國立中山大學物理學系 博士論文 次世代電阻式記憶體與氮化鎵高電子遷移率電晶體物理機制研究 研究生：鄭皓軒 110 學年度

國立中山大學物理學系

博士論文

Department of Physics

National Sun Yat-sen University

Doctorate Dissertation

次世代電阻式記憶體與

氮化鎵高電子遷移率電晶體物理機制研究

Research on Physical Mechanism of

Next Generation Resistive Random Access Memory and GaN High

Electron Mobility Transistor

研究生：鄭皓軒

Hao-Xuan Zheng

指導教授：張鼎張 博士

Dr. Ting-Chang Chang

中華民國 111 年 01 月

January 2022

國立中山大學物理學系

博士論文

Department of Physics

National Sun Yat-sen University

Doctorate Dissertation

次世代電阻式記憶體與
氮化鎵高電子遷移率電晶體物理機制研究

Research on Physical Mechanism of
Next Generation Resistive Random Access Memory and GaN High Electron Mobility Transistor

研究生：鄭皓軒

Hao-Xuan Zheng

指導教授：張鼎張 博士

Dr. Ting-Chang Chang

中華民國 111 年 01 月

January 2022

論文審定書

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校物理學系博士班

研究生鄭皓軒（學號：D052030007）所提論文

次世代電阻式記憶體與氮化鎵高電子遷移率電晶體物理機制研究
Research on Physical Mechanism of Next Generation Resistive Random Access Memory and GaN High Electron Mobility Transistor

於中華民國 111 年 1 月 9 日經本委員會審查並舉行口試，符合博士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

召集人 莫亦先 莫亦先　　委　員 張鼎張 張鼎張

委　員 蔡宗鳴 蔡宗鳴　　委　員 陳柏勳 陳柏勳

委　員 王喻生 王喻生　　委　員 _____

委　員 _____　　委　員 _____

委　員 _____　　委　員 _____

指導教授(張鼎張) 張鼎張 ✓(簽名)

論文公開授權書

國立中山大學博碩士論文公開授權書

etd-0010122-141120 2022-01-10 17:14:00

本授權書所授權之論文為授權人 鄭皓軒 在 國立中山大學物理學系 110 學年度 第 1 學期 取得 博士 學位之論文。

論文題目： 次世代電阻式記憶體與氮化鎵高電子遷移率電晶體物理機制研究

指導教授： 張鼎張

注意事項：

1. 依本校109年4月29日108學年度第2學期第6次行政會議修正通過，研究所畢業生可於上傳電子論文時，與指導教授討論後選擇學位論文紙本及電子檔之開放年限，紙本論文若選擇「四至五年後公開」者，電子論文若選擇「四至五年後公開」或「其他」者，應提供涉及機密、專利事項或依法令規定限制公開之證明資料，經指導教授及系所(學程)主管認定始能作上述選擇。
2. 因專利申請涉及論文公開時間，為避免因喪失新穎性而無法申請專利，請各位老師及同學至經濟部智慧財產局網站參考「專利各項申請案件處理時限表」後再選定論文公開時間。
   另有關著作權相關資訊，請參考「經濟部智慧財產局著作權專區」。
   若尚有任何專利申請與著作權等相關問題，歡迎洽詢本校全球產學營運及推廣處技術移轉中心，分機2651。
3. 授權書一式兩份，將簽署後論文公開授權書正本裝訂於審定書之後，辦理畢業離校時，除繳交一本論 文至圖書與資訊處外，另一本繳交至教務處註冊課務組。

·電子論文 此項授權同意以非專屬、無償方式授權予本校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化方式將論文全文(含摘要)進行重製，及公開傳輸，亦提供讀者非營利使用線上檢索、閱覽、下載或列印。

☐ 立即公開 傳輸數位檔案

☑ 因特殊原因，校內 請於3年後 公開、校外 (含國家圖書館) 請於3年後 公開或上載網路公開閱覽。

※ 電子論文延後公開原因：涉及機密。

延後公開理由：學術著作權年限。

※ 電子論文公開日期：校內 民國114年01月10日，校外 (含國家圖書館) 民國114年01月10日

·紙本論文 此項授權同意以非專屬、無償方式授權予本校圖書館，不限地域、時間與次數，以紙本方式將 論文全文(含摘要)進行收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

☐ 同意 立即公開

☑ 因特殊原因，請於3年後 公開陳覽

※ 紙本論文延後公開原因：涉及機密。

延後公開理由：學術著作權年限。

※ 紙本論文公開日期：民國114年01月10日

學　　號：D052030007

授　權　人：鄭皓軒 (簽章)　　指導教授：張鼎張 (簽章)

中華民國 111 年 1 月 12 日

※ 此授權書嚴禁塗改

- 若欲修改權限，請登入系統修改後重新列印此授權書。
- 若論文定稿核准後欲異動授權書，請洽詢etd@mail.nsysu.edu.tw或校內分機2452。
- 授權書需自行列印兩份，請於圖資處和教務處辦理離校手續時，裝訂於繳交的紙本論文內。

致謝

漫長的博士班生涯即將要結束了，從大三進入實驗室到現在博士班要畢業了，經歷許多不同的事物與接觸不一樣的人，在這過程中，不只是研究以及學識上的提升，更重要的是學習到許多待人處事的方式，相信這段時間的經歷與成長，能成為我未來的一個重要資產。首先我要特別感謝指導老師 張鼎張老師，老師不只提供完善的實驗室設備以及豐富的研究資源，使我們能順利完成實驗，最主要是老師平時的教學方式，由淺入深，使我能完全了解艱深的知識，同時也學習到老師思考邏輯，使我獲益匪淺，收穫良多，在此至上最誠摯的感謝。此外感謝口試委員台積電王喻生部經理、台積電莫亦先經理、中山大學蔡宗鳴教授以及海軍官校陳柏勳教授撥冗審查，並在口試時給予指正與教導，特此感謝。

在博士班期間，很感謝實驗室每個成員的陪伴，豐富我的博士生涯。其中特別感謝志承學長，你用心地教導我進行各式各樣的實驗。感謝伯勳學長，在博士班期前，遇到了許多困難以及挑戰，感謝學長協助我解決許多問題。感謝 RRAM 組的學長們郁庭、懿霆、志陽、政憲，感謝你們在我研究的路上不斷地幫助我，精進我的研究。感謝實驗室的學長姊敏甄、建佑、宏誌、馨平、俞慶，無論在實驗上還是生活上，各位都幫助我許多，感謝你們的幫忙。感謝實驗室的同學們智程、福源、穩仲、俊曲、宇哲、妤姍、豐閔，在研究的路上，有你們的陪伴，互相討論提升我們的能力，一起度過許多難關，感謝各位。感謝學弟妹們仕凱、煒宸、珮瑜、茂洲、建傑、凱鈞、詠方、重緯、又瑄、詠慈、庭慈、慈筠、耀凱、育霖、宇瑄、冠儒、

冠旭、笠荃、偉傑、聖堯，感謝各位的幫忙與陪伴，使我的博士班生涯更精彩。另外也要感謝物理系辦玉晶、子芸，TEM 負責人慧君學姐，奈米核心書香姐，感謝各位的幫忙。

最後要感謝我的家人，父親鄭其昌、母親鄭良枝以及哥哥鄭智益。感謝你們的付出與支持，使我可以順利完成博士學位。也要感謝國防工業發展基金會，讓我在求學過程上沒有經濟壓力，無後顧之憂地完成學業。在這幾年間，我學習到許多東西，接下來我將進入人生的下一個階段去努力，感謝各位的陪伴與協助。

鄭皓軒 謹識

摘要

近年來 5G 通訊、人工智慧物聯網(AIoT)以及車用電子各項技術蓬勃發展，在高速運算、儲存容量與大功率操作的需求下，記憶體元件與功率電晶體的發展相當重要。在記憶體方面，隨著人工智慧物聯網時代的來臨，微控制器(MCU)將扮演相當重要的角色，而微控制器需使用大量的嵌入式記憶體(Embedded Memory)，嵌入式記憶體需要低操作功耗、高操作速度，並且能與半導體製程整合，在次世代記憶體中，電阻式記憶體最具有潛力。而在功率電晶體方面，過去以矽基元件的設計和技術開發經過了多次結構和製程優化更新，已逐漸接近矽材料的極限。而氮化鎵(GaN)為寬能隙(Wide Band-gap)半導體材料的代表之一，相較於矽材料，具有寬能隙(bandgap)、高臨界電場(critical electric field)、高電子飽和速度(electron saturation velocity)等特性，在電動車與 5G 通訊方面為極具優勢的材料，以氮化鎵(GaN)為基底的高電子遷移率電晶體(High Electron Mobility Transistor, HEMT)日漸受到重視，顯現出氮化鎵在商業市場上的重要性以及未來的發展性。本論文針對電阻式記憶體以及氮化鎵高電子遷移率電晶體之性能進行相關研究。

RRAM 的元件目前以電晶體控制其開關(1T1R)作為嵌入式記憶體的主要結構。隨著莫爾定律的發展，電晶體的通道不斷的微縮，電晶體可承受的電壓會越來越小，可能會逼近 RRAM 最大的操作電壓 – 形成電壓(Forming Voltage)，因此，如何降低形成電壓就會是一個重要的問題。本論文提出利用交流訊號進行 Forming 的步驟，使 RRAM 的 Forming 電壓下降，並且更進一步的設計出理想的操作波形，應

用於嵌入式電阻式記憶體中。另一方面，由於嵌入式電阻式記憶體是 RRAM 串聯一電晶體，在 Reset 過程中，RRAM 所獲得的電壓增加，造成電晶體的 VGS 減少，電晶體進入飽和區，使 RRAM 無法有效地增加操作窗口。因此，RRAM 的操作窗口會受到電晶體的限制。除此之外，電晶體不只影響 RRAM 的操作窗口，也會影響 RRAM 的阻態分部，因此，了解嵌入式電阻式記憶體操作過程中，RRAM 與電晶體之間的關係，能夠有效降低嵌入式電阻式記憶體操作過程中電晶體的跨壓，就可以設計出低功耗/高性能嵌入式電阻式記憶體的架構。

在氮化鎵高電子遷移率電晶體方面，考量安全因素元件的起始電壓須大於 0，因此 p-GaN HEMT 因可達增強型(Enhancement-Mode, E-mode)為主要發展的元件，但是元件在關態時會產生嚴重的漏電流，故如何抑制元件漏電流是一重要議題。研究中發現 p-GaN HEMT 元件具有駝峰效應。分析其原因係在元件保護層中，因製程所產生的氫擴散至 p-GaN 層，進而產生次通道(Sub-channel)效應造成較大關態漏電。另一方面，p-GaN HEMT 閘極常見有 Ni、Au 和 TiN 等材料，不同材料間基本物理特性會影響元件的基本性能。然而，閘極金屬製程可能因為前驅物或電漿的轟擊，導致元件有前驅物殘留的污染、不平整的表面和較差的介面品質。此章節主要討論 p-GaN HEMT 漏電成因與不同閘極金屬製程對於之性能的影響。

關鍵字：電阻式記憶體、嵌入式記憶體、功率半導體元件、氮化鎵高電子遷移率電晶體、氫效應

Abstract

In recent years, 5G communications, artificial intelligence Internet of Things (AIoT) and electric vehicle technologies have flourished, and the demand for high-speed computing, storage capacity, and high-power operation has increased. The development of memory devices and power transistors is paramount. In terms of memory, with the advance of AIoT, micro control units (MCUs) will play a very important role, and MCU needs to incorporate a lot of embedded memory. Embedded memory requires low power consumption, high operating speed, and it can be integrated with semiconductor manufacturing processes. Among the next-generation memory, resistive random access memory (RRAM) has been one of the most potential candidates. In terms of power transistors, the development of silicon-based devices has undergone many structural and process optimization, and they have gradually approached the limit of silicon-based devices. Gallium nitride (GaN) is one of the representatives of wide band-gap semiconductor materials. Compared with silicon materials, it has a wide bandgap, high critical electric field, and high electron saturation velocity. It is a highly advantageous material for electric vehicles and 5G communications. High Electron Mobility Transistor (HEMT) based on GaN is gaining more and more attention, showing the importance of GaN in the commercial market and its future development. This work conducts related research on the performance of RRAM and GaN HEMT.

RRAM currently uses a transistor to control its switch (1T1R) as the main structure of the embedded memory. With the development of Moore's law, the channel length of transistors is constantly shrinking, and breakdown (operating) voltage of the transistors will become smaller. It may approach the maximum operating voltage of RRAM-forming voltage. Therefore, how to reduce the forming voltage is an important issue. This study proposes the steps of using AC signals for forming process to reduce the forming voltage. Then, I further design the ideal operating waveform and apply it to the RRAM array. On the other hand, during the reset process, the voltage obtained by the RRAM has increased, causing the V_{GS} of the transistor to decrease, and the transistor is thereby turned off, making the RRAM unable to effectively increase the operating window. Therefore, the operating window of the RRAM is limited by the transistor. In addition, the transistor not only affects the operating window of the RRAM but also affects the resistance state of the RRAM. Therefore, understanding the relationship between RRAM and transistor during the operation of 1T1R can effectively reduce the cross voltage of the transistor. It can facilitate the design of a low-power/high-performance embedded memory architecture.

In terms of GaN HEMT, considering safety factors, the threshold voltage of the power device must be greater than 0. The p-GaN HEMT has more the most investigation due to enhancement-mode (E-mode) properties. However, a serious leakage current is

generated when the device is in the off state, so how to suppress the leakage current of the device is an important issue. In this study, p-GaN HEMT devices have also presented a hump effect. The orientation of the hump is that the hydrogen diffuses into the p-GaN layer during the ILD process, which generates a sub-channel effect and causes a large off-state leakage. On the other hand, p-GaN HEMT gates metal often is selected as Ni, Au, and TiN. The physical properties of different materials will affect the performance of the device. However, the gate metal process may be bombarded by precursors or plasma, resulting in residual contamination of the precursors, uneven surfaces, and poor interface quality. This chapter mainly discusses the causes of p-GaN HEMT leakage and the impact of different gate metal processes on its performance.

Keywords: Resistive Random Access Memory (RRAM), Embedded Memory, Power device, Gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMT), Hydrogen effect

Contents

Figure Captions

Chapter 1

Chapter 2

Chapter 5

Table Captions