

國立交通大學

電子工程學系電子研究所

碩士論文

題目：游離輻射對 N 型電晶體的隨機電報雜訊  
之影響研究

A Study on the Effect of Ionizing Radiation on  
Random Telegraph Noise of NMOSFETs

研究生：黃致弘

指導教授：崔秉鉞教授

中華民國一〇三年八月

游離輻射對 N 型電晶體的隨機電報雜訊之影響研究  
A Study on the Effect of Ionizing Radiation on Random  
Telegraph Noise of NMOSFETs

研究生：黃致弘

Student : Zhi-Hong Huang

指導教授：崔秉鉞

Advisor : Bing-Yue Tsui



國立交通大學

電子工程學系

電子研究所

碩士論文

A thesis

Submitted to Department of Electronics Engineering & Institute of  
Electronics

College of Electrical Engineering and Computer Science  
National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirement  
for the Degree of Master

in

Electronic Engineering

August 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇三年八月

# 游離輻射對 N 型電晶體的隨機電報雜訊之影響研究

研究生:黃致弘

指導教授:崔秉鉞

國立交通大學電子工程學系 電子研究所碩士班

## 摘要

自 1958 年起積體電路的發明來，元件密度都依循著摩爾定律(Moore's Law)以每 18 個月在同樣面積下的積體電路所容納的電晶體數目會以加倍的趨勢成長，而微影技術更是左右著此定律能否維持下去的一大主因。在 10nm 以下積體電路製程中，極紫外光微影技術是最有可能發展起來的微影技術，但當以極紫外光微影技術進行曝光微影，將使得製程中的元件直接暴露於輻射下而使得輻射損害不可忽略，且必須謹慎的評估。本論文中主要探討極紫外光所造成的游離輻射對 NMOSFETs 產生的影響進行研究。

經過極紫外光照射之後，金氧半電晶體的電性產生了許多明顯的變化，包括汲極電流( $I_D$ )-閘極電壓( $V_G$ )曲線變化、漏電流上升、臨界電壓位移、隨機電報雜訊(Random Telegraph Noise)的時間常數改變和功率譜密度(Power Spectral Density)的斜率變化。這些電性的變化代表元件經過極紫外光照射後，介電層中、淺溝渠隔離氧化物下方以及介電層和矽基板間介面的缺陷以及被捕捉到的電荷增加，這將使得原本沒有隨機電報雜訊的元件因為照射紫外光，而造成電路的不穩定性增加，此外我們發現到因輻射產生隨機電報雜訊的缺陷可能會在同一位置

有深淺不同能階的缺陷，當電子損失能量時，會掉到較深的能階而讓電子待在缺陷的時間( $\tau_e$ )增長許多，但是當電子從深缺陷中釋放後，又開始回復原本與淺能階互動的情形。

本論文顯示極紫外光照射所引發的隨機電報雜訊現象將是研究人員得考量的因素，因為隨機電報雜訊對於元件操作在低電流時的影響更是嚴重，而讓穩定度受到很大的威脅。



# **A Study on the Effect of Ionizing Radiation on Random Telegraph Noise of NMOSFETs**

**Student: Zhi-Hong Huang**

**Advisor: Bing-Yue Tsui**

Department of Electronics Engineering  
Institute of Electronics National Chiao Tung University

## **Abstract**

Since Integrated circuit (IC) was invented in 1958, density of devices follows Moore's law which means that the number of device in the same area is doubled every eighteen months. Lithography is an important factor for continuous scale-down of IC technology. However, below 10 nm technology node of the IC manufacturing, the extreme ultraviolet lithography (EUVL) technology is the most likely lithography technology to be employed. Lithography by extreme ultraviolet (EUV) light source will make the device be directly exposed to irradiation so that the radiation damage can't be ignored and should be considered carefully. This thesis focuses on the effect of ionizing radiation from EUV light source on random telegraph noise of NMOSFETs.

After exposing to extreme ultraviolet radiation, the characteristics of NMOSFET exhibit many significant changes including variation of  $I_D$ - $V_G$  characteristic, increase of leakage current, shift of threshold voltage, change of the time constant of

random telegraph noise, and induce of random telegraph noise phenomenon. These variations of characteristics imply that the number of traps in gate dielectric, in field oxide of shallow trench isolation, and at the interface between gate dielectric and silicon increase after exposing to EUV. Random telegraph noise (RTN) phenomenon may be arisen on devices without random telegraph noise phenomenon before EUV irradiation, which resulting in increasing instability of the circuit. Furthermore, we found that the emission time constant of the EUV irradiation induced random telegraph noise trap has two quite different values. It may change from less than 1 second to longer than several tens seconds and then change back to less than 1 second. This phenomenon can be explained by the charge state of trap in  $\text{HfO}_2$ . Therefore, it is suggested that the EUV irradiation produces trap which generates random telegraph noise in  $\text{HfO}_2$ .

We conclude that RTN resulting from EUV irradiation would be an important factor for further research especially when device is operated at low power and low current level.

# 誌謝

一轉眼之間兩年的碩士生涯過去了，這兩年的時間雖然不長，但卻是我求學的路途中最深刻的一段日子，也是身心靈獲得最多成長的時光。

能夠得以完成碩士學業，我最要感謝的就是我的指導教授 崔秉鉞 老師。在老師底下學習不只能學到學業上的知識，更重要的是老師做研究謹慎嚴謹的精神更是未來做人處事更為重要的事情。而因為老師這樣的精神態度，讓我在研究實驗上少走了許多冤枉路，因此能夠更快的完成實驗進度。

在實驗研究方面，感謝奈米中心以及國家同步輻射中心提供完善的實驗環境，讓我能夠將所學東西得以實現。

最後感謝本實驗室的曾元宏學長、王培宇學長、鄭嶸健學長、陳璽允學長、廖雪君學姊在實驗上的鼎力相助以及細心指導，讓我能夠學到學長姐們寶貴的經驗，也感謝兩年以來一直和我一起學習的夥伴，楊昕翰、楊易瑾、盧立偉同學在實驗上以及課業上的支持，還有也感謝最貼心的學弟妹們，吳宗翰、周鴻儒、梁嘉琳因為有你們為實驗室帶來很多年輕的能量，讓實驗室的氣氛一直是既快樂又溫馨。

黃致弘 寫於新竹 103 年 8 月 6 日

# 主目錄

摘要(中文).....	i
摘要(英文).....	iii
誌謝.....	v
主目錄.....	vi
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
第一章 緒論.....	1
1-1 微影技術的演進.....	1
1-2 極紫外光微影技術的發展.....	3
1-3 輻射傷害的影響.....	4
1-4 隨機電報雜訊(Random Telegraph Noise)的影響.....	6
1-5 研究動機與論文架構.....	7
第二章 實驗方法.....	12
2-1 N型電晶體架構.....	12
2-2 NSRRC 實驗環境.....	12
2-3 實驗量測及參數萃取方式.....	14
2-3-1 劑量的計算.....	14
2-3-2 RTN 量測方式及參數萃取.....	15

第三章 結果與討論.....	23
3-1 介紹.....	23
3-2 輻射對既有 RTN 元件的影響.....	23
3-2-1 劑量 $70 \text{ mJ/cm}^2$ .....	23
3-2-2 劑量 $500 \text{ mJ/cm}^2$ .....	25
3-2-3 劑量 $1000 \text{ mJ/cm}^2$ .....	26
3-3 輻射所造成的 RTN..	27
3-3-1 劑量 $500 \text{ mJ/cm}^2$ .....	27
3-3-2 劑量 $1000 \text{ mJ/cm}^2$ .....	28
3-4 小結.....	30
第四章 結論與未來研究方向.....	56
4-1 結論.....	56
4-2 未來研究方向.....	57
參考文獻.....	59
作者簡歷.....	66

# 表目錄

## 第二章

表 2-1 在不同閘極介電層的缺陷垂直深度萃取方式.....18

## 第三章

表 3-1 各種劑量下所量測的元件數以及有 RTN 現象的元件數  
目整理.....31

表 3-2 照射  $70 \text{ mJ/cm}^2$  EUV 前後的元件基本性.....31

表 3-3 照射  $500 \text{ mJ/cm}^2$  EUV 前後的元件基本特性.....31

表 3-4 照射  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  EUV 前後的元件基本特性.....32

表 3-5 照射  $500$  與  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  EUV 後產生 RTN 的元件基本  
特性.....32

# 圖目錄

## 第一章

圖 1-1 奈米壓印圖形轉移步驟圖.....	8
圖 1-2 電子束微影技術機台架構圖.....	8
圖 1-3 極紫外光微影系統，為反射式光學微影，光束線主要操作於真空環境.....	9
圖 1-4 極紫外光微影系統中所採用的布拉格反射器是由多層鉬/矽組成的，圖中為該反射器的穿透式電子顯微鏡圖.....	9
圖 1-5 加正偏壓的金屬氧化物半導體受到輻射游離時的能帶示意圖.....	10
圖 1-6 隨機電報雜訊隨時間變化示意圖， $\tau_c$ 表示缺陷未填電子所維持的時間， $\tau_e$ 表示缺陷已填電子所維持的時間.....	10
圖 1-7 單個缺陷與多個缺陷複合顯示出不同斜率的 PSD 圖.....	11

## 第二章

- 圖 2-1 在 NSRRC 中同步加速器運行方式，主要是由增能環以及儲存環所構成，此圖由 NSRRC 網站提供.....19
- 圖 2-2 (a)為使用的腔體區塊概念圖(b)為實體架構圖.....19
- 圖 2-3 實驗站 08A1 光束線射出的光線樣子，大小為  $0.016 \text{ cm}^2$  .....20
- 圖 2-4 (a)放置樣品載板實體圖，鐵板可插進主腔體中進行 EUV 的輻射照射，後面的接線連接到光二極體 (b)樣品載板區塊示意圖.....20
- 圖 2-5 左邊為水平光柵右邊為垂直光柵.....21
- 圖 2-6 量測 RTN 所用源極與基底共接地接法，由安捷倫網站提供.....21
- 圖 2-7 (a)為介面氧化層的缺陷與通道中的電荷交換時的能帶圖(b)為高介電質氧化層的缺陷與閘極中的電荷交換時的能帶圖.....22

## 第三章

- 圖 3-1 照射  $70 \text{ mJ/cm}^2$  對元件 A 產生的轉換特性變化.....33
- 圖 3-2 元件 A 照射前與照射後 RTN 的變化.....33

圖 3-3 輻射產生的正電荷距離產生 RTN 的缺陷太近時，將會 降低 RTN 缺陷的能障高度.....	34
圖 3-4 A 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖...	35
圖 3-5 照射 70 mJ/cm <sup>2</sup> 對元件 B 產生的轉換特性變化.....	36
圖 3-6 照射 EUV 後增加漏電流的機制.....	36
圖 3-7 元件 B 照射前與照射後 RTN 的變化.....	37
圖 3-8 B 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖....	38
圖 3-9 照射 500 mJ/cm <sup>2</sup> 對元件 C 產生的轉換特性變化.....	39
圖 3-10 元件 C 照射前與照射後 RTN 的變化.....	39
圖 3-11 元件 C 三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖..	40
圖 3-12 照射 500mJ/cm <sup>2</sup> 對元件 D 產生的轉換特性變化.....	41
圖 3-13 元件 D 照射前與照射後 RTN 的變化.....	41
圖 3-14 D 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖...	42
圖 3-15 D 元件三種不同偏壓下照前與照後的歸一化 PSD 圖.....	43
圖 3-16 照射 1000 mJ/cm <sup>2</sup> 對元件 E 產生的轉換特性變化....	44
圖 3-17 元件 E 照射前與照射後 RTN 的變化.....	44
圖 3-18 E 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖..	45
圖 3-19 照射 1000 mJ/cm <sup>2</sup> 對元件 F 產生的轉換特性變化....	46

圖 3-20 元件 F 照射前與照射後 RTN 的變化.....	46
圖 3-21 F 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖..	47
圖 3-22 照射 500 mJ/cm <sup>2</sup> 對元件 G 產生的轉換特性變化.....	48
圖 3-23 元件 G 受到輻射傷害而造成的 RTN.....	48
圖 3-24 輻射所產生的 RTN 發生缺陷能量移動.....	49
圖 3-25 造成 RTN 現象的缺陷深度.....	49
圖 3-26 G 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖...	50
圖 3-27 照射 1000 mJ/cm <sup>2</sup> 對元件 H 產生的轉換特性變化....	51
圖 3-28 元件 H 受到輻射傷害而造成的 RTN.....	51
圖 3-29 輻射所產生的 RTN 發生 $\tau_e$ 變長的情形.....	52
圖 3-30 $V_G=0.7V$ 下 $\tau_e$ 由於缺陷能量的降低而變長.....	52
圖 3-31 (a)空間上深、淺缺陷在同一位置，由於庫倫作用力造成 同時間只會有一個缺陷被填電子(b)電子會因為能量的損失掉到深 缺陷能階使 $\tau_e$ 變長.....	53
圖 3-32 造成 RTN 現象的缺陷深度.....	54
圖 3-31H 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖...	55

# 第一章

## 緒論

### 1-1 微影技術的演進

在 1958 年代，Jack Kilby 以及 Robert Noyce 同時間發明了積體電路[1]，因而開啟了積體電路(IC)發展的時代，而幾年下來都依循著摩爾定律(Moore's Law)以每 18 個月在同樣面積下的 IC 所容納的電晶體數目將會加倍的趨勢成長，當中微影技術更是左右著此定律能否維持下去的一大主因。從一開始由高壓汞燈產生的 G-line(436nm)和 I-line(365nm)到後來的準分子雷射的 KrF(248nm)和 ArF(193nm)，一直到現今以 ArF 為基礎，搭配浸潤式及兩次微影(double patterning)開發出 22 nm 製程，但若要能繼續微縮下去卻開始面臨了一些挑戰[2-3]。

因為在 10 nm 以下的線寬將使得此微影技術無法再繼續微縮，原因可以從下列式子中得知：

$$Resolution = \frac{k_1 \lambda}{NA}, \quad (1-1)$$

其中  $k_1$  為係數由光阻製程、曝光機台及光罩技術所決定， $\lambda$  為曝光波長，而 NA 為透鏡之數值孔徑(numerical aperture)[4]，一般常見的  $k_1$  為 0.5-0.8，而 NA 大概是 0.5-0.6 之間，因此解析度幾乎就是取決於所用的光源波長，而 193 nm 波長的光源要用於 10 nm 以下世代是非常困難的事，所以為了微縮線寬大小，一個具有更佳解析度的微影系統是必要的，也就是說使用更短波長的光源將會是未來的解決方案之一。

現今有三種可能用於下世代的微影技術，他們分別為奈米壓印技術 (nanoimprint)、電子束直接寫入(EBDW)以及極紫外光微影技術(EUVL)。

奈米壓印技術如圖 1-1 所示，它有著比另外兩者更便宜的製程成本且單位時間產出數高的優勢[5-6]，但是卻有兩個致命傷，一個是難以製造出 1x nm 以下的母模，另一個就是多次使用後，模上可能產生出缺陷或髒汙，得定期清洗或是更換，否則將會造成後續曝光上的問題，因此母模的汰換率也會增加此技術的成本。

而 EBDW 則是一種不需要光罩的微影技術，主要架構如圖 1-2[7]，主要是靠高能量電子去激發光阻產生化學反應，使得晶片上可以直接產生出圖案，較小的光束源可以得到較窄的線寬，此外因為全程並無使用光罩，所以沒有光罩壽命或是光罩汙損的問題[8]。雖然沒有光罩的花費，但是 EBDW 的產出量卻相當低，與每小時標準產量 200-300 片相差甚遠，若要引入 EBDW 到製程中，得靠多電子束的方式才能提升產量。

最後一個為極紫外光微影 (EUVL) 技術，它是較被看好的技術，其架構如圖 1-3 所示[2]，因為 EUV 波長為 13.5 nm 又被稱為軟性 X 光。從公式 1-1 中知道它將可以大幅提高解析度，也可以讓光學微影技術持續微縮下去。但是 EUVL 也有一些限制，例如這區段範圍的光較容易被物質吸收，因此光束路徑得維持在超高真空，且光罩和光學系統都得採用反射式以避免被吸收[9-10]。此技術目前還有一些待解決的問題，例如：光源效率、鏡面的反射效率、入射角的定位以及

吸收層厚度，但是比起另外兩者 EUVL 還是較有希望。根據 2013 年 ITRS 的預估[11]，EUVL 將會在 2016 年被引進 IC 製程生產線上。

## 1-2 極紫外光微影技術的發展

雖然在 10 nm 以下積體電路製程中，EUVL 是最有可能被應用的技術，但它仍存在著許多待解決的問題[12-13]。下面幾段讓我們先從 EUV 的起源介紹，等有了基本概念後再來更深入的探討。

最早提出 EUVL 概念的是 1988 年由 Hawryluk 以及 Seppala 在 Lawrence Livermore 國家實驗室所建構出來的系統[14]，雖然只是雛型，但為了能實現這樣的架構，開始有許多人投入光源、多層反射膜以及光阻材料相關的研究，開啟了 EUVL 研究的熱潮。極紫外光(EUV)又稱為軟性 X 光，它的波長介於 4 到 40 nm 之間，此區段波長的光容易被物質所吸收。現今 EUVL 較常採用的光源為 13.5 nm，主要是因為它是這區間反射效率最高的波長，而 EUVL 在操作過程中得處於一個高真空環境下且它的成像系統得全部得採用反射式才能減低損耗。

但若是使用垂直入射方式，光源的損耗也無法降低，因此會在成像系統的表面鍍上多層薄膜的物質，也就是所謂的布拉格反射器。而一個好的反射器會由大原子序及小原子序的兩種物質交叉疊放所構成，達到高反射效率的效果。目前常用的物質為鉬(大原子序)和矽(小原子序)，主要是因為在 13.5 nm 曝光光源下可

以達到高達 70% 的反射效率[12]。製作方式可以利用磁控式濺鍍來達到兩種物質的多層架構，其穿透式電子顯微鏡圖如圖 1-4 所示[15]。

即使上述問題都解決了，但一個好的量產型機台還是得要有高產出量，因此 EUV 的光源功率是決定產出量很大的因素，常見的 EUV 光源產生方式分別是雷射產生電漿的方式(LPP)、放電產生電漿的方式(DPP)以及同步加速器[16]，當中又以同步加速器的 EUV 光源最穩定，但是造價昂貴且佔地面積大，因此 LPP 以及 DPP 將會是在 EUVL 上較有可能被採取的方式，而艾斯摩爾公司也已經成功研發出了 DPP 的機台[17]。但是同步輻射光原因為最為純淨，是 EUVL 研究的利器。

從上面的幾點可以看出，雖然 EUVL 還有很多待改善的問題，但相信在不久的將來，EUVL 將能正式應用在產線中，因此盡早的發現出微影時可能對元件產生的輻射傷害，是刻不容緩的事情。

### 1-3 輻射傷害的影響

輻射傷害的研究起始於航太科技，所以大部分對於半導體元件的研究都是在輻射能量極高的環境下作探討，常見的太空環境中就充斥著各種高能量的光子或粒子，像是 X 光、伽瑪射線、電子、質子或是阿爾法粒子，這些高能量的光子或粒子會使得元件特性變差甚至或減少他們的使用壽命[18-20]。但除了使用中會暴露於高能量環境，在元件的製作過程中也可能面臨輻射傷害的危機，例如在使

用反應式離子蝕刻機進行蝕刻時，或是電子束寫入以及其它電漿處理的製程，都有可能產生輻射損傷[21]。相較於元件的閘極介電層在經過沉積多層金屬以及保護層最後再經過封裝後使用在高能量輻射的環境中，製程中直接的輻射傷害可能影響更大。此外由於元件的微縮，勢必得引進 EUVL 進行曝光微影，而使得製程中的元件更直接暴露於輻射下而使得輻射損害不可忽略。

輻射游離主要是因為輻射源提供的能量足以打破原子鍵結產生電子電洞對，對於電晶體來說，閘極介電層所受的影響將會更為嚴重。圖 1-5 描繪了加正偏壓的金氧半導體結構受到輻射游離的能帶圖，閘極介電質吸收輻射產生電子電洞對，由於正偏壓的吸引，電子會在極短的時間內從閘極流走，但剩下的電洞雖然有機會與電子復合，但有一部分會仍留在介電層中，因此電洞在輻射損傷中扮演了一個極重要的角色，它將會暫時性使得電晶體的臨界電壓(threshold voltage)往負偏壓移動，且過了一段時間後電洞會透過缺陷躍遷到矽和氧化物的介面，當中又有一些會被陷在較深的缺陷裡而形成永久的臨界電壓位移。此外輻射也會傷害到矽和氧化物的介面鍵結，產生介面缺陷，主要是因為當電洞躍遷到介面時會與電子復合，釋放的能量會產生介面缺陷，這些介面缺陷的正、負或不帶電是由缺陷以及矽的表面位能所決定[22-25]。

電晶體會因為輻射而使得臨界電壓改變、次臨界擺幅(subthreshold swing)增加、閘極漏電增加、增益下降，甚至閘極介電層崩潰而使元件失去效用[26-28]。上面幾項可靠度的研究已經相當的成熟，但是面對元件的微縮，產生介面缺陷後，

在元件操作時是否捕獲電子的影響將會更為嚴重，這也將使得隨機電報雜訊 (RTN, random telegraph noise) 的影響將會更為劇烈，因此輻射對於元件的 RTN 影響得更為關注才行。

#### 1-4 隨機電報雜訊(Random Telegraph Noise)的影響

RTN 又稱為 RTS(random telegraph signal)，它是一種電流隨著時間上下跳動，如圖 1-6 所示的現象。電流在同偏壓下會有兩個不同的位準，這種現象會使得元件操作在類比與數位電路時降低效能[29-31]。RTN 主要的產生原因為閘極介電層裡面的缺陷能量剛好在費米能階幾個 kT 附近，而會隨著時間捕獲或發射電子，電流位準較高所維持的時間我們稱之為捕獲時間( $\tau_c$ )，也就是需要多長時間才會捕獲電子，而較低的電流位準所維持的時間我們稱之為發射時間( $\tau_e$ )，也就是被捕獲的電子經過多長時間才被發射出去。元件尺寸較大時，缺陷數量較多，大量缺陷捕獲/發射電子造成的雜訊的功率頻率密度(PSD, Power Spectrum Density)和頻率成倒數關係，如圖 1-7 所示，斜率為-1[32-34]。然而這種現象會因為元件的越縮越小，缺陷數量減少，使得少數缺陷的電荷變動就會劇烈的影響電流，讓 RTN 現象更加明顯，最後當只有一個缺陷時，PSD 圖斜率將會變為-2。因此元件因為 RTN 的影響將是不容小覷的，況且當元件受到輻射時產生的缺陷，會使此現象發生的可能性更高。[35-37]

## 1-5 研究動機與論文架構

本論文主要的目的是研究元件受到 EUV 照射後所產生的影響，在 P. H. Li 和 T. T. Su's 的論文中有一個結論，EUV 輻射對高介電質材料的影響比二氧化矽還要大[38-39]，而對於像 RTN 這種暫時性的電荷捕獲/發射，高介電質材料會比二氧化矽的閘極介電層影響還要大，且介電層主體中的缺陷會比介面缺陷影響還要大 [40-41]，因此在本論文中我們將會著重於 N 型電晶體在不同劑量 EUV 照前與照後的 RTN 分析比較。

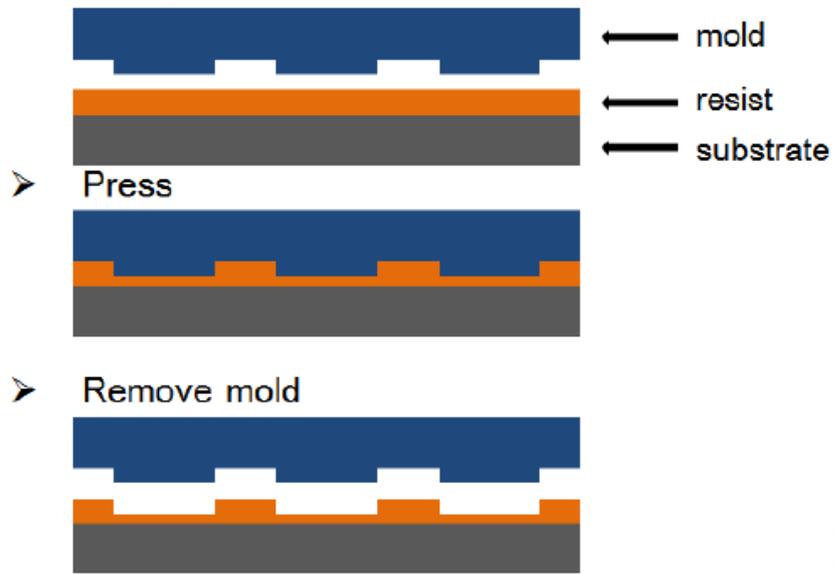
第一章介紹包含微影的歷史、EUVL 的發展以及 RTN 所造成的影響。

第二章我們將會敘述元件的製作過程，參數的萃取方式，以及國家同步輻射研究中心(NSRRC)的實驗環境介紹。

第三章則是結果與討論，我們將會比較三種劑量分別為 70、500、1000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  下原本就有 RTN 的元件照前與照後的比較，以及原本沒有 RTN 照後會產生 RTN 的現象去做討論

最後的第四章將會做結論並未來學弟妹們可實行的研究方向。

## 1. Nanoinprint



## 2. Pattern transfer



圖 1-1 奈米壓印圖形轉移步驟圖[5]。

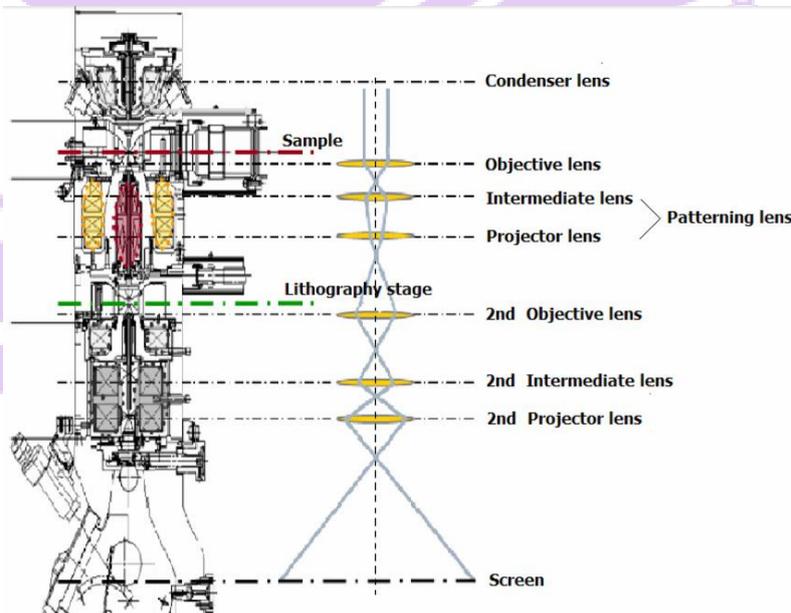


圖 1-2 電子束微影技術機台架構圖[7]。

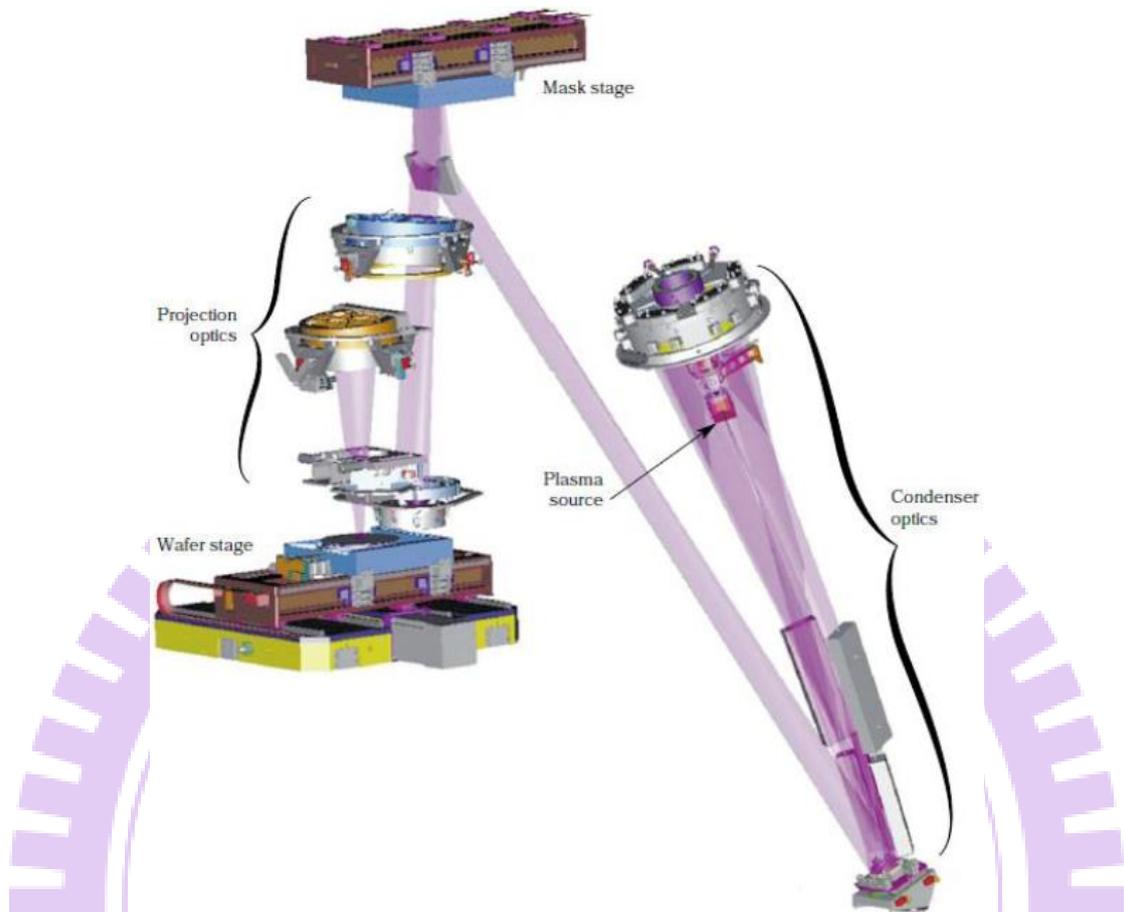


圖 1-3 極紫外光微影系統，為反射式光學微影，光束線主要操作於真空環境[2]。

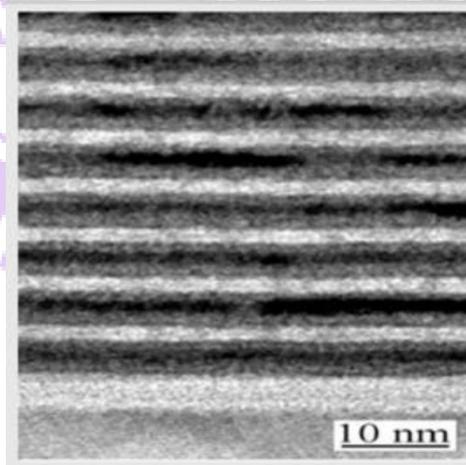


圖 1-4 極紫外光微影系統中所採用的布拉格反射器是由多層鉬/矽組成的，圖中為該反射器的穿透式電子顯微鏡圖[15]。

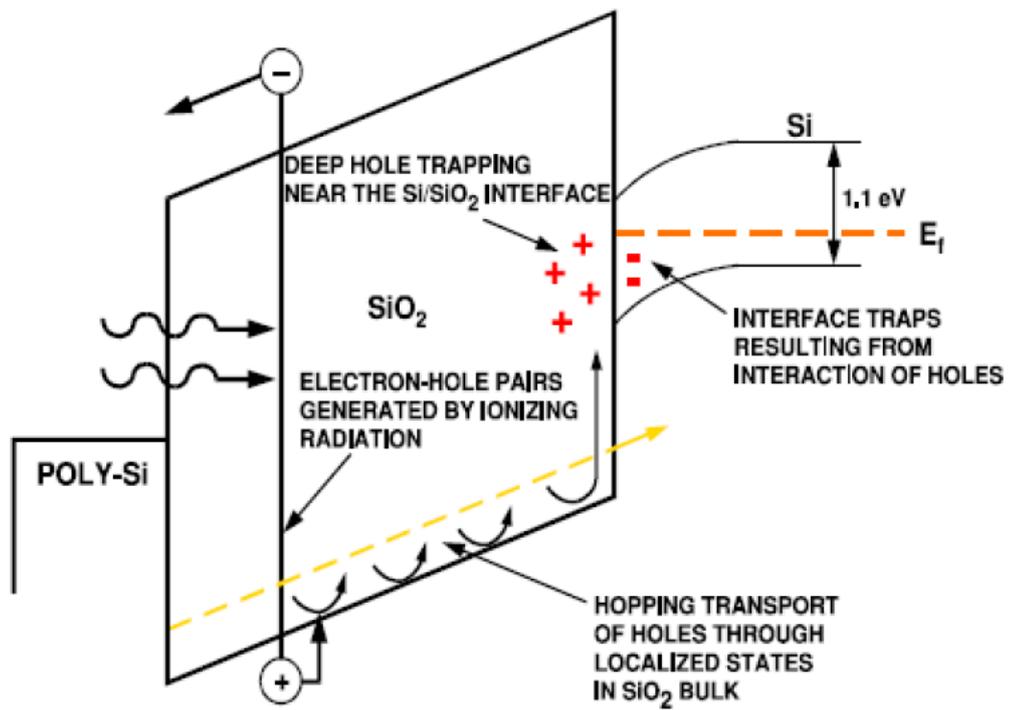


圖 1-5 加正偏壓的金屬氧化物半導體受到輻射游離時的能帶示意圖[22]。

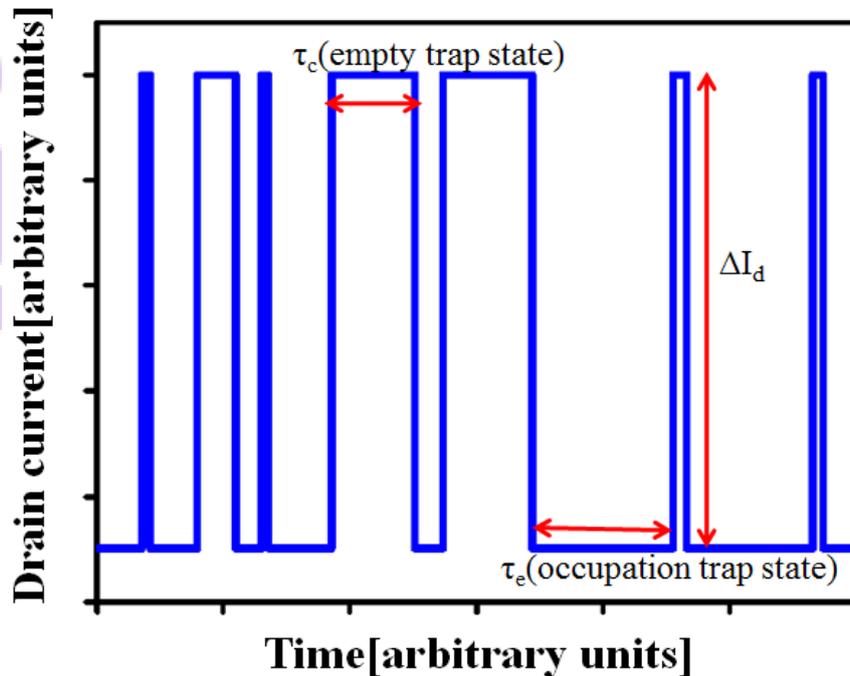


圖 1-6 隨機電報雜訊隨時間變化示意圖， $\tau_c$  表示缺陷未填電子所維持的時間， $\tau_e$  表示缺陷已填電子所維持的時間。

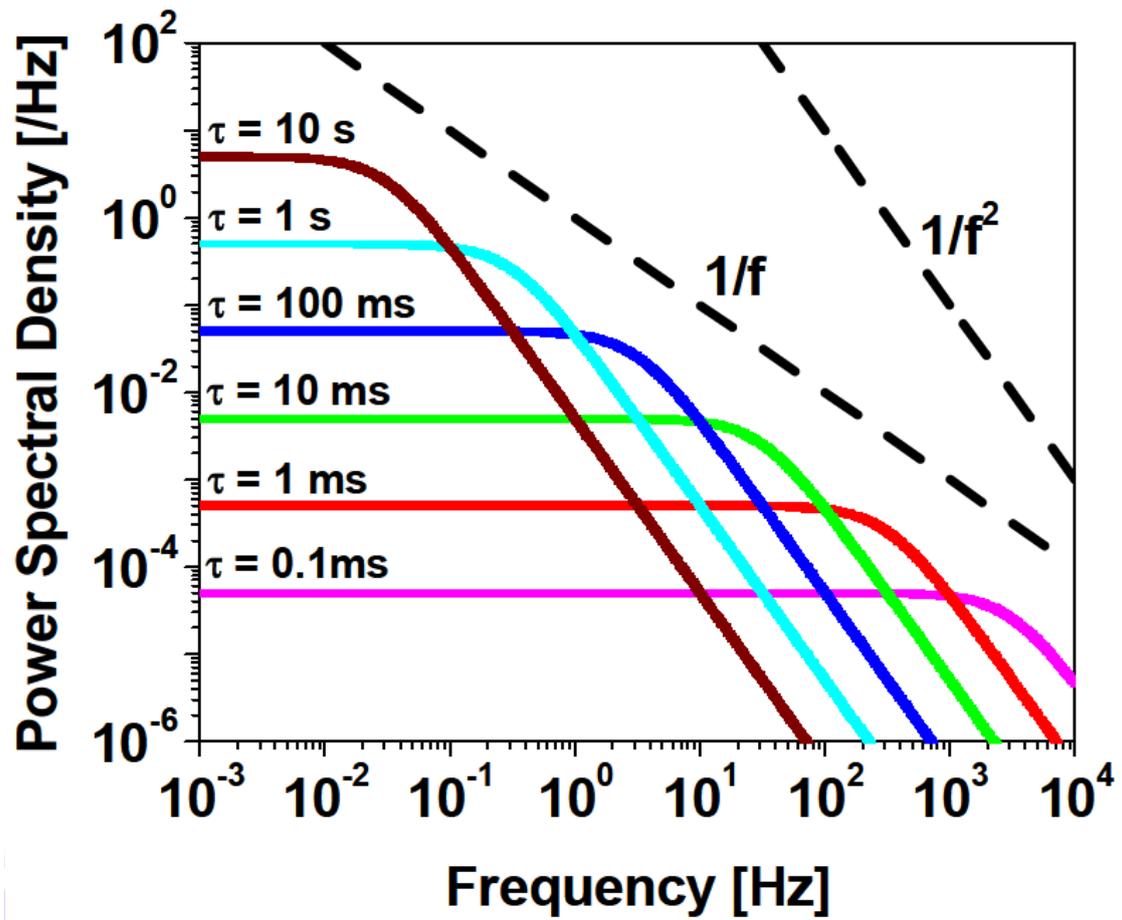


圖 1-7 單個缺陷與多個缺陷複合顯示出不同斜率的 PSD 圖[32]。

# 第二章

## 實驗方法

### 2-1 N 型電晶體架構

本論文的元件是採用先進金屬閘極/高介電常數介電質製程的 N 通道 MOSFET，屬於閘極後製(gate last)的平面結構。電性隔離採用淺溝渠隔離(STI)，並在源極和汲極上形成鎳矽化物來降低阻抗。閘極介電層是由 2 nm 的二氧化鈣及 0.4 nm 的介面氧化物所組成。使用 TiN 作為金屬閘極可有效地調整功函數，接著在 TiN 上面蓋上一層阻擋層避免與主要閘極導電層鎢相互擴散，閘極電極的金屬總厚度為 38 nm，最後覆蓋 40 nm 的磷矽玻璃。量測元件的尺寸為寬度(width)固定為 0.2  $\mu\text{m}$ ，長度(length)則有三種，分別為 0.15、0.12 與 0.1  $\mu\text{m}$ 。

### 2-2 NSRRC 實驗環境

NSRRC 中同步加速器的架構如圖 2-1 所示，是由增能環與儲存環所構成，而中心總共有 24 條光束線實驗站，本論文採用編號 08A1 的實驗站提供的 EUV 光源。編號 08A1 的實驗站可以調整光子射出量以及功率，這條光束線是設計使用 15 到 200 eV 能量的光源，而我們要用的 EUV 能量為 91.85eV 剛好在這範圍之內。實驗站的末端將會銜接到我們所使用的腔體，它的外觀如圖 2-2 所示，由一個主腔體、差動腔體、三個閥門以及兩個細抽馬達組成，主腔體就是我們放元件照射的地方，而差動腔體的功用主要是為了減輕主腔體的壓力。

此實驗站的 EUV 光束為微笑的形狀，如圖 2-3 所示，面積約為  $0.016 \text{ cm}^2$ ，而放置樣品的載板棒如圖 2-4 所示，是一個可上下調整的載台，上面裝有一個光電二極體以及有孔洞的鋼板，利用光電二極體量測光電流並換算成 EUV 的劑量，而元件黏在鋼板孔洞後方，這樣就可以減少輻射的汙染，以下我們將詳述實際腔體操作時的步驟。

1. 首先確定所有閥門(V1、V2 和 V3)以及細抽 1 和 2 都是在關閉狀態。(當細抽關閉後使用者至少得等 20 分鐘以上細抽才會完全停止運轉)
2. 把氮氣通入在主腔體後端的一個旋鈕來做破真空。
3. 把鋼板棒從主腔體取出。
4. 要照射的元件黏貼於鋼板棒上。
5. 把鋼板棒放回主腔體內並鎖住。
6. 打開 V2 讓粗抽把主腔體抽到壓力為  $5 \times 10^{-2}$  torr 以下，接著打開 V3 並等待一分鐘。
7. 打開細抽 1 和 2。
8. 打開 V1。

當主腔體抽到壓力為  $1 \times 10^{-7}$  到  $5 \times 10^{-8}$  torr 之間，我們就可以開始進行 EUV 曝光了，由於 EUV 為不可見光，因此我們得先用白光進行位置的對準，詳細照射程序如下：

1. 把光源調成白光。

2. 打開光束線源頭閥門，並讓光打到主腔體內。
3. 接著利用望遠鏡把白光和望遠鏡中的十字符號對準在光點上。
4. 關閉光束線源頭，並把光源設定成 EUV。
5. 移動元件位置讓望遠鏡中的十字對準在要照射的元件上，確保 EUV 能準確打在上面。
6. 打開光束線源頭閥門，讓 EUV 光線打進來，並進行曝光秒數倒數。
7. 結束後關閉光束線源頭閥門。
8. 如果有其他元件要照射則再跳回第五步開始做，當所有元件照射完後則就回到腔體操作程序，為下一梯的元件做準備。

### 2-3 實驗量測及參數萃取方式

本小節介紹實驗的量測方式及本論文會用到的參數萃取方式，在這裡分成兩個部分作介紹:劑量的計算、RTN 參數萃取。

#### 2-3-1 劑量的計算

本論文所用到的劑量單位為每單位面積的能量( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )，而劑量可以從光束線上的光通量來估計，通量主要是由機台的水平與垂直光柵如圖 2-5 兩個部分做調整，但這只是粗估而已，事實上每次做實驗由於時間點的不同，同樣數值的光柵設定但光束線的光通量都會不一樣，因此我們會用鋼板上的光電二極體量測電流來獲取準確的光通量，再微調垂直和水平光柵以符合我們所要的電流值。

偵測光子的光電二極體是採用國際輻射探測公司編號 AXUV100G 的產品，此產品能感測 7 到 100 eV 的光子能量。波長為 13.5 nm 的 EUV 轉換效率為 24，因此光通量與電流的轉換如式 2-1

$$Flux = \frac{current}{24 \times 1.6 \times 10^{-19}} \quad (2-1)$$

利用光電二極體的電流求出了光通量後，由於已知 EUV 能量為 91.85 eV 且光點面積為 0.016 cm<sup>2</sup> 再利用式 2-2 求得劑量

$$\frac{Flux \times 91.85 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.016} = \text{does 量} \left( \frac{mJ}{cm^2 \cdot sec} \right) \quad (2-2)$$

式 2-2 所算出的劑量是元件表面劑量，由於輻射傷害主要是在探討在閘極介電層的損傷，因此在到達介電層之前得經過如鈍化層及金屬層，因此劑量會以式 2-3 方式衰減

$$p(x) = e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (2-3)$$

$p(x)$  指的是輻射穿過該層材料的機率， $x$  為該層的厚度而  $\lambda$  為該層的衰減長度，因此根據式 2-3，在經過好幾層衰減最後到達閘極介電層的只有 29%。

### 2-3-2 RTN 量測方式及參數萃取

從第一章的介紹我們知道 RTN 是一種電流隨時間變化的現象，因此我們需要能夠隨時間取樣的儀器，而安插在 B1500A 中的波形產生器/快速量測裝置 (WGFMU) B1530A 模組就可以滿足這樣的需求，B1530A 的取樣頻率最高可達到 100 MHz、取樣點數可以到  $4 \times 10^6$  個點且能量測到 1 nA 的電流值，因此不管是快的缺陷或是慢的缺陷都可以量得到。針座詳細的接線方式則如圖 2-6 所示，透過

此接法可以利用共接地的方式讓源極與基底維持在零電位而不需額外再設定，而汲極則維持在 50 mV，透過改變閘極偏壓方式量測出不同偏壓下所產生的 RTN，最後再透過傅立葉轉換把時域的 RTN 結果轉換到頻域觀察 PSD，即可完整的獲取元件的 RTN 結果。

而從第一章我們知道 RTN 會有高電流位準維持的平均時間 $\langle\tau_c\rangle$ 以及低電流位準維持的平均時間 $\langle\tau_e\rangle$ ，假設  $E_T$  為缺陷的能量， $E_F$  為電晶體通道的費米能階，則 $\langle\tau_c\rangle$ 與 $\langle\tau_e\rangle$ 會與上述兩者有如 Eq.2-4 的關係：

$$\frac{\langle\tau_c\rangle}{\langle\tau_e\rangle} = g \exp\left(\frac{E_T - E_F}{k_B T}\right) \quad (2-4)$$

其中  $k_B$  為波茲曼常數、 $T$  為溫度以及  $g$  為退化因子通常為 1， $\langle\tau_c\rangle$ 與 $\langle\tau_e\rangle$ 除了與缺陷能量有上述關係之外，還可以萃取缺陷的垂直深度如表 2-1 所示，其中  $x_{T1}$  表示介面氧化層中的缺陷距離通道的距離、 $x_{T2}$  表示高介電質氧化層中的缺陷距離通道的距離、 $k_B$  為波茲曼常數、 $T$  為溫度、 $T_{ox1}$  表示介面氧化層厚度、 $T_{ox2}$  表示高介電質氧化層厚度、 $\epsilon_{ox1}$  為介面氧化層的介電常數、 $\epsilon_{ox2}$  為高介電質氧化層的介電常數以及  $\Psi_s$  為表面電位，因為缺陷與閘極或是通道作用如圖 2-7[42]，萃取的運算會不一樣，主要是因為當與通道作用時，隨著閘極的正偏壓增加，缺陷能量隨之降低而使得 $\langle\tau_c\rangle$ 下降但 $\langle\tau_e\rangle$ 卻上升，反之當與閘極作用時，隨著閘極正偏壓增加，閘極的費米能階越來越低，相對的缺陷能量比費米能階越來越高而使得 $\langle\tau_c\rangle$ 下降但 $\langle\tau_e\rangle$ 卻上升，因此缺陷深度得分這兩種情形來討論，而缺陷在高介電質材料中還是介面氧化層中主要會因為介電常數的不同而造成深度得用介電

常數去做修正。

在這章中對元件、實驗環境以及會用到的萃取方法有所了解後，在下一章我們將會去做照射前所做的 RTN 量測與照射後的 RTN 的分析比較，也是本論文的重點所在。



表 2-1 在不同閘極介電層的缺陷垂直深度萃取方式[42]。

<p>1. 當介面氧化層的缺陷與通道中的電荷做交換，能帶對應如圖 2-7(a)。</p> $x_{T1} = \left( T_{OX1} + \frac{\epsilon_{OX1}}{\epsilon_{OX2}} T_{OX2} \right) \left( \frac{k_B T}{q} \frac{d \ln(\tau_c / \tau_e)}{dV_G} + \frac{d\psi_s}{dV_G} \right) \left( \frac{d\psi_s}{dV_G} - 1 \right)$
<p>2. 當高介電質氧化層的缺陷與通道中的電荷做交換。</p> $x_{T2} = \left( T_{OX2} + \frac{\epsilon_{OX2}}{\epsilon_{OX1}} T_{OX1} \right) \left( \frac{k_B T}{q} \frac{d \ln(\tau_c / \tau_e)}{dV_G} + \frac{d\psi_s}{dV_G} \right) \left( \frac{d\psi_s}{dV_G} - 1 \right) + \left( 1 - \frac{\epsilon_{OX2}}{\epsilon_{OX1}} \right) T_{OX1}$
<p>3. 當介面氧化層的缺陷與閘極中的電荷做交換。</p> $x_{T1} = \left[ 1 - \frac{k_B T}{q} \frac{d \ln(\tau_c / \tau_e)}{dV_G} \left( 1 - \frac{d\psi_s}{dV_G} \right) \right] \left( T_{OX1} + \frac{\epsilon_{OX1}}{\epsilon_{OX2}} T_{OX2} \right)$
<p>4. 當高介電質氧化層的缺陷與閘極中的電荷做交換，能帶對應如圖 2-7(b)。</p> $x_{T2} = \left[ 1 - \frac{k_B T}{q} \frac{d \ln(\tau_c / \tau_e)}{dV_G} \left( 1 + \frac{\epsilon_{OX2} T_{OX1}}{\epsilon_{OX1} T_{OX2}} \right) \left( 1 - \frac{d\psi_s}{dV_G} \right) \right] T_{OX2} + T_{OX1}$

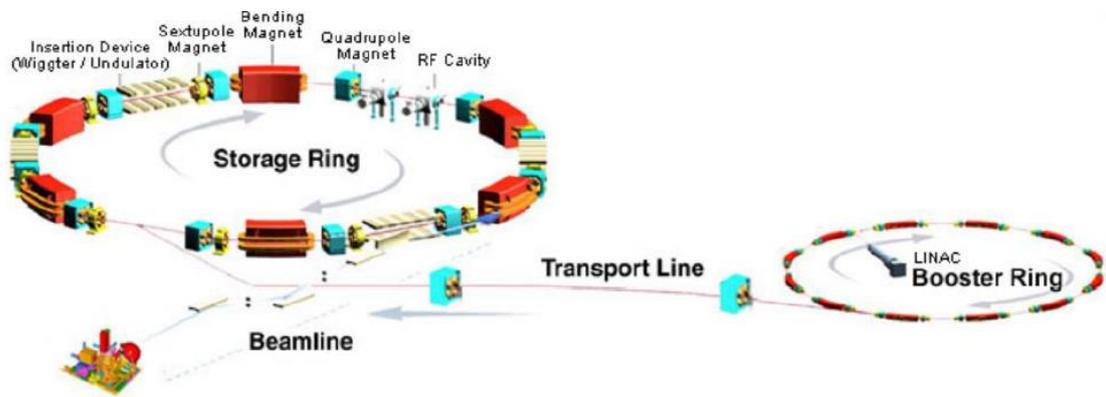
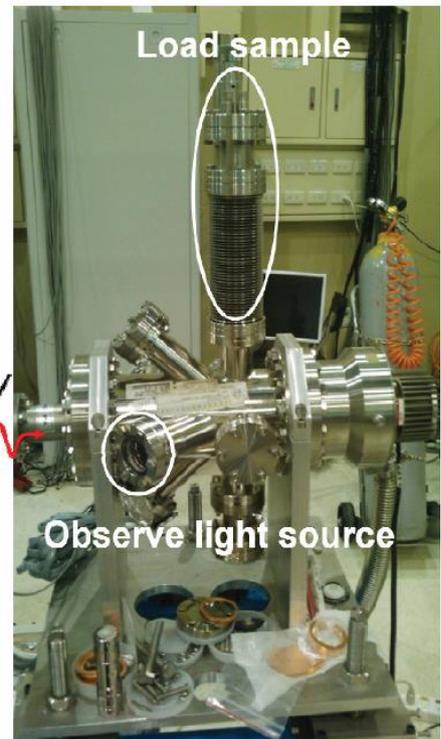
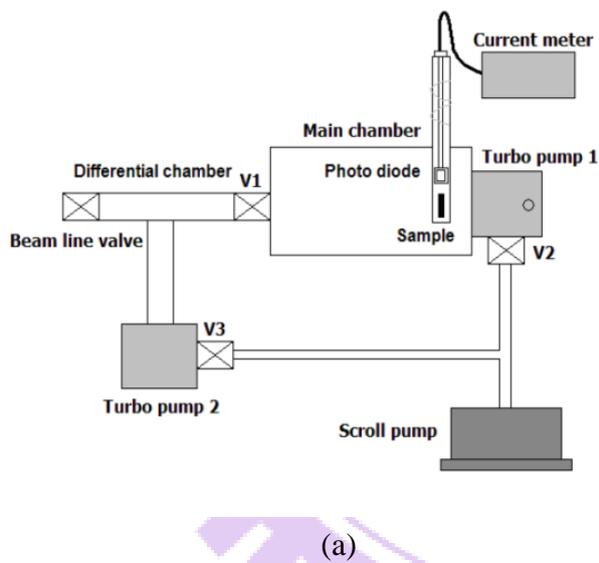


圖 2-1 在 NSRRC 中同步加速器運行方式，主要是由增能環以及儲存環所構成，此圖由 NSRRC 網站提供。



(b)

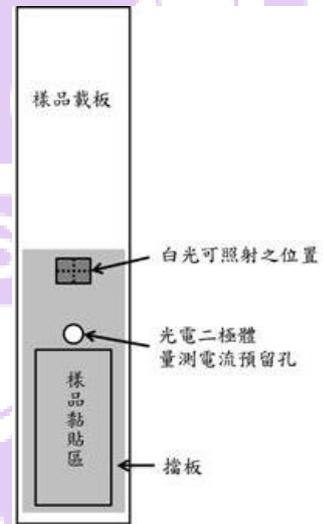
圖 2-2 (a)為使用的腔體區塊概念圖(b)為實體架構圖[39]。



圖 2-3 實驗站 08A1 光束線射出的光線樣子，大小為  $0.016 \text{ cm}^2$ [39]。



(a)



(b)

圖 2-4 (a)放置樣品載板實體圖，鐵板可插進主腔體中進行 EUV 的輻射照射，後面的接線連接到光二極體[39](b)樣品載板區塊示意圖。

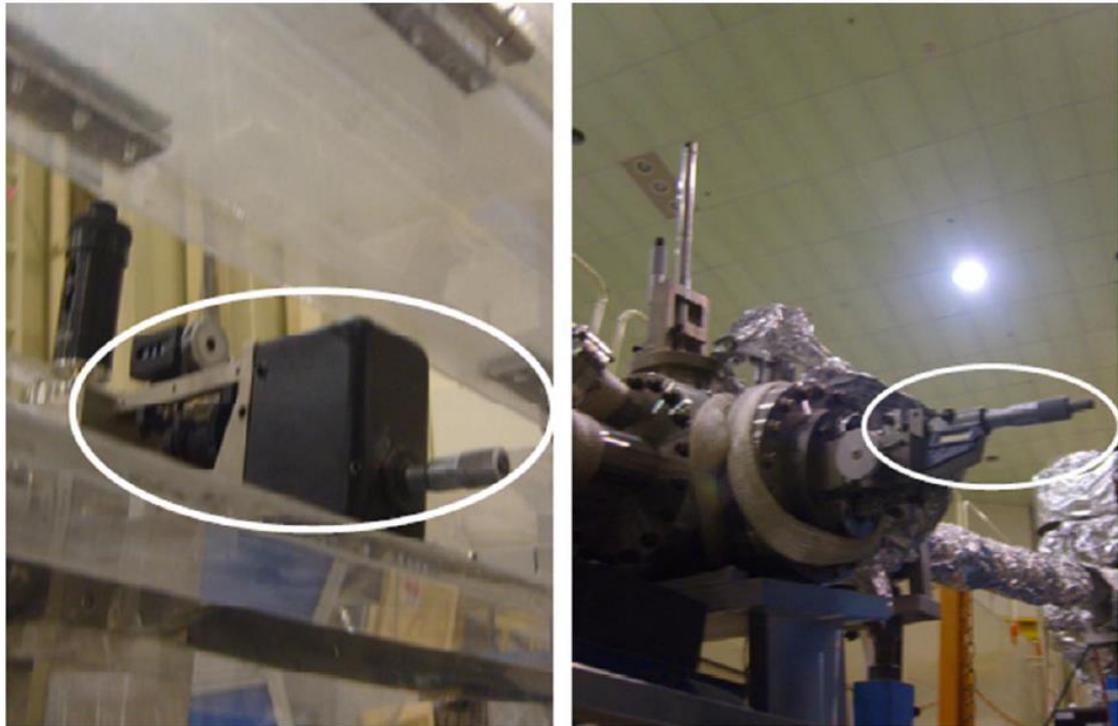


圖 2-5 左邊為水平光柵右邊為垂直光柵[39]。

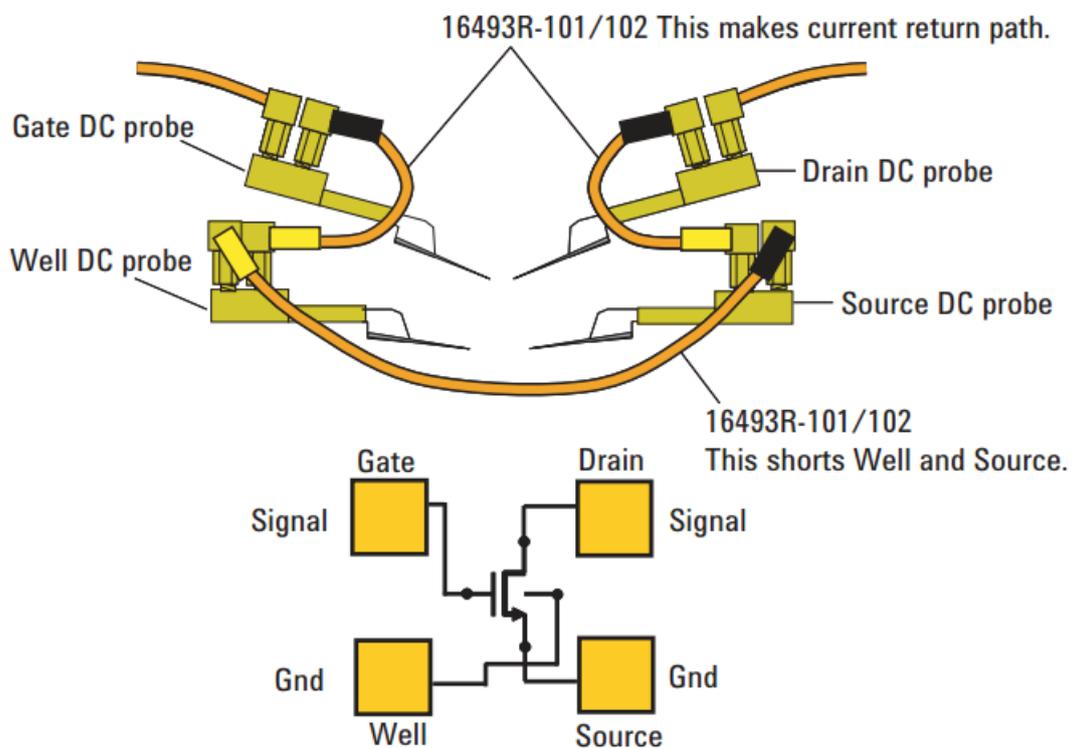


圖 2-6 量測 RTN 所用源極與基底共接地接法，由安捷倫網站提供。

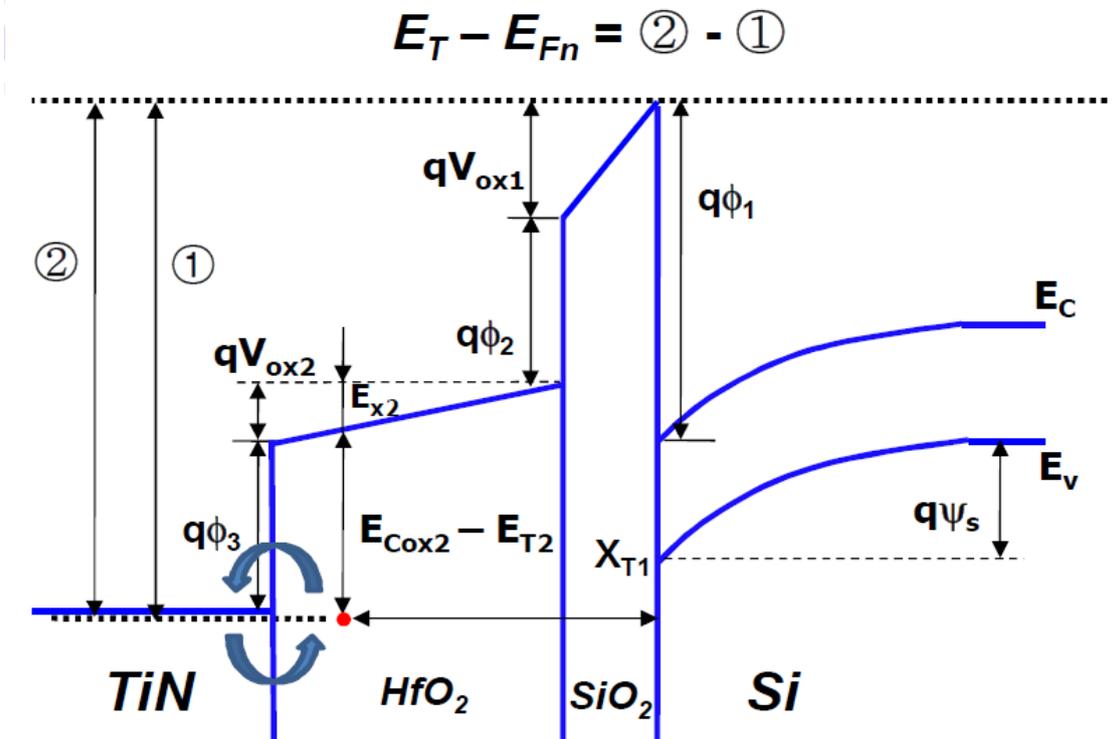
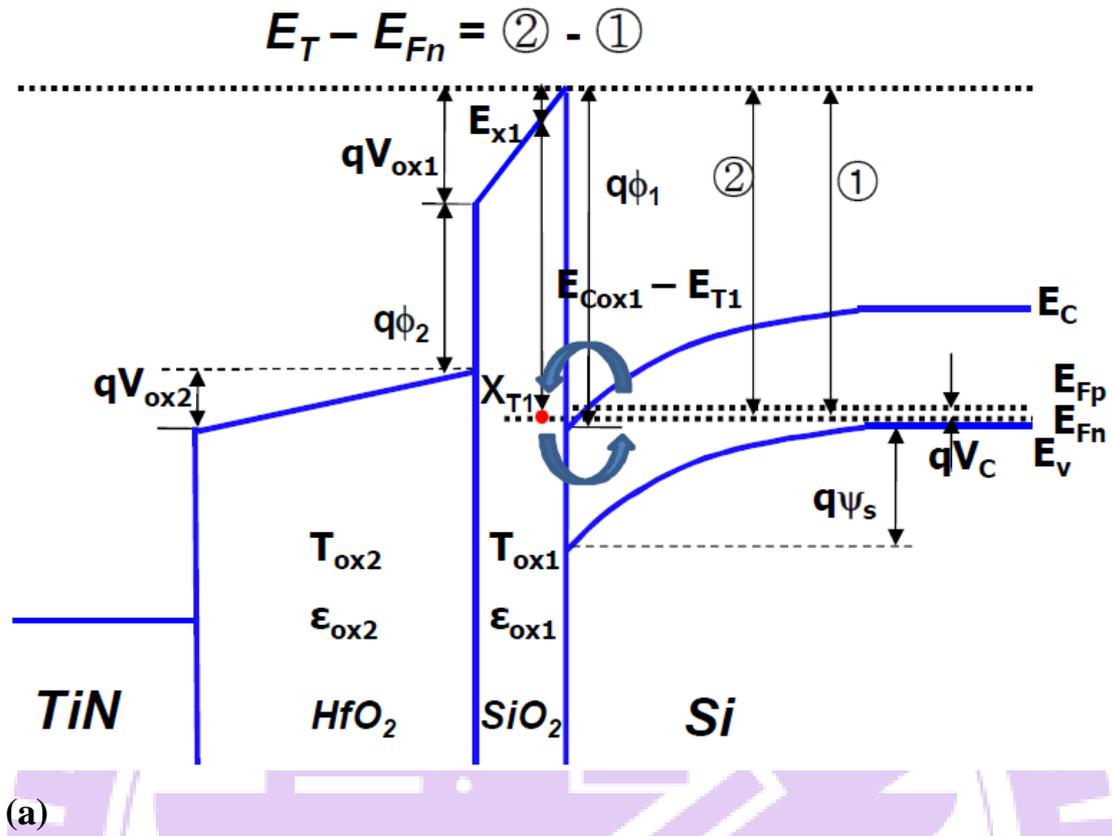


圖 2-7 (a)為介面氧化層的缺陷與通道中的電荷交換時的能帶圖(b)為高介電質氧化層的缺陷與閘極中的電荷交換時的能帶圖[42]。

# 第三章

## 結果與討論

### 3-1 介紹

在這一章節中我們將分析 nMOSFET 在 EUV 照射下的電性變化，基本特性的變化包含  $I_D-V_G$ 、臨界電壓以及 RTN 的時間常數和 PSD 分析，而結果將會分為照射前有量到 RTN 現象的元件在 70、500、1000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  等不同劑量下的變化，另外一部分則是會去探討在照射前沒有量到 RTN 的元件在分別照射 500 與 1000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  後產生的 RTN 現象，各種劑量下所量測的元件數以及有特殊現象的元件數目整理如表 3-1。

### 3-2 輻射對既有 RTN 元件的影響

在這裡我們將只做照射前後都有 RTN 的元件做比較，我們將分別以低劑量 (70  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )、中劑量 (500  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) 以及高劑量 (1000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) 去做分析。

#### 3-2-1 劑量 70 $\text{mJ}/\text{cm}^2$

在這一小節當中我們將探討 nMOSFET 在低劑量 70  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  的照射下所產生的影響，首先看閘極長度為 0.15  $\mu\text{m}$ 、寬度為 0.2  $\mu\text{m}$  的元件 A 的  $I_D-V_G$  特性(圖 3-1)，從圖中可以看到臨界電壓( $V_t$ )往負的方向移動了 22 mV，這代表介電層當中有正電荷產生，而在元件關閉時漏電流的部分，照射前可以觀察到 GIDL 現象，但照射後因為介電層中正電荷的影響使得閘極/汲極重疊處的能帶彎曲減緩，因

此在相同的偏壓範圍沒有 GIDL 現象，而次臨界擺幅(subthreshold swing)也從 69.9 mV/decade 增加到 77.47 mV/decade，表示介面態密度增加。根據以上觀察，輻射確實讓元件受到了損傷因而特性變差。

RTN 的情形如圖 3-2，從圖中可以看到 RTN 發生的區域是在元件完全導通的時候，也可以看到  $V_G$  的上升將使得缺陷填電子的機率變高因此  $\tau_c$  下降而  $\tau_e$  上升的情形，而照射前與照射後的時間常數也變了，推測是輻射產生的正電荷距離產生 RTN 的缺陷太近，降低 RTN 缺陷的能障高度如圖 3-3，因而影響了時間常數。最後由圖 3-4 的低頻雜訊的 PSD 圖看到照射前與照射後沒有明顯的改變，斜率都在 -1.65~-1.85 之間，表示元件的低頻雜訊仍以 RTN 為主，且輻射並未產生新的 RTN 缺陷。

接著觀察閘極長度為 0.1  $\mu\text{m}$ 、寬度為 0.2  $\mu\text{m}$  的元件 B 的  $I_D$ - $V_G$  特性(圖 3-5)，臨界電壓因為介電層正電荷的增加往負方向位移了 20 mV，而漏電流也有上升的趨勢，這個漏電流主要產生的原因為淺溝渠隔離的 Field oxide 因為 EUV 照射後產生正電荷[43]，使得淺溝渠隔離氧化物下方的矽表面產生空乏層，在空乏層中介面缺陷可以作為電子-電洞對的激發中心(generation center)，因此使得漏電上升，如圖 3-6 所示。次臨界擺幅從 76.91 mV/decade 變成 81.47 mV/decade。RTN 在不同偏壓下的情形如圖 3-7 所示，發生在元件完全導通時且一樣有  $V_G$  上升因而  $\tau_c$  下降且  $\tau_e$  上升的情形，此外照前與照後時間常數並沒有太大的改變，因此產生 RTN 的缺陷並沒有受到介電層中正電荷太大的影響。而低頻雜訊的 PSD 圖如圖

3-8 所示，和元件 A 的情形一樣，照射前和照射後並沒有太大的差別。

nMOSFET 經過  $70\text{mJ}/\text{cm}^2$  的照射特性變化整理如表 3-2，元件特性確實是受到輻射的影響而改變，RTN 部分則是照射後可能會因為介電層中的正電荷使得缺陷能量改變而造成時間常數的變化。

### 3-2-2 劑量 $500\text{mJ}/\text{cm}^2$

分析完  $70\text{mJ}/\text{cm}^2$  低劑量的照射情形，接著討論中劑量  $500\text{mJ}/\text{cm}^2$  的影響。閘極長度  $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 、寬度  $0.2\text{ }\mu\text{m}$  的元件 C 的  $I_D-V_G$  特性如圖 3-9 所示，臨界電壓移動了  $-19\text{ mV}$ ，但是漏電流相較於低劑量 ( $70\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) 的情形卻上升了不少，這也代表輻射照射在淺溝渠隔離氧化物所造成的電荷密度上升，矽表面空乏區增加，造成漏電流上升了很多，另外次臨界擺幅也從  $69.46\text{ mV/decade}$  增加到  $77.27\text{ mV/decade}$ ，nMOSFET 的特性明顯劣化了不少。

RTN 特性變化如圖 3-10 所呈現，發生在完全導通時，且時間常數並沒有因為照射後而有太大的改變，代表氧化物缺陷正電荷並沒有太大的影響到 RTN 的缺陷。低頻雜訊的 PSD 如圖 3-11 所示，斜率和大小也沒有太大的變化。

閘極長度  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、寬度  $0.2\text{ }\mu\text{m}$  的元件 D，其  $I_D-V_G$  特性如圖 3-12 所示，可以看到臨界電壓往負位移了  $20\text{ mV}$ ，off-current 上升約 29 倍，而次臨界擺幅從  $71.03\text{ mV/decade}$  增加到  $80.42\text{ mV/decade}$ ，整體劣化程度和元件 C 相當。

RTN 的部分，電流隨時間變化的特性如圖 3-13 所示，有趣的是在圖 3-12 在閘極偏壓  $0.4\text{-}0.5\text{ V}$  附近有一個很明顯的電流抖動，剛好是 RTN 發生的區間。電

流發生明顯抖動的主要原因是在次臨界電壓區間，電流和表面電位是指數關係，遠比導通之後敏感，因此單一電荷的捕獲和發射，就會造成的很大的電流變化。

這個元件的 RTN 時間常數也受到了氧化物缺陷正電荷的影響，而低頻雜訊的 PSD 的圖則如圖 3-14 所示，可以看到照射前與照射後的強度有明顯上升。根據

Eq.3-1 換算 PSD 的公式：

$$S_{I_d}(f) = \frac{\kappa}{1+(f/f_0)^2} \quad (\text{Eq.3-1})$$

其中  $\kappa = \frac{4\tau^2(\Delta I_D)^2}{\langle\tau_e\rangle + \langle\tau_c\rangle}$ ， $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau}$  且  $\frac{1}{\tau} = \left(\frac{1}{\langle\tau_e\rangle + \langle\tau_c\rangle}\right)$ ，因此我們去除掉電流改變量的因素做歸一化，如圖 3-15 所示，就可以看到照射前後幾乎沒有什麼變化。

nMOSFET 經過 500 mJ/cm<sup>2</sup> 劑量的照射影響整理如表 3-3，我們看到相較於低劑量(70 mJ/cm<sup>2</sup>)照射，中劑量(500 mJ/cm<sup>2</sup>)照射對元件的損傷更嚴重，RTN 方面則是和低劑量一樣有些元件的時間常數會受到改變有些則不會，取決於氧化層中增加的正電荷和造成 RTN 的缺陷的相關位置。

### 3-2-3 劑量 1000 mJ/cm<sup>2</sup>

最後分析高劑量(1000 mJ/cm<sup>2</sup>)的影響。閘極長度 0.15 μm、寬度 0.2 μm 的元件 E，其 I<sub>D</sub>-V<sub>G</sub> 特性如圖 3-16 所示，臨界電壓往負的方向移動了 29 mV，漏電流增加 64 倍，比中劑量照射上升更多一些，次臨界擺幅從 70.47 mV/decade 增加到 78.57 mV/decade，整體劣化更為嚴重。

RTN 的變化如圖 3-17，發生在接近導通時，一樣因為缺陷能量受到了氧化物缺陷正電荷的影響，造成時間常數縮短，低頻雜訊的 PSD 如圖 3-18，照射前

與照射後沒有太大的差別。

閘極長度  $0.12\ \mu\text{m}$ 、寬度  $0.2\ \mu\text{m}$  的元件 F，基本特性的  $I_D-V_G$  圖如圖 3-19，臨界電壓移動了  $-20\ \text{mV}$ ，漏電流接近  $0.1\ \text{nA}$ ，次臨界擺幅變化更是劇烈，從  $78.99\ \text{mV/decade}$  變成  $92.47\ \text{mV/decade}$ 。RTN 如圖 3-20，雖然發生在次臨界電壓卻因為電流變化不大所以不影響  $I_D-V_G$  圖，而時間常數沒有變化，低頻雜訊的 PSD 圖(圖 3-21)，照射前後並沒有改變。

$1000\ \text{mJ/cm}^2$  輻射劑量的照射前後的變化整理在表 3-4 中，我們可以看到高劑量確實又讓 nMOSFET 的特性劣化得更嚴重，RTN 的時間常數有些元件受到改變，但有些卻不太受影響，取決於氧化層中增加的正電荷和造成 RTN 的缺陷的相關位置。

### 3-3 輻射所造成的 RTN

在這小節中我們將研究由於輻射傷害讓原本沒有 RTN 現象的元件產生 RTN 現象。 $70\ \text{mJ/cm}^2$  的元件，照射 30 個，均未發生此現象，只在照射  $500\ \text{mJ/cm}^2$  與  $1000\ \text{mJ/cm}^2$  劑量的元件中找到，因此只能從中高劑量進行分析。

#### 3-3-1 劑量 $500\ \text{mJ/cm}^2$

圖 3-22 顯示閘極長度  $0.1\ \mu\text{m}$ 、寬度  $0.2\ \mu\text{m}$  的元件 G 照射前後的基本電性。臨界電壓往正電壓方向移動了  $17\ \text{mV}$ ，造成這樣的結果主要是因為此元件在照射中產生大量的介面缺陷，使得次臨界擺幅從  $71.28\ \text{mV/decade}$  大幅增加到  $95.7$

mV/decade，因抵銷了氧化物缺陷正電荷降低臨界電壓的作用。漏電流如同之前的各個元件，受到了輻射影響而讓漏電流上升。

RTN 的特性如圖 3-23 所示，很明顯地看到原本為固定電流的元件因為 EUV 的輻射傷害而開始產生 RTN 的現象，此現象發生在完全導通時，同時我們也發現了一個如圖 3-24 的有趣現象，製程中所產生的缺陷所引發的 RTN 現象並不會有在量測過程中長時間捕獲電子的情形，但是輻射所產生的缺陷卻會發生這樣的情形，並且重新加偏壓再量一次也一樣只有前段時間回復正常的捕獲/發射電荷，後段時間也長時間處於捕獲電子的狀態。這種情況也在照射 EUV 劑量為  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  的元件中發生，詳細的分析將在下一個小節中說明。從圖 3-25 再利用表 2-1 中第二個公式 - 缺陷在高介電係數介電質中且與通道反應的公式，得出缺陷是在垂直方向距離通道  $1.81 \text{ nm}$  的位置，因此是在高介電滯介電質中。低頻雜訊的 PSD 如圖 3-26 所示，很明顯地看到照後由於 RTN 的產生，雜訊強度大幅增加，讓 PSD 原本照射前斜率為接近-1 但照射後卻變為接近-2，呈現 RTN 主導的現象。

### 3-3-2 劑量 $1000 \text{ mJ/cm}^2$

最後分析閘極長度  $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ 、寬度  $0.2 \text{ }\mu\text{m}$  的元件 H，基本電性如圖 3-27，臨界電壓往負的方向移動  $30 \text{ mV}$ ，而 off-current 也是受到介面缺陷電荷的影響而使漏電流上升，次臨界擺幅則是從  $70.46 \text{ mV/decade}$  增加為  $80.35 \text{ mV/decade}$ 。RTN 變化如圖 3-28，元件 H 也因為受到輻射傷害產生缺陷因而出現 RTN 現象，同樣發生在完全導通時，也有和照射劑量  $500 \text{ mJ/cm}^2$  的元件相同的電子被長時間捕

獲的現象，如圖 3-29 所示。如果我們把時間軸拉到更長的時間來看，圖 3-30 顯示了  $V_G=0.7\text{ V}$  的情形，可以發現到  $\tau_e$  會在某些時間點急遽的上升，這種情形發生的主要因為，在同一位置上有深( $E_{T2}$ )、淺( $E_{T1}$ )兩個能階如圖 3-31，深能階低於費米能階，淺能階高於費米能階。當淺能階接近費米能階，可能捕獲電子，但是因為能量剛於費米能階，即使捕獲電子， $\tau_e$  還是比  $\tau_c$  短。但是萬一該電子因為某些因素損失能量，例如與聲子(phonon)碰撞，掉入深能階， $\tau_e$  就會變長。因為深、淺能階在空間的同一位置，捕獲一個電子後，庫倫作用力使得不易捕獲第二個電子，一旦電子從深能階逃出，又恢復淺能階捕獲電子的情形。在此我們只就淺能階的位置做時間常數的計算，並且利用表 2-1 算出缺陷的垂直位置，如圖 3-32 所示，此缺陷深度距離通道 1.618 nm，也是在閘極介電層中。低頻雜訊的 PSD 圖如圖 3-33，由於 RTN 的產生，雜訊強度變強，斜率也從接近 -1 變成接近 -2。

我們把這兩種劑量的結果整理在表 3-5，從表格看到輻射傷害確實讓元件的特性變差，並有可能會產生 RTN 現象。相較於製程缺陷所產生的 RTN，輻射照射後可能會在同一位置產生深淺能階的缺陷，會因為電子損失能量從淺掉到深能階而使得  $\tau_e$  的時間因而被拉長，但是在重新釋放電子後又能回復到原本較淺能階缺陷的時間常數。

### 3-4 小結

在第三章我們看到了輻射讓 nMOSFET 的基本特性都有明顯的變異，像是漏電流上升、次臨界擺幅以及臨界電壓都受到影響。RTN 方面則是在造成 RTN 的缺陷周圍，如果產生氧化物缺陷正電荷，時間常數會因為缺陷位能障礙降低而縮短。此外輻射也會讓原本沒有 RTN 現象的元件產生出電流隨時間而改變的 RTN 現象，而這種缺陷跟以往的製程缺陷不同，它會因為電子損失能量時掉到深能階，因而使時間常數( $\tau_e$ )受到改變，但電子若在重新釋放出去後，電子又開始與淺能階互動，讓 RTN 的現象回歸成原來的時間常數。



表 3-1 各種劑量下所量測的元件數以及有 RTN 現象的元件數目整理。

劑量( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )	70	500	1000
量測元件數	30	30	30
照射前後皆有 RTN 的元件數	2	3	2
照射後才有 RTN 的元件數	0	1	2

表 3-2 照射  $70 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  EUV 前後的元件基本特性。

劑量 $70 \text{ mJ}/\text{cm}^2$		A	B
(閘極長度, 閘極寬度)		( $0.15\mu\text{m}, 0.2\mu\text{m}$ )	( $0.1\mu\text{m}, 0.2\mu\text{m}$ )
臨界電壓(V)	照射前	0.552	0.49
	照射後	0.53	0.47
次臨界擺幅 ( $\text{mV}/\text{dec.}$ )	照射前	69.9	76.91
	照射後	77.47	81.47
RTN 發生區域		完全導通區域	完全導通區域
時間常數是否變化		有	無

表 3-3 照射  $500 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  EUV 前後的元件基本特性。

劑量 $500 \text{ mJ}/\text{cm}^2$		C	D
(閘極長度, 閘極寬度)		( $0.15\mu\text{m}, 0.2\mu\text{m}$ )	( $0.1\mu\text{m}, 0.2\mu\text{m}$ )
臨界電壓(V)	照射前	0.541	0.535
	照射後	0.52	0.515
次臨界擺幅 ( $\text{mV}/\text{dec.}$ )	照射前	69.46	71.03
	照射後	77.27	80.42
RTN 發生區域		完全導通區域	次臨界區域
時間常數是否變化		無	有

表 3-4 照射 1000 mJ/cm<sup>2</sup> EUV 前後的元件基本特性。

劑量 1000 mJ/cm <sup>2</sup>		E	F
(閘極長度, 閘極寬度)		(0.15μm, 0.2μm)	(0.12μm, 0.2μm)
臨界電壓(V)	照射前	0.61	0.613
	照射後	0.581	0.593
次臨界擺幅 (mV/dec.)	照射前	70.47	78.99
	照射後	78.57	92.47
RTN 發生區域		接近導通區域	次臨界區域
時間常數是否變化		有	無

表 3-5 照射 500 與 1000 mJ/cm<sup>2</sup> EUV 後產生 RTN 的元件基本特性。

輻射造成的 RTN		G	H
(閘極長度, 閘極寬度)		(0.1μm, 0.2μm)	(0.1μm, 0.2μm)
劑量(mJ/cm <sup>2</sup> )		500	1000
臨界電壓(V)	照射前	0.474	0.586
	照射後	0.491	0.556
次臨界擺幅 (mV/dec.)	照射前	71.28	70.46
	照射後	95.7	80.35
PSD 斜率	照射前	接近-1	接近-1
	照射後	接近-2	接近-2
RTN 發生區域		完全導通區域	完全導通區域
缺陷深度(nm)		1.81	1.618

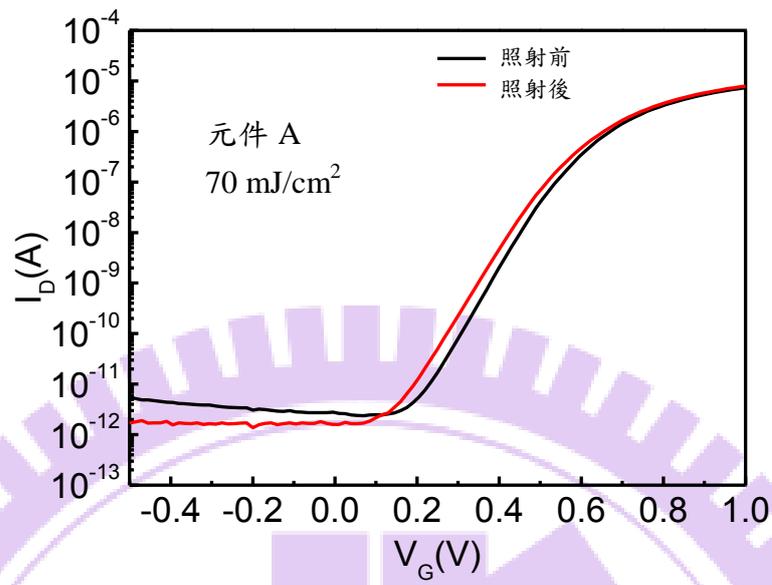


圖 3-1 照射  $70 \text{ mJ/cm}^2$  對元件 A 產生的轉換特性變化。

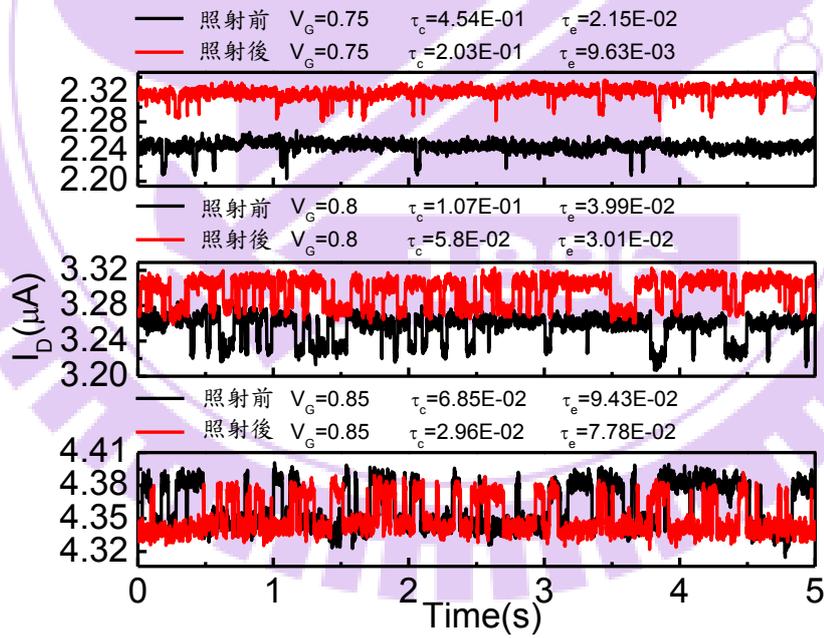


圖 3-2 元件 A 照射前與照射後 RTN 的變化。

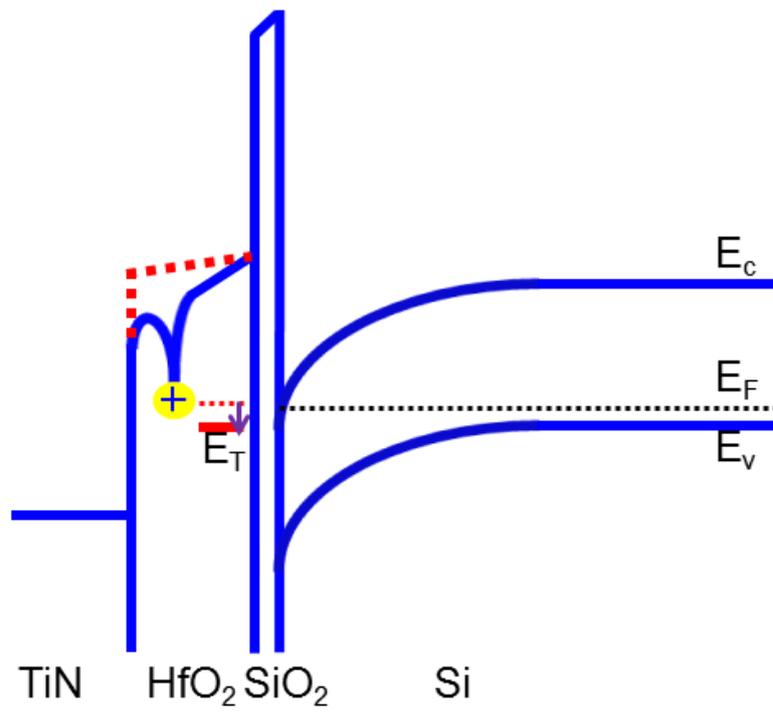
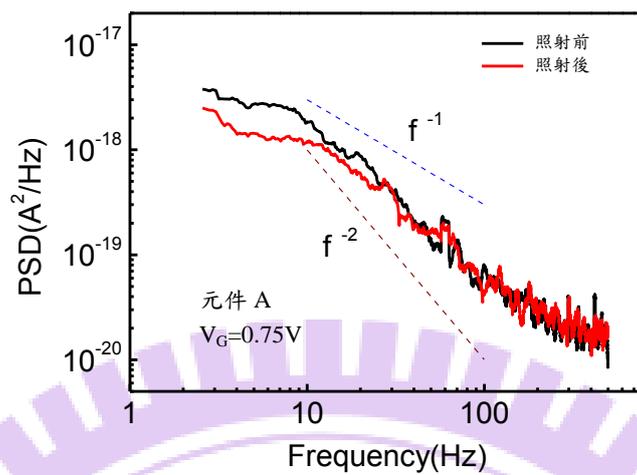
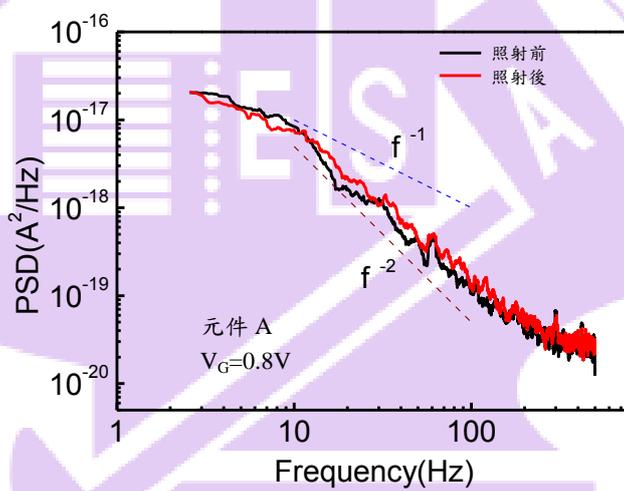


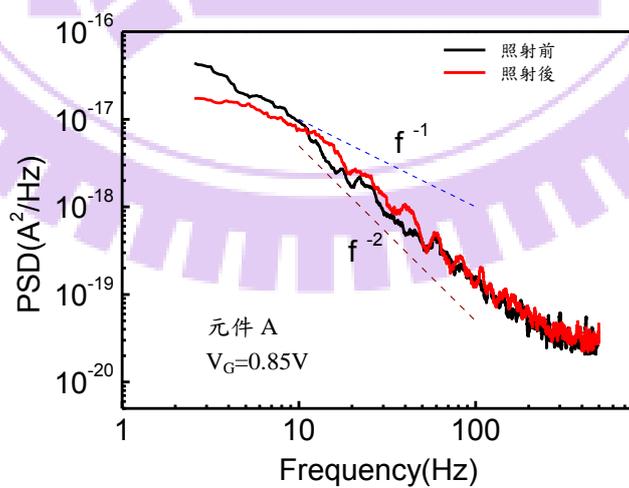
圖 3-3 輻射產生的正電荷距離產生 RTN 的缺陷太近時，將會降低 RTN 缺陷的能障高度。



(a)



(b)



(c)

圖 3-4 A 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖。

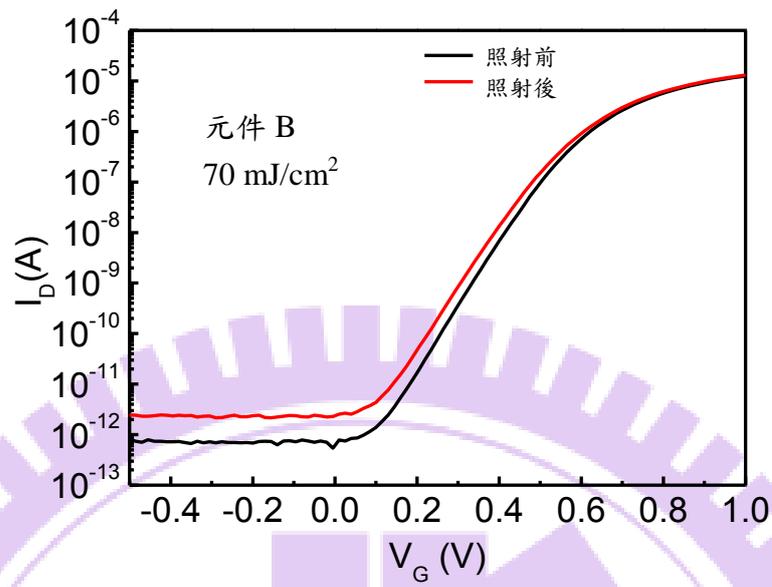


圖 3-5 照射  $70 \text{ mJ/cm}^2$  對元件 B 產生的轉換特性變化。

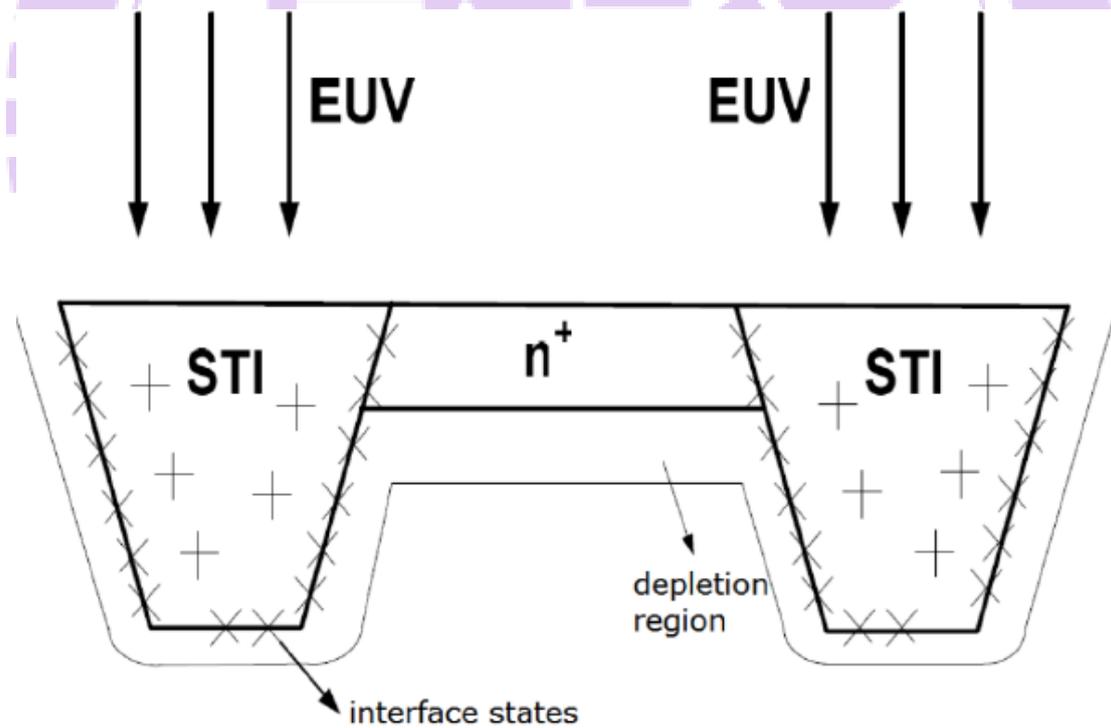


圖 3-6 照射 EUV 後增加漏電流的機制[39]。

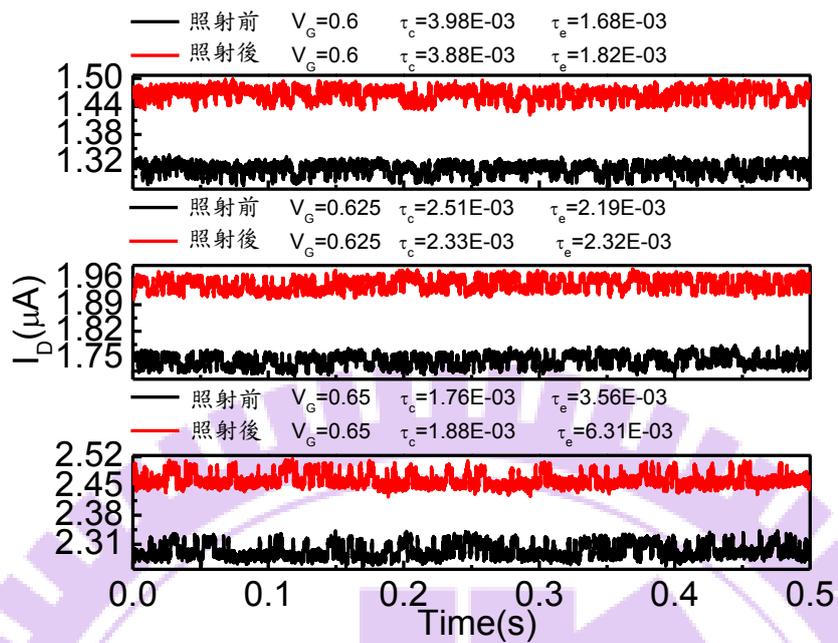
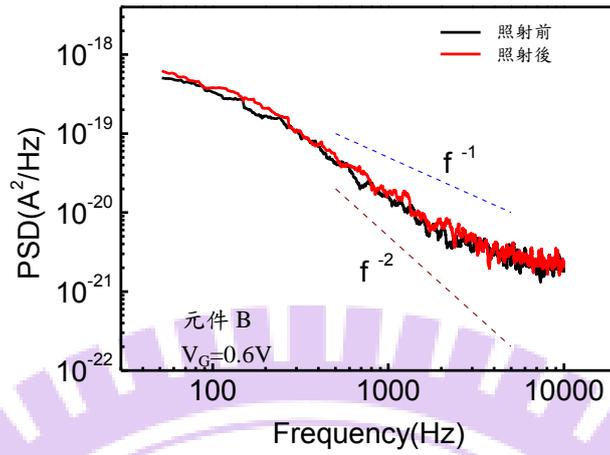
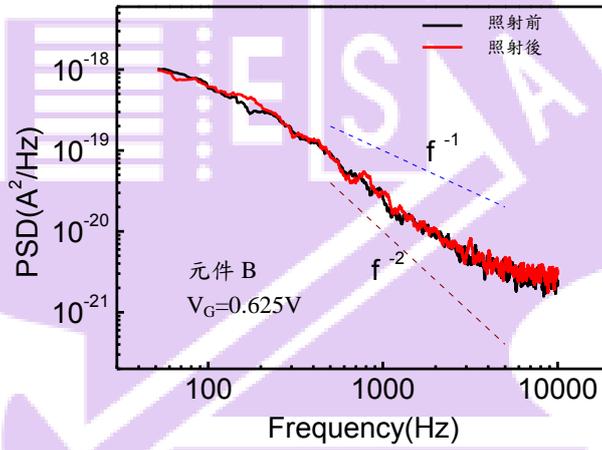


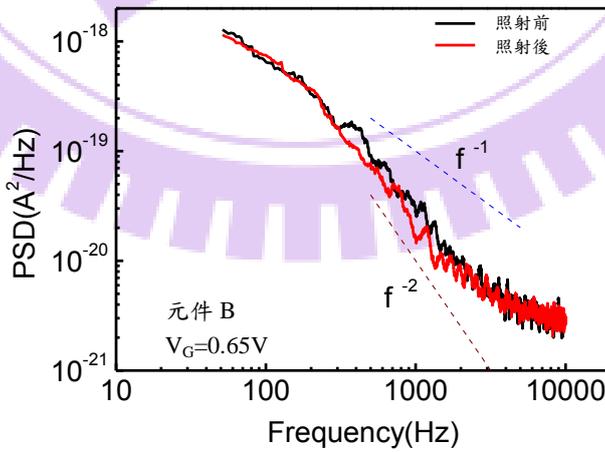
圖 3-7 元件 B 照射前與照射後 RTN 的變化。



(a)



(b)



(c)

圖 3-8 B 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖。

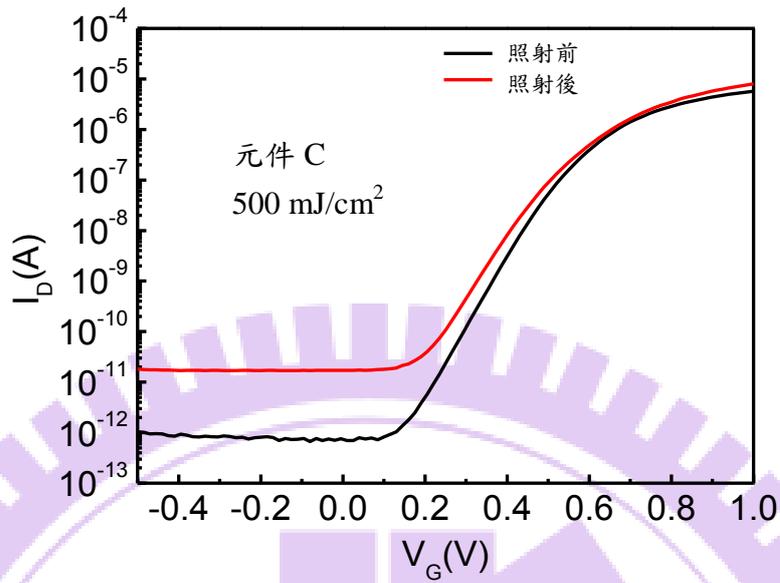


圖 3-9 照射  $500 \text{ mJ/cm}^2$  對元件 C 產生的轉換特性變化。

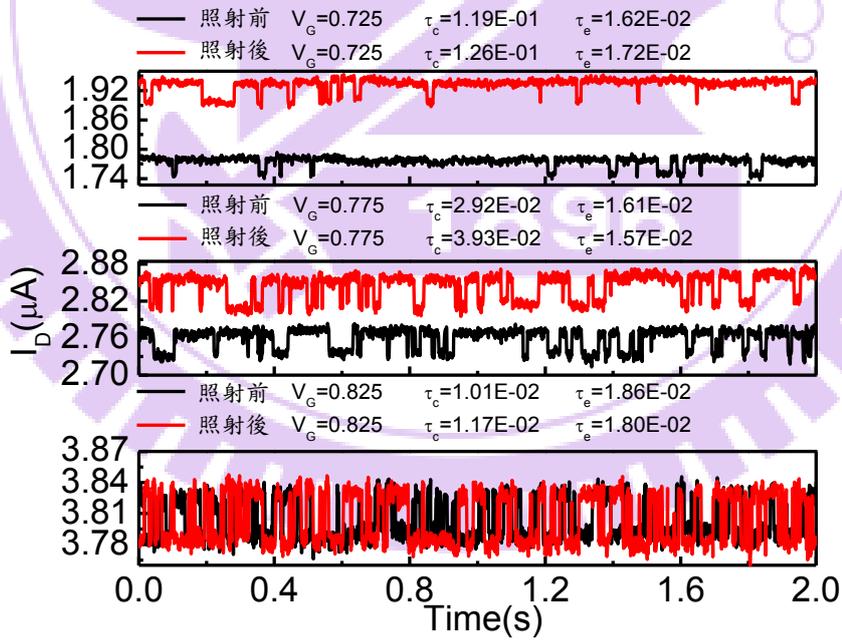
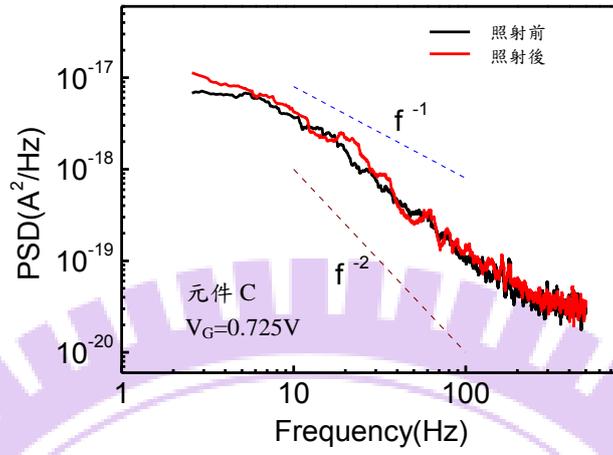
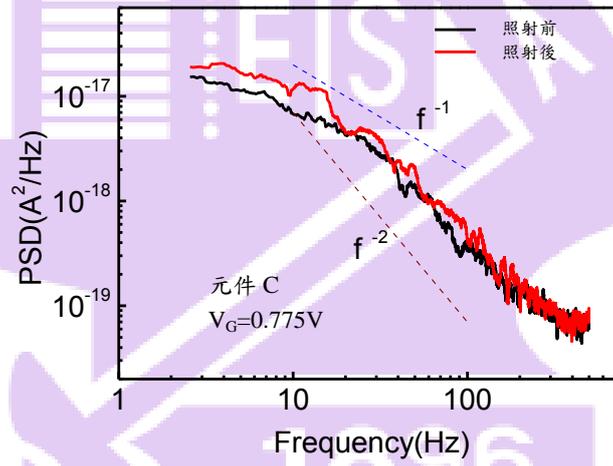


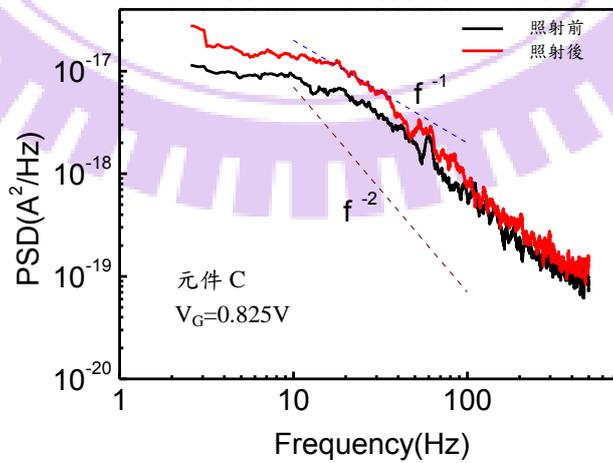
圖 3-10 元件 C 照射前與照射後 RTN 的變化。



(a)



(b)



(c)

圖 3-11 元件 C 三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖。

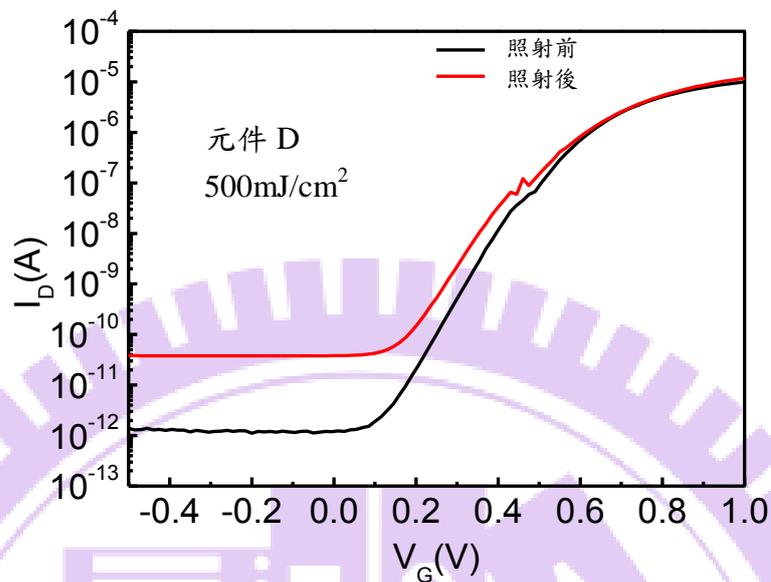


圖 3-12 照射  $500 \text{ mJ/cm}^2$  對元件 D 產生的轉換特性變化。

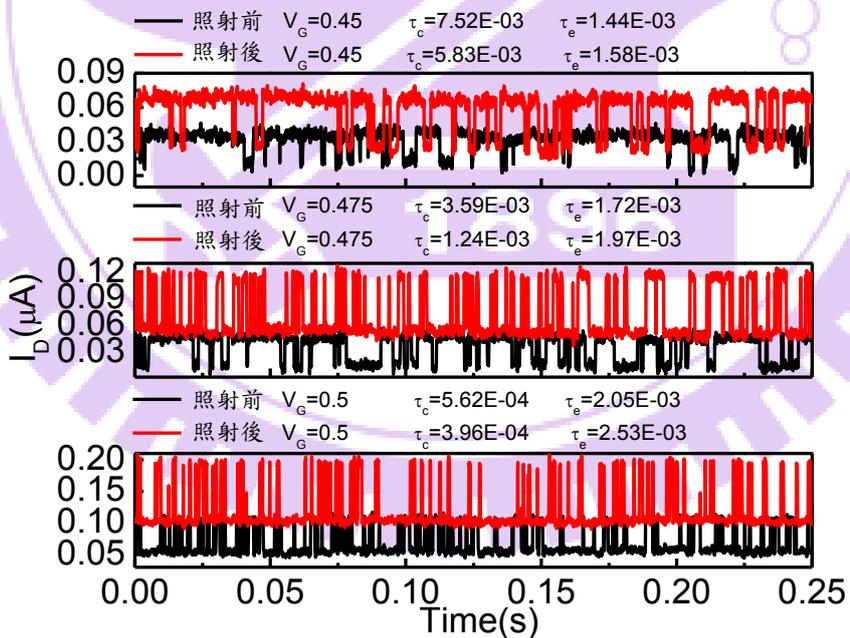
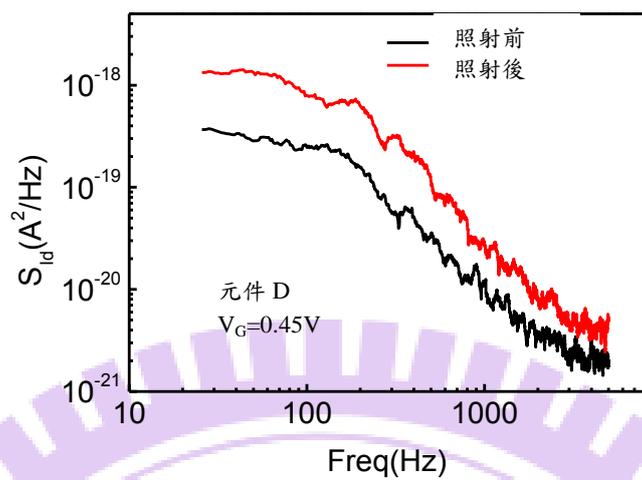
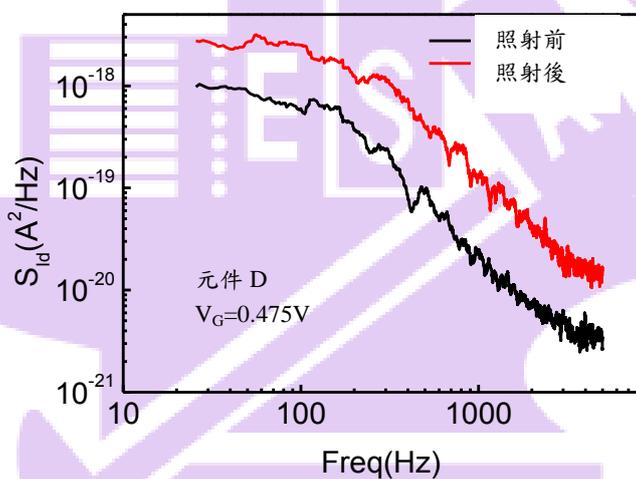


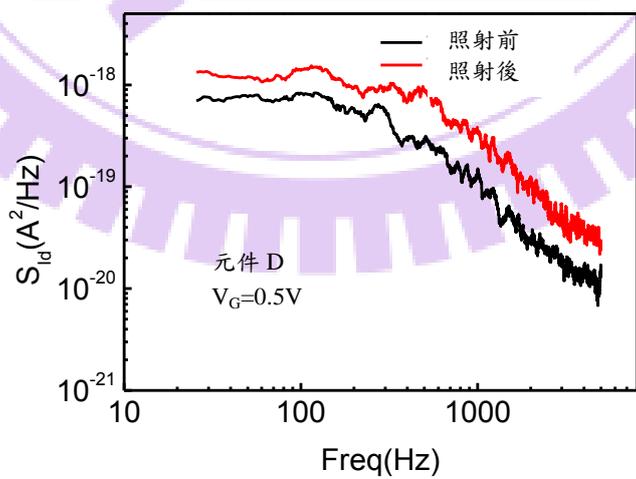
圖 3-13 元件 D 照射前與照射後 RTN 的變化。



(a)

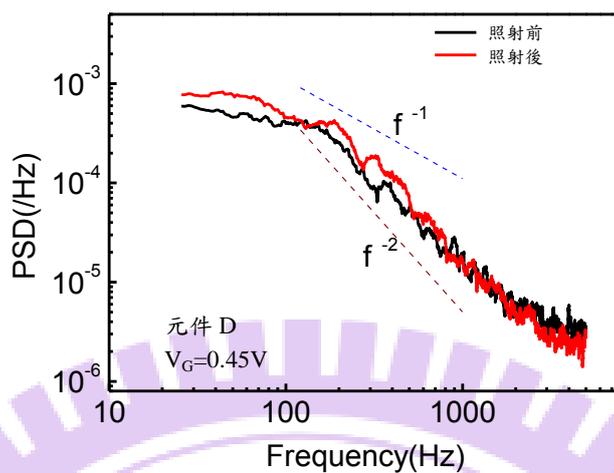


(b)

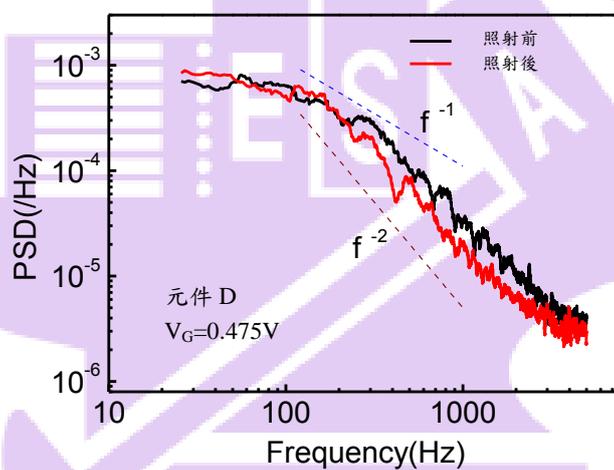


(c)

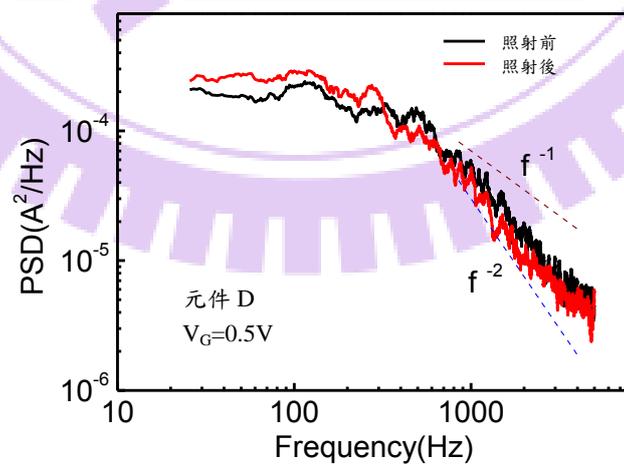
圖 3-14 D 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖。



(a)



(b)



(c)

圖 3-15 D 元件三種不同偏壓下照前與照後的歸一化 PSD 圖。

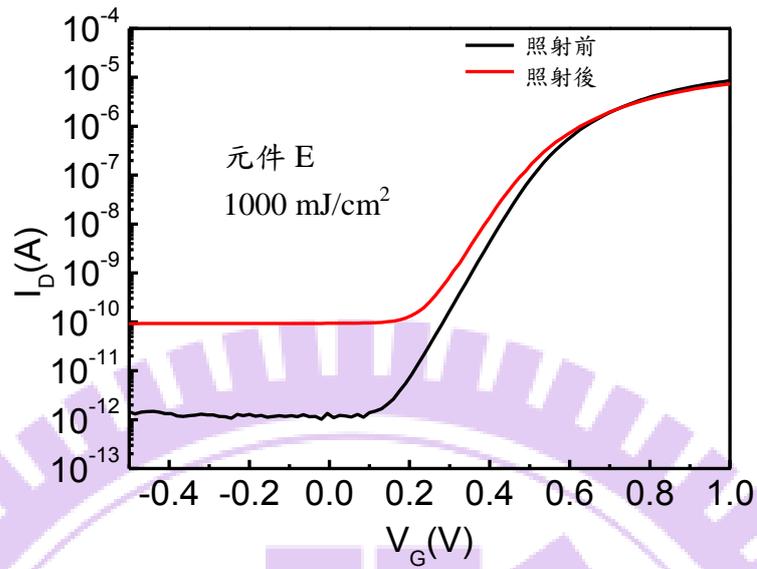


圖 3-16 照射  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  對元件 E 產生的轉換特性變化。

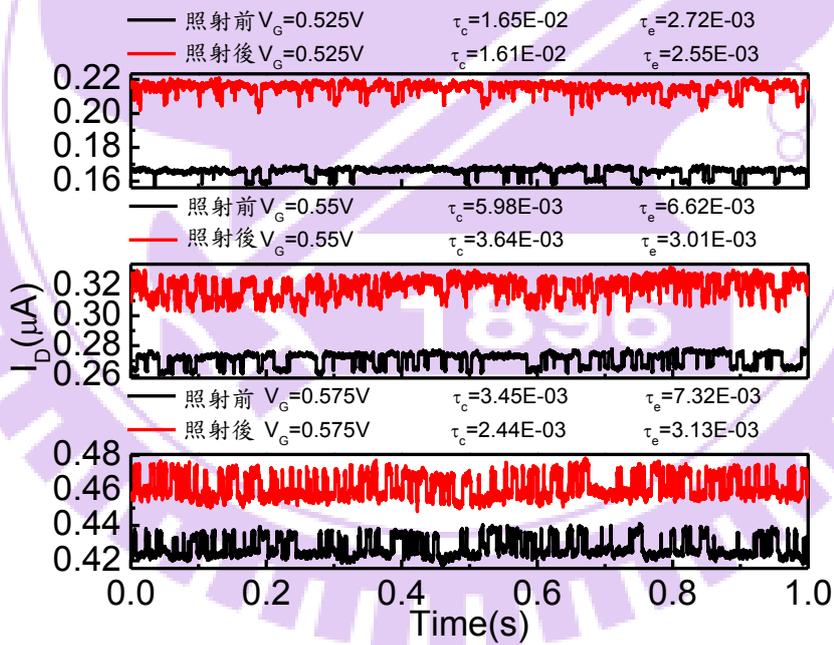
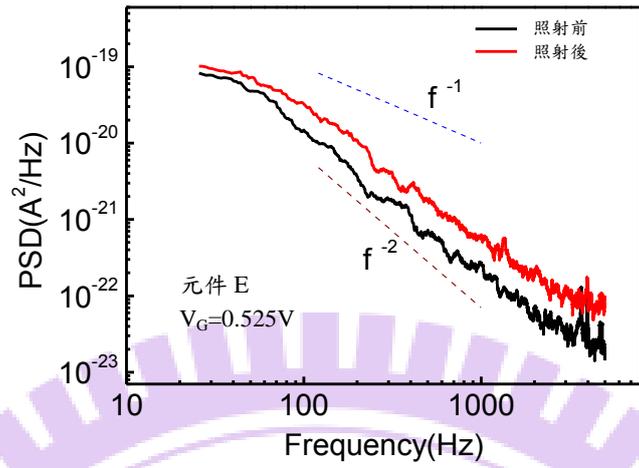
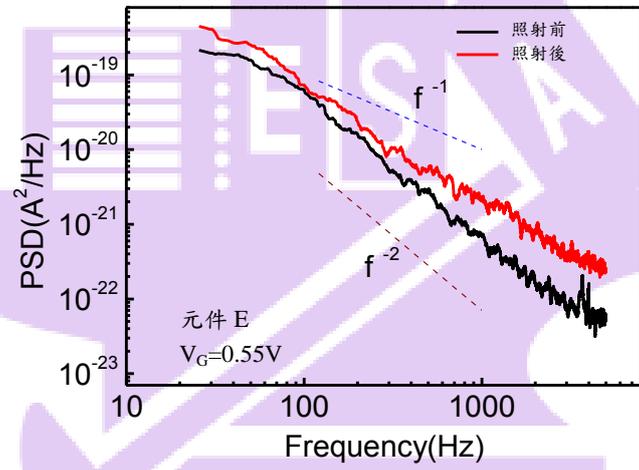


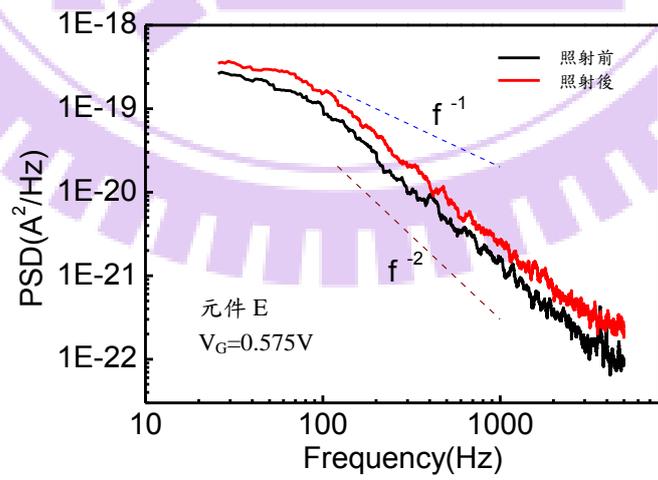
圖 3-17 元件 E 照射前與照射後 RTN 的變化。



(a)



(b)



(c)

圖 3-18 E 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖。

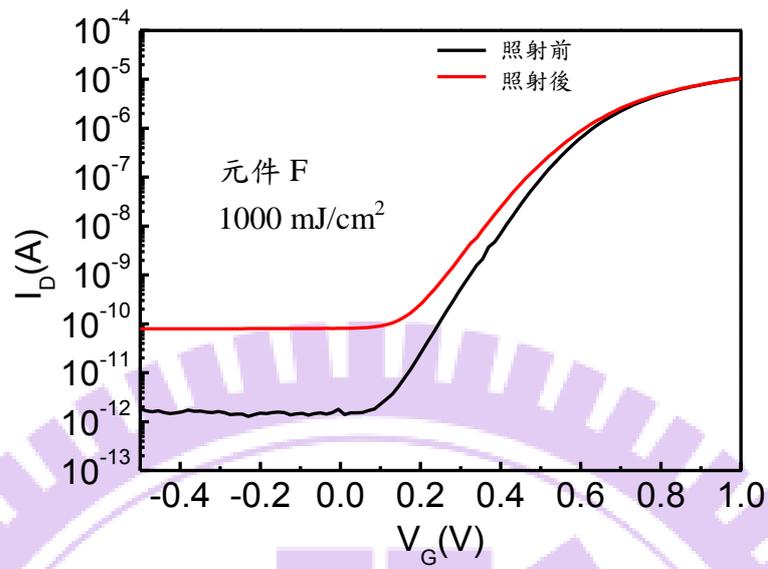


圖 3-19 照射 1000 mJ/cm<sup>2</sup> 對元件 F 產生的轉換特性變化。

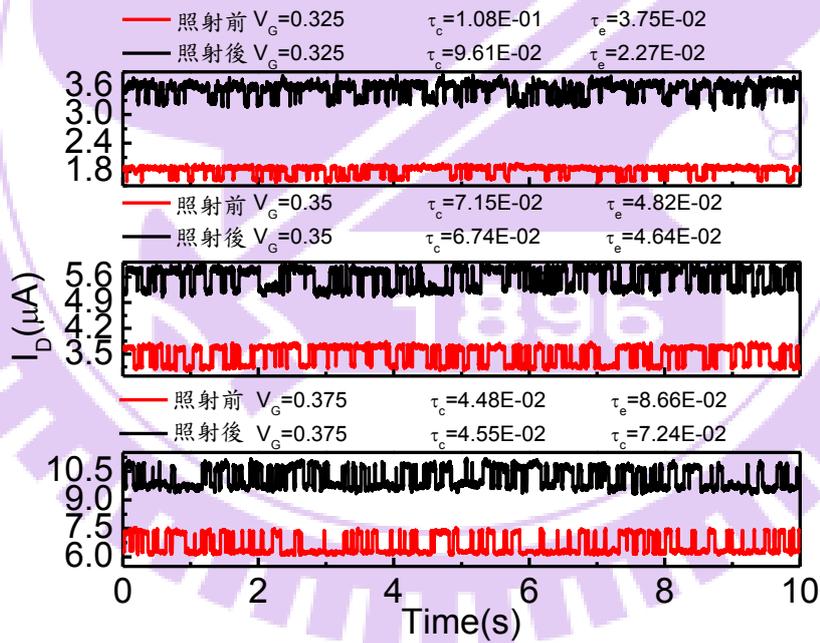
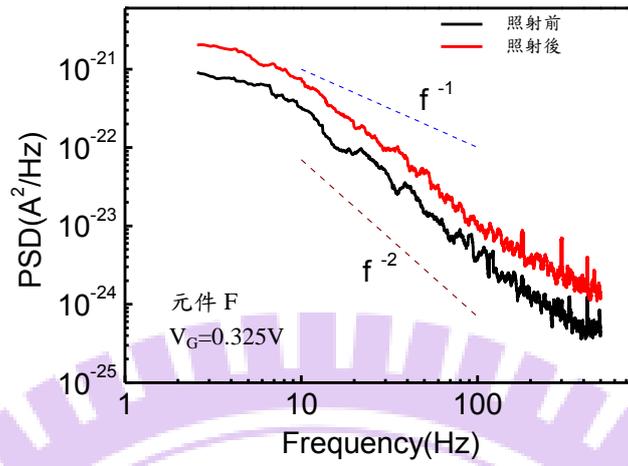
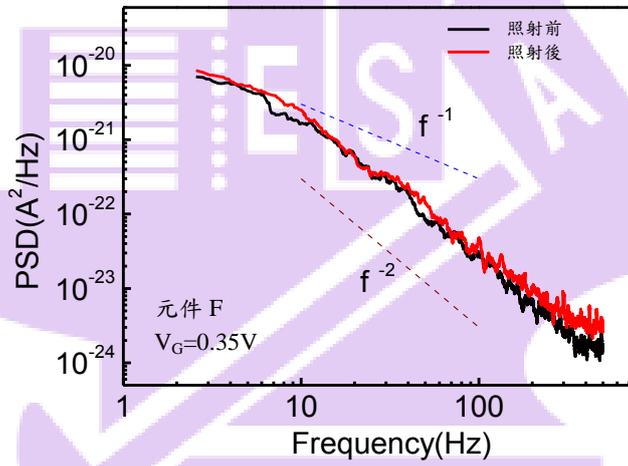


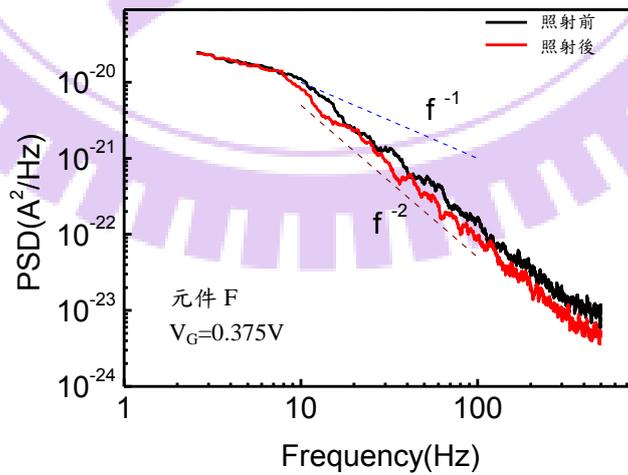
圖 3-20 元件 F 照射前與照射後 RTN 的變化。



(a)



(b)



(c)

圖 3-21 F 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖。

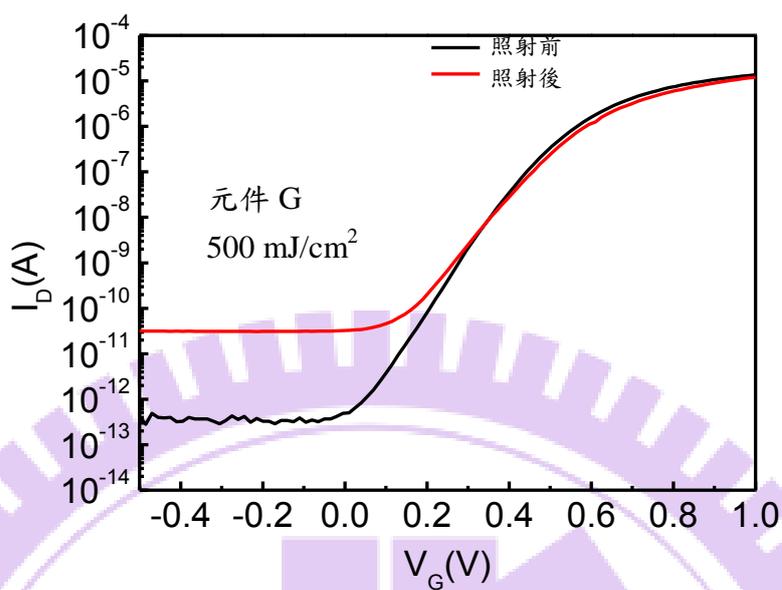


圖 3-22 照射 500 mJ/cm<sup>2</sup> 對元件 G 產生的轉換特性變化。

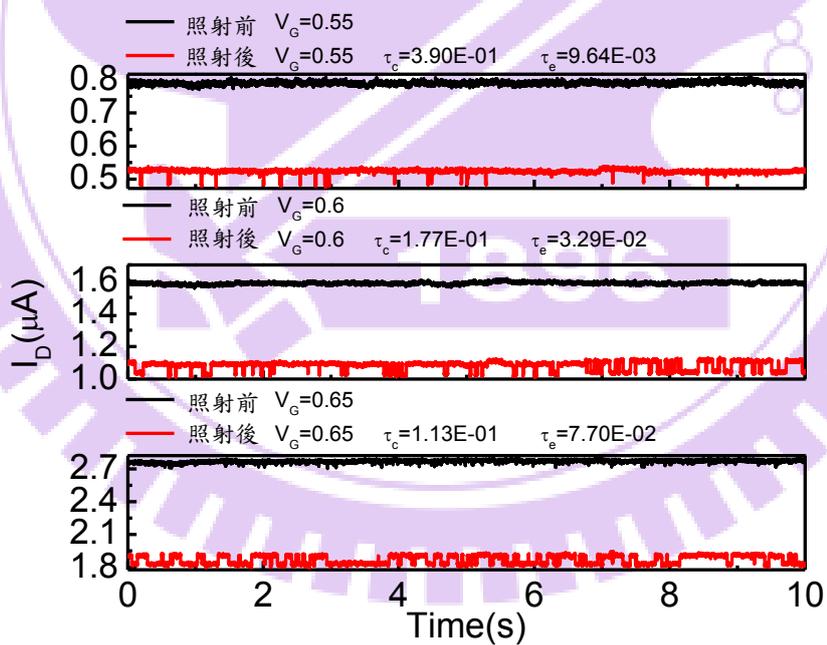


圖 3-23 元件 G 受到輻射傷害而造成的 RTN。

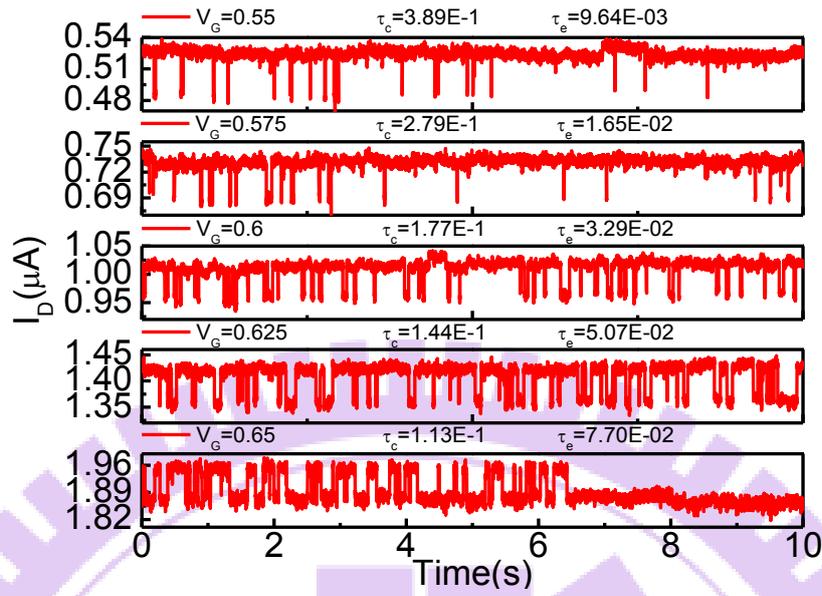


圖 3-24 輻射所產生的 RTN 發生缺陷能量移動。

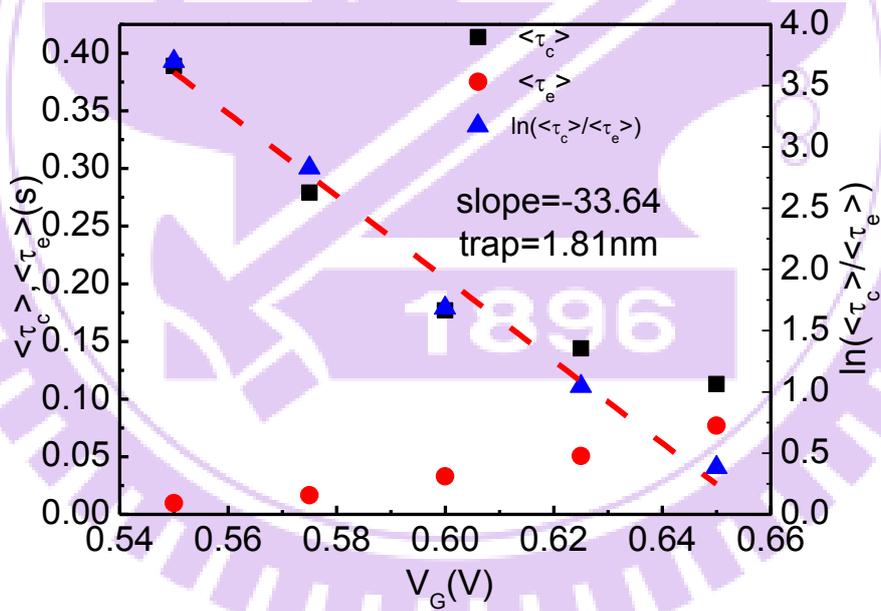
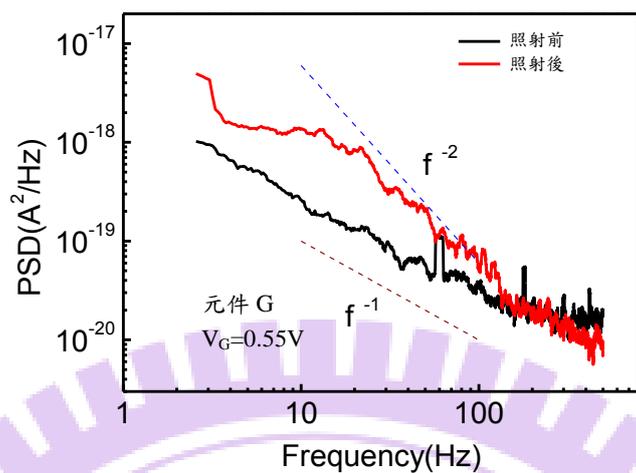
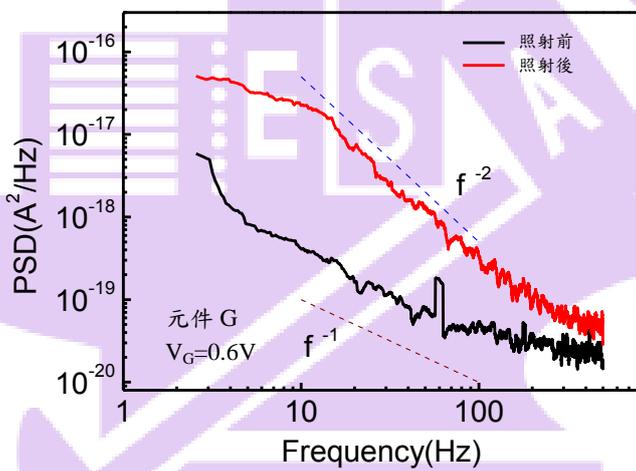


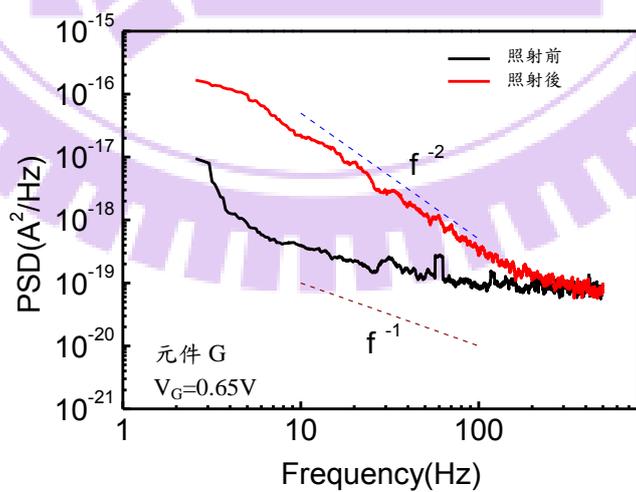
圖 3-25 造成 RTN 現象的缺陷深度。



(a)



(b)



(c)

圖 3-26 G 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖。

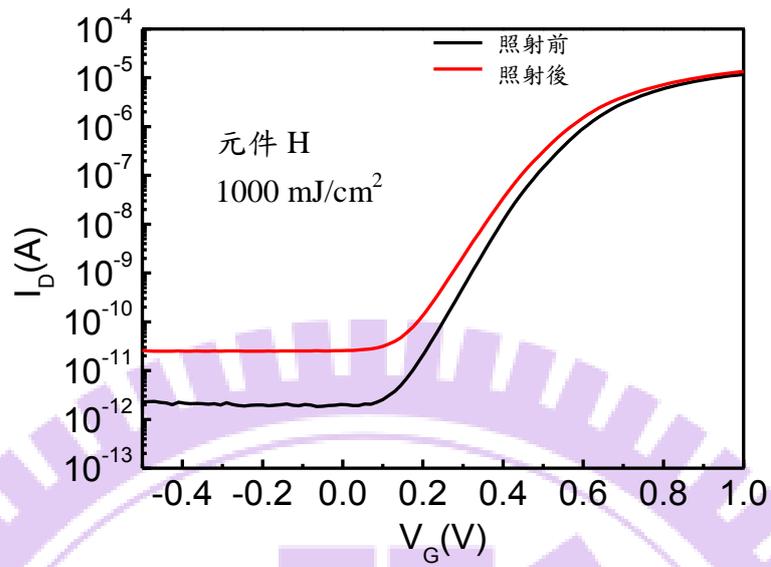


圖 3-27 照射  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  對元件 H 產生的轉換特性變化。

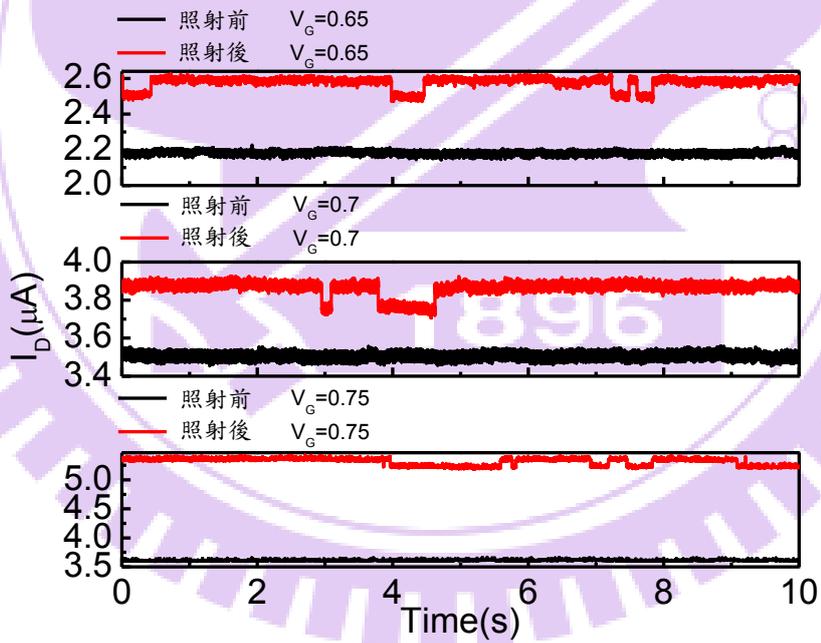


圖 3-28 元件 H 受到輻射傷害而造成的 RTN。

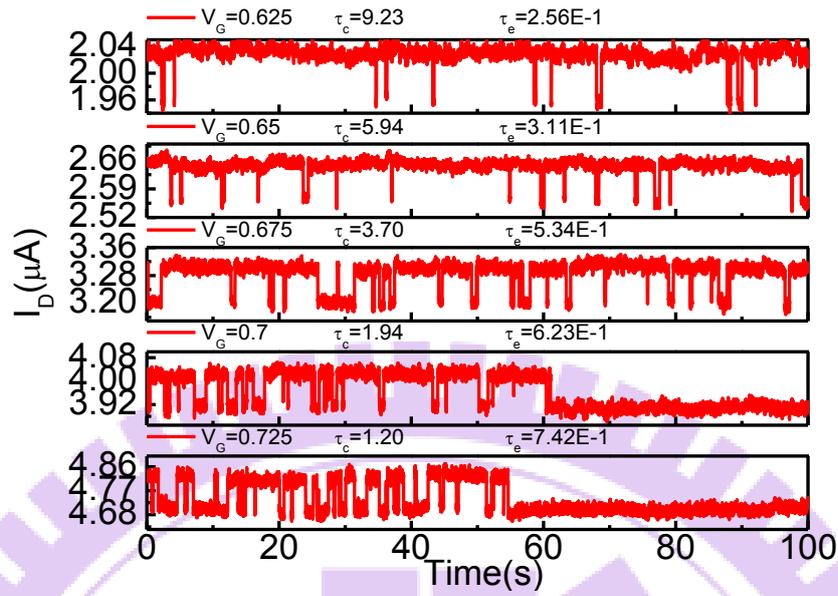


圖 3-29 輻射所產生的 RTN 發生  $\tau_e$  變長的情形。

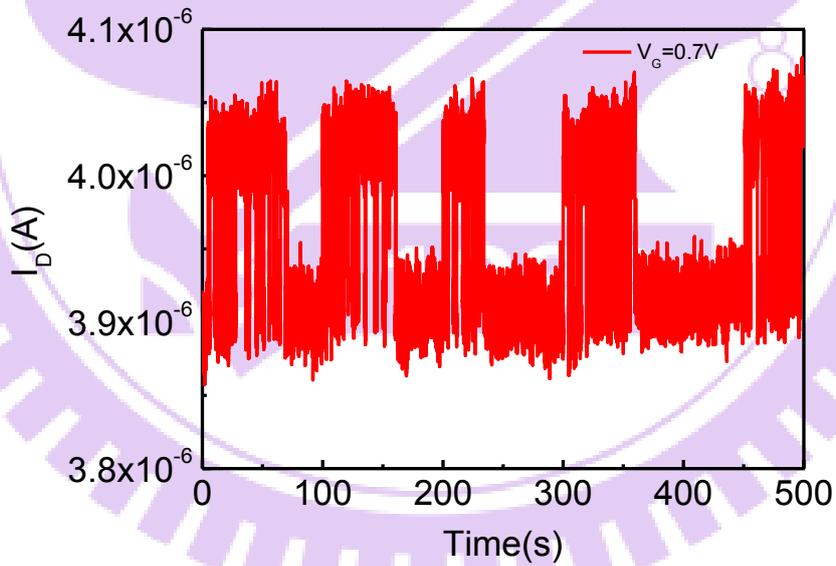


圖 3-30  $V_G=0.7V$  下  $\tau_e$  由於電子掉到深能階而變長。

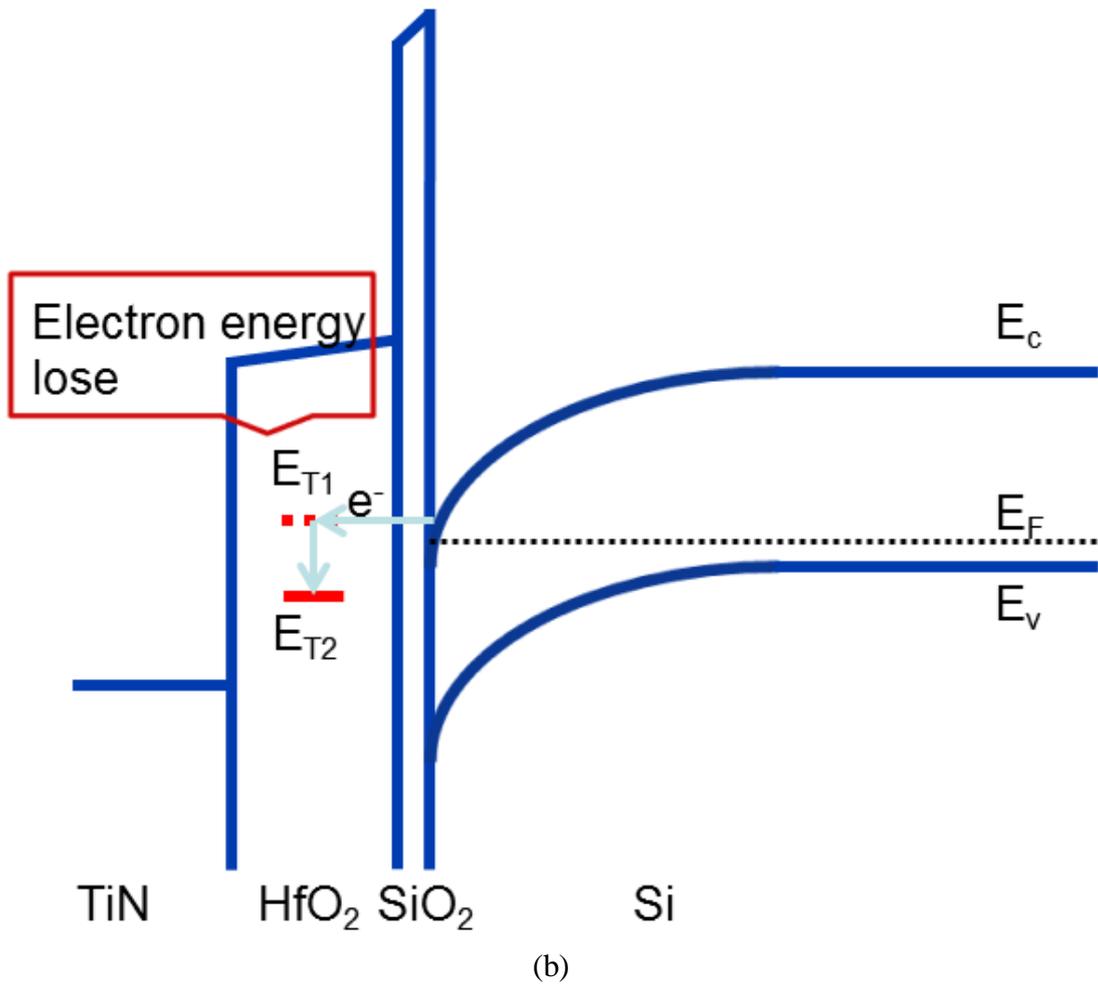
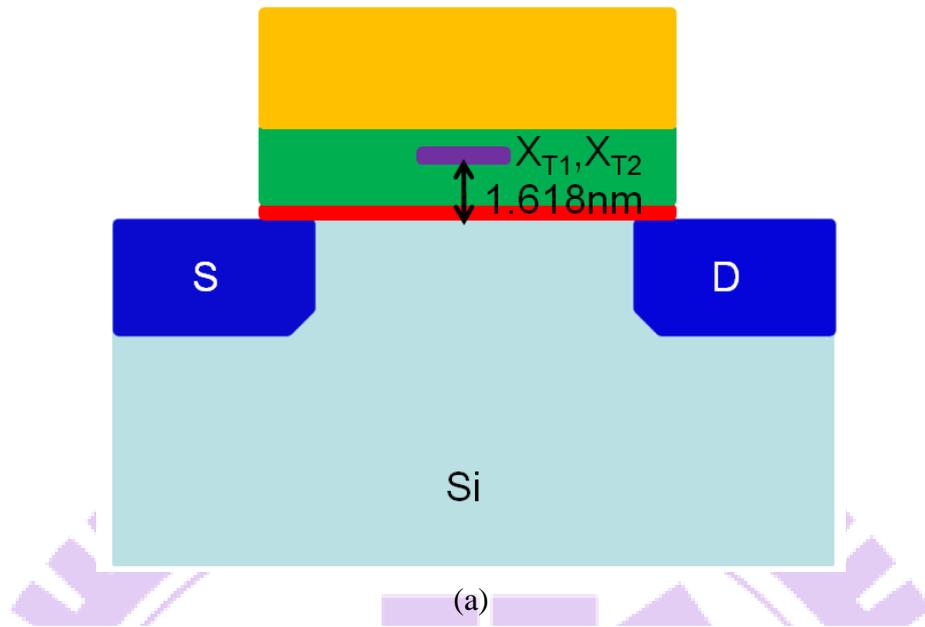


圖 3-31 (a)空間上深、淺缺陷在同一位置，由於庫倫作用力造成同時間只會有一個缺陷被填電子(b)電子會因為能量的損失掉到深缺陷能階使  $\tau_c$  變長。

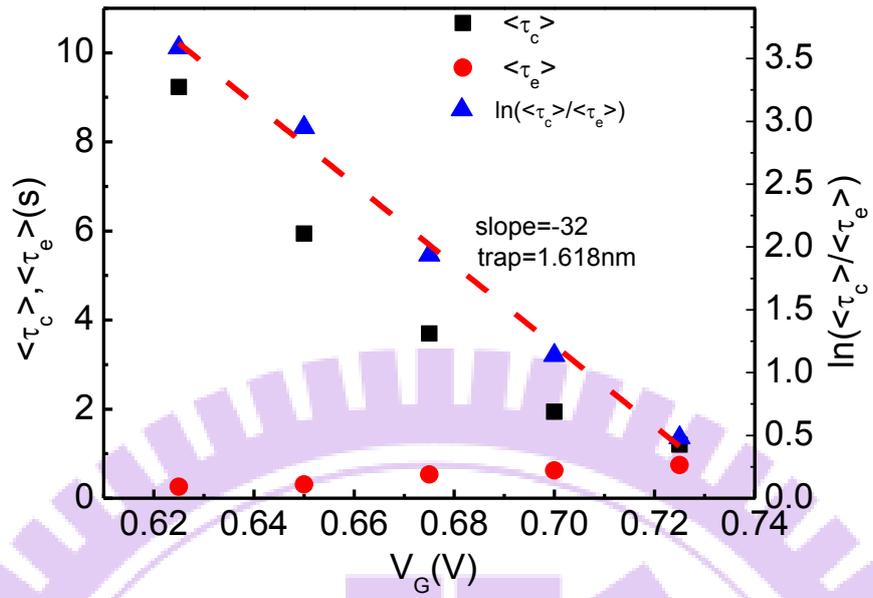
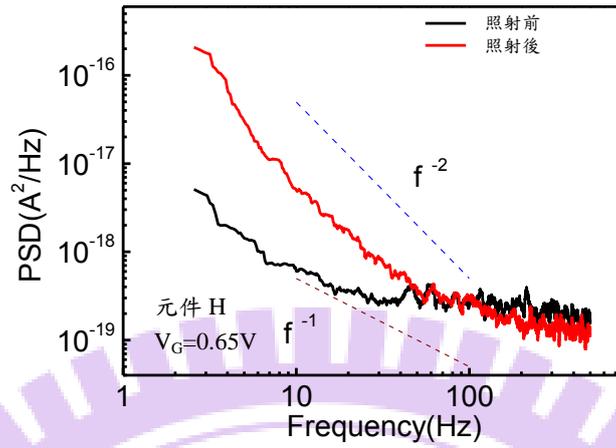
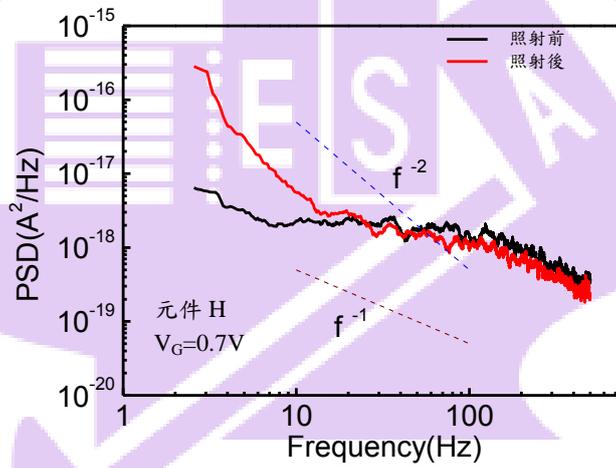


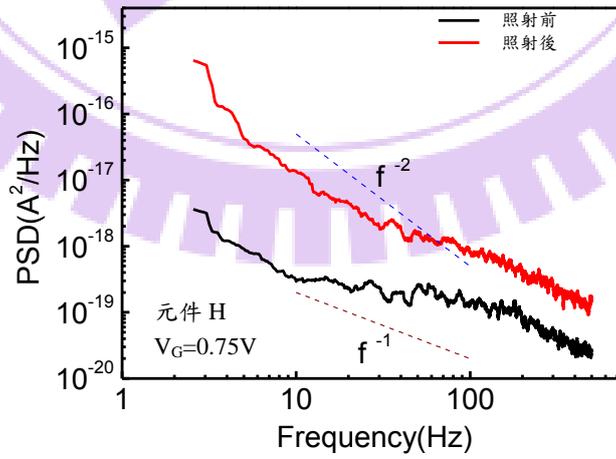
圖 3-32 造成 RTN 現象的缺陷深度。



(a)



(b)



(c)

圖 3-33 H 元件三種不同偏壓下照前與照後的 PSD 改變圖。

# 第四章

## 結論與未來研究方向

### 4.1 結論

在本論文當中我們討論了 EUV 輻射對 nMOSFET 所造成的損傷，主要是因為在 10 nm 以下的製程世代，利用 EUVL 作為微影技術的機率很高，一旦採用那麼在 MOSFET 製程中照射 EUV 所引起的輻射傷害就是一個需要先行評估的課題了。根據我們的實驗結果可以知道，EUV 會在 nMOSFET 的閘極介電層當中產生氧化物缺陷電荷以及介面缺陷電荷而使得臨界電壓以及次臨界擺幅改變。此外淺溝槽隔離中的氧化層也會因為輻射引發的正電荷而在矽表面產生空乏層，在空乏層中的介面缺陷可以作為電子-電洞對的激發中心(generation center)因此使得漏電上升，且會因為照射劑量升高變得更加嚴重。

在照射前與照射後都有 RTN 現象的元件中，RTN 現象不會因為照射 EUV 而消失，但是可能會因為閘極介電層中的氧化物缺陷電荷距離造成 RTN 的缺陷較近而影響到缺陷能量，而改變時間常數。

沒有 RTN 現象的元件，可能混因為 EUV 輻射而出現 RTN 現象，這種情形只在  $500 \text{ mJ/cm}^2$  與  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  兩個劑量中看到，在低劑量( $70 \text{ mJ/cm}^2$ )則是沒有發現這種情形。輻射產生的缺陷可能會在同一位置產生深淺不同能階的缺陷，當電子損失能量時，會掉到較深的能階而讓  $\tau_c$  增長許多，但是當電子從深缺陷中釋放後，又開始回復原本與淺能階互動的情形。PSD 則因為元件從原本比較穩定

的電流變成有高低位準的電流，因而對頻率倒數的斜率從原本的接近-1 變成接近-2。

總而言之，雖然 EUVL 對於元件的微縮有著很大的幫助，等效閘極氧化層厚度減薄之後，抗輻射能力增強，但是 EUV 照射可能改變 RTN 的時間常數，甚至引發 RTN，對於元件操作在低電流時的影響更是嚴重，而讓穩定度受到很大的威脅。

#### 4.2 未來研究方向

在前幾章中我們已經得出 EUV 輻射所造成的結果以及原因，然而還有一些課題值得繼續深入研究：

1. 我們只研究了 EUV 照射對 nMOSFET RTN 的影響，但真正的製程中 pMOSFET 也是不可或缺的，因此這方面的研究也值得討論，才能得出一個更完整的結論出來。
2. 由於產生 RTN 的缺陷主要都是在高介電質層中，因此變換不同的閘極介電質材料所做的 MOSFET，再去經過輻射處理後來分析，便可以尋找其它比較能抗輻射的材料作為高介質層。。
3. 雖然本論文是因為 EUVL 的發展才研究 EUV 對於元件的影響，但是其它的輻射源對於 RTN 的影響也值得研究，畢竟在外太空中輻射源的種類也是很多，探討各種輻射源的傷害也是必要的。

4. 在本論文中元件的尺寸還是使用次微米等級的元件，但是在業界真正引進 EUVL 的時候在會達到 10 nm，因此對於更小尺寸元件的研究也是不可避免。
5. 近年來鍺、三五族與 SiC 的興起，因此輻射對於這些材料製作而成的電晶體的影響也值得探討。
6. 照射後產生的缺陷有著  $\tau_c$  變長的情形，因此缺陷的型態尚待研究，未來將會往這個方向進行探討。



## 參考文獻

- [1]. T. Wolfe, “The tinkering of Robert Noyce,” Esquire Magazine, pp. 346-374., 1983.
- [2]. L. R. Harriott, “Limit of lithography,” Proc. IEEE, vol. 89, no. 3, pp. 366-373, 2001.
- [3]. R. Panwar, “Recent developments, issues and challenges for lithography in ULSI fabrication,” Int. J. Electron. Comp. Sci. Eng., vol. 1, no. 2, pp. 702-711, 2012.
- [4]. M. Fritze, B. Tyrrell, R. Mallen, and B. Wheeler, “Optical imaging properties of dense phase shift feature patterns,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 20, no. 6, pp. 2589-2596, 2002.
- [5]. S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, “Nanoimprint lithography,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 14, no. 6, pp. 4129-4133, 1996.
- [6]. L. J. Guo, “Nanoimprint lithography: methods and material requirements,” Adv. Mater., vol. 19, no. 4, pp. 495–513, 2007.
- [7]. K. B. Kim, “A novel technique for projection-type electron-beam lithography,” SPIE Newsroom, DOI: 10.1117/2.1200812.1396, 2008.
- [8]. D. Lam, D. Liu and T. Prescop, “E-beam direct write (EBDW) as complementary lithography,” SPIE Newsroom, DOI: 10.1117/12.868485, 2010.
- [9]. S. D. Hector, “EUVL masks: requirements and potential solutions” SPIE

Newsroom, DOI: 10.1117/12.472284, 2002

[10]. P. H. Benschop, "Euclides: European EUVL program," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 17, no. 6, pp. 2978-2981, 1999.

[11]. Lithography in international technology roadmap for semiconductor, pp. 1-3, 2013.

[12]. B. Wu and A. Kumar, "Extreme ultraviolet lithography: A review," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 25, no. 6, pp. 1743-1761, 2007.

[13]. R. H. Stulen and D. W. Sweeney, "Extreme ultraviolet lithography," IEEE J. Quantum Electron., vol. 35, no. 5, pp. 694-698, 1999.

[14]. A. M. Hawryluk and L. G. Seppala, "Soft x-ray projection lithography using an x-ray reduction camera," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 6, pp. 2162-2166, 1988.

[15]. B. Wu and A. Kumar, "Extreme ultraviolet lithography: towards the next generation of integrated circuits," Optics & Photonics Focus, vol. 7, story 4, 2009.

[16]. A. Hassanein, V. Sizyuk and T. Sizyuk, "Multidimensional simulation and optimization of hybrid laser and discharge plasma devices for EUV lithography"

SPIE Newsroom, DOI: 10.1117/12.771218, 2008

[17]. O. Wood, C. S. Koay, K. Petrillo, H. Mizuno, S. Raghunathan, J. Arnold, D. Horak, M. Burkhardt, G. McIntyre, Y. Deng, B. La Fontaine, U. Okoroanyanwu,

- A. Tchikoulaeva, T. Wallow, J. H. C. Chen, M. Colburn, S. S. C. Fan, B. S. Haran, and Y. Yin, "Integration of EUV lithography in the fabrication of 22-nm node devices," in Proc. SPIE, vol.7271, pp. 727104-1-727104-9, 2009
- [18]. E. G. Stassinopoulos and J. P. Raymond, "The space radiation environment for electronics," in Proc. IEEE, vol.76 , pp.1423-1442, 1988.
- [19]. J. P. Raymond and E. L. Petersen, "Comparison of neutron, proton, and gamma ray effects in semiconductor devices," IEEE Trans. Nucl. Sci. , vol. NS-34, no. 6, pp. 1622-1628, Dec. 1987.
- [20]. J. H. Adams, R. Silberg, and C. H. Tszo, "Cosmic ray effects on microelectronics, Part I: The near-earth particle environment," Naval Research Laboratory, NRLMem. Rep.4506, Aug. 1981.
- [21]. D. J. DiMaria, "Radiation damage in silicon dioxide films exposed to reactive ion etching," J. Appl. Phys., vol. 50, no. 6, pp. 4015-4021, 1979.
- [22]. T. P. Ma and Paul V. Dressendorfer, "Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits," Wiley, New York, 1996.
- [23]. S. N. Rashkeev, C. R. Cirba, D. M. Fleetwood, R. D. Schrimpf, S.C. Witczak, A. Michez, and S. T. Pantelides, "Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates," IEEE Trans. Nucl. Sci. , vol. 49, pp. 2650–2655, 2002.

- [24]. T. R. Oldham, "Analysis of damage in MOS devices in several radiation environments," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 31, pp. 1236–1241, 1984.
- [25]. S. K. Lai, "Two-carrier nature of interface-state generation in hole trapping and radiation damage," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, no. 1, pp. 58–60, 1981.
- [26]. J. A. Felix, J. R. Schwank, C. R. Cirba, R. D. Schrimpf, M. R. Shaneyfelt, D. M. Fleetwood and P. E. Dodd, "Influence of total-dose radiation on the electrical characteristics of SOI MOSFETs," *Microelectronic Engineering*, vol. 72, no. 1-4, pp. 332-341, 2004.
- [27]. S. K. Dixit, X. J. Zhou, R. D. Schrimpf, D. M. Fleetwood, S. T. Pantelides, R. Choi, G. Bersuker, and L. C. Feldman, "Radiation induced charge trapping in ultrathin HfO<sub>2</sub>-based MOSFETs," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 54, no. 6, pp. 1883-1890, Dec. 2007.
- [28]. J. A. Felix, M. R. Shaneyfelt, D. M. Fleetwood, T. L. Meisenheimer, J. R. Schwank, R. D. Schrimpf, P. E. Dodd, E. P. Gusev, and C. D'Emic, "Radiation-induced charge trapping in thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/Si (100) gate dielectric stacks," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 50, no. 6, pp. 1910-1918, Dec. 2003.
- [29]. Yun Ye, Chi-Chao Wang, Yu Cao, "Simulation of random telegraph Noise with 2-stage equivalent circuit," in *ICCAD*, pp. 709 - 713, Nov. 2010
- [30]. M. J. Uren, D. J. Day, and M. J. Kirton, "1/f and random telegraph noise in

- silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.47, p.1195, 1985.
- [31]. K. K. Hung, P. K. Ko, C. Hu, and Y. C. Cheng, “Random telegraph noise of deep-submicrometer MOSFETs,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol.11, pp. 90–92, Feb. 1990.
- [32]. J. P. Campbell, J. Qin, K.P. Cheung, L.C. Yu, J.S. Suehle, A. Oates, K. Sheng, “Random telegraph noise in highly scaled nMOSFETs,” *IEEE Reliability Physics Symposium*, pp. 382-388, April 2009
- [33]. S. Machlup, “Noise in semiconductors: spectrum of a two-parameter random signal,” *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 3, pp. 341–343, Mar. 1954.
- [34]. Y. Yuzhelevski, M. Yuzhelevski, and G. Jung, “Random telegraph noise analysis in time domain,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, no. 4, pp. 1681–1688, Apr. 2000.
- [35]. A. Ghetti, C. Monzio Compagnoni, F. Biancardi, A. Lacaia, S. Beltrami, L. Chiavarone, A. Spinelli, and A. Visconti, “Scaling trends for random telegraph noise in deca-nanometer flash memories,” in *IEDM Tech. Dig.*, 2008, pp. 835–838.
- [36]. A. Asenov, R. Balasubramaniam, A. Brown, and J. Davies, “RTS amplitudes in decananometer MOSFETs: 3-D simulation study,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 50, no. 3, pp. 839–845, Mar. 2003.

- [37]. P. Fantini, A. Ghetti, A. Marinoni, G. Ghidini, A. Visconti, and A. Marmiroli, "Giant random telegraph signal in nanoscale floating gate devices," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 28, no. 12, pp. 1114–1116, Dec. 2007
- [38]. P. H. Li, "Effect of extreme ultra-violet radiation on high dielectric constant dielectrics," Graduate Program for Science and Technology of Accelerator Light Source National Chiao Tung University, 2010.
- [39]. T. T. Su, "Effect of interfacial layer engineering on the radiation hardness of Hf-based dielectrics to EUV irradiation," Graduate Program for Science and Technology of Accelerator Light Source National Chiao Tung University, 2011.
- [40] K. Shiraishi, "Guiding principles toward future gate stacks given by the construction of new physical concepts", *VLSI Tech. Dig.*, pp. 196-197, 2009
- [41] D. M. Fleetwood, P. S. Wuokur, R. A. Reber, Jr., T. L. Meisenheimer, J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, and L. C. Riewe, "Effects of oxide traps, interface traps, and border traps on metal-oxide-semiconductor devices," *J. Appl. Phys.*, vol. 73, p. 5058, 1993.
- [42] S. Lee, "Characterization of oxide traps leading to RTN in high-k and metal gate MOSFETs", *IEEE IEDM.*, pp.763-766, 2009

[43] M. H. Sung, "A study on the effect of ionizing radiation on MOS devices with various Hf-based dielectric thickness," Graduate Program for Science and Technology of Accelerator Light Source National Chiao Tung University, 2012.



# 作者簡歷

姓名:黃致弘

性別:男

出生年月日:民國 78 年 9 月 8 日

籍貫:台灣省嘉義市

住址:嘉義市延平街 47 號

學歷:

國立嘉義高級工業職業學校 (94.9-97.6)

國立台灣科技大學電子工程系學士 (97.9-101.6)

國立交通大學電子所碩士 (101.9-103.8)

論文研究題目:

游離輻射對 N 型電晶體的隨機電報雜訊之影響研究

A Study on the Effect of Ionizing Radiation on Random Telegraph Noise of NMOSFETs