增加許多功能且具有更大存取空間，隨著記憶體的蓬勃發展及市場需求，人們成功研發出了非揮發記憶體技術，其代表元件是快閃記憶體，因元件快速微縮，積體電路中密度增加，記憶容量加大。新式記憶體元件在近幾年來因為迫切需要，配合半導體製程技術的進步，進而不斷持續研究開發，以挑戰電晶體尺寸上的微縮限制，並促使記憶體擁有更高密度及容量。在此論文中，我們利用控制脈波寬度及電流大小以實現高密度多階(Multi-level)的設計概念，並且藉由操作脈波的遞增、遞減，以及相關參數的設定，從中改善元件上的限制，在更多階位元之使用做探討，而我們也預期我們所提出的多階記憶胞(multi-level cell: MLC)的操作方法能有效的節省功率，並達到真正的低功率消耗。

關鍵字：非揮發性記憶體、相變化記憶體、多階記憶胞、操作脈波、高密度記憶體

★. 通訊作者

E-Mail: ctwang@niu.edu.tw

Design insights of high-density multi-level phase-change memory cell

Bing-Cian Lin¹ and Meng-Hsueh Chiang^{2*}

1. Student, Department of Electronic Engineering, National Ilan University
2. Professor, Department of Electronic Engineering, National Ilan University

Abstract

Volatile memory has been a major market in semiconductor industry. In the past few decades, more mobile products with increased functions and larger storage were released. Following the technology progress and market's demand, non-volatile memory technology has been developed successfully, especially in recent years. Among the nonvolatile memory products, flash memory has been the main stream. Due to fast increase in memory density and demand in data storage, several novel memory structures are emerging, which can potentially overcome the scaling obstacle in conventional flash memory. In this work, we propose novel programming pulses for phase change memory in order to achieve multi-level design. By properly setting the the operation pulses and the relevant parameters, we are able to explore more bits per cell and hence higher density. We also evaluate and try to reduce the operation power using the proposed scheme for low-power application.

Keywords: non-volatile memory, phase change memory, multi-level cell, programming pulse
high-density memory

★. 通訊作者

E-Mail: ctwang@niu.edu.tw

一、簡介

在現今的市場上，電子產品以簡單輕便、功能齊全為主要方向，對於記憶體容量的需求也越來越大，記憶體的種類很多，根據儲存能力與電源的關係可以分為兩類，分別是揮發性記憶體(Volatile memory)與非揮發性記憶體(Non-volatile memory)，目前又以非揮發性記憶體為主流。可能有些人不瞭解何謂『揮發性』，所以我再針對這個名詞作一個說明。

揮發性與非揮發性的差別在於，當電源供應中斷後，資料是否能繼續存取。揮發性記憶是在電源供應中斷後，記憶體所儲存的資料便會消失的記憶體，有以下類型：RAM (Random access memory, 隨機存取記憶體)、DRAM (Dynamic random access memory, 動態隨機存取記憶體)、SRAM (Static random access memory, 靜態隨機存取記憶體)；非揮發性記憶體是指即使電源供應中斷，記憶體所儲存的資料並不會消失，重新供應電源後，就能夠讀取內存資料的記憶體，有以下類型：ROM (Read-only memory, 唯讀記憶體)、PROM (Programmable read-only memory, 可規化式唯讀記憶體)、EPROM (Erasable programmable read only memory, 可擦可規化式唯讀記憶體)、Flash memory (快閃記憶體)。

非揮發性記憶體在市場上的需求日益增加，隨著電晶體尺寸微縮技術遇到了瓶頸，開發新穎的非揮發性記憶體技術是必須的，其中又以相變化記憶體(phase change memory, PCM)具有高潛力，因為它的低功率消耗、記憶高容量、相容性佳以及快速讀取等優點，將有機會成為下一代非揮發性記憶體的主流。

在探討多階操作(Multi-Level Cell: MLC)的操作之前，我們來回顧多階操作的前身---傳統操作模式，利用三個 PCM 元件達到四階二位元儲存的狀態，為什麼會造成四階的儲存狀態呢？因為當階梯式電流由低到高輸入三個 PCM 串聯元件之後，當電流到達 I_{set} 的瞬間，三個 PCM 元件都會由高阻態轉成低阻態，在數位邏輯來看是“00”。此時繼續將電流不停的往上增加，根據不同的電阻值，設定不同的數位邏輯“01”和“10”，當第三個 PCM 元件達到 I_{reset} 臨界電流時會轉換成高阻抗，符合轉態條件後，此時三個 PCM 元件串聯的總歐姆會達到最高阻抗，以數位邏輯來看是“11”，如圖 1 所表現在 Multilevel 的特性**錯誤！找不到參照來源。**]

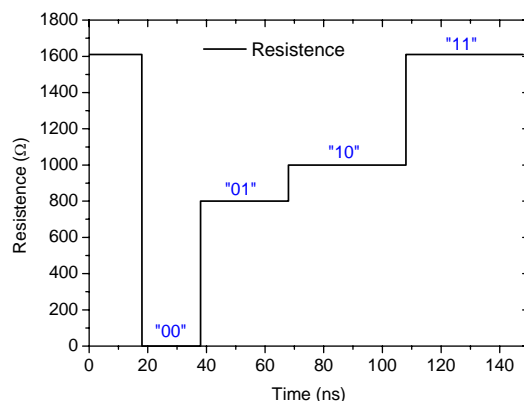


圖 1 PCM 元件串聯轉換圖

雖然可以完成 Multi-level 的模型，但是在實際操作上，需要繁雜的手續來設定這三種元件模型的參數，再使用三個模型來完成一個實際元件，這會造成電路模擬時間複雜度的增加，電路面積和成本提高，也大大的增加模擬不收斂的機率，另外在理想模型在 R-I 特性曲線前半部部分的結晶狀況，與實際 PCM 模型擬合上也有明顯的不合。在傳統的 PCM 元件操作上，

因為只有兩種相變化狀態(0 or 1)，所以需要用到兩個或兩個以上的元件串聯，或是用其他的方式達到多階操作的效果，在功率的消耗上，遠比單顆具有結晶變化的元件功率消耗來得大，以上這些是傳統操作方式的缺點。

隨著模型的進步，多階操作屬於較新穎的操作方式，針對 PCM 元件模型的多階操作模擬，單顆 PCM 元件模型即可達到 2bits 的操作容量，僅使用一個 PCM 元件來完成讀寫方式，相較與以前的三個 PCM，可以更精確的計算出某個時刻所需的電阻值，也不會發生轉化過程中電阻值浮動的現象。在本期刊論文中，主要是以物理理論為依據，以溫度及結晶率的計算為基礎，利用精簡的元件模型應用在多階層面，透過不同的電流操作模式，來達成高存取容量且兼顧低功率消耗和省時的效果。

二、Multi-level 操作模式

圖 2 為我們 PCM 元件模型擬合工業技術研究院實際量測元件 40nm T-shape cell 的 R-I 特性曲線圖[錯誤! 找不到參照來源。]，由圖我們可以發現，在後半段結晶率的變化上，最高電阻和最低電阻的電阻變化範圍夠大，所以我們可以定出四種不同的電阻準位分別為「00」、「01」、「10」、「11」來達到多階操作[錯誤! 找不到參照來源。]。在本章節我們會介紹不同的電流操作方式達到 MLC 操作，更進一步的將原本的 2bits 提升到 3bits，增加了兩倍的儲存容量，有效的節省空間，達到真正的低功率消耗。

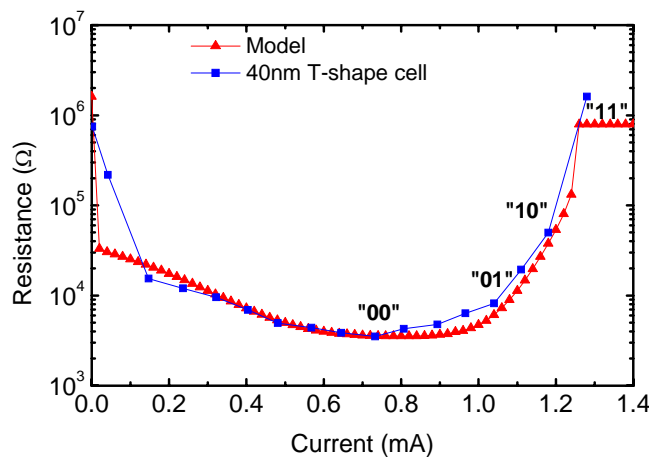


圖 2 40nm T-shape cell 的 R-I 特性曲線圖

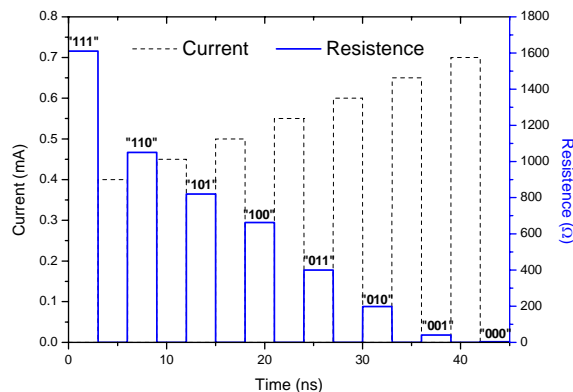


圖 3 方波電流遞增脈波模擬 MLC 操作結果

2-1 方波

2-1-1 電流遞增脈波

首先我們利用方波，用遞增的方式寫入電流脈波達到 MLC 操作的結果，結果如圖 3 所示，我們輸入一連續電流脈波，脈波寬度為 3ns，電流大小由 0.4mA 遞增到 0.8mA，每一階遞增 0.05 mA，初始狀態我們設為 Reset 的電流脈波，由圖我們可以擷取出 8 種不同的電阻準位，我們將這八種電阻準位設為邏輯準位的「000」、「001」、「010」、「011」、「100」、「101」、「110」、「111」。而圖 4 為電流遞增溫度變化關係圖，由圖可以看出，PCM 元件模型內部的溫度隨著電流改變慢慢增加，電阻也會跟著溫度增加而降低。

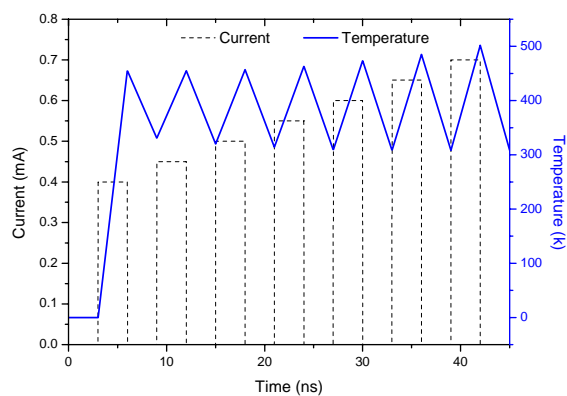


圖 4 方波電流遞增脈波溫度變化關係圖

2-1-2 電流遞減脈波

第二種方法我們利用電流脈波遞減寫入達到 MLC 操作，結果如圖 5 所示，我們輸入一連續脈波寬度為 3ns，電流大小由 0.91mA，每一階遞減 0.03mA 的電流寫入方式來達到 MLC 操作，由模擬結果我們一樣可以訂出八種不同的電阻準位，藉由不同的電流輸入及寬度長度的調整來達到我們所要的結果。圖 6 為電流遞減溫度變化關係圖，由圖我們可以觀察到，在第一個電流脈波輸入後，此時的溫度達到最高，隨著電流慢慢的下降，溫度下降影響結晶率的上升，電阻也隨著結晶率增加而降低。

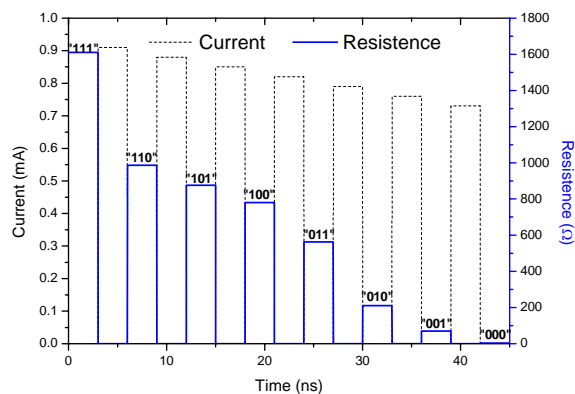


圖 5 方波電流遞減脈波模擬 MLC 操作結果

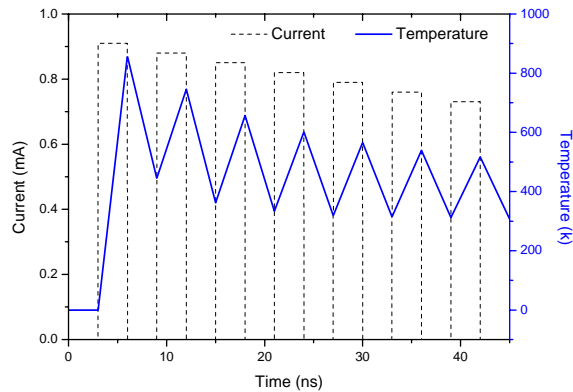


圖 6 方波電流遞減脈波溫度變化關係圖

2-1-3 電流固定脈波

最後的方法我們輸入相同電流大小的連續電流脈波來達到 MLC 操作，其模擬結果如

圖 7 所示，我們輸入一電流大小為 0.6mA，脈波寬度為 3ns 的連續電流脈波來達到 MLC 操作，圖 8 為相同電流與溫度變化關係圖，由圖我們可以清楚的觀察到，在第一個電流脈波輸入時，此時的溫度達到最高，而後來溫度則慢慢的降低，具有保溫的效果。關於 PCM 元件的溫度特性還有一些補充，當結晶率越大的時候，此時 PCM 元件的溫度在散逸掉的溫度也會越多，因此嚴格的控制電流大小，才能讓溫度正常的運作，結晶率快速的結晶，使電阻到達我們理想的數值。

以上介紹的三種方法，我們藉由調整脈波寬度大小和電流大小的不同，可以使 PCM 元件模型寫入到不同的電阻值，再加上利用電流脈波遞增、電流脈波遞減、相同電流大小等寫入方式達到 MLC 操作。利用這些我們所提供的寫入方式，預期可以使電路設計者在設計電路上有更多的選擇，以及更大的設計空間。在之後的章節，我們將提出一種新穎的脈波波形---三角波，可以作為我們之後研究延伸的一個方向。

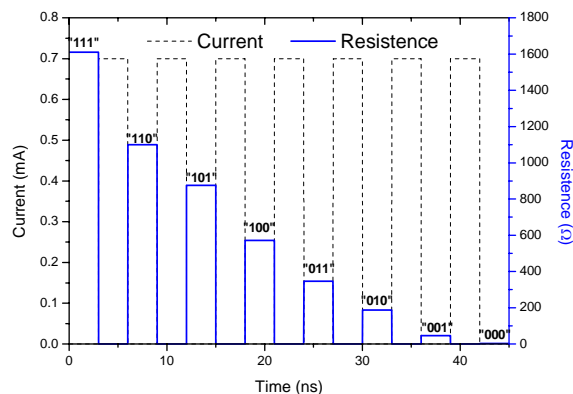


圖 7 方波使用相同電流大小脈波模擬 MLC 操作結果

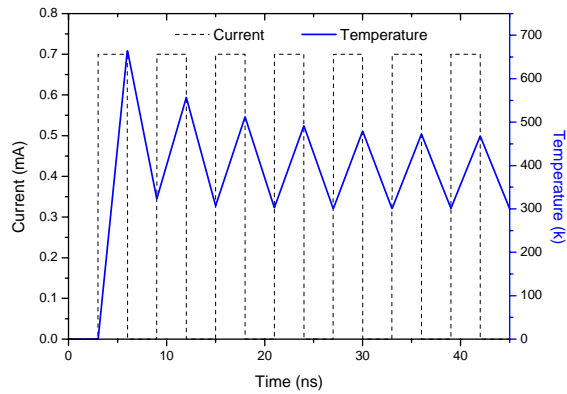
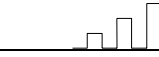




圖 8 方波相同電流大小脈波溫度變化關係圖

2-1-4 功率消耗評估

如表格 1 所示，這是用不同操作方式所需要的功率之比較，我們可以從功率的計算清楚的發現到，電流遞增、遞減和固定以上三個脈波中，使用電流遞增寫入脈波達到 MLC 操作的結果，在低功率的消耗上，和其他脈波的比較起來，有較好的節省功率效果。

Programming techniques Power consumption (pJ)	Increasing pulse 	Decreasing pulse 	Same pulse 
000	18.8	24.5	21.8
001	17.4	23	20.3
010	16.2	21.4	18.9
011	15	19.7	17.5
100	14	17.8	16
101	13.1	15.9	14.6
110	12.1	13.9	13.2
111	11.7	11.7	11.7

表格 1 方波功率消耗比較圖

2-1-5 寫入時間比較

接下來我們繼續的將這三個脈波作另一種比較，如表格 2 所示，我們紀錄了非結晶率與時間的關係，由此可以知道固定脈波可以在較短的時間達到完全非結晶狀態，較其他的兩個脈波節省時間，遞增的脈波雖然可以節省功率，但是需要花較多的時間，來達到完全非結晶狀態。

Programming Techniques 達成時間 (ns)	Increasing pulse	Decreasing pulse	Same pulse
完全非晶態	41	40	36

表格 2 方波寫入時間比較圖

2-2 三角波

在前一個章節我們所使用的脈波波形是以方波為主，方波的優點是速度快，能很快的到達非結晶狀態，但缺點是消耗功率大，在現今節能減碳的觀念下，這是必須改進的部份。於是我們提出了三角波的波形，使之功率降低的同時，也能滿足到達非結晶態的條件。

2-2-1 電流遞增脈波

我們利用三角波用遞增的方式，寫入電流脈波達到 MLC 操作的結果，結果如圖 9 所示，我們輸入一連續電流脈波，脈波寬度為 3ns，電流大小由 0.7mA 遞增到 1mA，每一階遞增 0.5 mA，可以擷取出 8 種不同的電阻準位，將八種電阻準位設為邏輯準位的「000」、「001」、「010」、「011」、「100」、「101」、「110」、「111」。

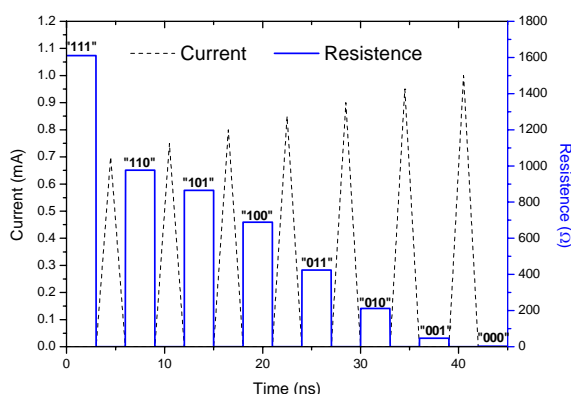


圖 9 三角波電流遞增脈波模擬 MLC 操作結果

2-2-2 電流遞減脈波

這次我們利用遞減來寫入，結果如圖 10 所示，我們輸入一連續脈波寬度為 3ns，電流大小由 0.91mA，每一階遞減 0.01mA 的電流寫入方式來達到 MLC 操作，由模擬結果我們一樣可以訂出八種不同的電阻準位，藉由不同的電流輸入及寬度長度的調整來達到我們所要的結果。

2-2-3 電流固定脈波

最後我們利用相同電流寫入，其模擬結果如圖 11 所示，輸入一電流大小為 0.9mA，脈波寬度為 3ns 的連續電流脈波來達到 MLC 操作。我們發現三角波與方波的不同，如圖 12 所示，差異在於三角波的上升脈波與下降脈波的時間較方波的長，所以溫度上升下降的斜率也就比較低，坡度緩有利於控制溫度是其優點。

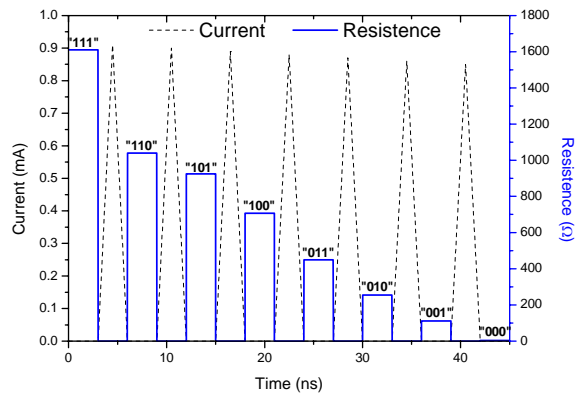


圖 10 三角波電流遞減脈波模擬 MLC 操作結果

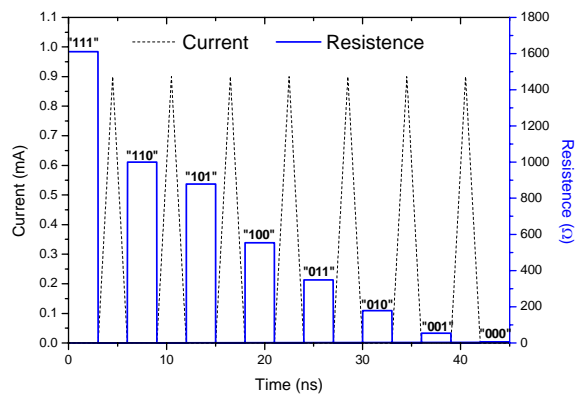


圖 11 三角波使用相同電流大小脈波模擬 MLC 操作結果

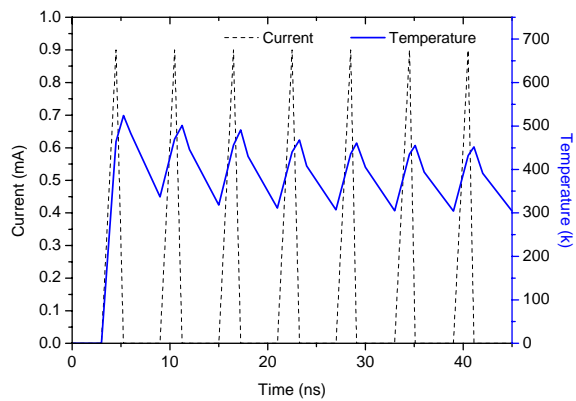


圖 12 三角波相同電流脈波溫度關係圖

2-2-4 功率消耗評估

如表格 3 所示，這是用不同操作方式所需要的功率之比較，我們可以從功率的計算清楚的發現到，三角波的结果與方波類似，在低功率的消耗上，和其他脈波的比較起來，節省功率的效果更好。

Programming techniques Power consumption (pJ)	Increasing pulse	Decreasing pulse	Same pulse
000	15.4	15.7	21.8
001	14.8	15.2	20.3
010	14.2	14.6	18.9
011	13.6	14	17.5
100	13.1	13.5	16
101	12.6	12.9	14.6
110	12.1	12.3	13.2
111	11.7	11.7	11.7

表格 3 三角波功率消耗比較圖

2-2-5 寫入時間比較

接下來我們繼續比較這三個脈波的寫入時間，如表格 4 所示，我們紀錄了非結晶率與時間的關係，可以發現三個脈波到達完全非結晶態的時間相當的接近，但還是可以發現遞增脈波寫入時間是最快的。

Programming Techniques 達成時間 (ns)	Increasing pulse	Decreasing pulse	Same pulse
完全非晶態	34.5	34.7	34.7

表格 4 三角波寫入時間比較圖

三、結論

經過這兩種脈波的比較，我們得到一個結論，並且用表格 5 來呈現：

	方波	三角波
消耗功率	多	少
寫入速度	慢	快
電阻辨認度	中	高

表格 5 波形優缺點比較表

本篇論文著重在於利用我們的 PCM 元件模型達到多階操作的應用，並可以提供不同的操

作模式，以及不同的脈波波形設計，來達到低功率消耗，經以上實驗證實，利用三角波可以有效的降低功率的消耗，縮短寫入到達完全非晶態的時間，因此有更大的設計空間，來設計更低功率損耗的電路，達到電路功能齊全，但一樣節省製作成本的目標，也希望本篇論文的實驗結果，可以在未來相變化記憶體的研究上，有一定程度上的幫助，這是我們所希望的，也是我們最初的目標。

誌謝

此論文是由國科會部份補助及工研院電光所技術支援與贊助。

四、參考文獻

1. 林佳龍，吳少暉，江孟學，2008，非揮發性記憶體的元件 Spice 模擬與測試，專題研究報告，國立宜蘭大學，宜蘭，台灣。
2. 林俊廷，2009，以模型實現相變化記憶體多階操作應用，碩士論文，電子工程研究所，國立宜蘭大學，宜蘭，台灣。
3. Jun-Tin Lin, Yi-Bo Liao, Meng-Hsueh Chiang, and Wei-Chou Hsu, 2009, "Operation of Multi-Level Phase Change Memory Using Various Programming Techniques", Proc. 2009 IEEE International Conference on IC Design and Technology, Page(s):199 – 202.