檔　　號：
保存年限：

核判權責
董事長
執行長
V
秘書

財團法人國防工業發展基金會　便簽

一、 國立中山大學光電工程學系林建佑博士生畢業論文公告案。

二、 中山大學光電工程學系林建佑博士原支領本會108年度國防工業獎學金，渠於今(110)年8月24日畢業離校(如附呈1)，畢業後前往「台灣積體電路製造股份有限公司(台積電)」服研發替代役。台積電市值全球十大，半導體晶圓代工全球排名第一，為國際知名晶圓代工半導體製造廠。

三、 林博士畢業論文題目「前瞻式金氧半電容器與鰭式場電晶體之電性分析與可靠度機制研究」(英文版)，按本會「國防工業獎學金發放作業規定」第五點獎學金受領人義務(三)規定，提供畢業論文2本及電子檔，並於論文致謝誌中表達對本會之感謝。另按同規定第七點成果運用，畢業論文無償提供本會或本會指定之公法人、政府機關（構）運用。(如附呈 2)

四、 林博士畢業論文主頁及中、英文摘要、目錄等擬於本會網站公告（如附件)，提供國防部研究單位（如：國防部軍備局、中科院、國防安全研究院、軍事院校等）有需求可洽本會索取。

五、 請核示。

承辦單位：

會計員葉恒菁 1100907085O

督導管理歐仲偉 1100908143O

可

秘書謝日升 1100908155

國立中山大學光電工程學系

博士論文

Department of Photonics

National Sun Yat-Sen University

Doctorate Dissertation

前瞻式金氧半電容器與鰭式場效電晶體之電性分析與可靠度機制研究

Investigation on Electrical Analysis and Reliability Mechanisms of Advanced MOSCAP and FinFETs

研究生：林建佑

Chien-Yu Lin

指導老師：張鼎張 博士

Dr. Ting-Chang Chang

中華民國 110 年 8 月

August 2021

論文審定書

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校光電工程學系博士班

研究生林建佑（學號：D043090002）所提論文

前瞻式金氧半電容器與鰭式場效電晶體之電性分析與可靠度機制研究
Investigation on Electrical Analysis and Reliability Mechanisms of Advanced MOSCAP and FinFETs

於中華民國 110 年 8 月 21 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	王英郎	委　員	張鼎張
委　員	楊育佳	委　員	李文熙
委　員	劉全璞	委　員	
委　員		委　員	
委　員		委　員	

指導教授(張鼎張) 張鼎張 (簽名)

致謝

轉眼間 6 年，碩博生涯也即將邁入尾聲，這幾年在半導體以及人生經歷也內化成現在的我，終於要以嶄新的自己邁開步伐接受社會的挑戰啦。從小時候懵懂無知念著理工科電機，只知道需要個碩士學位以符合工作需求，尋找實驗室時在張鼎張老師的介紹下，好像發現一個新世界，能支撐我所憧憬夢想的未來，有興趣且有動力能投入其中研究的產業環境，還能夠把研發的內容化做生活處處可見的 IC 晶圓各種科技產物，想起來就很有成就感，因此在大學畢業的年紀就決定未來 5 年所要投資自己的道路，有目標的訂立執行起來也不會迷惘；童年在海邊長大的我，海洋對我來說永遠都看不膩，替我充電且吸引著我，從實驗室看出的西子灣景色著實令人著迷，中山大學博士班的生涯就此展開。

感謝張鼎張老師打造的實驗室環境，完善且穩定的儀器加上多年積累與各公司良好的合作關係，取得世界頂端的元件供我們建立物理機制，讓我們能專心量測沒有後顧之憂，配合老師淺顯易懂傾囊相授於元件物理上的教導，帶領我們跨越元件物理知識的能障，累積知識更有效率，託實驗室的資源讓我有機會參加國際研討會看看世界，並獲得科技部千里馬支助圓了出國留學的心願，尤其在這年內心境上也成長了不少，或許跟老師所說的一樣，有比較後才會有感覺。

君昱可靠極具親和力，從專題手把手的帶我步入正軌，甚麼問題都難不倒你，由你帶領我與錫紋，我們從狀況外到互相照應，你永遠是我的老大 panpan；Q 哥欽佩你對研究的投入，對元件物理的追根究柢，是實驗室公認最強的男人；柏瑋學長從一開始憂鬱王子到人生勝利組，每當我遇到難題不只是實驗上或是人生方面找你準沒錯，可能你我骨子裡都有一樣的多愁善感。柏詠、俐卉，看你們幸福我也很開心，很慶幸與你們能那麼 close 一個像兄弟一個像知己；狗頓、宜諼、錫紋、素君、阿咪，你們主動的邀約，讓這個遠從宜蘭隻身到高雄的新生馬上就融入環境；冠汝謝謝你學姊，猶如團體領袖般具有號召力且非常照顧我們這些學

弟妹，實驗上教導我許多想法與細節，給予我方向，下班後凝聚我們成一群感情深厚的夥伴，既是同事也是好友，不只是上下屬關係也要經營好密切的友誼關係，這句話我也謹記在心，未來新竹的日子也請多多指教。SiGe 這段期間非常的謝謝日謙、冠甫、慈筠、宛萱你們的陪伴，提供我知識與技術上的支援還有歡笑；柏勳學長是人生上的導師，給予我們心靈雞湯和實用的建議，志陽、懿霆、政憲、宏誌與你們的合作看來能在公司繼續下一章囉!

豐閔、妤珊，65 組有你們的加入猶如清新的泉源，豐閔的邏輯及對實驗的敏銳值得我學習，搭配妤珊細心窩心觀察入微，時常跟我會有同樣的想法也讓我不用過多描述，博士班後期受你們照顧很多，真的很懷念出遊的時光加上揚豪的日本行；福源半路轉組真的很不容易，你的付出努力我都看到了請撐下去加油，辛苦你們一同扛下 MOS 組這個招牌；nini、晏誠、冠旭我的學弟妹們，雖說我平時看起來嚴肅很兇，我還是很關心你們，希望提醒你們的事情能漸漸體會能知道我的用心；凱鈞默默成長為模擬大師，你的元件物理沒問題，瑋駿的實驗想法思維及切入的角度很特別繼續保持，開創新手法靠你了，建宏、庭慈、景涵、瑞澤、偉傑以及家宏超新星以後就看你們啦。智程阿我們倆難兄難弟，聽到你 offer 到手我真的開心，未來總算定案，真的要找天一起下水；宇哲、冠儒、子恆這幾個清志郎好夥伴讓我面臨無解難題時能有個休息之處，英文也受你幫忙很多。皓軒、穩仲、仕鎧、玉發、聖堯平常的吃飯聊天，情感也越發濃厚；茂洲看你打球就讓我想到 Doncic，實驗室有你及宇瑄的帶領實驗室越來越穩定，也很有身為學長姊的風範，俊曲、育霖、煒宸、笠荃、家撰、詠慈、娟瑋、建傑、佩瑜、詠方、又瑄、宇珊、昱安、泓邑、亞寰、沛君、淳珅、紘閔、裕博大家都要加油喔~ 奕年、之稚、菁姊有你們提醒協助，口試與離校才能如此順利完成，年底一起請客吧~

中山大學的環境資源，感謝蔡鋒樺老師以及黃志豐教練，讓我能在海域有個具歸屬感的家，在我遇到低潮時期給予我鼓勵堅持下去，疫情期間也遠洋電聯給予我關心，還有阿嘉、煥宇，跟你們的搭配真的是合作無間，從風帆到潛水，體

驗了大海當了助教，也認識了不少學弟妹，婕瑜快點變明星，梓凌哪時候要組團出遊，在海邊的日子真的非常的快樂，即便曬的烏漆媽黑每次都會被說”你又變黑了”也無所謂，子庭、子修、Brain、Helen、魏儀、籃球在海裡受你們照顧了。

比利時的生活當然很謝謝政憲的陪伴，不用孤身一人而是有實驗室熟悉的戰友能一同前往異鄉，細心的你也常常提醒我該注意的地方，IMEC 夥伴們 Carol、康康、小余、城武、方禹、仁頡、逸軒、奇廷、維凡、黃平、肯尼、宏傑、秋月、家祐、芸慈、Jade、Ally、Brent、雅德，陪我工作吃飯運動瘋狂熱血填滿生活的日常。當然還有 Vamsi 我的 mentor，給予很多實質的建議，放手信任讓我發揮，離開 IMEC 前的那封信讓我很感動，除此之外還有 Sachin，應該更早認識你的，你的肯定也大大增加我信心，希望未來某天能在和你們相遇或合作。有幸變成 Guido 大神的學生哈哈哈這也得謝謝于傑的牽線，後來加入承接我房間的金毛這些也都是緣分阿~

感謝我的家人父親林燈進先生、母親鍾麗珠對我毫無保留的支持，哥哥林志韋、姊姊林依瑩、嫂嫂劉恩維還有我可愛且療育的侄子侄女們，終於完成博士學位能回家陪伴你們了，靜宜老師、安琪、彥廷、佶橙、卓凡你們也陪我聊了很多，老朋友們宜蘭見，博士學位這條路上，真的太多的點點滴滴，歷練的一切都如此不易，回想起來都是寶貴的經驗，衝動的性格也收斂許多，看事情及處理事情的角度也成長，真的很感激這幾年的訓練，及一路克服過來的自己，很感激張鼎張老師除了知識上，對於我處事態度上的提點我謹記在心，並佩服你全力以赴的精神，當離開學校後就沒了身為學生的保護傘，一切都要更沉穩更冷靜的分析思考並保持著正面的態度去面對，期許自己能保持赤子之心。最後堅持到了博士學位以及研發替代役工作，人生要彩色啦~

再次感謝春燕姊及馨文於行政上的協助和一路上陪伴我的人，再見熱辣的高雄。

另外感謝財團法人國防工業發展基金會獎學金，支持我在研究期間的經濟負擔。

林建佑 謹識

前瞻式金氧半電容器與鰭式場效電晶體之電性分析與可靠度機制研究

研究生：林建佑　　指導教授：張鼎張 博士

國立中山大學

光電工程學系

摘要

自 1960 年，世界上第一顆電晶體由 Bell 實驗室的 D. Kahng 和 Martin Atalla 首次實作成功。此時電晶體的通道長度還維持在 25 微米 (μm)，氧化層厚度為 100 奈米(nm)，五年後，Intel 創辦人之一 Gordon Moore 提出 "Moore' s Law"，其內容為: 積體電路上可容納的電晶體，約每隔兩年便會增加一倍，7 奈米的鰭式電晶體(FinFET)已經順利量產並應用至高端電子產品當中。可隨著世代演進，微縮已至物理極限也不能迎合的更高操作速度的需求，所以將從材料本質上追求載子移動率更高的材料或者進行元件結構的設計，來提升元件性能。

第三章我們研究了矽通道和矽鍺（SiGe）通道 MOSCAP 之間的電容 - 電壓（C-V）特性，顯著的平帶電壓（V_{FB}）偏移和 C-V 高台(hump)僅出現在 SiGe 通道器件中，我們發現這兩種元件之間的 V_{FB} 偏移取決於半導體基板與金屬公函數的差異，我們提出了一個缺陷分佈模型來解釋異常現象，通過改變 C-V 測量頻率並使用電導法萃取能帶內的缺陷態密度分佈來證明所提出的模型，我們還對 C-V 中的這種異常高台特性提出了額外的解釋，Silvaco-TCAD 元件模擬軟體的

結果也進一步證實我們的模型假設。

為了進一步提高元件性能，於第四章我們開發了用於 Si 和 SiGe-MOSCAP 元件的低溫高壓（LTHP）氫化的缺陷鈍化技術。 LTHP 處理法是處於液態和氣態間的特殊材料狀態，其結合了液體的高溶解度優點以及氣體的高穿透能力，將欲修補元素帶入元件並增強元件品質及性能。我們認為 LTHP 氫化處理可以修復 SiO_2 / SiGe 界面間的斷鍵。利用電導法萃取初始狀態和處理後的缺陷密度，可以觀察到缺陷密度顯著降低。並提出能帶模型，且模擬結果也驗證了深能級缺陷的修復。我們還調變了不同的處理條件，包括溫度，時間和氫濃度，並在 Si 和 SiGe 通道 MOSCAP 中找到最佳的缺陷鈍化參數。

相較於改變元件材料，第五章節我們對 FinFETs 結構元件進行了些研究。本部分研究了經熱載子應力（HCS）後，N 型鰭式場效電晶體（FinFETs）有異常基極電流（I_{sub}）上升的現象。傳統上在 HCS 之後，飽和區的汲極電流和 I_{sub} 會持續減小。然而在這項研究中，出現了 I_{sub} 首先減少，然後逐漸上升的異常現象。我們將透由不同的測量方法研究此異常行為，並且發現是由於陷阱輔助穿隧的機制。本研究首先使用不同的工作電壓來證明所提出的模型，然後利用變溫度應力條件來驗證。最後利用介面電流測量找出缺陷產生的位置。

第六章節中，隨著器件不斷縮小到接近 20 nm 的通道長度。研究了基極電流與短溝道鰭式場效應晶體管（FinFET）退化的關係。從 log ID-VG 圖中，藉由熱載子劣化前後的閾值電壓偏移量辨別出氧化物陷阱 (Not) 和界面態陷阱 (Nit) 的變化。在不同器件尺寸的不同應力條件下，可以分別觀察到 Not 和 Nit 的變化趨勢。發現短溝道 FinFET 結構器件的 HCS 退化機制以 MVE 為主。隨著應力 VG 增加，閾值電壓變化更嚴重。而缺陷在通道中產生得更均勻。

關鍵字：金氧半場效電晶體、矽鍺通道、超臨界處理、缺陷萃取、鰭式電晶體、熱載子劣化、偏壓不穩定性。

Investigation on Electrical Analysis and Reliability Mechanisms of Advanced MOSCAP and FinFETs

Student : Chien-Yu Lin **Advisor : Dr. Ting-Chang Chang**

Department of Photonics

National Sun Yat-sen University

Abstract

Since 1960, the first metal-oxide-semiconductor-field-effect transistors (MOSFETs) in the world were invented by Kahng and Atalla in Bell Lab. The length of transistor is 25 μm, and thickness of gate oxide is 100nm. Nowadays, MOSFETs with low power consumption, low cost and easy to scale down, they have become the main component of ultra-large-scale integration (ULSI) circuits. In 1965, Gordon Moore, one of Intel's founders, first proposed Moore's Law: The number of devices per integrated circuit will doubling every year. The 7 nm fin transistor (FinFET) has been mass-produced and applied to advance electronic products. With the evolution of the IC technology, the miniaturization has reached the demand of higher operating speeds that cannot cater the physical limit. As a result, the material of intrinsic performance with higher carrier mobility would be attempted or the design of the device structure would be conducted in order to improve devices' performance.

Therefore, in the first part, we studied the capacitance - voltage (C-V) characteristics between silicon channel and silicon-germanium (SiGe) channel MOSCAPs. In comparison of both devices, significant flatband voltage (V_{FB}) shifts and a C-V plateau were observed only in the SiGe-channel device. We found that the V_{FB} shift between these two devices is determined by the difference in substrate work-function values against metal. We propose a defect distribution model to explain abnormal phenomenon. The proposed model was proved by changing the frequency of C-V measurement and extracting the interface state density distributions within the energy band using the conductance method. We also provide additional explanation of this anomalous plateau in the C-V measurements. Moreover, the result of Silvaco-TCAD device simulation tool also supports our model. The hypothesis is further confirmed by the defect position and defect quantity in the energy band.

To further improve the device performance, we developed a Low-Temp-High-Pressure (LTHP) of hydridation treatment used for Si- and SiGe- MOSCAP devices in the second part. The LTHP treatment (LTHPT) is an unique material state that uses the coexistence characteristics of liquid and gaseous states. It combines the advantages of the high permeability capability and also high liquid solubility of gas to enhances the device performance. We think that the LTHPT of hydridation can effectively passivate dangling bonds in the SiO_2/SiGe interface. Utilizing the conductance method to extract D_{it} between pristine devices and the devices after treatment, a significant reduction in D_{it} can be observed. Subsequently, the energy diagram model is proposed, and the simulation result verifies that the deep state defects are mended. We also adjust different treatment condition including temperature, time and hydrogen concentration, and find the optimal parameters in Si- and SiGe-channel MOSCAP.

Instead of changing the device material, we also did some research on optimizing

structure of fin field effect transistors (FinFET). This part studies the mechanism of uncommon body current (I_B) after hot carrier stress (HCS) in FinFETs. Generally, I_B will continually decrease with the drain current after HCS. However, in this work, I_B first declines then showed a gradual unusual ascent. This unusual I_B behavior was studied through different measurement methods, and it was speculated that is was caused by trap-assisted tunneling. First, utilizes different operating bias to confirm the model we proposed, then applies different temperature during stress which further verify the model. Finally, junction current can also be measured to determine the location of the defect generation.

In the final section, as device's channel length continually shrinks to around 20 nm. The relationship between body current and degradation of short channel fin field transistor (FinFET) was widely studied. From log I_D-V_G diagrams, the change of oxide trap (N_{ot}) and interface state trap (N_{it}) are calculated from threshold voltage shift before and after stress. Under different stress conditions of different device dimensions, the trends of N_{ot} and N_{it} will be able to be observed, respectively. However, as stress V_G increases, the threshold voltage shifts more severely. From these results, it is found that the HCS degrade mechanism of short channel FinFET structure device is dominate by MVE. As stress V_G increases, the threshold voltage shifts more severely. Moreover, defect generates more uniform in the channel.

Keywords: MOSFETs、SiGe-channel、LTHPT、D_{it} extraction、FinFETs、Hot Carrier Instability、BTI.

Contents

Figure Captions