

# 核能安全委員會委託研究報告

## 衛星元件開發及輻射驗證環境建構

Development of satellite components and establishment of radiation  
test environment

執行期間：112 年 01 月 01 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：葉彥顯

執行單位：國家原子能科技研究院

中華民國 113 年 9 月 2 日

## 摘 要

國際上各國已將太空科技發展視為競逐國力的象徵，而決定太空科技成功與否的重要關鍵因素之一便是發展可用於太空之太陽電池、電子元件與晶片。這些元件必須克服的第一個障礙即是太空輻射環境(大部分來自於宇宙射線)對元件的損害，其影響範圍可能從元件操作性能劣化到完全的功能失效，而這些影響甚至可能會導致主要衛星系統故障及太空任務提前終止。故瞭解輻射對於太陽電池、電子元件與晶片的影響以及因應措施對發展太空科技應用尤為重要。

本計畫進行衛星元件之開發及輻射驗證環境之建構。工作項目 1「太陽電池抗輻射技術發展」，完成太空太陽電池效率提升之研究與進行質子輻射測試和分析。工作項目 2「元件製程抗輻射技術發展」，完成可抗輻射新材料、製程技術與新型元件結構之研究，釐清輻射耐受性及總游離劑量輻射效應的作用機制與驗證測試方法。工作項目 3「晶片系統抗輻射技術發展」，完成脈衝雷射光代替質子或高能粒子進行晶片之單事件輻射效應驗證之研究，可大幅縮短驗證時間，有助於快速開發耐輻射的晶片。

## Abstract

The maturity of space technology development has been regarded as a symbol of national strength, and the key topics of space technology are the space solar cells, electronic components and chips. The first obstacle these components have to overcome is the damage caused by radiation in space environment (mostly from cosmic rays). Radiation damage may degrade the performance of components or even cause functional failure, which may further lead to failure of major satellite systems and termination of space programs. Therefore, understanding the impact of radiation on solar cells, electronic components and chips is particularly important for the development of space technology applications.

This project includes the development of satellite components and the construction of a radiation verification environment. In work item 1 "Development of Anti-Radiation Solar Cell Technology ", the research on improving the efficiency of space solar cells is implemented and the proton radiation testing and analysis is performed. In work item 2 " Development of Radiation Resistant Technology in Component Process", the research on new radiation-resistant materials, process technologies and new component structures is undertaken, and the mechanism and verification test methods of radiation tolerance and total ionizing dose radiation effects are clarified. In work item 3 "Development of Radiation Resistant Technology in Chip Systems", the research on using pulsed laser light instead of protons or high-energy particles to verify the single-event radiation effect of the chip is carried out. The technique can significantly simplify the verification procedure and help to accelerate the development of radiation-hardened chips.

# 目 錄

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1. 前 言 .....                 | 1  |
| 2. 太陽電池抗輻射技術發展 .....         | 3  |
| 2.1 抗輻射太陽能電池磊晶研究 .....       | 3  |
| 2.2 抗輻射太陽能電池元件製程 .....       | 6  |
| 2.3 抗輻射太陽能電池元件特性量測 .....     | 9  |
| 3. 元件製程抗輻射技術發展 .....         | 12 |
| 3.1 抗輻射之新興記憶體元件開發 .....      | 12 |
| 3.2 抗輻射之積體電路製程與先進電晶體研究 ..... | 20 |
| 3.3 寬能隙半導體材料與元件之輻射效應評估 ..... | 26 |
| 4. 晶片系統抗輻射技術發展 .....         | 41 |
| 4.1 太空商業應用之抗輻射晶片設計開發 .....   | 41 |
| 4.2 短脈衝雷射輻射驗證技術 .....        | 44 |
| 4.3 抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術 .....   | 47 |
| 5. 論著產出 .....                | 51 |
| 6. 結論 .....                  | 52 |
| 參考文獻 .....                   | 55 |

## 附 圖 目 錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 2-1 藉由調整摻雜濃度形成 PIN 太陽電池.....                         | 3  |
| 圖 2-2 各子電池之 EQE 與電流密度.....                             | 4  |
| 圖 2-3 新的設計參數.....                                      | 5  |
| 圖 2-4 調整上層子電池光譜之實驗結果.....                              | 6  |
| 圖 2-5 以多層 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 製作 AR 之模擬結果..... | 8  |
| 圖 2-6 清大加速器實驗室.....                                    | 9  |
| 圖 2-7 電池於質子照射前後之 EQE 量測的結果.....                        | 11 |
| 圖 3-1 質子束照射平台與 n 型通道 FeFET 鐵電記憶體元件之結構圖.....            | 13 |
| 圖 3-2 質子流量 FeFET 鐵電記憶體之臨界電壓耐久性影響.....                  | 14 |
| 圖 3-3 反覆操作次數照射質子後對鐵電記憶體閘極切換電流影響.....                   | 15 |
| 圖 3-4 質子流量對鐵電記憶體之遲滯曲線及反覆操作次數之斜率變化.....                 | 16 |
| 圖 3-5 鐵電記憶體中氧空缺數量的分布狀況.....                            | 18 |
| 圖 3-6 質子輻射流量對 O1s 能譜及非晶格氧比例影響.....                     | 19 |
| 圖 3-7 質子輻射流量對對 FeFET 鐵電記憶體資料保存能力之影響.....               | 20 |
| 圖 3-8 FinFET 元件製程流程圖.....                              | 22 |
| 圖 3-9 輻射劑量率對 MOSFET 之汲極電流-電壓圖.....                     | 22 |
| 圖 3-10 輻射劑量率對 FinFET 之汲極電流-電壓圖.....                    | 23 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 3-11 輻射劑量率 MOSFET 轉換特性圖.....   | 23 |
| 圖 3-12 輻射劑量率對 FinFET 轉換特性圖.....  | 24 |
| 圖 3-13 S.S.變化量對不同輻射劑量率圖.....   | 24 |
| 圖 3-14 不同輻射劑量率之 on/off ratio 變化量.....  | 25 |
| 圖 3-15 不同輻射劑量率下 MOSFET 及 FinFET 之 $I_{on}$ 、 $I_{off}$ 退化比例.....                   | 26 |
| 圖 3-16 THOR 爐心佈局圖及 SiC 試片的中子照射條件.....  | 27 |
| 圖 3-17 利用 MCNP 計算所得之 THOR 照射管中子能譜.....   | 28 |
| 圖 3-18 利用 SRIM 計算之 He <sup>+</sup> 與 Ar <sup>+</sup> 照射離子之濃度與 dpa 分布情形...          | 29 |
| 圖 3-19 SiC 之 UV-Vis 吸收光譜、能隙與 EU 值隨不同照射位置的變化...                                     | 31 |
| 圖 3-20 SiC 之拉曼散射光譜隨不同中子照射位置的變化.....  | 32 |
| 圖 3-21 SiC VT-G 之拉曼散射光譜與 $I_R$ 隨退火溫度的變化.....                                       | 33 |
| 圖 3-22 SiC 的載子濃度、遷移率、導電率隨退火溫度的變化.....  | 34 |
| 圖 3-23 GaN 的電子濃度隨 Ar <sup>+</sup> 與 He <sup>+</sup> 輻照通量的變化.....                   | 35 |
| 圖 3-24 GaN 的電子濃度下降率隨 Ar <sup>+</sup> 與 He <sup>+</sup> 輻照通量的變化.....                | 35 |
| 圖 3-25 GaN 的電子遷移率隨 Ar <sup>+</sup> 與 He <sup>+</sup> 輻照通量的變化.....                  | 35 |
| 圖 3-26 GaN 的 XRD-2 $\theta$ 掃描圖譜隨 Ar <sup>+</sup> 與 He <sup>+</sup> 輻照通量的變化情形..... | 37 |
| 圖 3-27 GaN 的 c 軸晶格應變隨 Ar <sup>+</sup> 與 He <sup>+</sup> 輻照通量的變化情形.....             | 37 |
| 圖 3-28 不同 Ar <sup>+</sup> 與 He <sup>+</sup> 輻照通量下 GaN 樣品的 PL 發光能譜.....             | 38 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 3-29 不同 Ar <sup>+</sup> 與 He <sup>+</sup> 輻照通量下 GaN 的拉曼散射光譜.....     | 39 |
| 圖 3-30 GaN 拉曼散射之 A <sub>1</sub> (LO)聲子模式隨 Ar <sup>+</sup> 輻照通量的變化..... | 40 |
| 圖 4-1 傳統與抗輻射 SWR PCB 圖 .....   | 41 |
| 圖 4-2 類比冗餘原理圖.....   | 42 |
| 圖 4-3 Time-Skewed Space-Split LDO 架構 .....                             | 43 |
| 圖 4-4 不同抗輻射技巧輸出擾動比較 .....  | 43 |
| 圖 4-5 短脈衝雷射輻射驗證平台架構配置 .....  | 44 |
| 圖 4-6 照射實驗掃描流程規劃 .....   | 46 |
| 圖 4-7 照射能量量測流程 .....   | 47 |
| 圖 4-8 異質整合通道等效電路模型 .....   | 48 |
| 圖 4-9 Marker 與 PAD 設計概念圖 .....   | 49 |
| 圖 4-10 異質整合主動中介層晶片設計規劃 .....   | 50 |

## 附表目錄

|  |    |
|--|----|
| 表 2-1 改變中層子電池摻雜濃度之實驗結果 .....   | 4  |
| 表 2-2 不同退火溫度所得到的特徵接觸電阻 .....   | 7  |
| 表 2-3 有無 ARC 之效率比較 .....   | 8  |
| 表 2-4 質子輻射照射實驗結果 .....   | 10 |
| 表 3-1 GaN 試片的 He <sup>+</sup> 與 Ar <sup>+</sup> 離子照射條件與 dpa 峰值 ..... | 30 |
| 表 4-1 不同抗輻射方法比較表 .....   | 44 |
| 表 4-2 選用之物鏡參數.....   | 45 |
| 表 5-1 「太陽電池抗輻射技術發展」之相關論著 .....                                       | 51 |
| 表 5-2 「元件製程抗輻射技術發展」之相關論著 .....                                       | 51 |
| 表 5-3 「晶片系統抗輻射技術發展」之相關論著 .....                                       | 51 |

## 1. 前 言

衛星元件技術發展與產業建立在各個國家主要皆以訂定航太政策來主導，而我國政府亦積極推動太空產業國家隊發展，於 108 年 2 月底正式成立由國家太空中心帶頭的「台灣太空產業發展協會」<sup>[1]</sup>，核心目標為將太空產業國產化，初期冀望能具備相關技術與物料能達到自給自足的能力，待產業成熟後更一步推廣至國際上。立法院更於 110 年 05 月底完成「太空發展法」法案三讀，明定科技部（現為國科會）為主管機關，並應以專責法人協助推動太空發展業務，也規範發射載具在境內發射時應於國家發射場域實施作業，且科技部與經濟部等部會應鼓勵民間投資太空事業<sup>[2]</sup>。發展可用於太空等級應用的太陽電池、電子元件與晶片是決定太空科技成功與否的重要關鍵因素，而元件必須克服的第一個障礙即是太空輻射環境對於元件的衝擊，其影響範圍可能從元件與晶片操作性能劣化到完全的功能失效，這些影響甚至可能會導致主要衛星系統故障及太空任務提前終止。如何設計及開發可有效抑制太空輻射效應的太陽電池、電子元件與晶片，並針對該等元件建立適用的輻射效應驗證測試平台便成為一項不可或缺的工作。

太陽電池常見的材料與結構中，以 III-V 族半導體製作之多接面太陽電池可完美匹配太空太陽電池的核心技術發展需求，透過多接面子電池連續堆疊串聯，可有優異的轉換效率；另外 III-V 族材料本身比起傳統矽基太陽電池具備更高的抗輻射能力，因此若要適應各種環繞地球軌道之太空輻射環境，其 III-V 族多接面太陽電池乃是最佳的選擇。在元件開發上，本院已有超過 10 年之 III-V 族高效率地面型太陽電池研發的經驗。近年亦配合政府「國家太空科技發展長程計畫」政策，投入太空太陽電池技術之開發。本

院接續過去之開發經驗持續提升太陽電池之轉換效率，並對電池之抗輻射能力及損害機制加以研究。在「太陽電池抗輻射技術發展」方面，經改變中層子電池摻雜濃度、調整上層子電池光譜、降低接觸電阻及增加抗反射膜後，提升電池之效率。在太空太陽電池輻射測試上以 1 MeV 之質子照射，電池轉換效率維持率平均為 65.65%，已達預期目標；並量測照射前後之外部量子效率，探討可能之輻射損害機制。而為太空任務與低軌衛星應用的高度需求，本計畫亦進行「元件製程抗輻射技術發展」研究，開發抗輻射新型記憶體元件並建構質子束照射下之總游離劑量效應測試技術；完成抗輻射之積體電路製程與先進緒式場效電晶體之研究；並對 SiC 或 GaN 等寬能隙材料進行評估和輻射損傷特性分析。在「晶片系統抗輻射技術發展」之研究上，以脈衝雷射光協助進行晶片之抗輻射照射測試可以大幅縮短晶片抗輻射驗證的成本及時間；整合不同抗輻射電路，包含電路、佈局、系統三個層面，完成開發具有耐輻射功能的電源轉換器(DC-DC Converter)；另亦研發小晶片之異質整合的技術、探討異質整合載板之矽橋(Silicon Bridge)的多層連線(Interconnect)，並討論大面積的晶圓整合，以減少使用傳統印刷電路板，有利於太空電子系統的體積與重量之降低。

本研究報告第二章介紹計畫子項目 1：「太陽電池抗輻射技術發展」，並分別說明「抗輻射太陽能電池磊晶研究」、「抗輻射太陽能電池元件製程」、「抗輻射太陽能電池元件特性量測」之研發成果；第三章介紹計畫子項目 2：「元件製程抗輻射技術發展」，並分別說明「抗輻射之新興記憶體元件開發」、「抗輻射之積體電路製程與先進電晶體研究」、「寬能隙半導體材料與元件之輻射效應評估」之成果；第四章則是計畫子項目 3：「晶片系統抗輻射技術發展」，亦分別說明「太空商業應用之抗輻射晶片設計開發」、「短脈衝雷射輻射驗證技術」、「抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術」之成果。

## 2. 太陽電池抗輻射技術發展

### 2.1 抗輻射太陽能電池磊晶研究

首先針對本院太空太陽電池之設計作調整。本院電池結構之中層子電池(Middle Cell)之基極可細分為三層，如圖 2-1 所示。下方靠近背表面場(Back Surface Field, BSF)的區域為  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的高濃度摻雜；上方靠近射極的區域為  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的低濃度本質摻雜；中間區域則採用濃度由高至低的漸變方式摻雜。本計畫將本質與 P 型摻雜濃度之差異加大，以提升效率。

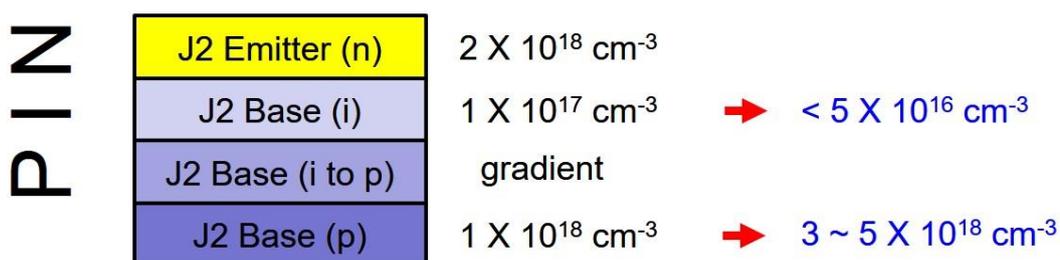


圖 2-1 藉由調整摻雜濃度形成 PIN 太陽電池

如圖所示，我們將靠近 BSF 區域的摻雜濃度改為  $3 \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ；靠近射極區域的摻雜濃度改為  $< 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以拉大濃度差異；實驗結果如表 2-1 所示，發現加大中層子電池基極之本質與 P 型之摻雜濃度梯度可提升載子收集效率，進而將電池效率由平均 27.41% 提升至平均 27.62%。

表 2-1 改變中層子電池摻雜濃度之實驗結果

|        | Jsc(mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc(V) | Jm(mA/cm <sup>2</sup> ) | Vm(V) | Pm(W) | FF   | Eff.   | Avg. Eff. |
|--------|--------------------------|--------|-------------------------|-------|-------|------|--------|-----------|
| Before | 17.75                    | 2.60   | 17.08                   | 2.18  | 1.12  | 0.81 | 27.27% | 27.41%    |
|        | 17.89                    | 2.60   | 17.35                   | 2.16  | 1.13  | 0.81 | 27.42% |           |
|        | 17.81                    | 2.61   | 17.01                   | 2.21  | 1.14  | 0.81 | 27.53% |           |
|        | 17.90                    | 2.59   | 17.27                   | 2.17  | 1.13  | 0.81 | 27.39% |           |
|        | 17.80                    | 2.60   | 17.01                   | 2.21  | 1.13  | 0.81 | 27.43% |           |
| After  | 17.10                    | 2.63   | 16.64                   | 2.27  | 1.14  | 0.84 | 27.57% | 27.62%    |
|        | 18.00                    | 2.61   | 17.37                   | 2.18  | 1.14  | 0.80 | 27.63% |           |
|        | 17.59                    | 2.62   | 16.85                   | 2.24  | 1.14  | 0.82 | 27.65% |           |
|        | 17.59                    | 2.58   | 17.00                   | 2.21  | 1.13  | 0.83 | 27.51% |           |
|        | 17.34                    | 2.63   | 16.79                   | 2.26  | 1.14  | 0.83 | 27.72% |           |

電池面積：30.18 cm<sup>2</sup>

另外亦進行上層子電池(Top Cell)之調整。首先藉由量測各子電池之 EQE，並搭配太陽光譜模擬計算各子電池之電流密度，結果如圖 2-2 所示。可發現上層子電池電流為 18.24 mA/cm<sup>2</sup>，中層子電池電流 16.98 mA/cm<sup>2</sup>，兩者不匹配，整體電流受限於中層子電池。

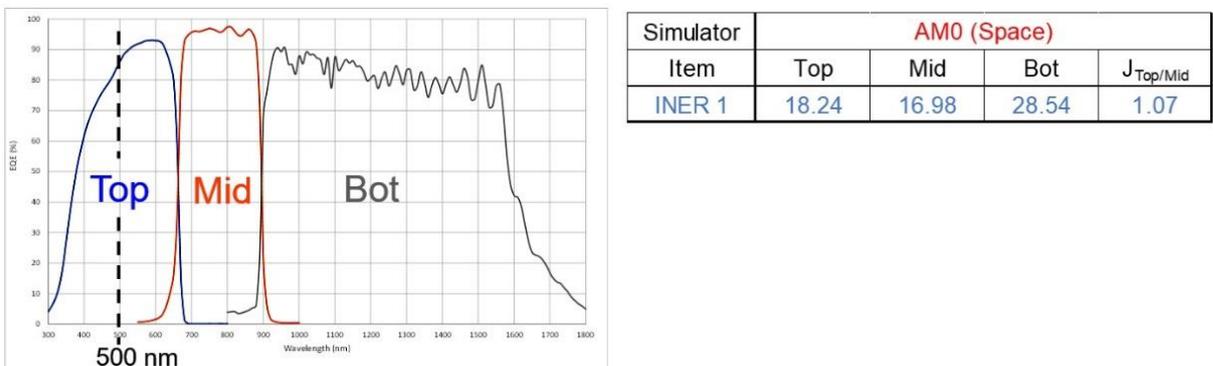


圖 2-2 各子電池之 EQE 與電流密度

為增加中層子電池之電流，本計劃設計將上層子電池 > 500 nm 之 EQE 降低，以增加中層子電池之吸光量。但為防止上層子電池電流降太多，亦略為提升上層子電池 < 500 nm 之 EQE 作為補償。在降低 > 500

nm EQE 方面，由於波長越長的光，吸收係數越低，故上層子電池要全部吸收 < 660 nm 波長的光大約需要 1  $\mu\text{m}$  厚的基極。而現在要降低長波長光的吸收，因此可將基極減薄，使長波長光來不及吸收，因而降低 EQE。因此如圖 2-3 所示，將基極厚度由 1100 nm 減為 500 nm。而在提升 < 500 nm EQE 方面，由於短波長光吸收係數高，容易在淺層區域被吸收而無法到達空乏區。故若將射極減薄，可提升短波長之 EQE。因此如圖 2-3 所示，將射極厚度由 80 nm 減為 50 nm。

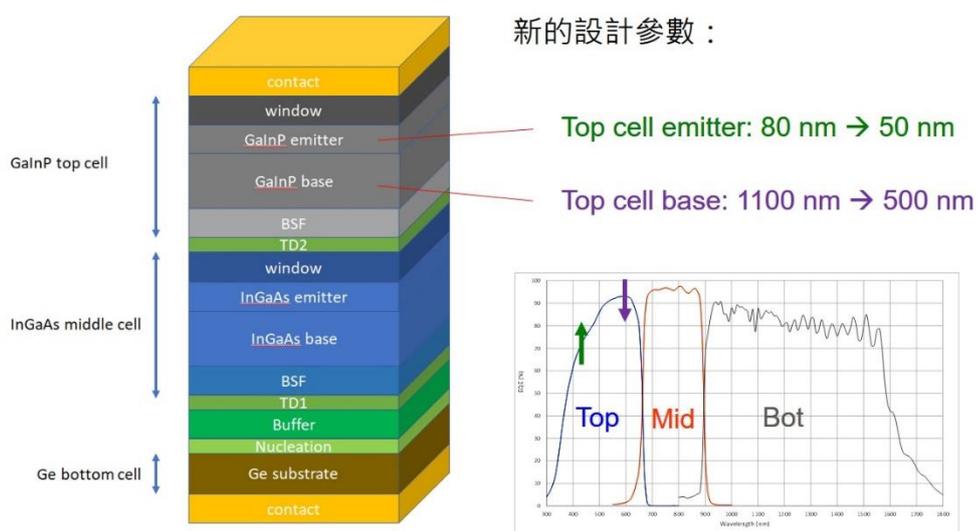
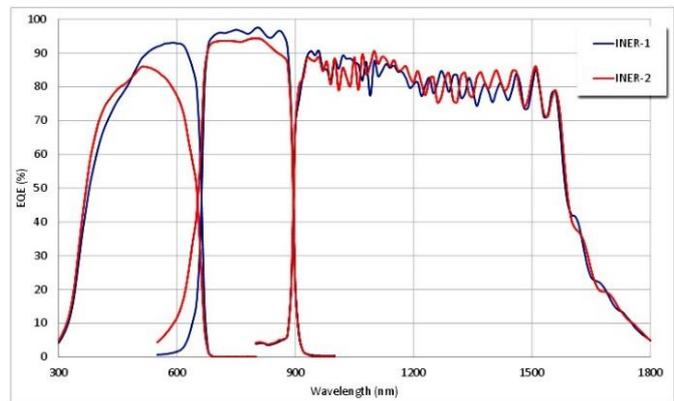


圖 2-3 新的設計參數

實驗結果如圖 2-4 所示。新參數電池之上層子電池光譜有如預期之變化，短波長 EQE 提升、長波長 EQE 降低；中層子電池 之短波長 EQE 亦有隨之提升；轉換效率亦有改善，從 27.1% 提升至 29.3%。

| Simulator | AM0 (Space) |       |       |                      |
|-----------|-------------|-------|-------|----------------------|
| Item      | Top         | Mid   | Bot   | J <sub>Top/Mid</sub> |
| INER 1    | 18.24       | 16.98 | 28.54 | 1.07                 |
| INER 2    | 16.54       | 17.83 | 28.73 | 0.93                 |



| Sample | J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | V <sub>oc</sub> (V) | J <sub>m</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | V <sub>m</sub> (V) | P <sub>m</sub> (W) | FF   | Eff.  |
|--------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|------|-------|
| INER 1 | 16.06                                 | 2.62                | 15.68                                | 2.36               | 0.03               | 0.88 | 27.1% |
| INER 2 | 17.76                                 | 2.60                | 17.41                                | 2.30               | 0.03               | 0.87 | 29.3% |

電池面積：0.8 cm<sup>2</sup>

圖 2-4 調整上層子電池光譜之實驗結果

## 2.2 抗輻射太陽能電池元件製程

在元件製程方面，為降低金屬電極與半導體間之電阻，本計畫研究在不同常壓退火溫度下，特徵接觸電阻率之變化，以獲得最低之接觸電阻。當半導體表面沉積金屬時，金-半介面通常易有缺陷使其產生電阻；而熱退火便可使晶體再結晶，讓金屬與半導體形成必要的鍵結，減少缺陷並從而降低接觸電阻。但過高的退火溫度反而會造成有害的原子擴散產生能障，反而升高接觸電阻。因此，適當的退火溫度便是改善電極傳導特性重要的參數。本實驗分別就五種退火溫度（345°C、365°C、385°C、405°C、425°C，退火時間皆為 2 分鐘）完成電極的歐姆接觸，然後進行 I-V 電性量測。對歐姆接觸而言，其 I-V 曲線為直線，斜率即為電極之間的總電阻。由不同電極間距和總電阻之關係可萃取出半導體薄膜之片電阻(sheet resistance) 以及金屬-半導體接觸之特徵接觸電阻率(specific contact

resistivity)。結果如表 2-2 所示，發現在 405°C / 2 分鐘的條件下，金屬半導體間有較低的電阻值。

表 2-2 不同退火溫度所得到的特徵接觸電阻

| 退火溫度(°C) | 轉移長度 $L_T$ ( $\mu\text{m}$ ) | 片電阻 $R_{sh}$ ( $\Omega/\square$ ) | 特徵接觸電阻率 $\rho_c$ ( $10^{-4}\Omega\text{-cm}^2$ ) |
|----------|------------------------------|-----------------------------------|--|
| 345      | 10.8                         | 480.36                            | 5.59   |
| 365      | 9.7                          | 503.47                            | 4.72   |
| 385      | 8.5                          | 492.01                            | 3.51   |
| 405      | 6.1                          | 506.98                            | 1.90   |
| 425      | 10.5                         | 483.31                            | 5.38   |

另外由太空太陽電池裸晶片在太空輻射環境中容易被破壞，為避免在太空輻射環境中快速損壞，因此通常會在裸晶片上黏附一片約 100  $\mu\text{m}$  的玻璃。但由於玻璃穿透率約 90%，會遮蔽部分入射光，使得效率下降。為降低玻璃所造成之損耗，本研究在玻璃上鍍抗反射層 (Anti-reflection Coating, ARC) 作為補償。

玻璃的折射率大約 1.5，對各波長而言單面的反射率約 4%，如圖 2-5(a)。本計畫先以模擬的方式用多層  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  計算，將 400 - 900 nm 波段之反射率壓到 1% 以下，模擬之參數如圖 2-5(b)，模擬之結果如圖 2-5(c)。在所需波段 400 - 900 nm 反射率壓至 1% 以下，代價是其他波段的反射率會上升，但由於那些波段對電流之貢獻較小，因此整體的電流仍可獲得改善。

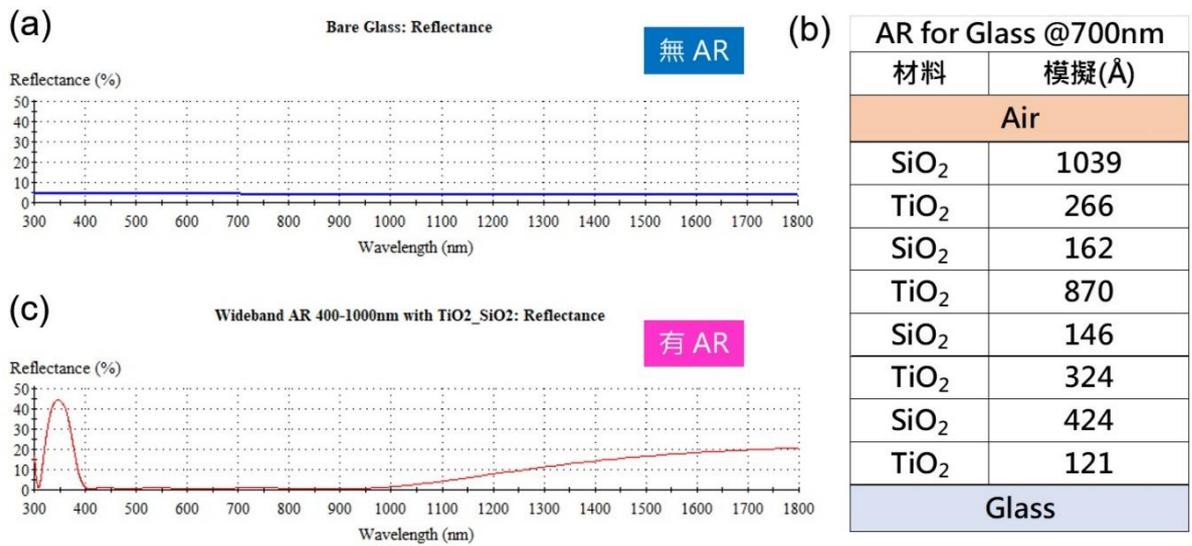


圖 2-5 以多層 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 製作 AR 之模擬結果

實際鍍膜後發現電池之玻璃表面加上 ARC 後效率確實有再增加，如表 2-3 所示。其中效率的變化定義為(有 AR-無 AR)/無 AR，結果發現有 ARC 大約可使效率提升 3%。

表 2-3 有無 ARC 之效率比較

| 玻璃有無AR之比較 (AM0) |      | Jsc (mA/cm <sup>2</sup> ) | Voc (V) | Jm (mA/cm <sup>2</sup> ) | Vm (V) | Pm (W) | F.F. | EFF.   | 效率變化 (%) |
|-----------------|------|---------------------------|---------|--------------------------|--------|--------|------|--------|----------|
| Sample 1        | 無 AR | 12.88                     | 2.54    | 12.22                    | 2.28   | 0.84   | 0.85 | 20.45% | +2.80%   |
|                 | 有 AR | 13.22                     | 2.54    | 12.37                    | 2.32   | 0.86   | 0.85 | 21.02% |          |
| Sample 2        | 無 AR | 13.85                     | 2.60    | 13.25                    | 2.32   | 0.93   | 0.85 | 22.56% | +2.71%   |
|                 | 有 AR | 14.19                     | 2.60    | 13.76                    | 2.30   | 0.95   | 0.86 | 23.17% |          |
| Sample 3        | 無 AR | 13.79                     | 2.56    | 12.37                    | 2.30   | 0.86   | 0.81 | 20.87% | +3.21%   |
|                 | 有 AR | 14.12                     | 2.58    | 12.91                    | 2.28   | 0.89   | 0.81 | 21.54% |          |

電池面積：30.18 cm<sup>2</sup>

## 2.3 抗輻射太陽能電池元件特性量測

國際上太空太陽電池測試之相關規範主要是由歐盟和美國所制定。歐盟是由歐洲太空標準協會 (The European Cooperation for Space Standardization, ECSS) 所制定之規範，文件編號為 ECSS-E-ST-20-08C<sup>[3]</sup> 美國則有航空與太空學會 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA) 所制定之規範，文件編號為 AIAA S-111A<sup>[4]</sup>；。ECSS 主要偏向驗證程序之規範，而相關的計算方式與衡量標準則較少定義；相較之下 AIAA 的規範有比較明確的測試數值與方式之規定。

質子源方面清華大學擁有 3 MeV 以下質子照射，且時程上較方便配合，故本實驗由清大加速器實驗室進行質子照射。圖 2-6 為清大加速器之外觀與基本資料。

清大加速器實驗室

NEC 9SDH-II Tandem Accelerator with Ortec 439 Current Integrator

最高電壓：3 MV

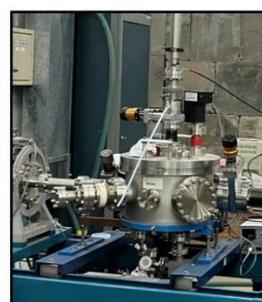
可提供離子源：H, B, C, O, F, Al, Si, P, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ge



加速器前端



加速器末端



樣品放置腔

圖 2-6 清大加速器實驗室

本實驗以 3 片大小  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  三接面電池樣品，結構為磷化銦鎵/砷化鎵/鍍基板 (GaInP/GaAs/Ge)，於清大加速器實驗室以質子能量 1 MeV、累

積通量  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  做測試，結果如表 2-4 所示。由實驗結果可發現，在質子照射後，太陽電池之剩餘轉換效率均在 65%-70%之間，平均為 65.65%。

表 2-4 質子輻射照射實驗結果

| Sample | Condition | Isc (mA) | Voc (V) | Im (mA) | Vm (V) | Pm (mW) | FF   | Eff.   | Ratio  |
|--------|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|------|--------|--------|
| 1      | Before    | 14.41    | 2.56    | 0.01    | 2.26   | 31.54   | 0.86 | 28.84% | 65.22% |
|        | After     | 11.61    | 2.26    | 0.01    | 1.99   | 20.51   | 0.78 | 18.81% |        |
| 2      | Before    | 14.34    | 2.56    | 0.01    | 2.28   | 31.62   | 0.86 | 28.91% | 66.72% |
|        | After     | 11.69    | 2.30    | 0.01    | 2.01   | 21.03   | 0.78 | 19.29% |        |
| 3      | Before    | 14.38    | 2.56    | 0.01    | 2.26   | 31.62   | 0.86 | 28.91% | 65.02% |
|        | After     | 11.73    | 2.28    | 0.01    | 2.01   | 20.50   | 0.77 | 18.80% |        |

關於不同能量粒子輻射對電池之損害方面，質子和電子照射結果趨勢是相反的；電子能量越高損害越大；反之質子能量越高損害越小。關於質子與電子趨勢相反之現象在諸多文獻中均有提及，此為電子和質子損害機制不同所致。電子對材料的破壞是較均勻的，質子則較侷限在其路徑附近。並且對於嵌入材料的質子，其最大的破壞點會在路徑的末端，也就是質子停下的地方。能量越高的質子會穿入越深的距離，更高能量的質子則會穿過電池，不會嵌入材料破壞較低。而低能量質子則容易嵌入材料，造成最大的能量轉移，這使得低能量的質子反而破壞力更強。

為探討可能之質子損害機制，本研究亦分析本實驗樣品在質子照射前後各子電池之材料特性之改變，於質子照射前後分別進行 EQE 之量測，量測結果如圖 4-4。波長在 300-700 nm 附近為上層子電池的 EQE；波長在 600-900 nm 附近為中層子電池的 EQE；波長大於 900 nm 為底層子電池的 EQE。結果顯示 EQE 下降最多的為中層和底層子電池，可以推斷這兩個子電池是受到最大破壞的地方，這也呼應文獻中提到能量在 1 MeV

附近的質子大多會嵌入中層或底層電池。由於底層電池非限流電池，因此主要效能的下降是因中層子電池受破壞所致。

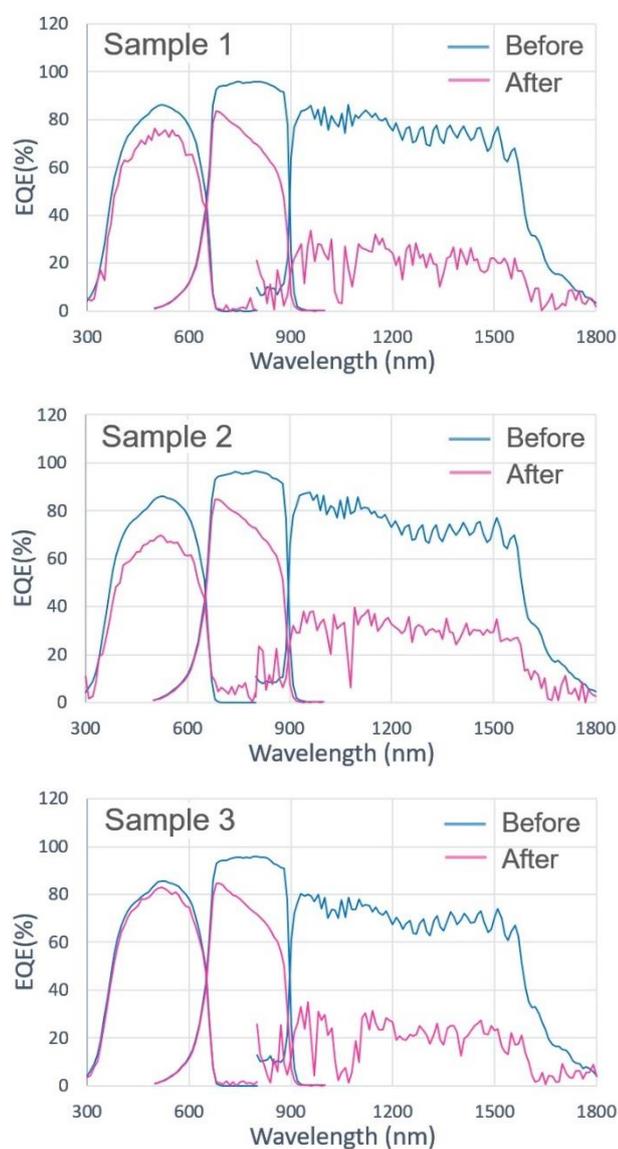


圖 2-7 電池於質子照射前後之 EQE 量測的結果

### 3. 元件製程抗輻射技術發展

#### 3.1 抗輻射之新興記憶體元件開發

為瞭解鐵電記憶體受質子輻射照射之影響，透過製程手法改變鐵電 HZO 中 Zr 比例，並製作成 FeFET 鐵電記憶體進行量測。基板採用 6 吋 p 型輕摻雜矽晶圓，其阻值介於 10-50 ohm-cm。以原子層沉積系統(atomic layer deposition, ALD)在上方堆疊閘極薄膜。首先在矽基板表面形成 SiO<sub>2</sub> 介面層，接著進行 HZO 沉積，此部分係採用 TDMAH、TDHAZ 兩種前驅物搭配 O<sub>2</sub> 電漿，交錯沉積 HfO<sub>2</sub> 與 ZrO<sub>2</sub> 奈米原子層堆疊，每層厚度約為 0.1nm，透過改變兩種奈米原子層堆疊 cycle 數，可製作出 Zr 比例為 40%、50%與 67%的 HZO 薄膜，而各種比例的 HZO 薄膜總厚度皆控制約為 10 nm。下一步以物理氣相沉積系統(physical vapor deposition, PVD)製作約 50 nm 的 TiN 作為應力層與接觸電極。經過黃光製程後，以離子佈值搭配磷元素，進行源極與汲極製作。最後以快速熱退火(rapid thermal annealing, RTA)，使 FeFET 鐵電記憶體在 800 °C的環境維持 30 秒，完成 HZO 鐵電層結晶與摻雜活化。

鑑於低軌衛星所承受的輻射主要來自質子，本研究以高能質子束作為輻照射源，探討鐵電記憶體的輻射損傷機制。此研究使用迴旋加速器系統(cyclotron system)將質子加速到 30 MeV。進行輻照實驗時，使用鋁片作為降能器，藉此將質子的能量降低至實驗所設定的水平(10 MeV)。同時為進行照射前的射束監控，使用法拉第杯、閃爍體偵測器、以及二次電子監控器等進行量測，確保實驗的質子能量、流量(fluence)和均勻性。圖 3-1 顯示質子束照射平台與 n 型通道 FeFET 鐵電記憶體元件之結構示意圖。

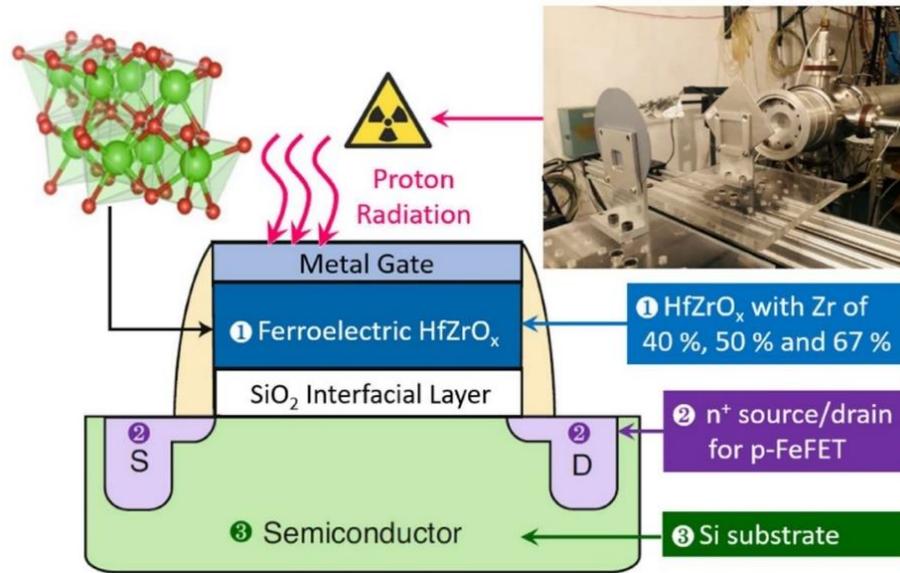


圖 3-1 質子束照射平台與 n 型通道 FeFET 鐵電記憶體元件之結構圖

實驗所採用的質子能量是參考低軌道衛星在范艾倫輻射帶(Van Allen belt)內層可能承受的質子輻射，其能量約為 10 MeV。本實驗使用固定的質子通量率(flux) ( $8.33 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>/s)，分別對鐵電記憶體元件進行 10 分鐘和 50 分鐘的照射，總質子流量分別為  $5 \times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> 和  $2.5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>。照射完後再與未受質子照射的元件進行比較，以研究質子輻射的 TID 效應對於 FeFET 鐵電記憶體元件特性的影響。

為確認 FeFET 鐵電記憶體經過質子輻照之後，其非揮發性記憶體特性是否受到影響，圖 3-2 所示為不同 Zr 比例之 FeFET 鐵電記憶體，使用雙向脈衝電壓( $\pm 5$  V/ $5 \mu$ s)對元件反覆進行寫入，其臨界電壓(threshold voltage, V<sub>TH</sub>)隨操作次數之變化。當 Zr 比例為 40%與 50%時，即使經過質子輻照後的 FeFET 鐵電記憶體皆能維持穩定的臨界電壓至  $10^7$  次，其中，Zr 比例為 50%時則在反覆操作後有較大的記憶視窗表現。隨著 Zr 比例上升至 67%，FeFET 鐵電記憶體則可進一步反覆操作至  $10^8$  次而不會

breakdown，然而，當質子照射流量達到  $2.5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 後，在  $10^0$  次即受到高臨界電壓減少導致記憶視窗出現衰退，推測 Zr 比例為 67% 的 FeFET 鐵電記憶體在經過高流量質子輻射照射後，鐵電層出現衰退。此部分需透過下一步直接量測閘極鐵電切換電流來確認。

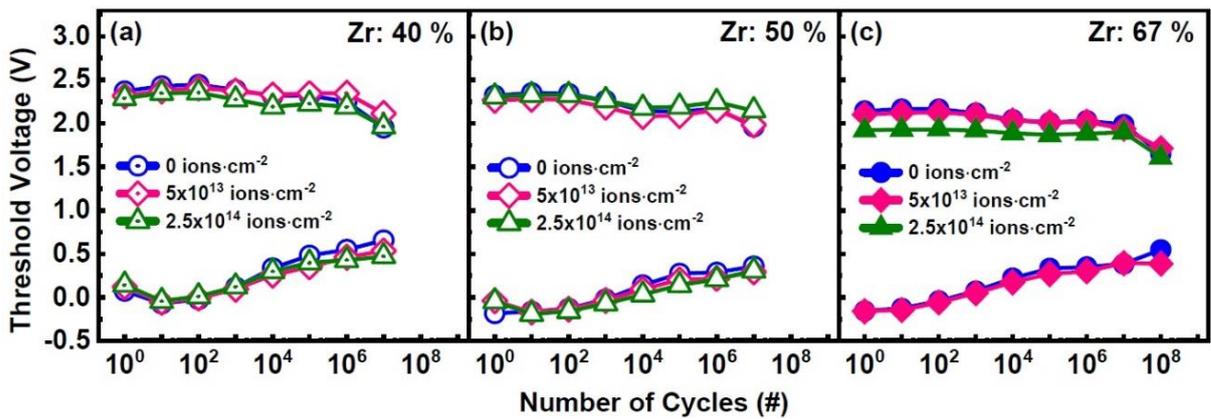


圖 3-2 不同質子流量對 Zr 比例為(a) 40 %、(b) 50 %與(c) 67 % FeFET 鐵電記憶體之臨界電壓耐久性影響

圖 3-3 顯示 Zr 比例 67% 的 FeFET 鐵電記憶體，將源極、汲極以及基極相接後<sup>[5]</sup>，在不同質子輻射流量照射下，閘極電流-電壓(IG-VGS)曲線隨操作次數增加之變化。當質子照射流量達  $5 \times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup>，在 +3 V 閘極電壓的位置僅會出現單一切換電流峰，且在反覆操作之後矯頑電壓 (coercive voltage) 亦無明顯變化。然而，當質子照射流量上升至  $2.5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>，初始狀態( $10^0$  次)之 IG-VGS 曲線在正閘極電壓出現兩個切換電流峰，且在 +4 V 閘極電壓位置具有更高的切換電流峰強度，導致矯頑電壓增加，以及切換電流分布變廣，此現象意味著在質子輻射照射後，介面處會產生氧空缺並導致電偶極發生釘扎(pinning)<sup>[6]</sup>。經過  $10^1$  次的反覆操

作後，位於+4 V 閘極電壓的電流峰消失，同時在+3 V 的強度開始增加。在反覆操作過程中，正矯頑電壓降低可能與照射輻射所增加的氧空缺與去釘扎有關<sup>[6]</sup>。同樣地，在負閘極電壓區亦可觀察到相同的去釘扎現象，當反覆操作次數介於  $10^0$  至  $10^2$  次區間，隨著質子照射流量上升至  $2.5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>，切換電流峰不僅強度從 100  $\mu$ A 下降至 50  $\mu$ A，形貌亦從陡峭的單一電流峰轉為分布廣泛的平坦形，這意味著翻轉電偶極更加困難，需使用更大的電壓範圍才能完全切換，此種在負閘極電壓區受阻礙的切換電流特性亦可用來解釋圖 3-2 之中 Zr 比例為 67% 的 FeFET 在照射輻射流量  $2.5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 後高臨界電壓產生衰退。

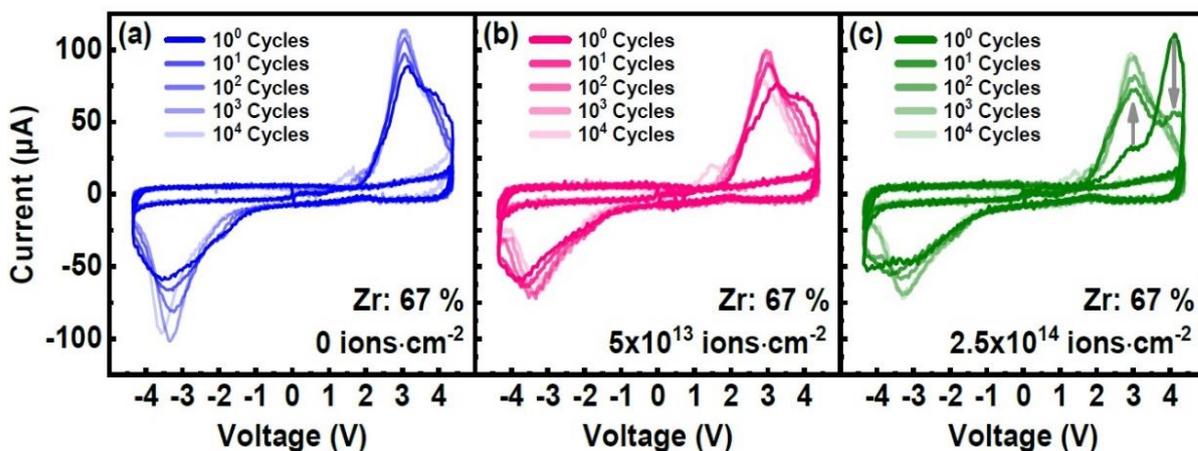


圖 3-3 不同反覆操作次數照射質子流量(a)  $0$  ions/cm<sup>2</sup> (b)  $5 \times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> (c)  $2.5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 後對 FeFET 鐵電記憶體(Zr : 67 %)閘極切換電流影響

圖 3-4 顯示質子輻射流量對鐵電遲滯曲線與斜率的影響。如圖中黃色紅色框所示區域，由於鐵電遲滯曲線是由瞬態電流對時間積分計算而得，其斜率可用來反映矯頑電壓分佈。舉例來說，較大的斜率代表矯頑電壓分佈較為密集，在小範圍的電壓區間就可以切換所有的電偶極。從結果來看，

Zr 比例為 67% FeFET 鐵電記憶體在反覆操作  $10^3$  次後，照射輻射流量越高的元件在負電壓方向斜率則越小，意味著在此電壓範圍下受到輻射照射所產生的缺陷影響，導致可被翻轉的電偶極減少。另外也萃取出 Zr 比例為 50%與 67% FeFET 鐵電記憶體，在反覆操作過程中的斜率變化。無論何種 Zr 比例或照射流量，在經過反覆操作後其斜率皆有所增加，此現象來自於 wake-up effect 有利增加翻轉電偶極之效率。而 Zr 比例 50 %與 67%的 FeFET 鐵電記憶體，在高流量輻照後具有相反的斜率增加趨勢，後者隨著流量增加而有較小的斜率增加率，意味著 67%的 FeFET 鐵電記憶體可能具有較差的輻射抗性，此差異需要後續進一步分析來確認。

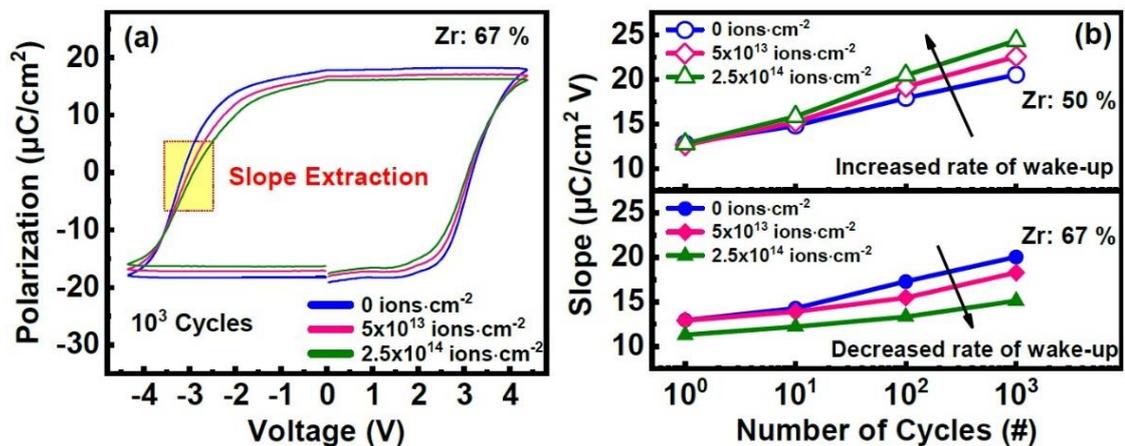


圖 3-4 不同質子流量對 FeFET 鐵電記憶體(a)在 Zr 為 67%之遲滯曲線以及(b)在 Zr 為 50%與 67%於不同反覆操作次數之斜率變化

圖 3-5 分析了 Zr 比例 50%與 67%的 FeFET 鐵電記憶體在質子輻照與反覆操作下之氧空缺行為表現。值得注意的是在鐵電層中只有兩個主要晶相，包括 tetragonal 與 monoclinic。Zr 含量較高的鐵電層具有較高成分的 tetragonal 晶相與較低成分的 monoclinic 晶相。通常大多數剛製作完成

的 FeFET 鐵電記憶體，由於結晶過渡性之故，其氧空缺會聚集在 HZO 鐵電層與 Si 基板的介面而非 HZO 鐵電層之本體(bulk)，因此在示意圖中底部界面附近顯示數量較多的氧空缺。然後隨著額外能量的提供(如質子輻射)，氧空缺開始重新分佈。對於 Zr 比例 50%的 FeFET 鐵電記憶體，如圖 3-5(a)、圖 3-5(c) 和圖 3-5(e) 所示，當質子通過元件時，損失的能量施加於氧空缺並使其重新分佈，從而舒緩了鐵電疇壁釘扎效應。此外新的氧空缺幾乎不會形成。經過反覆操作後展現出更明顯的鐵電疇壁去釘扎效應。需要注意的是由於輻射有助於舒緩釘扎效應，與未經輻射的 FeFETs 鐵電記憶體相比，輻射照射過的 Zr 比例 50%之 FeFET 鐵電記憶體在圖 3-4(b)中呈現出更大的 P-V 斜率。對於 Zr 比例 67 %之 FeFET 鐵電記憶體而言，如圖 3-5(b)，圖 3-5(d)和圖 3-5(f)所示，由於本質氧空缺(intrinsic  $V_o$ )含量更高，相比於 Zr 比例 50 %之 FeFET 鐵電記憶體，當質子通過元件時損失的能量將會產生更多的氧空缺。儘管反覆操作下仍會有輕微的重新分佈，但更高濃度的氧空缺仍然會在 HZO 鐵電層之晶粒界面引起鐵電疇壁釘扎。由於氧空缺生成效應比其重新分佈效應更為顯著，因此隨著質子流量的增加，Zr 比例 67%之 FeFET 鐵電記憶體呈現較差的 P-V 斜率和較差的 FeFETs 性能，這解釋了圖 3-4(b)中所示的斜率趨勢。

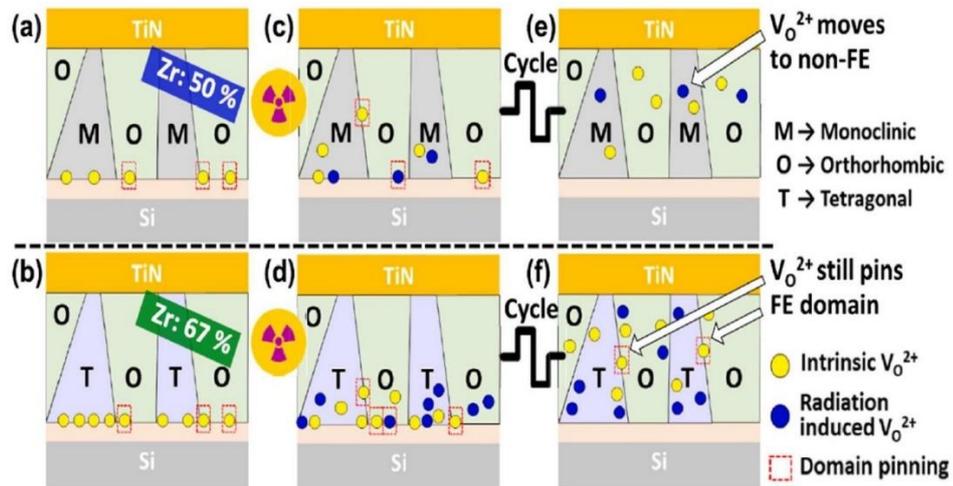


圖 3-5 FeFET 鐵電記憶體中氧空缺數量的分布狀況：(a)、(b)未照射輻射，(c)、(d)照射輻射，(e)、(f)照射輻射後反覆操作之情況。其中(a)、(c)、(e)之 Zr 比例為 50%，(b)、(d)、(f)之 Zr 比例為 67%

文獻的研究結果顯示氧空缺的電子捕獲效應對於後續氧空缺的數量有決定性的影響，其方式包括(1)氧空缺中的電子捕獲可促使附近產生新的氧空缺，(2) 氧空缺中的電子捕獲引起的周圍原子變形在附近創建另一個電子捕獲的前驅點(precursor site)，而這些前驅點進一步的電子捕獲會促使新的氧空缺形成。換句話說，一旦電子被現有的氧空缺捕獲，就很可能在現有的氧空缺附近生成新的氧空缺。由於在輻射下可以產生電子，因此預期在質子輻射照射期間將生成新的氧空缺。由於 Zr 比例 67%之 FeFET 鐵電記憶體的 HZO 鐵電層之本質氧空缺數量比 Zr 比例 50%之 FeFET 鐵電記憶體還高，故在輻射照射期間產生電子時，更多的電子將被現有的氧空缺捕獲，因此在附近生成更多氧空缺的可能性更高。這樣的機制也支持當 FeFETs 之本質氧空缺數量較高時，其在質子輻射照射期間將遭受更嚴重損壞的論點。

圖 3-6(a) 顯示了在不同質子流量下，Zr 比例 50%與 67%之 FeFET 鐵電記憶體所對應的 X 射線光電子能譜(XPS)之 O1s 能譜。圖 3-6(b)顯示了不同質子流量下 HZO 鐵電層之晶格氧(Lattice Oxygen, LO, 531.4 eV)和非晶格氧 (Non-Lattice Oxygen, NLO, 532.3 eV)之分峰拆解(deconvolution)結果，其中非晶格氧與氧空缺席位高度相關。對於 Zr 比例 50%之 FeFET 鐵電記憶體，即使在高達  $2.5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 流量時氧空缺席位數量幾乎不變。然而，對於 Zr 比例 67%之 FeFET 鐵電記憶體氧空缺席位數量則增加了 4.5%。在未照射輻射的情況下，Zr 比例 67%之 FeFET 鐵電記憶體由於 tetragonal 晶相較多，故具有更高的本質氧空缺席位數量，而這也在多項文獻中獲得證實。從模擬結果得知，tetragonal 晶相較多導致氧空缺席位數量較高的原因在於氧空缺席位可以使 tetragonal 晶相之體積能(bulk energy)更低，有益於 tetragonal 晶相的穩定。根據上述分析，本質氧空缺席位數量較高的鐵電材料將會在輻射照射下產生更多的氧空缺席位。

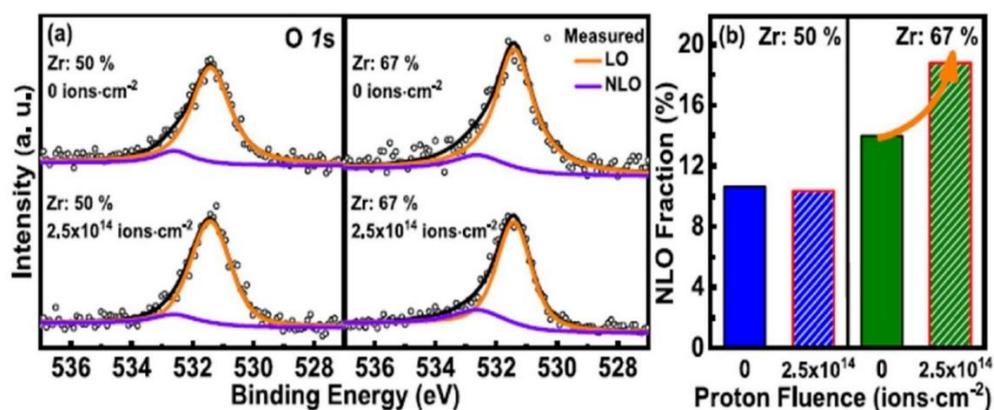


圖 3-6 (a)質子輻射流量對於 Zr 比例 50%與 67%之 FeFET 鐵電記憶體其 XPS O1s 能譜及分峰拆解之影響。(b)質子輻照流量對於不同 FeFET 鐵電記憶體其非晶格氧(NLO)比例影響

從上述分析可推論 Zr 比例 50%之 FeFET 鐵電記憶體由於具備較少的本質氧空缺數量，故具備了更優異的抗輻射能力。基於這項發現，本研究持續以此比例之 FeFET 鐵電記憶體為對象，探討質子流量與資料保存能力之關聯性，其結果如圖 3-7 所示。在不同質子流量照射後，FeFET 鐵電記憶體之初始記憶視窗差距不大，而流量達  $2.5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 時，資料保存能力的衰減程度相較於其他流量較為嚴重。儘管如此，在  $10^4$  秒也僅有些微的衰減，以外差法延伸至 10 年線仍有 2.2 V 的記憶視窗，這也再次證實比例 50%之 FeFET 鐵電記憶體具有極優異的質子輻射韌性 (radiation resilience)。

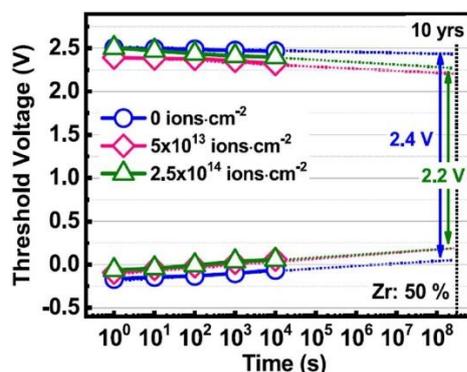


圖 3-7 質子輻射流量對 50% Zr FeFET 鐵電記憶體其資料保存能力之影響

### 3.2 抗輻射之積體電路製程與先進電晶體研究

由於太空環境的輻射強度比實驗室的照射強度低很多，為降低輻射照射強度對電子元件特性的影響，IEEE Std 383 規定電子元件壽命總劑量為  $5 \times 10^7$  Rad (Si)，照射劑量率為  $1.0 \times 10^6$  Rad/hr 以下，而一般典型的輻射劑量率為  $0.5-1.0 \times 10^6$  Rad/hr。然而當太空在短時間內發生高輻射劑量率時，

對電子系統以及元件影響亦很大。本實驗採用 Co-60 為射源，累積輻射劑量為 10 k - 1 M Rad。另也探討相同輻射總劑量且在高低輻射劑量率下對元件特性造成之影響，輻射劑量率為 1-80 kRad/hr。在評估低地球軌道輻射劑量及抗輻射測試方法方面，利用美國太空總署及歐洲開放資源，評估低地球軌道的輻射劑量，根據待測元件與系統之預定太空任務期間，評估其可接受的輻射劑量範圍，建立抗輻射測試程序方法。本研究參考國際規範，如測試前準備程序、輻射劑量率範圍、照射環境溫度、待測電子元件功能參數等項目條件，以符合我國福爾摩沙衛星電子元件使用。

本研究使用台灣半導體研究中心(TSRI)製程服務平台建立 SOI 鰭式電晶體(FinFET)製程，部分結構委託代工。此 FinFET 製程流程如圖 3-8。實驗中使用低壓化學氣相沉積(LPCVD)在 980°C 濕氧環境下成長 100 nm 的二氧化矽、在 780°C 環境下沉積 50 nm 的氮化矽和 100 nm 的非晶矽，然後進行 600°C、24 小時的固相結晶，使非晶矽轉變為多晶矽。接著使用微影蝕刻製程定義平台，然後使用 LPCVD 沉積形成 100 nm 的四乙氧基矽烷(tetraethoxysilane, TEOS)，進行蝕刻後保留 sidewall spacer 以作為阻擋蝕刻層(hard mask)。接著以光阻保護源極與汲極和蝕刻阻擋層保護通道，形成奈米線結構之後，使用氫氟酸移除阻擋層即完成主動區。接著進行 ALD 堆疊 HfON，堆疊週期期間使用氬氣電漿進行即場處理，HfON 沉積厚度為 3 nm。金屬閘極材料為氮化鈦，厚度為 100 nm，並使用微影蝕刻製程定義出主動區。定義和蝕刻閘極後，樣品進行磷離子佈植，再使用金屬快速熱退火以活化源極和汲極的摻雜。最後，使用電漿增強化學氣相沉積(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)，並由黃光微影與蝕刻製作接觸窗。最後接觸電極以 PVD 沉積 AlSiCu，經過微影與蝕刻後，使用水平爐管進行燒結(400°C、30 分鐘)，完成元件的製作。

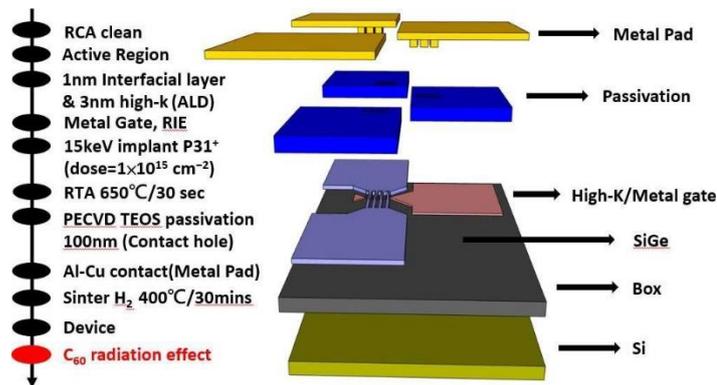


圖 3-8 FinFET 元件製程流程圖

圖 3-9 及圖 3-10 為相同總劑量 100 kRad，輻射劑量率 13、35、55 (kRad/h)對 MOSFET 及 FinFET 之汲極電流-電壓圖。對兩者而言都是隨著劑量率增高造成的導通電流退化也越多，推測是室溫退火的修復作用，劑量率高時照射時間較短，退火效應的使得元件恢復較少，因而退化量也大。而 MOSFET 的退化較 FinFET 大，推測是平面通道元件閘介電層受到傷害後，閘極對通道的場效控制變差使得元件特性退化明顯。然而 FinFET 的通道受到閘極三面控制，即使部分閘介電層受到傷害後，閘極對通道的場效控制影響較小，因此元件特性退化也較不明顯。

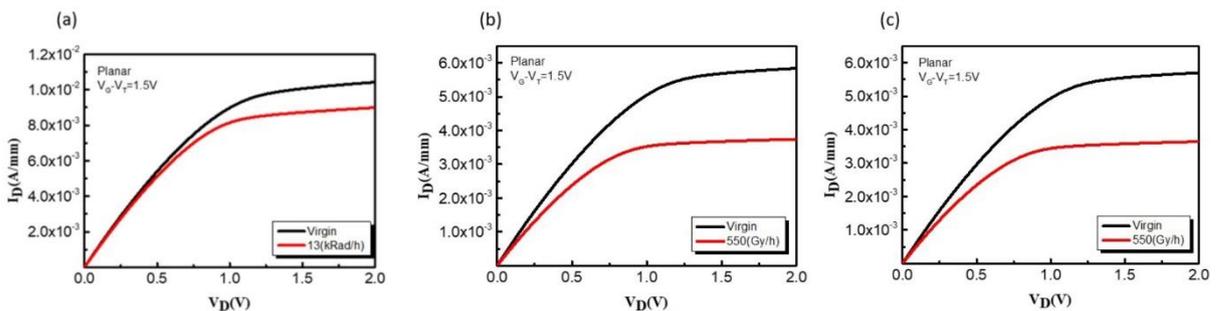


圖 3-9 相同總劑量 100 kRad，輻射劑量率(a)13、(b) 35、(c) 55 (kRad/h)對 MOSFET 之汲極電流-電壓圖

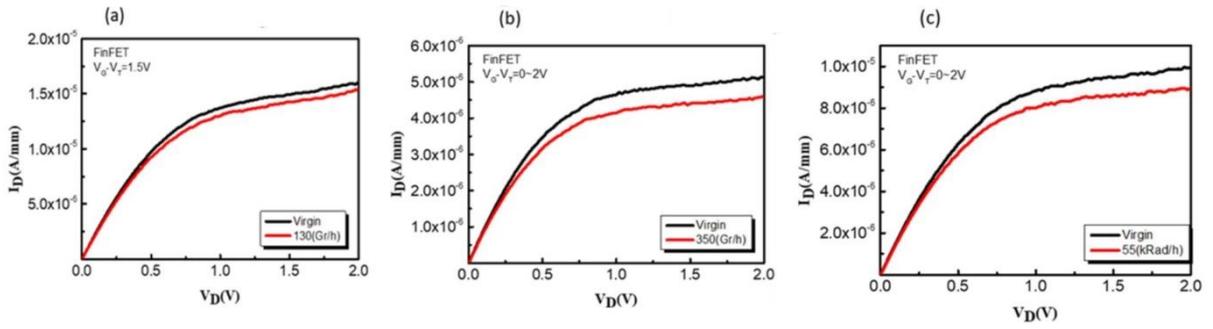


圖 3-10 相同總劑量 100 kRad，輻射劑量率(a)13、(b) 35、(c) 55 (kRad/h)對 FinFET 之汲極電流-電壓圖

圖 3-11 為不同輻射劑量率對 MOSFET 轉換特性圖，圖 3-12 為不同輻射劑量率對 FinFET 轉換特性圖。由 ID-VG 中可以得知 S.S.(Subthreshold Swing, 次臨界擺幅)、 $I_{on}$ 、 $I_{off}$ 、on/off ratio(電流開關比)及 Gm(Transconductance, 轉導值)，圖中可以觀察到相同閘極介電層，但不同的電晶體結構經過輻射後，所有的電性不管是 MOSFET 還是 FinFET 皆有劣化。

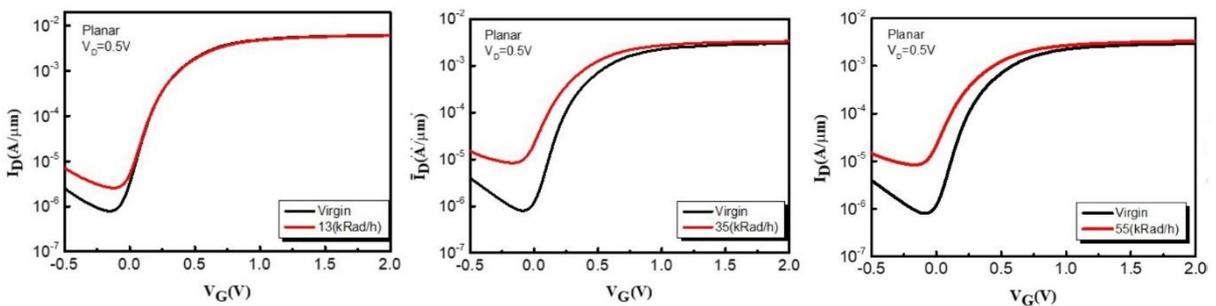


圖 3-11 輻射劑量率(a)13、(b) 35、(c) 55 (kRad/h)對 MOSFET 轉換特性圖

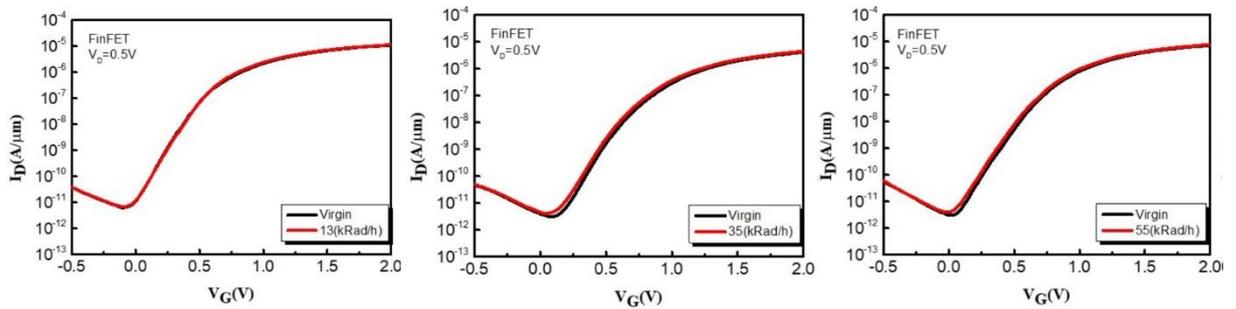


圖 3-12 輻射劑量率(a)13、(b) 35、(c) 55 (kRad/h)對 FinFET 轉換特性圖

為了證實元件電特性退化的推論是因為輻射照射中產生大量的界面缺陷造成的，故測量次臨界擺幅(S.S.)，主要是利用界面缺陷而變化的特性做 S.S.變化量的盒狀圖。從圖 3-13 可以明顯看出 MOSFET S.S.變化量較 FinFET 高出許多，這可能是鍍界面氧化層的元件較矽鍍的元件受到的傷害更大。另外也可以從兩張圖中看出在不同輻射劑量率下，兩者元件都有著相同的趨勢，隨著劑量率越高，照射時間也較短，S.S.的變化量也隨之增加，與上述推論相同。

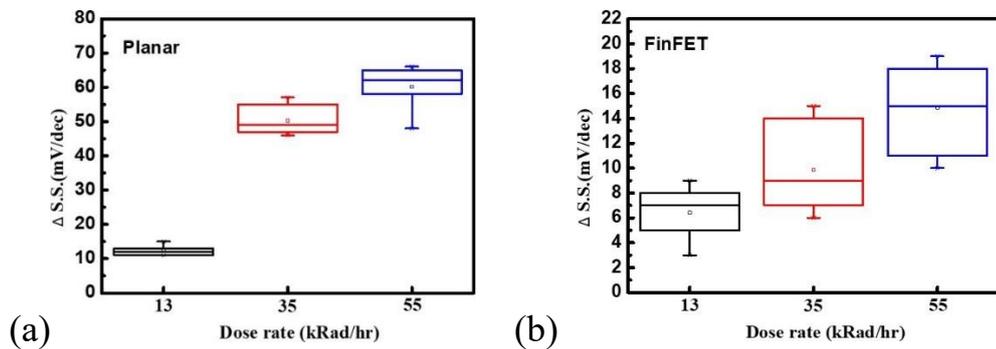


圖 3-13 S.S.變化量對不同輻射劑量率圖，(a)MOSFET、(b)FinFET

圖 3-14(a)為 MOSFET 之 on/off ratio 變化量對不同輻射劑量率圖，與前面結果相似，皆隨著輻射劑量率的上升，而使 on/off ratio 的退化量增加，圖 3-14 (b)為 FinFET 之 on/off ratio 變化量對不同輻射劑量率圖。從圖可以比較出 MOSFET 的退化量較 FinFET 來的高，推測矽通道的元件會較矽鍺的元件受到的傷害更大。

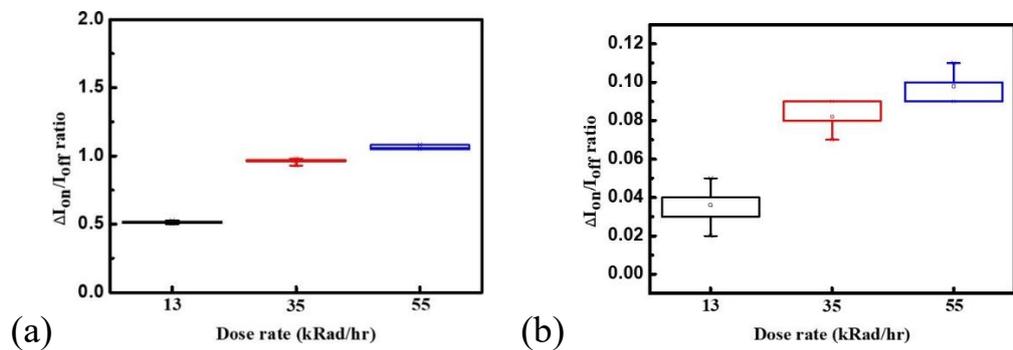


圖 3-14 不同輻射劑量率之 on/off ratio 變化量，(a)MOSFET、(b)FinFET

為觀察更高輻射劑量率對電晶體特性的影響，本計畫以清大現有最高輻射劑量率 68 kRad/h 來做實驗。元件導通與關閉電流退化比例對不同輻射劑量率的數據整理於圖 3-15。可以發現不管是 MOSFET 還是 FinFET，其導通電流退化量都相對比較微小，但關閉狀態的漏電流上升就明顯很多，與文獻結果一致。而從圖中也可得知 MOSFET 的劣化程度較 FinFET 劣化程度高出許多。推測原因是 MOSFET 界面層為 SiGeO IL，通道界面相對矽鍺 FinFET 有更多不穩定的 Si-Ge-O 鍵結之弱鍵，在輻射下更容易產生電子電洞對，導致界面產生較大量的界面陷阱數量或氧化層電荷，界面的總缺陷量較多使得 MOSFET 在導通電流及截止電流上會有較 FinFET 更大的退化幅度。

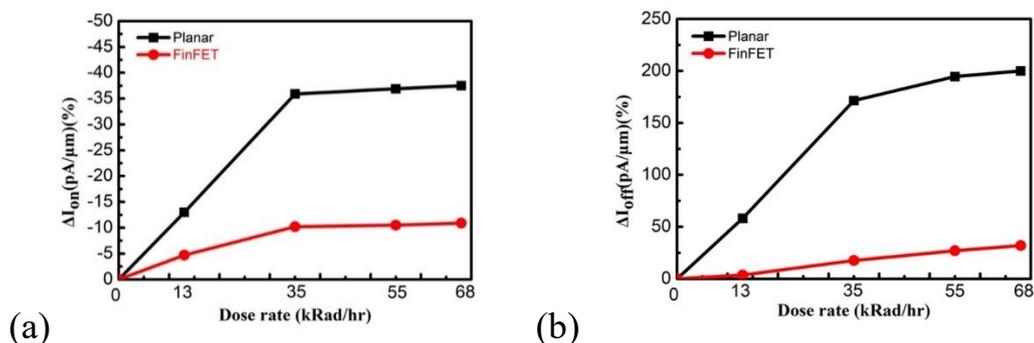


圖 3-15 不同輻射劑量率下 MOSFET 及 FinFET 之 (a) $I_{on}$ 、(b)  $I_{off}$  退化比例

而在輻射劑量率 13、35、55 及 68(kRad/h)的照射下，MOSFET 及 FinFET 都有著相同的趨勢，隨劑量率的增加而特性劣化也增加。當劑量率高於約 35 kRad/h 後，特性衰減程度呈現飽和，可能原因是劑量率越高則退火時間較短，造成的氧化層與界面陷阱也越多；但是很高的劑量率下，也可能使得半導體元件有升溫現象而增加退火效應。另外高劑量率照射元件產生較大的特性偏移，在量測時也會有較大的回復現象。因此劑量率再增高，元件整體的劣化並不會明顯增加。

### 3.3 寬能隙半導體材料與元件之輻射效應評估

本實驗採用 SiC 與 GaN 寬能隙半導體進行位移損傷效應研究。SiC 使用 neutron 進行輻照實驗；而 GaN 則進行氦離子( $\text{He}^+$ )與氬離子( $\text{Ar}^+$ )的照射實驗。SiC 基板採用製作功率半導體的 4H-SiC 獨立式基板；GaN 則因獨立型基板技術仍未成熟且成本高，因而使用目前常用的 GaN 磊晶於藍寶石基板，即 GaN on Sapphire 基板。切割的試片尺寸約為 1 cm x 1 cm。SiC 的輻照使用清華開放水池式反應器(Tsing Hua Open-pool Reactor, THOR)所提供的分裂中子源。實驗所使用的垂直照射管為位於 THOR 爐心南側

的 VT-4 與位於爐心正中央的 VT-G，THOR 的運轉功率為 1.5 MW，照射時間為 12 小時，圖 3-16 所示即為 THOR 爐心佈局圖及 VT-4 與 VT-G 垂直照射管對應的快/熱中子通量率。位於 VT-G 的 SiC 試片較 VT-4 遭受更高通量的中子輻照，VT-G 試片所接受的快、熱中子通量分別為  $7.8 \times 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup>、 $6.0 \times 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup>，VT-4 則為  $6.5 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>、 $1.6 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>。

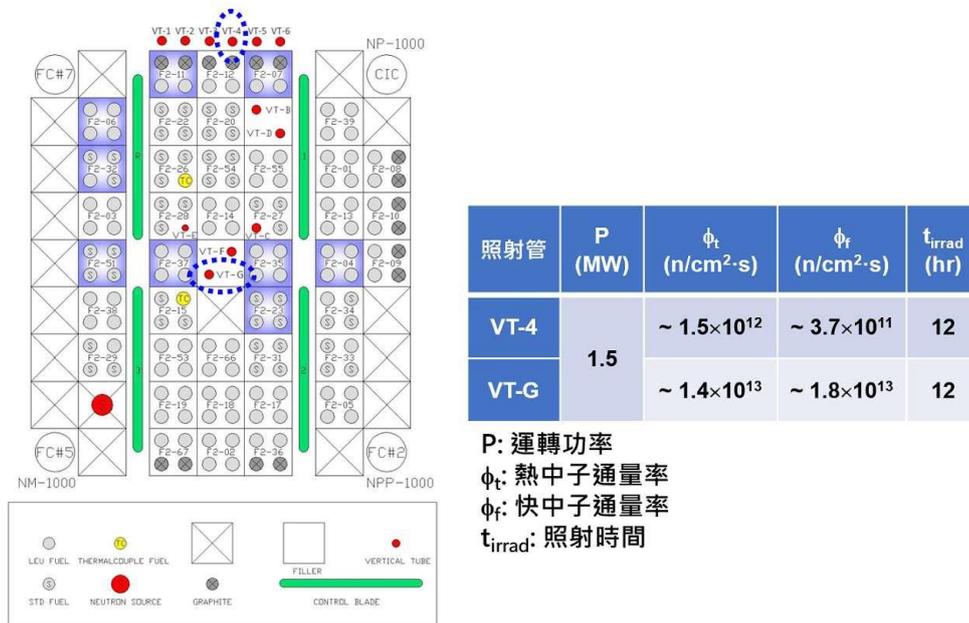


圖 3-16 THOR 爐心佈局圖及 SiC 試片的中子照射條件

在實驗前，本研究分別依據 SiC 與 GaN 的實驗條件與粒子種類建立兩組不同的蒙地卡羅模擬計算程式。在進行中子輻照之前，利用 MCNP (Monte Carlo N Particle Code) 蒙地卡羅中子遷移運算程式來建立 THOR 的爐心模型，以進行爐心的中子計算。圖 3-17 所示為 MCNP 計算所得之 THOR 不同垂直照射管所對應的中子能譜，其中藍色線可對應到本研究所使用的 VT-G 照射管的位置，綠色線則可對應到 VT-4 的位置。由此模

擬結果可知，相較於 VT-4 照射管，VT-G 照射管具有較高的中子通量率，並且具有較硬的中子能譜，亦即在此照射管中的快中子通量率高於熱中子通量率，此計算結果與實驗校正所得的中子通量率吻合。由於快中子具有較高的能量，可主導材料的位移輻射損傷，因此在 VT-G 照射管中照射的 SiC 試片應會呈現出較為明顯的位移損傷效應。

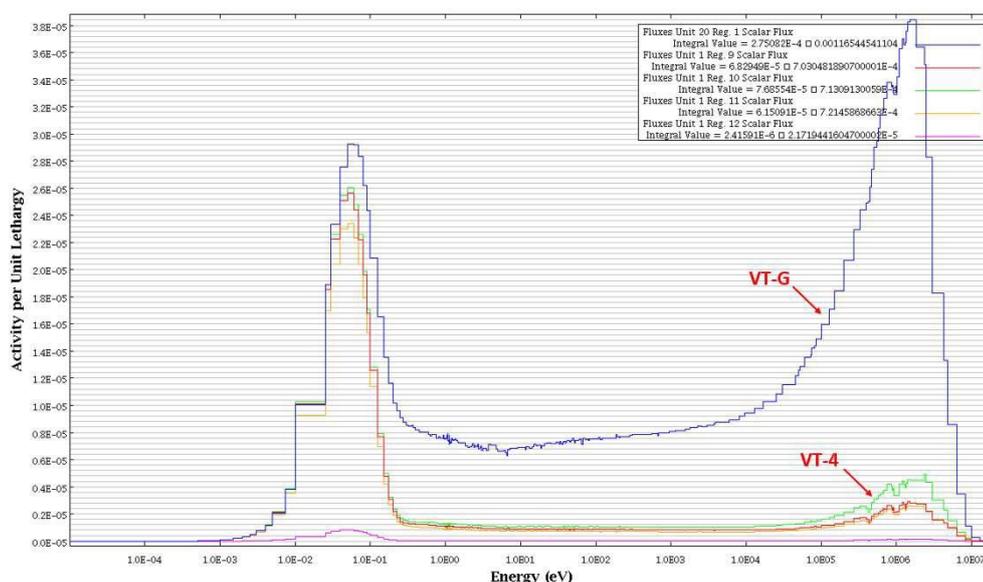


圖 3-17 利用 MCNP 計算所得之 THOR 照射管中子能譜

在進行  $\text{He}^+$  與  $\text{Ar}^+$  照射之前，為預測入射離子的射程與其所造成的位移損傷所致之缺陷位置，使用 SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) 蒙地卡羅程式計算入射離子的縱深及空孔分布，並決定離子照射的實驗條件，如加速能量與照射通量等。此外由計算所求得的 dpa (displacements per atom) 位移損傷量化數值亦可用於做為與其它輻射粒子輻射損傷程度相互比較時的參考。圖 3-18 所示為利用 SRIM 程式針對  $\text{He}^+$  與  $\text{Ar}^+$  入射於 GaN 至特定的照射通量之下的計算結果，圖中的藍線與紅線分別表示

離子濃度與 dpa 隨深度的變化。如圖所示，Ar<sup>+</sup>因質量較重，所造成的濃度與損傷分布的位置相較於 He<sup>+</sup>為淺，且在  $1.2 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> 的照射通量之下即可達到與  $5.0 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> He<sup>+</sup> 約略相等的 dpa 峰值。

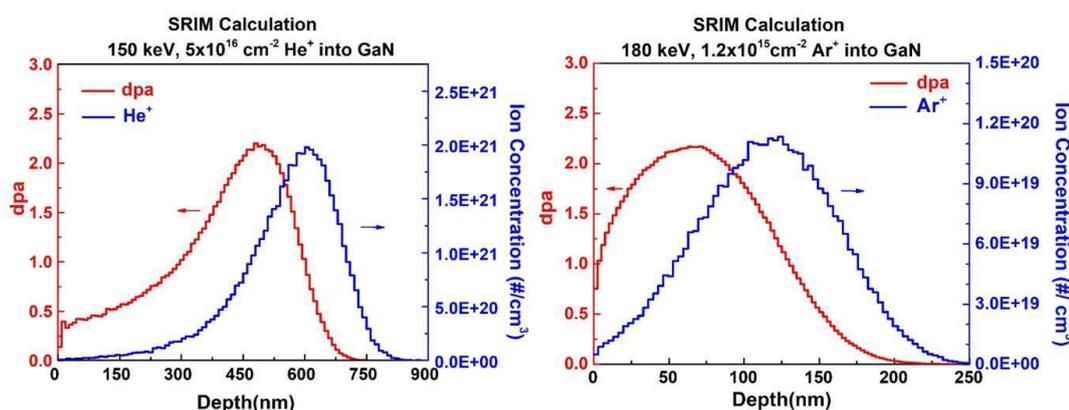


圖 3-18 利用 SRIM 計算所得之 He<sup>+</sup>與 Ar<sup>+</sup>照射離子之濃度與 dpa 分布情形

根據 SRIM 計算結果及本研究所使用的加速器規格，選定 He<sup>+</sup>與 Ar<sup>+</sup>的照射能量分別為 180 keV 與 150 keV。在照射通量方面，Ar<sup>+</sup>照射主要參考文獻選定能觀察到缺陷特性變化之劑量範圍，設計 5 組劑量進行照射以分析損傷程度與照射通量之間的關聯性。He<sup>+</sup>的照射通量則依據 Ar<sup>+</sup>照射所致之位移損傷 dpa 峰值進行設計，以比較不同離子照射所產生的位移損傷效應，但因 He<sup>+</sup>的照射需要較長的時間本次僅設計 3 組照射通量以為比較。所有的離子照射實驗皆在室溫下進行，照射時樣品法線與離子束傾斜 7°角以避免通道效應 (channeling effect)致使照射離子過於深入材料。照射參數整理於表 3-1 之中。

表 3-1 GaN 試片的 He<sup>+</sup>與 Ar<sup>+</sup>離子照射條件與 dpa 峰值

| 照射離子 | 能量      | 離子束流       | 照射時間     | 通量                                     | dap 峰值 |
|------|---------|------------|----------|--|--------|
| He   | 150 keV | 35 $\mu$ A | 12 min.  | $2.0 \times 10^{15}$ #/cm <sup>2</sup> | 0.09   |
|      |         | 65 $\mu$ A | 30 min.  | $1.0 \times 10^{16}$ #/cm <sup>2</sup> | 0.44   |
|      |         | 65 $\mu$ A | 150 min. | $5.0 \times 10^{16}$ #/cm <sup>2</sup> | 2.20   |
| Ar   | 180 keV | 7 $\mu$ A  | 2 min.   | $4.8 \times 10^{13}$ #/cm <sup>2</sup> | 0.09   |
|      |         | 35 $\mu$ A | 2 min.   | $2.4 \times 10^{14}$ #/cm <sup>2</sup> | 0.44   |
|      |         | 65 $\mu$ A | 5 min.   | $1.2 \times 10^{15}$ #/cm <sup>2</sup> | 2.20   |
|      |         | 65 $\mu$ A | 14 min.  | $3.6 \times 10^{15}$ #/cm <sup>2</sup> | 6.60   |
|      |         | 65 $\mu$ A | 25 min.  | $6.0 \times 10^{15}$ #/cm <sup>2</sup> | 11.01  |

圖 3-19(a)為未照射之 SiC 及位於 VT-4 與 VT-G 照射之後的 SiC 的 UV-Vis 吸收光譜。輻照前後 SiC 的吸收係數產生明顯的變化，由結果可知中子輻照會造成結構紊亂，擾亂電子結構並導致光吸收特性發生變化。根據 Tauc's equation，可藉由 UV-Vis 吸收光譜外插求得 SiC 的能隙，圖中所示的虛線與 x 軸的交點即是利用此關係式外插求得 SiC 的能隙。更進一步地利用 UV-Vis 吸收光譜亦可計算 Urbach energy ( $E_U$ )<sup>[7]</sup>， $E_U$  與材料的結構、及電子-聲子與電子-雜質交互作用有關，其值大小可用以判定能隙中的紊亂程度。當輻照於能隙中產生缺陷，則  $E_U$  會隨著輻照劑量增加而上升。圖 3-19(b)為 SiC 在 VT-4 與 VT-G 中子照射之後的能隙與  $E_U$  值。如圖所示，SiC 的能隙在 VT-4 照射之後有些許降低，而經過 VT-G 高通量的快中子照射之後，能隙出現明顯降低的現象。另一方面相對應條件所推得的  $E_U$  則呈現相反的趨勢，顯示晶格結構有漸趨紊亂之勢。由上述結果可證實，SiC 晶格損傷隨中子照射通量增加而變得更加嚴重，中子照射於 SiC 引發的位移損傷會導致能隙值下降並於能隙內累積缺陷態。

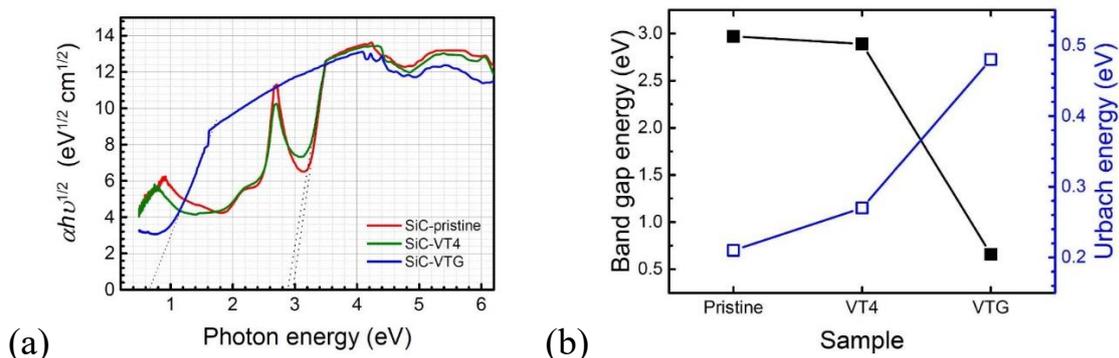


圖 3-19 SiC 之(a)UV-Vis 吸收光譜、(b)能隙與  $E_U$  值隨不同照射位置的變化

為進一步瞭解 SiC 晶體的原子組態隨中子照射條件的變化，本研究也進行 SiC 的拉曼射光譜分析。圖 3-20 所示為 SiC 在不同的中子照射管照射之後的拉曼散射光譜的變化情形，其中  $E_1(\text{TO})$  與  $E_2(\text{TO})$  為橫向聲子震動模式，而  $A_1(\text{LO})$  則為縱向聲子震動模式。這些聲子模式都是 4HSiC 晶體常見的拉曼散射特徵峰， $E_1(\text{TO})$  與  $E_2(\text{TO})$  與晶體品質相關， $A_1(\text{LO})$  則為聲子與電漿子耦合的結果，與載子濃度及傳導特性相關<sup>[8]</sup>。隨著中子照射通量增加， $E_1(\text{TO})$  與  $E_2(\text{TO})$  橫向聲子震動模式的特徵峰強度出現降低的現象；此外  $A_1(\text{LO})$  特徵峰則在 VT-G 照射之後明顯陡升之外，也出現特徵峰往高波數方向紅移的現象。上述的拉曼散射光譜的結果可更進一步地證實中子照射後的 4H-SiC 晶體品質有出現劣化的跡象，並且所引入的缺陷也造成原有摻雜載子的移除。

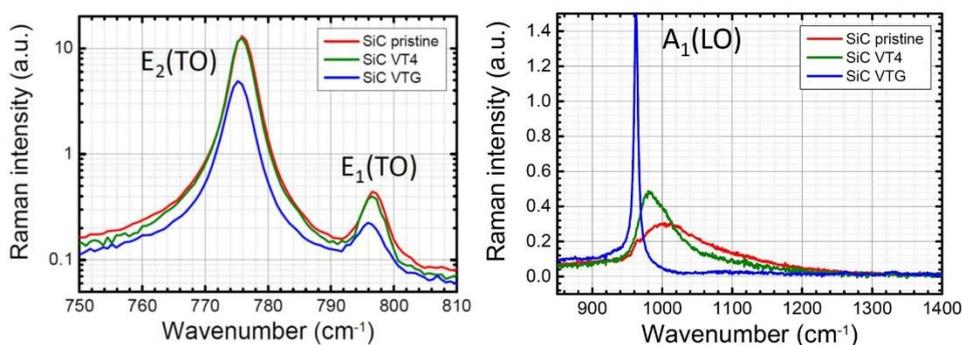


圖 3-20 SiC 之拉曼散射光譜隨不同中子照射位置的變化

由於中子照射導致位移損傷並在 SiC 晶體中產生許多的缺陷，本研究選擇在 VT-G 完成中子照射的 SiC，在氮氣下進行退火，溫度為 300、700、800、900、1100°C，時間為 1 小時，藉此探討中子照射試片的退火溫度效應。圖 3-21(a)為未照射試片及 VT-G SiC 在不同退火溫度之下的拉曼散射光譜，隨著退火溫度的增加可發現  $A_1(LO)$  特徵峰的紅移現象在 1100°C 時有趨緩的現象，然仍無法回復至原未照射試片的狀態，表示載子移除現象有逐漸復原的趨勢。另一方面  $E_1(TO)$  與  $E_2(TO)$  特徵峰的強度也隨著退火溫度出現變化。由於晶體中缺陷與完美晶體分別會對  $E_1(TO)$  與  $E_2(TO)$  模式有貢獻，Wan 等人的研究係將拉曼強度比  $I_R (=I_{E_1(TO)}/I_{E_2(TO)})$  定義為 SiC 晶體品質的性能參數<sup>[8]</sup>，若 SiC 晶體中的缺陷越多，則其強度比  $I_R$  越大。圖 3-21(b)為  $E_1(TO)$  與  $E_2(TO)$  特徵峰之強度比  $I_R$  隨退火溫度的變化情形，VT-G 剛照射完的樣品具有最大的  $I_R$ ，並且  $I_R$  隨著退火溫度的增加而逐漸降低。因此 SiC 的結晶品質在熱退火後有逐漸回復的趨勢。

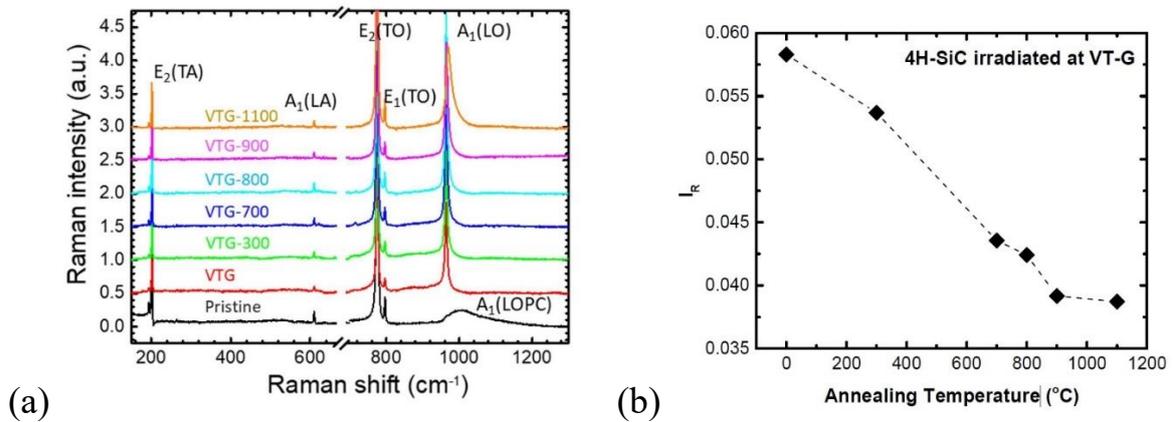


圖 3-21 SiC VT-G 之(a)拉曼散射光譜、(b)  $I_R$ ，隨退火溫度的變化

此外本研究也使用兆赫波時域能譜來研究中子輻照的 SiC 在不同退火溫度下的複光學電導率。將兆赫波時域能譜經由 Drude-Smith 模型擬合之後，即可推算個別 SiC 的載子濃度、載子遷移率、以及導電率等<sup>[9]</sup>，如圖 3-22 所示。經過 VT-G 中子輻照之後，SiC 晶體中的載子濃度可以從  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  降至約  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、載子遷移率從大約  $287 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  降至  $113 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、導電率由約  $250 \text{ }\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$  降至約  $50 \text{ }\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，這些結果亦可與前述的量測結果相呼應。此外在退火溫度增加至  $900^\circ\text{C}$  之前，這些參數值均未有明顯回復；直至退火溫度提高至  $1100^\circ\text{C}$  時，可發現載子遷移率幾乎完全回復，而載子濃度與導電率雖未完全復原，但亦有明顯提升。

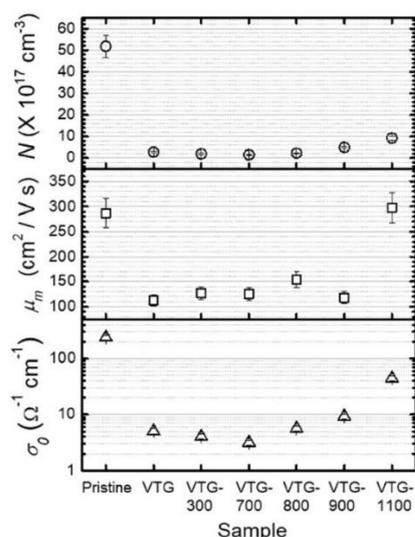


圖 3-22 SiC 的載子濃度、遷移率、導電率隨退火溫度的變化

在 GaN 輻射照射方面，圖 3-23 顯示霍爾效應分析儀測量的 GaN 薄膜中電子濃度( $n_e$ )隨  $\text{Ar}^+$ 與  $\text{He}^+$ 輻照通量的變化。明顯地，隨著  $\text{Ar}^+$ 與  $\text{He}^+$ 輻照通量增加，有效的電子濃度會隨之降低，並且兩種離子在等 dpa 的輻照條件下，其變化趨勢相當一致。圖 3-24 則顯示兩種離子輻照所造成的電子濃度下降比率與輻照通量的關係，以  $\text{Ar}^+$ 為例，當通量達到  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  時，載子密度下降的幅度甚至可達 32.5%。GaN 中載子被移除的原因可歸因於輻照產生的缺陷所引起的載子捕獲和載子補償效應<sup>[10]</sup>，而在之前使用 Ca、As 甚至 H 等不同離子輻照 GaN 的研究中也有發現類似的現象<sup>[11-13]</sup>。另一方面，圖 3-25 顯示了霍爾效應分析儀在 80 K 溫度下測量到的 GaN 材料中的電子遷移率隨  $\text{Ar}^+$ 與  $\text{He}^+$ 輻照通量的變化趨勢。可以看出  $\text{Ar}^+$ 與  $\text{He}^+$ 輻照導致載子遷移率隨著通量的增加而下降，這表示離子輻照的位移損傷產生的缺陷導致載子發生散射的機會增加，進而會降低 GaN 晶格中的載子傳輸速度。

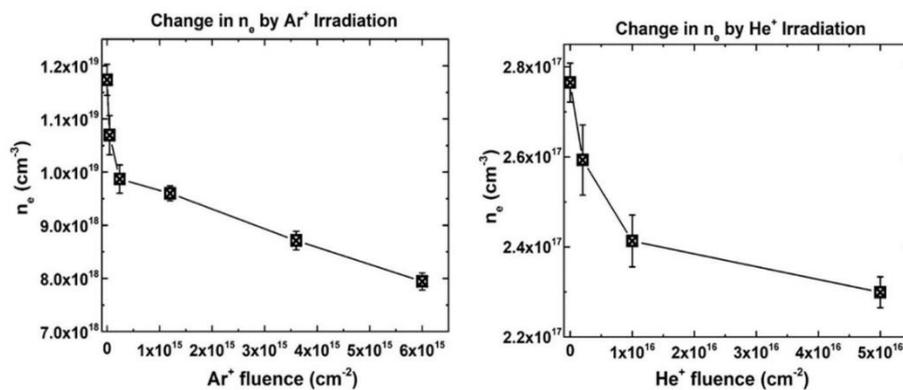


圖 3-23 GaN 的電子濃度隨  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量的變化

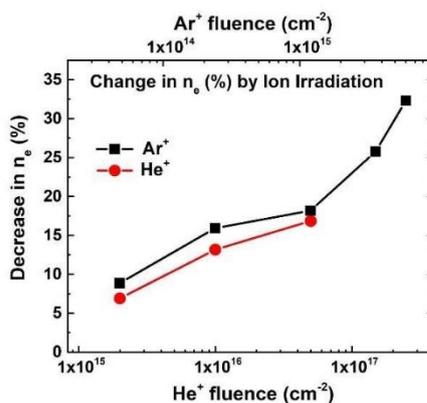


圖 3-24 GaN 的電子濃度下降率隨  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量的變化

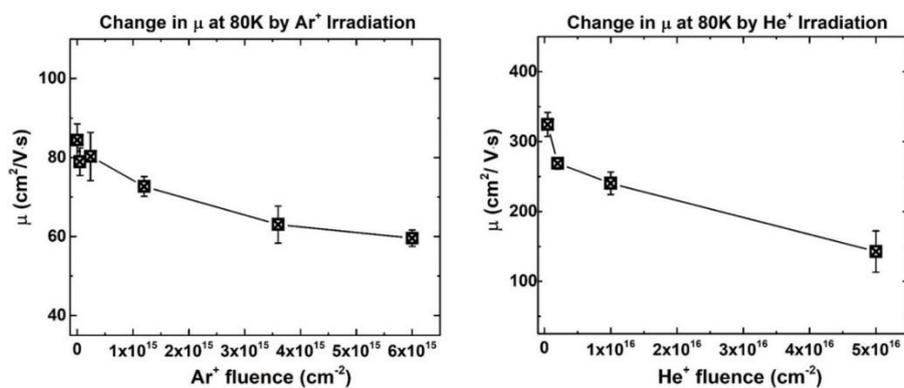


圖 3-25 GaN 的電子遷移率隨  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量的變化

圖 3-26 顯示 XRD 繞射圖譜隨 Ar<sup>+</sup>與 He<sup>+</sup>輻照通量的變化情形。如圖所示，經 Ar<sup>+</sup>與 He<sup>+</sup>照射之後，GaN 的(0002)繞射峰強度明顯下降，並且其繞射角隨通量增加而朝低角度的方向移動。強度降低說明 GaN 的結晶度發生劣化，而繞射角左移則表示 GaN 晶體沿 c 軸方向發生了晶格膨脹。為了瞭解 GaN 晶格膨脹相對於 Ar<sup>+</sup>與 He<sup>+</sup>輻照通量的變化趨勢，本研究進一步地定量 c 軸的晶格應變並發現兩者呈非線性的趨勢，如圖 3-27 所示，這結果在文獻中也有類似的發現<sup>[14,15]</sup>。在 GaN 中，經離子輻照所產生的 Frenkel pairs，在室溫下的動態退火過程中會使得輻射引起的缺陷累積隨著通量的增加而出現獨特的行為。在低通量輻照下，缺陷濃度相對較低，並隨著離子通量的增加而呈線性累積，c 軸晶格應變也隨之增加。隨著輻照通量逐漸增加，高濃度的缺陷變得非常活躍，缺陷之間產生強烈的相互作用，進而促使局域 GaN 晶格發生從晶相到非晶相的相變化。在相轉變的當下，缺陷會停止產生晶格損傷，同時形成非晶相，導致 XRD 和 RBS/C 圖譜中觀察到飽和的趨勢<sup>[14,16,17]</sup>。如圖 3-27 所示，從 GaN 的 c 軸晶格應變隨輻照通量的變化中可觀察到三種不同斜率的區域，這與上述先前的研究非常相似。在 Ar<sup>+</sup>通量  $2.4 \times 10^{14} \sim 1.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  範圍內，c 軸晶格應變飽和意謂 Ar<sup>+</sup>輻照的 GaN 在損傷區開始有非晶相。隨後 c 軸晶格應變的急劇增加表示 Ar<sup>+</sup>通量的進一步增加導致非晶層的形成和生長。同樣地，He<sup>+</sup>輻照的結果也與 Ar<sup>+</sup>有一致的趨勢，然在其本次所使用的最高通量僅可觀察到飽和區，預期若再增加 He<sup>+</sup>輻照通量亦可看到上升段。

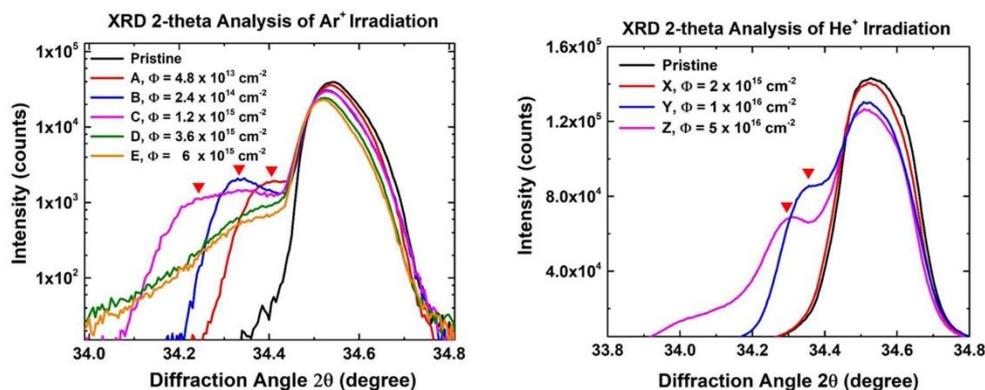


圖 3-26 GaN 的 XRD-2θ 掃描圖譜隨 Ar<sup>+</sup>與 He<sup>+</sup>輻照通量的變化情形

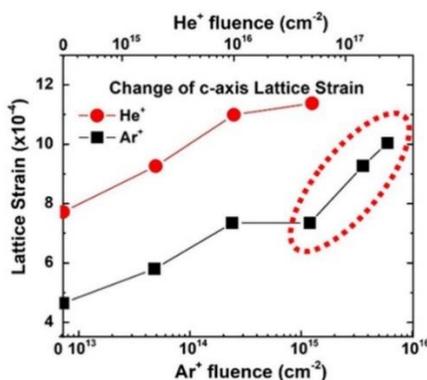


圖 3-27 GaN 的 c 軸晶格應變隨 Ar<sup>+</sup>與 He<sup>+</sup>輻照通量的變化情形

值得注意的是圖 3-26 中，在 Ar<sup>+</sup>與 He<sup>+</sup>輻照的 GST 晶體中，(0002)繞射峰的左側皆出現了肩部，此也被稱為”損傷峰”，此主要可歸因於到來自輻照損傷區域的繞射訊號<sup>[15,18]</sup>。隨著輻照通量的增加，損傷峰的 2θ 角逐漸遠離(0002)主繞射峰，這意味著損傷區域的晶格膨脹更加嚴重。由於損傷層的延伸，當 Ar<sup>+</sup>通量從 4.8x10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup> 增加到 2.4x10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup> 時，損傷峰的強度也表現出明顯的增加。隨著 Ar<sup>+</sup>通量繼續增加，損傷層開始演化為非晶相，損傷峰強度則開始下降<sup>[15]</sup>。最終當 Ar<sup>+</sup>輻照通量高於 3.6x10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>

$2$  時，損傷峰消失。特別的是損傷峰值強度的下降出現在  $1.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  的輻照通量，與圖 3-27 中 c 軸晶格應變的飽和狀態相符。再者當通量達到  $3.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  時，損傷峰完全消失，這也可對應於 c 軸晶格應變的第二段上升趨，即可歸因於非晶層開始形成和生長。根據 SRIM 模擬結果並由上述結果可以歸納離子輻照引起的 dpa 最大值在 0.44~2.2 之間會使得 GST 晶體損傷區局部區域出現非晶相，而在離子輻照 dpa 最大值高於 6.6 時則會形成非晶層。

圖 3-28 顯示了  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照的 GaN 在不同通量下的 PL 光譜。可以看出原始樣品發射出極高強度的 PL 特徵能峰，即近帶隙發射峰 (Near-Band-Edge, NBE)，此發射峰主要源自於帶間躍遷，具有 3.415 eV 的特徵光子能量。然而，即使在具有最低  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量的樣品中，NBE 特徵能峰強度也會出現顯著降低的現象。這意味著大多數輻射引起的缺陷可具有非輻射復合中心的特性，會透過缺陷捕獲與復合的過程而阻礙自由載子的帶間躍遷<sup>[19]</sup>。

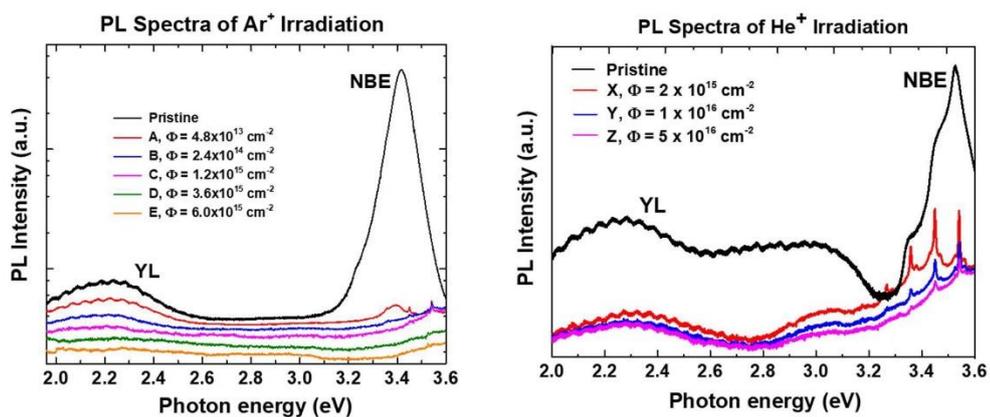


圖 3-28 不同  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量下 GaN 樣品的 PL 發光能譜

與 NBE 的劇烈變化相比，隨著  $\text{Ar}^+$  輻照通量的增加，位於 2.2 eV 附近的黃色發光(YL)帶的強度則下降得非常緩慢。YL 帶可歸屬於 CN 替代型深能階受體缺陷，即源自於 GaN 磊晶生長過程中，碳雜質佔據氮原子的晶格位置所致<sup>[20]</sup>。隨著  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量增加，CN 相關的 YL 發光帶也不再保持類高斯分佈，YL 發光帶消失也意味著  $\text{Ar}^+$  輻照可能會阻礙來自 CN 發光中心的光發射，或破壞 GaN 晶體中的原生 CN 缺陷。

GaN 的拉曼散射能譜隨  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量的變化如圖 3-29 所示。在  $570\text{ cm}^{-1}$  和  $736\text{ cm}^{-1}$  附近可觀察到兩個與 GaN 相關的拉曼特徵峰，分別對應於  $E_2^{\text{High}}$  和  $A_1(\text{LO})$  聲子模式。GaN 拉曼光譜中的  $E_2^{\text{High}}$  聲子模式是一種與 GaN 晶體結構內的氮次晶格(N sublattice)相關的振動模式。因此，隨著輻照通量的增加， $E_2^{\text{High}}$  峰值強度呈現下降趨勢，顯示  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照損傷也影響沿 c 軸方向的氮次晶格散射<sup>[21]</sup>。本研究也透過高斯洛倫茲曲線擬合，藉由將原始樣品的積分面積除以輻照樣品的積分面積，並將其定義為「無序因子」用以衡量輻射損傷的程度。由估算結果也顯示，隨著  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量的增加，無序因子的值呈現增加的趨勢，與上述結果一致。

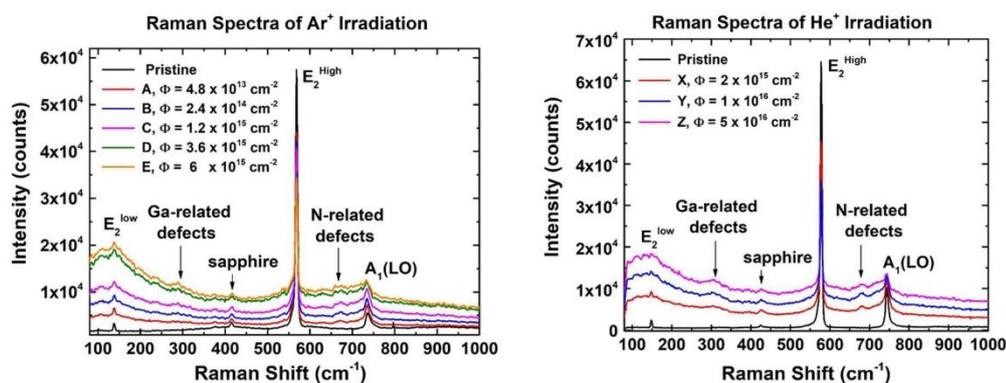


圖 3-29 不同  $\text{Ar}^+$  與  $\text{He}^+$  輻照通量下 GaN 的拉曼散射光譜

在 GaN 的拉曼光譜中， $A_1(\text{LO})$ 聲子模式是另一種特定的縱向光學振動模式，可用於識別和表徵晶格振動與電荷載子(通常是電子)的相互作用。如圖 3-30 所示，隨著  $\text{Ar}^+$ 輻照通量的增加， $A_1(\text{LO})$ 聲子模式特徵峰表現出紅移和變寬的趨勢。 $A_1(\text{LO})$ 聲子模式的紅移反映輻照後樣品中電子濃度的降低<sup>[22]</sup>，而半高全寬(FWHM)的增加則是由於  $A_1(\text{LO})$ 聲子模式的鬆弛，這都可代表離子輻照的 GaN 樣品中電子傳導的退化<sup>[23]</sup>。此外在  $\text{Ar}^+$ 與  $\text{He}^+$ 輻照的 GaN 拉曼光譜中，在波數  $300 \text{ cm}^{-1}$  和  $670 \text{ cm}^{-1}$  附近也分別顯示出與缺陷相關的特徵峰，稱為無序活化拉曼散射(disorder activated Raman scattering, DARS)<sup>[21,23,24]</sup>，其分別屬於 Ga 相關和 N 相關的 DARS 缺陷，而兩者的強度也隨著輻照通量的增加而呈現上升趨勢。

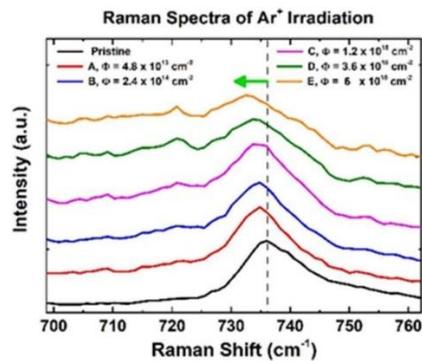


圖 3-30 GaN 拉曼散射之  $A_1(\text{LO})$ 聲子模式隨  $\text{Ar}^+$ 輻照通量的變化

## 4. 晶片系統抗輻射技術發展

### 4.1 太空商業應用之抗輻射晶片設計開發

本研究完成抗輻射 SWR(Switching Regulator)晶片之量測，配合輻射射線觀察晶片輸出訊號的 SEE 現象，完成抗輻射 SWR 與傳統 SWR PCB 下線並進行 LDO 輻射影響分析與抗輻射方法分析。

傳統與抗輻射 SWR PCB 晶片如圖 4-1 所示，量測時可使用麵包版與離散被動元件進行量測，此量測方法由於不需進行焊接並且可自由更動佈線，相較於設計 PCB 搭配 SMD 容易進行量測所需之電路環境，然而使用麵包版與離散被動元件實現之電路環境具有些缺點，如佈線線阻較大、雜訊較多、離散被動元件數值較不精確等，因此多使用 PCB 搭配 SMD 進行量測電路環境設置，確保量測數值精確並符合所需之電路環境，目前已經由 TSRI 進行抗輻射 SWR 與傳統 SWR PCB 下線。

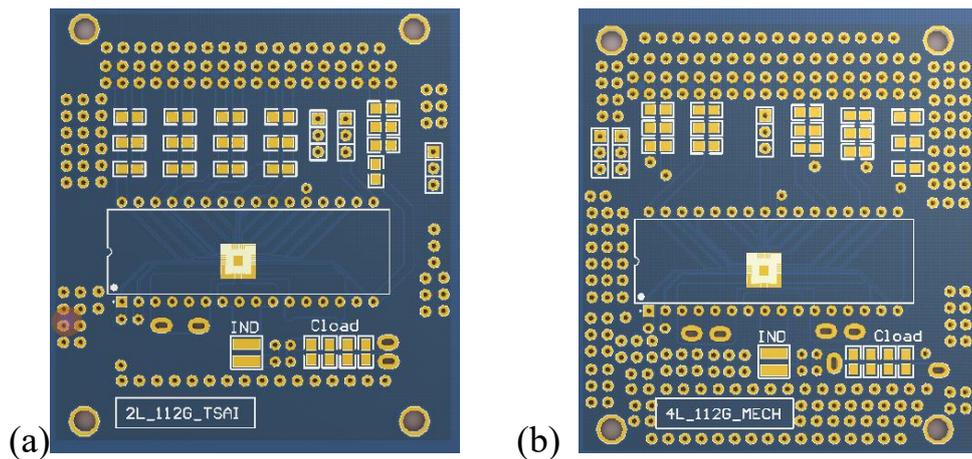


圖 4-1 (a)傳統與(b)抗輻射 SWR PCB 圖

在 LDO 輻射影響分析與抗輻射布局前分析方面，當傳統 LDO 受到輻射干擾時，由於 SEE 現象導致內部節點電壓跳動，導致輸出電壓擾動，由於當參考電壓擾動時可能導致使用此參考電壓之電路產生非預期之行為表現，抑制此現象對於提供電路穩定參考電壓之應用尤為重要。

類比電路抑制 SEE 現象主要使用兩種方式進行，類比冗餘(Analogue Redundancy)與時間偏移(Time-Skewed Redundancy)冗餘。類比冗餘如圖 4-2 所示，利用將電路複製多份，並利用電阻將輸出進行平均，來達到減緩輸出擾動的效果，可用於運算放大器輸出節點減緩因輻射引起之擾動，進而減緩 LDO 輸出之擾動。

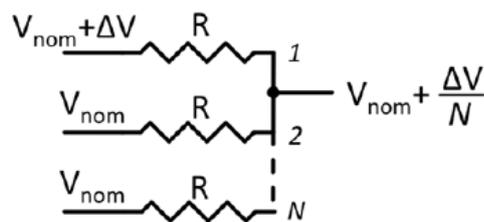


圖 4-2 類比冗餘原理圖

時間偏移冗餘利用將控制電壓延遲，並利用並聯不同延遲控制電壓控制之元件進行平均，來達到減緩輸出擾動的效果，此方法可應用於 LDO 功率元件部分，以此舒緩 SEE 現象導致之 LDO 輸出擾動，如圖 4-3 所示。

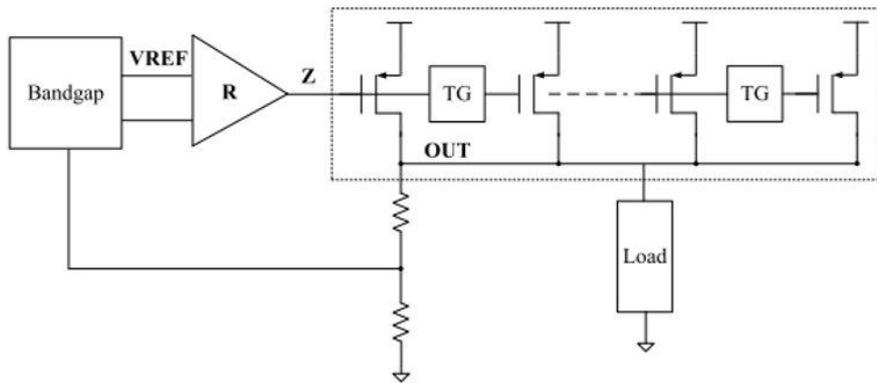


圖 4-3 Time-Skewed Space-Split LDO 架構

使用時間偏移冗餘設計方法之 LDO 雖具有較佳之輸出擾動抑制效果，但其穩定性較差，相較之下類比冗餘方法雖具有較差之輸出擾動抑制效果，但其穩定性與傳統 LDO 相似，如圖 4-4 所示，不同抗輻射方法比較列於表 4-1。

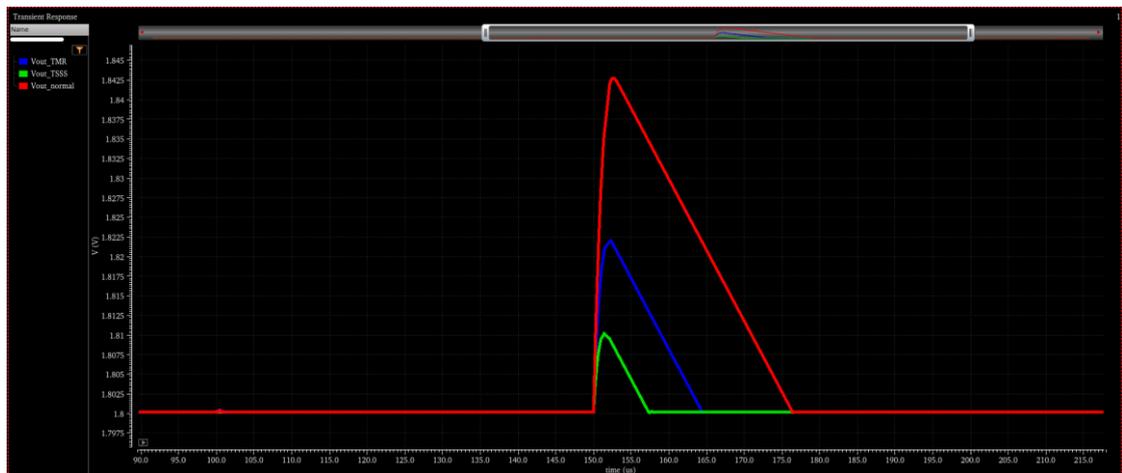


圖 4-4 不同抗輻射技巧輸出擾動比較

(紅線：無抗輻射、藍線：類比冗餘、綠線：時間偏移冗餘)

表 4-1 不同抗輻射方法比較表

|                       | 傳統 LDO                      | TSSS                        | Redundancy                  |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Regulated Output (V)  | 1.8 ( $\pm 1.27\text{mV}$ ) | 1.8 ( $\pm 1.27\text{mV}$ ) | 1.8 ( $\pm 1.27\text{mV}$ ) |
| PSRR @ 1kHz (dB)      | -61.98                      | -61.98                      | -61.98                      |
| PM (deg)              | 56.81                       | 35.31                       | 56.81                       |
| $\Delta V_{out}$ (mV) | 42.89<br>(1.179%)           | 9.87<br>(0.173%)            | 21.89<br>(0.414%)           |
| Duration (us)         | 26.16                       | 7.43                        | 14.31                       |

#### 4.2 短脈衝雷射輻射驗證技術

本研究之短脈衝雷射輻射驗證平台系統如圖 4-5 所示。

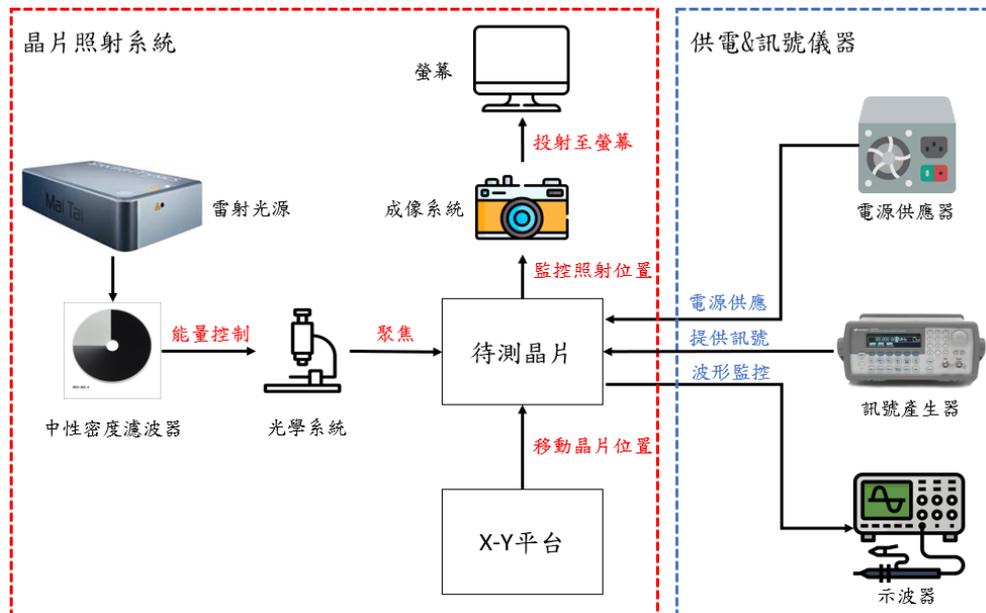


圖 4-5 短脈衝雷射輻射驗證平台架構配置

從整體架構配置中可再細分為光學系統、成像系統及移動平台系統。其中移動平台系統承載待測物，先透過垂直平台使光源及影像能對焦至待測物，再透過整合的兩個一維移動平台達到在二維移動的效果。平面掃描過程中設定每步移動單位長度、移動速度及定義座標零點，而達到讓光源掃描待測物的目的。

其中光點聚焦的光路是將光源透過物鏡聚焦至待測物上，而我們所選用之顯微鏡物鏡參數如表 4-2，依此物鏡的 NA 值計算可估計光斑最小直徑可小於 5  $\mu\text{m}$ ，如此便能針對電路中的敏感區域照射。在過去我們對焦光點所使用的垂直平台為分厘卡式移動平台，最小移動單位為 500  $\mu\text{m}$ ，相對物鏡的對焦來說精度不足，因此更換為可電控之垂直平台，而目前可程式控制垂直平台最小移動單位為 0.1  $\mu\text{m}$  且最大行程為 30 mm，如此能使光點更有效地對焦以加快實驗的設置。

表 4-2 選用之物鏡參數

| Item number  | Magnification | Numerical Aperture | Focal length | Working Distance |
|--------------|---------------|--------------------|--------------|------------------|
| PAL-50-NIR-L | 50x           | 0.45               | 4.0 mm       | 15.1 mm          |

設定完成對焦位置後，即開始移動 X-Y 平台以達成掃描待測物的效果。由於目前照射的晶片皆為自製的抗輻射電路，敏感區域皆在可預測的位置，因此照射實驗只需針對敏感區域即可。但若要成功達到驗證不同晶片的抗輻射特性，則需要將雷射掃描的路徑擴展至晶片全範圍。而實驗流

程規劃如圖 4-6 所示，會先整體掃描並記錄晶片中的敏感區域，再針對局部區域進行照射並分析。

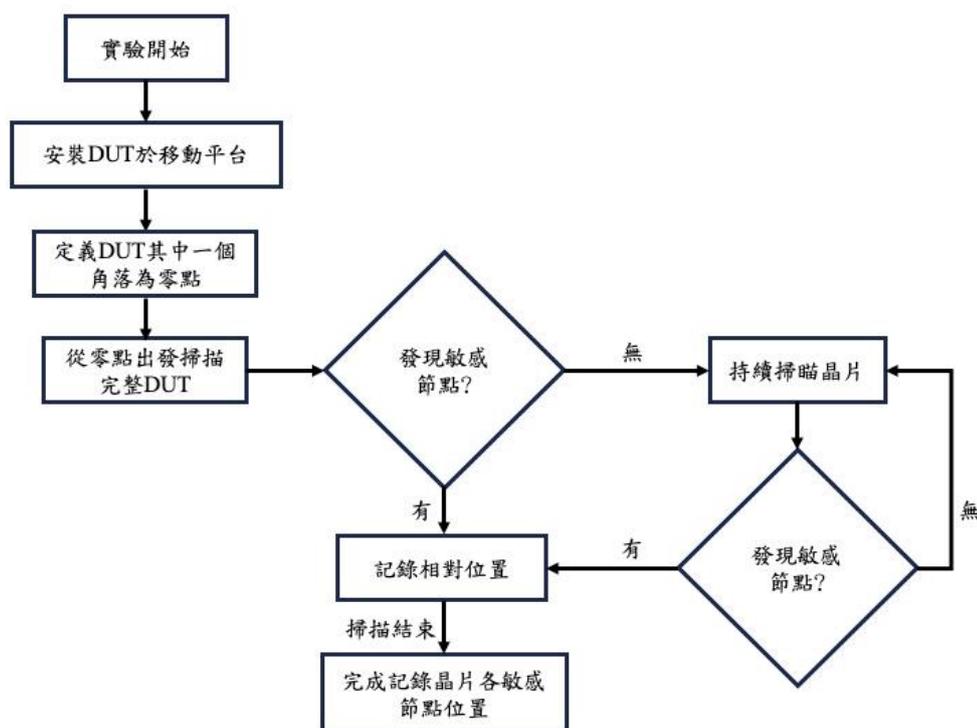


圖 4-6 照射實驗掃描流程規劃

若能藉由程式控制掃描範圍則能加快掃描晶片的效率，目前已經能透過程式控制二維平台，達到區域掃描的效果。在得到敏感區域後會再進行更局部的照射分析雷射對晶片造成的影響，以提供晶片各區域對能量的抗性給電路設計者參考。

在待測物發生 SEE 現象後，會針對敏感區域照射並逐步調降能量，且同時監測待測物的反應是否發生 SEE 現象，以找到對於雷射的臨界能量。實驗流程如圖 4-7 所示，而雷射能量的調控是透過光路中的中性密度

濾波片來控制，先前中性密度濾波片需手動旋轉使雷射通過濾波片中不同穿透率的部分，進而達到調控能量的效果。但中性濾波片不同位置對於能量衰減的變化為非線性的關係，且手動調整較難以固定比例調整能量變化。因此現今系統加入以馬達控制的濾光片輪，如此便能更準確地調整能量，且濾光片輪在連接電腦後能自動化控制，在精度上升的同時也增加了調整的效率。

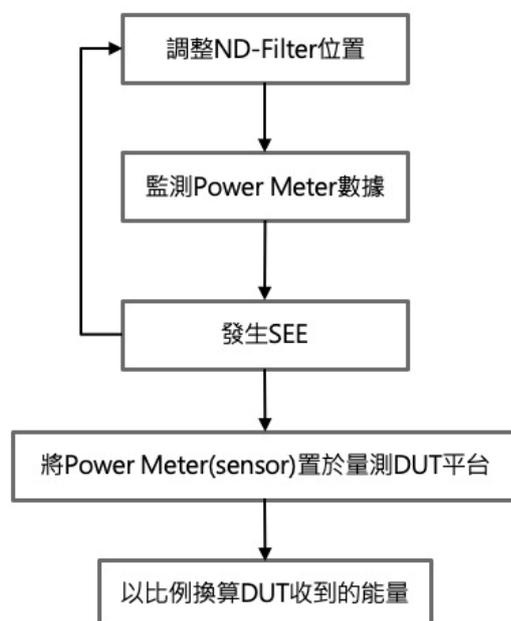


圖 4-7 照射能量量測流程

### 4.3 抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術

本研究探討異質整合晶片之多層連線建模。異質整合製程上方的小晶片，透過主動中介層(Active Interposer)的多層連線進行訊號的連結，PAD、微凸塊(microbump)與導線彼此之間的寄生電阻電容(RC)效應，會影響晶

片間訊號傳輸的延遲時間、穩定性及完整性。由於不同長度、粗細與間距的導線，對於電路特性所造成的影響程度不同，因此在異質整合晶片電路設計的過程中，於電路模擬時必須將 PAD、微凸塊與導線間的寄生效應納入考量，以確認晶片的功能與規格是否仍符合原先的設計，在主動中介層上的主動電路通常會加入緩衝器(Buffer)來增強訊號。

異質整合晶片通道連結的等效電路模型如圖 4-8 所示<sup>[25]</sup>，包含 PAD、微凸塊和導線的寄生效應。晶片與晶片之間每 100  $\mu\text{m}$  的連線使用三段的  $\pi$  模型來表示。因此對於更長的導線，需要使用更多段的等效電路。後續將先進行異質整合電路小晶片與主動中介層晶片的電路設計，再透過等效電路的估測公式進行 RC 數值的計算，並結合至 HSPICE 軟體進行電路模擬分析，了解寄生 RC 效應對於電路特性的影響。後續也將透過 TCAD 模擬軟體進行主動中介層上多層連線之抗輻射特性分析。

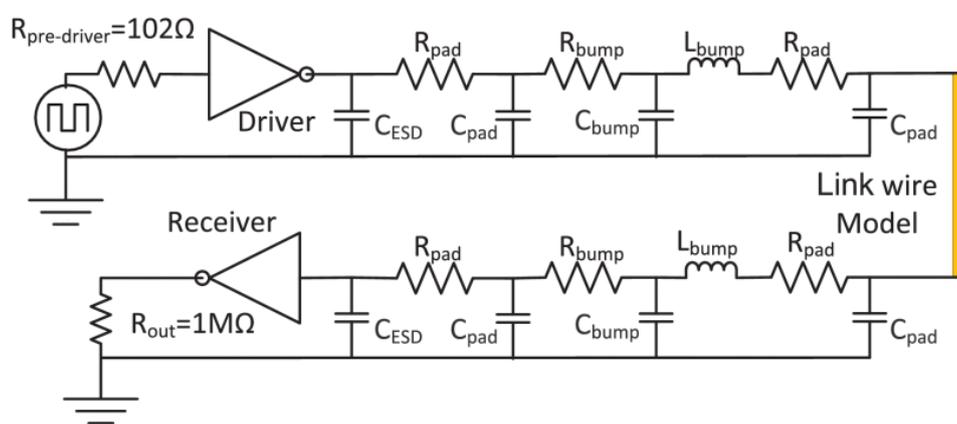


圖 4-8 異質整合通道等效電路模型<sup>[25]</sup>

為進行抗輻射小晶片異質整合技術開發與探討，本研究設計了一個含有 2 對 4 解碼器與 32 bit ROM 矩陣的電路佈局。ROM 電路佈局設計的

過程中，同時諮詢 TSRI 工程師的建議，將異質整合實作可能面臨的問題納入考量，並進行電路佈局修正。參考 TSRI 異質整合製程組的建議，將 alignment marker 設計成 L 型，避免黏晶(Die Bonding)時所產生 rotate 與 shift 的問題。同時參考 TSRI 異質整合製程組與晶片組的建議，將 PAD space 加大至  $23\ \mu\text{m}$  以上，避免因為 bonder 的攝影機能力限制，導致 XY 軸稍微偏移時影響到晶片接合，也避免接合時的錯位造成的短路問題。Marker 與 PAD 設計概念圖如圖 4-9 所示。

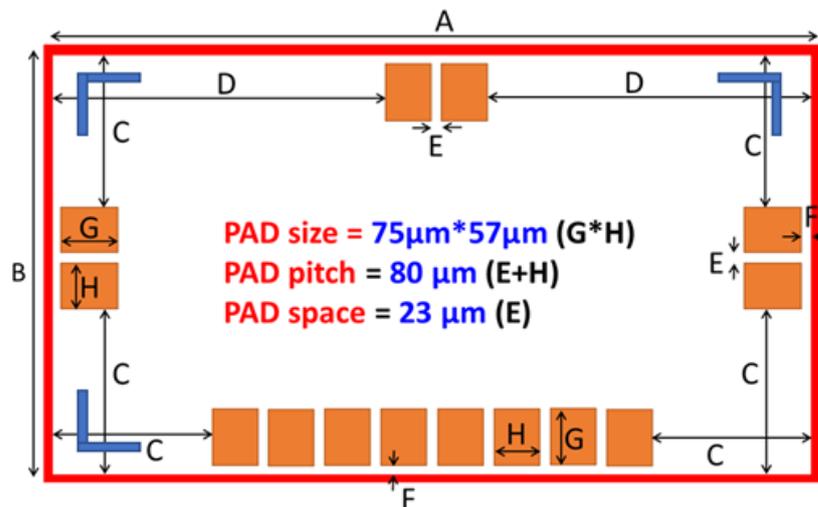


圖 4-9 Marker 與 PAD 設計概念圖

本研究參考 TSRI 提供的 design rule 與 SRAM 晶片所使用的 PAD 大小與間距，進行主動中介層晶片的電路設計。圖 4-10 為初步規劃的電路佈局圖，上方的兩個 Top chip 分別為 SRAM 晶片與 ROM 晶片，中間將透過主動中介層之主動電路進行連接。主動中介層內的主動電路預計使用緩衝器電路增強訊號，確保晶片間訊號傳輸的完整性。後續將使用前面

所探討的 RC 等效模型，評估主動中介層之多層連線的寄生效應對電路特性的影響，並透過 TCAD 模擬軟體分析其抗輻射特性。

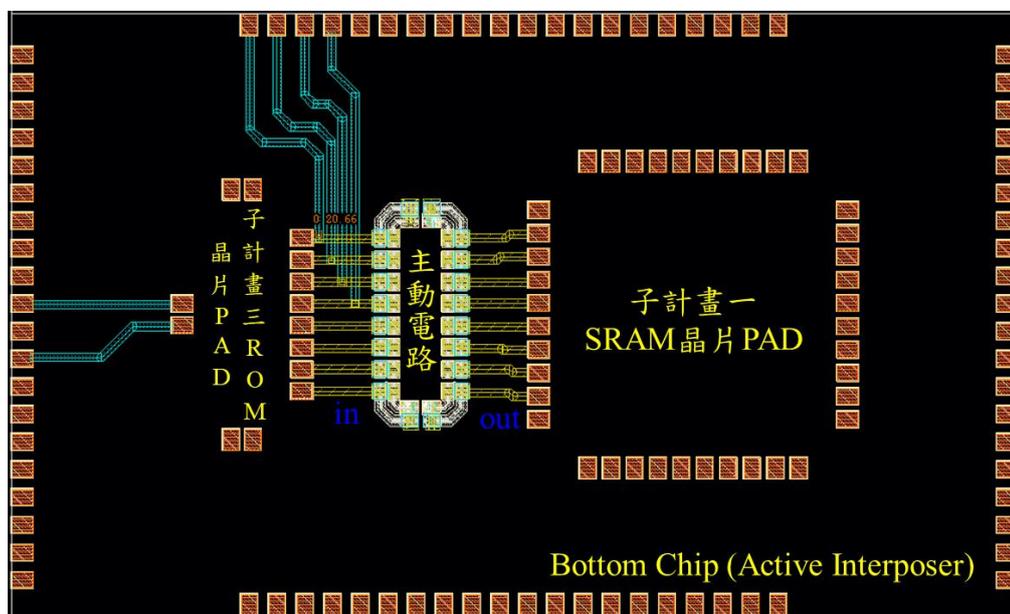


圖 4-10 異質整合主動中介層晶片設計規劃

## 5. 論著產出

表 5-1、5-2、5-3 分別列出「太陽電池抗輻射技術發展」、「元件製程抗輻射技術發展」及「晶片系統抗輻射技術發展」所產出之相關論著。

表 5-1 「太陽電池抗輻射技術發展」之相關論著

| 論著類型 | 題名   | 主要作者 | 編號          |
|------|--|------|-------------|
| 研究報告 | 光電元件金屬-半導體接觸特性之研究                          | 李岳穆  | INER-17121R |
| 研究報告 | 太空用太陽電池之磊晶架構優化研究                           | 施圳豪  | INER-17142R |
| 研究報告 | Al/Si 合金共熔點和 InGaP 化合物半導體能隙與 MOCVD 製程溫度之關係 | 蔡世貞  | INER-17181R |
| 研究報告 | 退火條件對半導體電極影響                               | 林家偉  | NARI-17269R |
| 研究報告 | 太空太陽電池之位移損害劑量測試法                           | 葉彥顯  | NARI-17342R |

表 5-2 「元件製程抗輻射技術發展」之相關論著

| 論著類型 | 題名  | 主要作者                | 編號  |
|------|---|---------------------|---|
| 期刊論文 | Impacts of Zr content of HfZrO <sub>x</sub> -Based FeFET memory on resilience towards proton radiation      | Hao-Kai Peng et al. | Applied Surface Science 645 (2024) 158788                                 |
| 期刊論文 | Effects of radiation damage on GaN epitaxial layer arising from argon ion implantation for edge termination | M.Y. Chen et al.    | Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 550, 165301 (2024). |

表 5-3 「晶片系統抗輻射技術發展」之相關論著

| 論著類型 | 題名   | 主要作者                | 編號  |
|------|--|---------------------|---|
| 期刊論文 | A 0.25- $\mu$ m HV-CMOS Synchronous Inversion and Charge Extraction Interface Circuit With a Single Inductor for Piezoelectric Energy Harvesting | Chi-Wei Chen et al. | IEEE Transactions on Power Electronics, 38, 12 (2023) 15707 |

|      |   |                   |  |
|------|---|-------------------|--|
| 期刊論文 | Pulsed-Laser-Induced Single Event Upset in Dynamic Comparator by Incorporating Experimental Parameters into Simulations | Shih-Bo Yu et al. | accepted by IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement   |
| 會議發表 | An Integrated Short-Pulse Laser Platform for Radiation Testing  | Jia-Han Li et al. | TASTI 2023 - Taiwan International Assembly of Space Science, Technology, and Industry 2023, Nangang Exhibition Center, Hall 2, Taipei, Taiwan, Oct. 30-Nov. 3, 2023 (oral, Nov. 1, Space Radiation Testing Workshop) |

## 6. 結論

本計畫進行衛星元件開發及輻射驗證環境之建構。工作項目 1「太陽電池抗輻射技術發展」之執行的研究項目包括「抗輻射太陽能電池磊晶研究」；「抗輻射太陽能電池元件製程」；「抗輻射太陽能電池元件特性量測」三個子主題。首先研究改變中層子電池摻雜濃度，將摻雜濃度之差異加大，以提升載子收集效率。接著根據外部量子效率之量測結果，調整上層子電池光譜，使電流達到更合適之匹配。製程方面則透過金屬與半導體之接觸電阻的研究，以改變退火溫度的方式降低電阻值，另外也研究在玻璃蓋片上增加抗反射膜，以進一步提升效率。在太空太陽電池輻射測試上以 1 MeV 之質子照射，電池轉換效率維持率平均為 65.65%，已達預期目標；並量測照射前後之外部量子效率，探討可能之輻射損害機制。

工作項目 2「元件製程抗輻射技術發展」執行的研究項目包括「抗輻射之新興記憶體元件開發」；「抗輻射之積體電路製程與先進電晶體研究」；

「寬能隙半導體材料與元件之輻射效應評估」三個子主題。完成探討質子輻照流量對 FeFET 鐵電記憶體之特性影響，結果顯示 Zr 比例 67%之 FeFET 鐵電記憶體於質子輻射照射後惡化較嚴重，推論是其本質氧空缺數量較多，經輻射後產生更多的氧空缺。反觀 Zr 比例 50%之 FeFET 鐵電記憶體對質子輻照有較高的韌性。接著探討 Co-60 照射對於 MOSFET 與 FinFET 不同結構的電晶體所造成的特性衰退影響。結果顯示 MOSFET 照射後衰退明顯，FinFET 僅有些微的劣化，因此 FinFET 具有相當高的輻射抗性。在輻射劑量率效應方面，MOSFET 及 FinFET 都有著相同的趨勢，隨劑量率的增加而特性劣化也增加。當劑量率高於約 35 kRad/h 後，特性衰減程度呈現飽和。在探討中子輻照對於 4HSiC 基材及 Ar<sup>+</sup>、He<sup>+</sup>輻照對於 GaN 磊晶層的輻射損傷效應的影響方面，發現中子輻照會造成 SiC 晶格損傷、降低載子傳導特性，而退火可移除輻照所造成的晶體缺陷，並使其載子濃度與載子遷移率獲得回復。Ar<sup>+</sup>與 He<sup>+</sup>輻照會導致 GaN 電子遷移率下降，並導致 c 軸晶格應變。

工作項目 3「晶片系統抗輻射技術發」之研究項目分為「太空商業應用之抗輻射晶片設計開發」、「短脈衝雷射輻射驗證技術」及「抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術」三個子主題。完成傳統 SWR 與抗輻射 SWR PCB 之設計並下線，另外進行 LDO 輻射影響分析與抗輻射方法分析，比較不同抗輻射方法之優劣，可據此進行抗輻射 LDO 之改善設計。短脈衝雷射輻射驗證平台優化方面，移動平台系統改為可程式控制，垂直平台更新後亦提升到更高的精度，使物鏡的對焦更有效率。而二維移動平台能以程式控制達到掃描晶片的功能。在抗輻射晶圓等級小晶片異質整合技術方面完成用於異質整合製程之 ROM 晶片電路佈局設計，並進行主動中介層晶片設計。

藉由本計畫之執行並整合國內跨領域研究機構資源及技術，完成自主研發設計並藉由元件輻射效應的探討，強化前瞻性太空科技的應用與實務。研究成果將可做為國內未來在推展航太科學、軍事、太空電子等研究領域的重要基礎，對半導體工業、核能電廠、太空飛行器等都有重要貢獻，可提昇我國科技競爭力。計畫的執行兼具理論推導與設計實作，技術涵蓋光電半導體磊晶、製程及輻射物理等，為創新之技術提供均衡且扎實的根基，藉由實驗數據分析、資料搜集、問題解決等步驟獲得新技術開發之成果，落實國家之國防、太空科技技術自主政策。

## 参考文献

1. NASA, (2023) Artemis I, Retrieved from <https://www.nasa.gov/artemis-1> (Jan. 3, 2023).
2. Starlink, (2023) Starlink, Retrieved from <https://www.starlink.com/> (Jan. 3, 2023).
3. ECSS, Photovoltaic assemblies and components, ECSS Secretariat, ECSS-E-ST-20-08C-Rev.1 (2012).
4. AIAA, Qualification and Quality Requirements for Space Solar Cells, AIAA Standard, AIAA S-111A-201X (2014).
5. K. Toprasertpong et al., “Evaluation of Polarization Characteristics in Metal/Ferroelectric/Semiconductor Capacitors and Ferroelectric Field-Effect Transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, 116, 242903 (2020).
6. P. Cai et al., “Investigation of Coercive Field Shift During Cycling in HfZrO<sub>x</sub> Ferroelectric Capacitors,” *IEEE Trans. Electron Devices*, 69, 2384 (2022).
7. S. Sorieul, J. Costantini, L. Gosmain, G. Calas, J. Grob, L. Thomé, “Study of damage in ion-irradiated  $\alpha$ -SiC by optical spectroscopy,” *J. Phys.: Condens. Matter* 18, 8493 (2006).
8. L. Wan, D. Zhao, C.-C. Tin, Z.C. Feng, Z. Feng, F. Wang, G. Xu, and T. Lin, “Quality evaluation of homopetaxial 4H-SiC thin films by a Raman scattering study of forbidden modes”, *Opt. Mater. Express* 8, 119 (2017).
9. T.I. Jeon and D. Grischkowsky, “Nature of Conduction in Doped Silicon”, *Phys. Rev. Lett.* 78, 1106 (1997).
10. B.D. Weaver et al., “On the Radiation Tolerance of AlGaN/GaN HEMTs”, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 5, Q208 (2016).
11. Lv, L., Ma, J. G., Cao, Y. R., Zhang, J. C., Zhang, W., Li, L., Xu, S. R., Ma, X. H., Ren, X. T., Hao, Y. “Study of proton irradiation effects on AlGaN/GaN high electron mobility transistors.” *Microelectronics Reliability*, 51 (2011) 2168-2172.

12. Lee, L., Lee, W. C., Chung, H. M., Lee, M. C., Chen, W. H., Chen, W. K., Lee, H. Y. "Characteristics of deep levels in As-implanted GaN films." *Applied Physics Letters*, 81 (2002) 1812-1814.
13. Mensching, B., Liu, C., Rauschenbach, B., Kornitzer, K., Ritter, W. "Characterization of Ca and C implanted GaN." *Materials Science and Engineering: B*, 50 (1997) 105-108.
14. Mendes, P., Lorenz, K., Alves, E., Schwaiger, S., Scholz, F., Magalhães, S. "Measuring strain caused by ion implantation in GaN." *Materials Science in Semiconductor Processing*, 98 (2019) 95-99.
15. Liu, C., Mensching, B., Volz, K., Rauschenbach, B. "Lattice expansion of Ca and Ar ion implanted GaN." *Applied Physics Letters*, 71 (1997) 2313-2315.
16. Wendler, E., Kamarou, A., Alves, E., Gärtner, K., Wesch, W. "Three-step amorphisation process in ion-implanted GaN at 15 K." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 206 (2003) 1028-1032.
17. Kucheyev, S. O., Boudinov, H., Williams, J. S., Jagadish, C., Li, G. "Effect of irradiation temperature and ion flux on electrical isolation of GaN." *Journal of Applied Physics*, 91 (2002) 4117-4120.
18. Han, Y., Peng, J., Li, B., Wang, Z., Wei, K., Shen, T., Sun, J., Zhang, L., Yao, C., Gao, N., Gao, X., Pang, L., Zhu, Y., Chang, H., Cui, M., Luo, P., Sheng, Y., Zhang, H., Zhang, L., Fang, X., Zhao, S., Jin, J., Huang, Y., Liu, C., Tai, P., Wang, D., He, W. "Lattice disorder produced in GaN by He-ion implantation." *NIM B*, 406 (2017) 543-547.
19. Taube, A., Kamińska, E., Kozubal, M., Kaczmarek, J., Wojtasiak, W., Jasiński, J., Borysiewicz, M. A., Ekielski, M., Juchniewicz, M., Grochowski, J., Mysliwiec, M., Dynowska, E., Barcz, A., Prystawko, P., Zajac, M., Kucharski, R., Piotrowska, A. "Ion implantation for isolation of AlGaIn/GaN HEMTs using C or Al." *Physica Status Solidi A*, 212 (2015) 1162-1169.
20. Reshchikov, M. A. "Measurement and analysis of photoluminescence in GaN." *Journal of Applied Physics*, 129 (2021) 121101.
21. Li, B. S., Wang, Z. G. "Structures and optical properties of H<sub>2</sub><sup>+</sup>-implanted GaN epilayers." *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48 (2015) 225101.

22. Jeganathan, K., Debnath, R. K., Meijers, R., Stoica, T., Calarco, R., Grützmacher, D., Lüth, H. "Raman scattering of phonon-plasmon coupled modes in self-assembled GaN nanowires." *Journal of Applied Physics*, 105 (2009) 123707.
23. Katsikini, M., Arvanitidis, J., Ves, S., Paloura, E. C., Wendler, E., Wesch, W. "Indium implantation and annealing of GaN: lattice damage and recovery." *Physica Status Solidi C*, 7 (2010) 36-39.
24. Katsikini, M., Arvanitidis, J., Paloura, E. C., Ves, S., Wendler, E., Wesch, W. "Raman and X-ray absorption near-edge structure characterization of GaN implanted with O, Ar, Xe, Te and Au." *Optical Materials*, 29 (2007) 1856- 1860.
25. Y. Zhang, X. Zhang and M. S. Bakir, "Benchmarking Digital Die-to-Die Channels in 2.5-D and 3-D Heterogeneous Integration Platforms," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 65, no. 12, (2018) 5460-5467.