

寄生輻射風險一次破解

X-ray檢測拒成元件隱形殺手

● 李易展

爲了精確找出IC內部缺陷，非破壞性的3D X-ray驗證已成為半導體業界的關鍵手段。然而，經過高劑量輻射處理的IC，在後續可靠度測試中卻可能提前失效！隨著半導體逐漸應用於AI、車用、航太與醫療設備等需要超高可靠度的領域，如何有效量測並控制這些寄生輻射對IC的影響，已是工程師不得不面對的重大挑戰。

X-ray屬於物理性非破壞檢測，是一項即時且便利的分析實驗，可在故障分析(FA)或產品製程改善過程中快速找出問題；僅在極少數特定製程或產品條件下，才可能影響元件的電氣特性。

如同人體若長期暴露在輻射環境中，可能導致細胞突變、DNA受損，甚至增加癌症風險。對於IC而言，情況其實類似——當元件在X-ray等非破壞性驗證分析中持續累積過高的輻射劑量(TID, Total Ionizing Dose)，其內部電晶體特性可能發生變化，造成閘極漏電流上升、閘極氧化層劣化，最終導致IC提前失效。

隨著AI人工智慧、車規與航太電子標準趨嚴，IC的長期可靠性要求日益提升，這項過往經常被忽略的潛在風險，如今已不得不正視。因此，JEDEC於2023年11月發布JESD22-B121標準，明確定義如何評估IC在製造、驗證和表面黏著技術(Surface Mount Technology，簡稱SMT)等製程中，暴露於輻射照射後的電性變化，並確立其TID限制值(可稱為故障極限值或供應商極限值)，以降低潛在失效風險。

本文將探討X-ray對電子元件造成的電氣故障模式、關鍵測試變數，以及X-ray輻射總電離劑量(TID)測試最終報告內容，分享如何透過「寄生輻射劑量沉積驗證平台」，有效預防潛在故障風險。

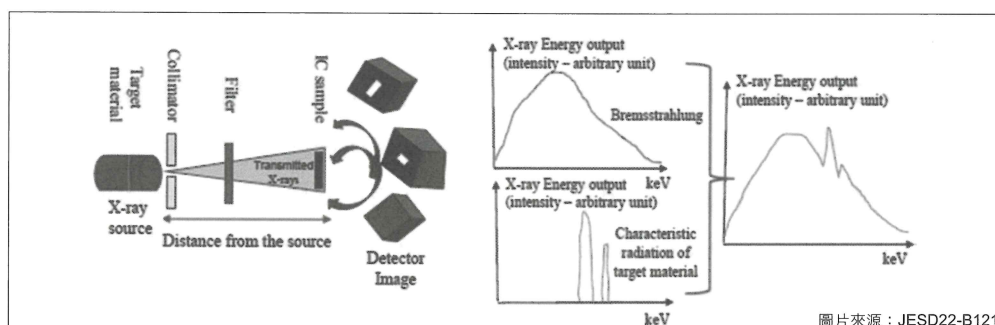
輻射劑量對IC電氣影響

爲了評估關鍵參數的變化，必須充分理解電子元件在電離輻射環境下，因介電電荷積聚(Trapped Charge)所產生的

表 1 主要 IC 元器件 / 單元類型其大部分預期的故障模式

元件/單元的類型	類別	引起的缺陷/應力層	預期的電氣故障模式
元器件	金屬氧化物半導體 (MoS)	電荷被困於柵極電介質 電荷被困於場電介質或淺溝渠器件 (STI)/電介質	在遭受一定輻射劑量後預期電晶體臨界電壓 (Threshold Voltage; V_{th}) 漂移 在受一定輻射劑量後，電介質隔離效能下降、元件間漏電增加
	雙極性元件(Bipolar)	電荷被困於柵極電介質	經一定輻射劑量後，基極電流 (I_b) 上升，雙極連結 (Beta, β) 降低。Beta (β)= I_c/I_b (I_c 為集極電流)
單元	1.非揮發性記憶體(NVM) 2.快閃記憶體(Flash Memory) 3.電子抹除式可複寫唯讀記憶體 (EEPROM)	電荷被困於氧-氮-氧與渠道的電介質中	在遭受一定輻射劑量後，導致臨界電壓 (V_{th}) 偏移
	動態隨機存取記憶體(DRAM)	在資料保留的其間，電荷被困於閘極電介質，造成電荷變化	在遭受一定輻射劑量後，記憶體在特定頻率下的更新週期 (Timing of Refresh Rate; t_{REF}) 降低

圖片來源：JESD22-B121



圖片來源：JESD22-B121

圖1 X-ray系統簡化示意圖

故障機制。當元件暴露於累積效應明顯的X-ray時，其內部的關鍵電性參數可能發生變化，導致潛在的失效風險。因此，輻射評估是確保半導體元件可靠性的重要環節，能幫助工程師判斷其抗輻射能力與安全範圍。

不同材料的輻射吸收速率不同，因此對電子元件的影響程度也會有所差異。當IC暴露在X-ray環境下，吸收的能量會沉積形成寄生輻射劑量(TID)，而這

種累積效應可能會導致不可逆的電氣故障(表1)。

X-ray系統設定和變數

X-ray成像技術廣泛應用於IC和元件的封裝驗證，特別適用於內部結構缺陷的發現，與可觀察表面缺陷的光學驗證技術相輔相成。X-ray成像技術可在IC運輸過程的影像掃描、焊點檢測、材料分析等應用中發揮關鍵作用。然而，

表 2 X-ray 的關鍵參數與其對輻射劑量的影響

關鍵參數	劑量依賴性	臨界最大劑量
曝光時間	劑量與時間成正比，檢測時間越長，累積輻射劑量越高。	最高曝露時間
準直器 (Collimator)	可限制 X-ray 的曝光範圍，減少鄰近區域的輻射擴散，降低不必要的輻射劑量。	相鄰物件二次曝露的總擴散曝露
X-ray 燈管形式 (來自輻射源的聚焦尺寸)	劑量與衰减比的關係，可根據 X-ray 供應商的資料表或 X-ray 校準報告提供的數據來確定。	較大的聚焦尺寸
X-ray 燈管功率 (Power; P) 電流與電壓的組合	較高的功率與電壓會提升 X-ray 強度，影響 TID 累積速率。如果沒有監測電流，則應測量每瓦的劑量率。	在給定電壓 (kV) 下的最高電流， 在給定電流下的最高電壓 (kV)
距離 (Distance; D) 輻射源 至樣品距離	劑量與距離平方成反比 ($1/D^2$)，射源與樣品的距離越近，IC 所受劑量越高。	最小距離
濾光片 / 吸收材料	不同材質與厚度的濾光片可影響 X-ray 能量，調整樣品的受輻射劑量。	測試時不建議使用任何濾鏡
角度	劑量與檢測模式的關係 (例如: 單一角度掃描的 2D X-ray 和多角度掃描的 3D X-ray 的差異)	最小距離的正交檢測

圖表來源: JESD22-B121

這些驗測過程亦會讓 IC 曝露於 X-ray 輻射，累積一定的總電離劑量 (TID)，可能影響其電性特性。圖 1 顯示了 X-ray 系統的基本架構。

當高速電子束或離子束撞擊金屬靶材 (如鎢) 時，會產生 X-ray 光子。這些光子來自於：

1. 軔致輻射 (Bremsstrahlung Radiation)：

入射電子因受原子核電場影響而減速，發射出連續光譜的 X-ray。

2. 特徵輻射 (Characteristic Radiation)：

入射電子與靶材內層電子 (殼) 層發生碰撞，產生離散特徵能量的 X-ray。

當 X-ray 穿透並圍繞樣品時，偵測器會接收來自不同材料的吸收與散射訊號，形成陰影影像 (Radiographic Image)。影像的明暗對比取決於材料

的 X-ray 吸收率，吸收率低的區域顯示較亮，吸收率高的區域則較暗。不同的 X-ray 系統參數亦會影響影像品質與 IC 所承受的輻射劑量，以 2D X-ray 和 3D X-ray 兩種分析為例，前者為單一角度成像，劑量較低，但可能受多層結構遮蔽影響；後者透過多角度掃描重建 3D 影像，可減少結構遮蔽效應，提高驗證準確性，但也因此增加輻射劑量。

針對功能性 IC 的輻射影響分析，表 2 定義了不同設定下的臨界最大劑量 (Critical Maximum Dose)。為確保 IC 在 X-ray 檢測過程中不會超過 TID 極限值，透過適當調整 X-ray 系統參數 (如降低電壓、縮短曝光時間、選擇合適的掃描方式)，皆可有效降低輻射劑量，並減少 IC 因驗證而導致的電性劣化風險。

接下來的問題是，X-ray 劑量儀這麼多種，該如何選擇呢？

表 3 劑量儀的類型

劑量儀類型	典型劑量計類型	描述	即時劑量讀取器
游離腔	圓球型游離腔	測量兩個電極之間的電流，透過氣體腔內產生的離子對產生偏壓	是
以半導體為基礎	PIN 型二極體	測量接面二極體兩端的感應電流	是
	單晶金剛石 (鑽石)	測量蕭特基二極體兩端的感應電流	是
	金屬氧化物半導體	測量柵極電介質中感應捕獲電荷改變的電容	是
以發光為基礎	熱發光劑量計 (ThermoLuminescent Dosimeter; TLD)	加熱材料以發光形式釋放被捕獲的能量	否
	光刺激發光劑量計 (Optically Stimulated Luminescence Dosimeter; OSLD)	將光能施加到材料上，以發光的形式釋放被捕獲的能量	否

圖表來源：JESD22-B121

X-ray輻射劑量的測量

為達成精準測量X-ray劑量的目的，需要X-ray檢測系統來產生穩定的輻射，以及X-ray劑量儀來精確測量劑量率。應選擇符合關鍵參數的X-ray系統來模擬典型的X-ray檢測條件。表3顯示劑量儀的類型。

游離腔和基於半導體的劑量儀為主動設備，可測量輻射引起的電流，因此能即時讀取劑量。而基於發光的劑量儀則是被動設備，會將劑量儲存於設備中，需要經過溫度或光的後處理才能測量劑量，且照射後無法立即讀取資料。因此，使用以發光為基礎的劑量儀時，建議在常溫和正常自然條件下儲存，保護其免受高溫 and 紫外線影響，並減少儲存與運輸時間，因為這些因素皆會影響劑量的準確度。若已知環境條件會影響劑量儀反應，則應對測量結果進行校正。額外的參考劑量計可用來監測由於不必要或雜散效應所產生的劑量，並將其從

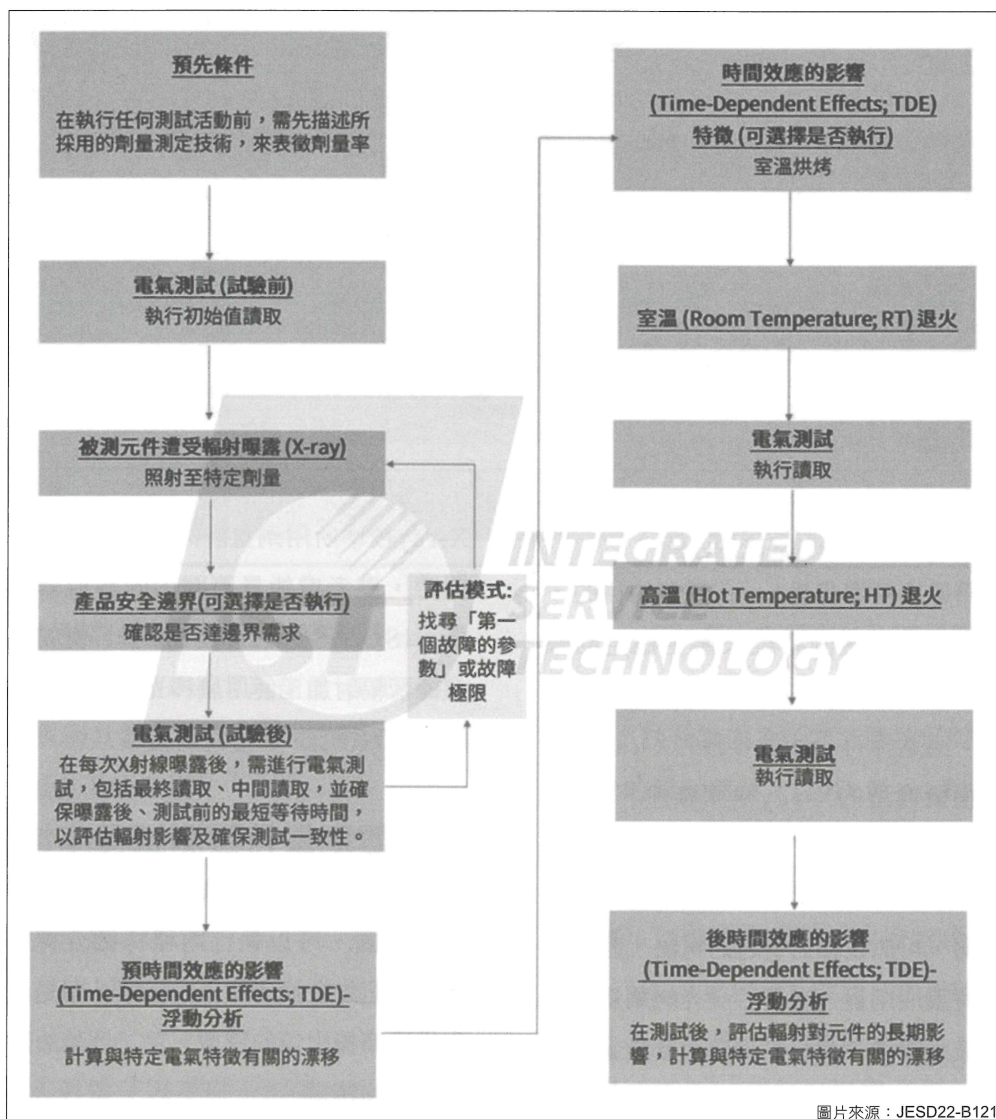
X-ray校準所用劑量計的讀數中扣除。同時，應考慮能量範圍內的讀取器校準。ISO/ASTM 51956標準，例如：《練習輻射加工使用熱釋光劑量測定系統(TLD系統)》，可作為指導方針。

總電離劑量特徵測試程序

圖2為X-ray總電離劑量(TID)測試流程示意圖。可以執行兩種特徵分析模式，並記錄在摘要報告中。第一個是超出供應商極限值的特徵，第二個是故障極限值的特徵。

1. 供應商極限值：這是供應商設立的一個輻射劑量的最大限度，指的是元件在接受X-ray輻射的過程中能夠承受的最大劑量。在這一過程中，測試會根據預期的最嚴重輻射情況來設定測試參數。如果在測試中需要返工或進行進一步檢查，這段時間的曝露時間也必須計算在內，不能超過設定的供應商極限。

2. 故障極限值：這是指在經受輻射



圖片來源：JESD22-B121

圖2 總電離劑量特徵流程圖

後，元件可能會出現故障的最大輻射劑量。透過對元件的測試，根據「第一個故障參數」來判定，這有助於確定元件在最大輻射劑量下是否仍能正常運作。

最終測試報告內容

X-ray輻射總電離劑量(TID)測試的

最終報告必須從典型批次的樣品中隨機選擇若干樣品及未遭受輻射的對照樣品。最終報告應包含以下內容(圖3)：

- 1.X-ray系統描述，包括：(1) 設備、供應商、型號、X-ray靶材類型。(2) X-ray的設定和劑量率。(3) 如果使用濾光片，濾光片的材料與厚度。(4)

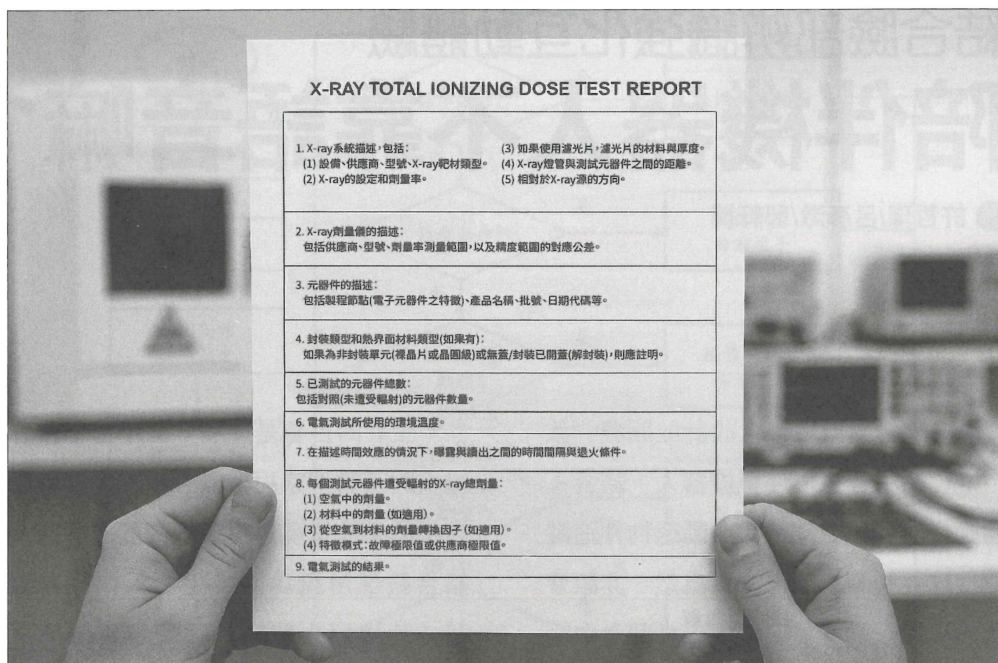


圖3 X-ray輻射總電離劑量(TID)測試的最終報告應包含許多重要內容

X-ray燈管與測試元器件之間的距離。

(5) 相對於X-ray源的方向。

2.X-ray劑量儀的描述: 包括供應商、型號、劑量率測量範圍, 以及精度範圍的對應公差。

3.元器件的描述: 包括製程節點(電子元器件之特徵)、產品名稱、批號、日期代碼等。

4.封裝類型和熱界面材料類型: 如果為非封裝單元(裸晶片或晶圓級)或無蓋/封裝已開蓋(解封裝), 則應註明。

5.已測試的元器件總數: 包括對照(未遭受輻射)的元器件數量。

6. 電氣測試所使用的環境溫度。

7. 在描述時間效應的情況下, 曝露與讀出之間的時間間隔與退火條件。

8. 每個測試元器件遭受輻射的X-ray總劑量: (1) 空氣中的劑量。(2) 材料中的劑量(如適用)。(3) 從空氣到材料的劑量轉換因子(如適用)。(4) 特徵模式: 故障極限值或供應商極限值。

9. 電氣測試的結果。

針對金屬氧化物半導體(MOS)、雙極性元件(Bipolar)、非揮發性記憶體(NVM)、快閃記憶體(Flash Memory)/電子抹除式可複寫唯讀記憶體(EEPROM), 以及動態隨機存取記憶體(DRAM)等元件, 若您擔心在進行2D/3D X-ray檢測時可能因寄生輻射導致提早失效, 可透過「寄生輻射劑量沉積驗證平台」進行事前驗證。●

(本文作者為宜特科技技術副理)