



## 善用背向分析技術

## 基板移除速找GaN晶片異常點

李文傑

**寬**能隙半導體(Wide Band Gap Semiconductors)如氮化鎵(Gallium Nitride, GaN)與碳化矽(Silicon Carbide, SiC),是近年熱門的化合物半導體材料,又稱為第三類半導體。相對於以往第一類(矽)與第二類(GaAs、InP)半導體,第三類半導體因具有寬能隙、低漏電、耐高電壓及高溫等特性,且其能源轉換效率更好,因此普遍被應用於功率元件。而氮化鎵元件可支援更高的開關切換頻率,並提供極佳的功率密度,在相同電氣性能下,可有效縮減整體系統的尺寸,通常被應用於中功率、中壓(50V至900V)產品。至於SiC元件則適用於高功率、高壓(1,000V以上)的相關應用。

以氮化鎵電晶體為例,目前已廣泛應用於手機和筆電等消費性電子產品的快速充電市場上,同時,資料中心(Data Center)需求的快速成長,也成為氮化鎵電晶體的另一個重要應用領域。再加上,未來隨著各國陸續禁售燃油車,車載充電器(On Board Charger, OBC)和電動車DC-DC轉換器等應用,也將成為氮化鎵電晶體大放異彩的舞台。從上述趨勢可觀察到,氮化

鎵電晶體不但將成為眾多汽車製造商爭相角逐的關鍵技術,亦正逐步展現出廣泛的市場潛力。

本文將透過筆者過去的驗證分析經驗,結合半導體產業第一線觀察。從兩大常用的功率電晶體結構,進一步分享到如何定位出氮化鎵電晶體晶片異常點,有效提高物性故障分析時找到缺陷的機率,擺脫找不出異常點的困擾,以加速產品的驗證與良率的有效提升。

### 垂直式功率電晶體架構彈性可靠

現今常用的功率電晶體架構,可概分為垂直式結構(Vertical Structure)與水平式結構兩大類。

#### 垂直式結構

一般Si與SiC普遍使用的垂直式功率MOSFET結構(Vertical Double-diffused MOSFET, VDMOS),在此結構中,電流路徑如圖1所示。為了改善其電氣特性,常用手法包括採用特殊的溝槽式閘極(Trench Gate)設計,以及減薄晶圓厚度等方式。

### 水平式結構

水平式功率MOSFET結構(Lateral Double-diffused MOSFET, LDMOS)，通常被廣泛應用於矽基材的電晶體中。而本文重點氮化鎵高電子移動率電晶體(High Electron Mobility Transistor, HEMT)亦採用該類LDMOS的結構(圖2)。

目前市場主流為GaN-on-Si架構，利用氮化鎵磊晶和金屬導線等相關製程，將P型摻雜氮化鎵的閘極(Gate)，與源

極(Source)和汲極(Drain)實現於矽基板(Si Substrate)之上，這種結構有以下優點：

- 可與標準的矽晶圓製程相容，製程更具彈性化，使其可於一般晶圓廠閒置產能進行量產，成本因此更加親民。

- 在GaN和AlGaN之間形成的二維電子氣(2-Dimensional Electron Gas, 2DEG)異質介面，具有非常高的電荷密度和遷移率，這樣的組合有效降低 $R_{DS(on)}$ 並提高元件的運算速度。

- 利用P型GaN進行二維電子氣通道的阻斷設計，使原先常開模式(Normally Open)元件改變為增強型(Enhance Mode)的常閉模式(Normally Off)，其與Si MOSFET的驅動方式類似，以方便設計者使用。

- 該結構無閘極氧化物可提供高閘極可靠性。

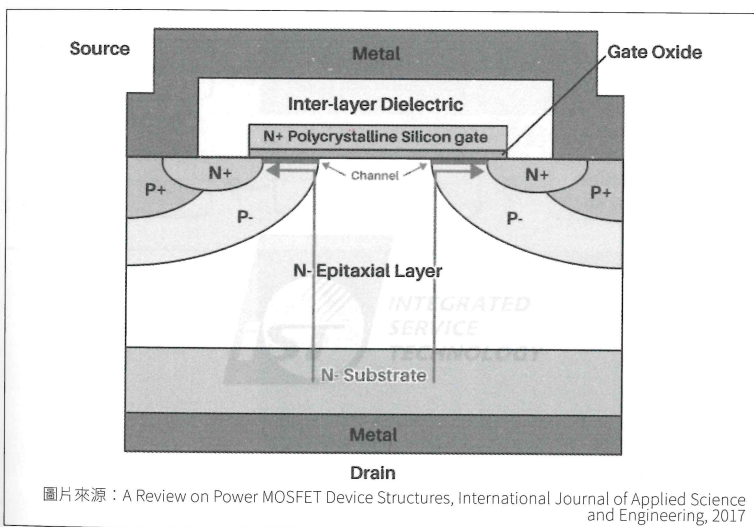


圖1 垂直式Power MOSFET結構示意圖

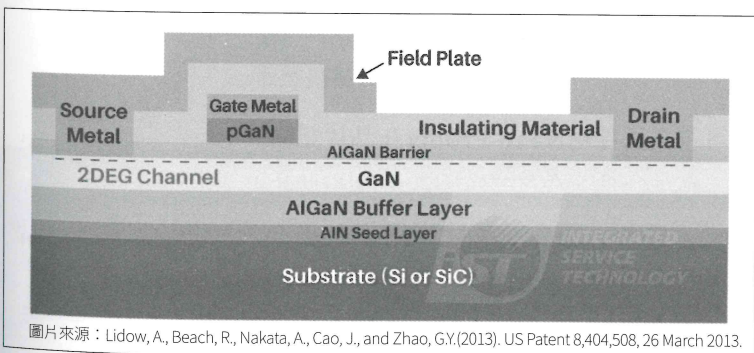


圖2 GaN水平式HEMT結構示意圖

### 氮化鎵/一般矽元件故障分析

由於上述這類型的氮化鎵晶片結構在閘極端附近的設計相對複雜，通常會使用不同型式的場板(Field Plate, FP)設計，用來降低峰值電場和介面陷阱(Interface Trap)，並利用在最上層設計的線路重布層(Redistribution Layer, RDL)，使晶片擁有最佳的電氣特性。如同一般故障分析手法，在進行破壞性分析前，需要先透過特性電流曲線的量測，了解該晶片的電性異常模式，例如汲極飽和電流(Drain-source Saturation Current,  $IDSS$ )、閘極漏電流(Gate-Source Leakage Current,

IGSS)或功能測試確認電性異常條件後，再針對該電性異常進一步進行亮點(Hot Spot)故障分析，以鎖定目標。

然而，由試片正面進行亮點故障分析時，往往容易因為場板及常見的RDL特殊結構造成亮點容易被遮蔽，也導致難以發現位於場板或閘極下方的缺陷。因此，廠商如宜特故障分析實驗室建議客戶進行背面熱點定位，為使觀測解析度更加提升。

首先會移除Ga<sub>N</sub>磊晶材質下方的基板，再直接利用光學顯微鏡(Optical Microscope, OM)進行觀測，其解析度比紅外線光學顯微鏡(Infrared Ray Optical Microscope, IROM)穿透基板觀測提升許多，異常亮點通常在此時都會現出蛛絲馬跡。之後再搭配背向DB-FIB或TEM切片分析，即可讓缺陷點無所遁形，客戶也因此可以有明確的改善預防措施。

### 背向分析提升故障分析成功率

找出Ga<sub>N</sub>晶片的故障點的有效方法，主要四項步驟如下：

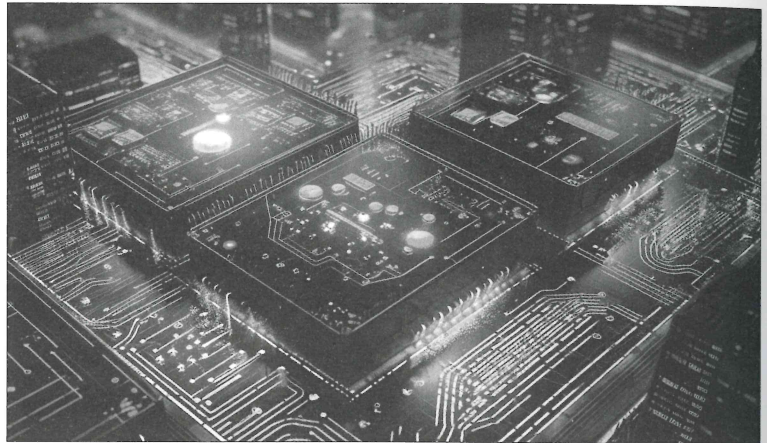
(一)透過電性量測分析，從正面定位出故障點。

(二)再透過移除磊晶材質下的基板，並從晶片背面更精確定位出故障點。

(三)大幅收斂異常區域後，即可用光學顯微鏡直接觀察異常點(Defect)。

(四)最後可再接續背向DB-FIB或TEM來對異常點做切片分析，進一步釐清實際失效原因。

除了以上四步驟所述的背向分析之外，



背向分析可提升Ga<sub>N</sub>晶片的故障分析成功率

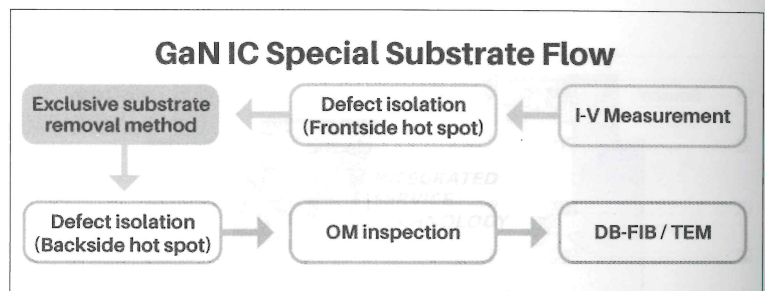


圖3 Ga<sub>N</sub>晶片故障分析流程圖

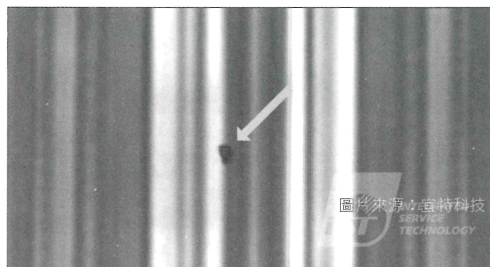


圖4 OBIRCH熱點分析影像，可在上方發現異常亮點

亦可視需求採用Nano-Prober在晶片正面取得精準定位，再用DB-FIB或TEM切片分析。另外，因各家晶圓廠使用的基板材質有所不同，所以步驟(一)和(二)的順序，可依實際試片狀況與客戶需求進行前後交換，流程圖則詳見圖3。

### (一)電性量測分析及故障點定位

當氮化鎵晶片產生電性故障如短路(Short)、漏電(Leakage)、高阻值(High Resistance)或是功能失效(Function Failure)時，可依據不同的電性失效模

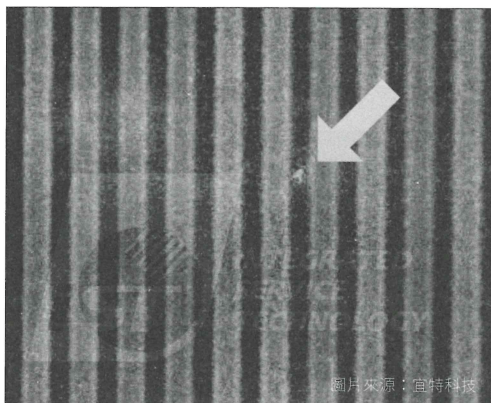


圖5 Thermal EMMI熱點分析影像，可在上方發現收斂亮點

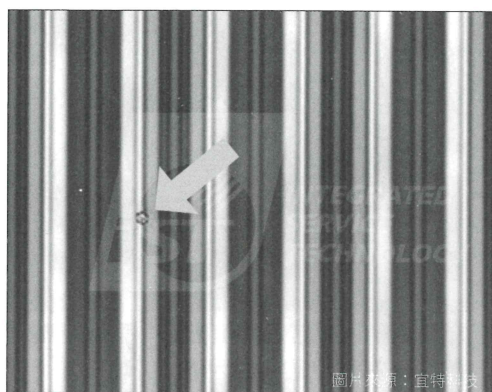


圖6 InGaAs熱點分析影像，可在上方發現收斂亮點

式，經由直流通電或上測試板通電，並透過適合的亮點(Hot Spot)故障分析工具進行定位，包括雷射光束電阻異常偵測(Optical Beam Induced Resistance Change, OBIRCH)(圖4)、熱輻射異常偵測顯微鏡(Thermal EMMI)(圖5)、砷化鎵銮微光顯微鏡(InGaAs)(圖6、表1)。藉由故障點定位設備找出可能的異常熱點(Hot Spot)位置，以利後續的物性故障分析(Physical Failure Analysis, PFA)。

### (二)移除磊晶材質下的基板與精確故障點定位

傳統所用的基板材料是以低摻雜的矽基板為主，紅外線顯微鏡可以穿透，只需依照一般的背向分析方式即可進行。然而隨著科技日新月異，基板的材料也與日俱進，例如重摻雜的矽基板、氮化鋁(AlN)(如氮化鎵矽基板廠Qromis開發出的QST基板)等陶瓷材料基板也隨之出現，這些基板都是紅外線顯微鏡無法輕易穿透的，造成背向亮點定位分析的瓶頸。

為因應此問題，宜特的新式基板移除技術，可針對各類基板移除並進行過程最佳化，精準且均勻地移除各類基板，並且順利完成高精確度的故障點定位。

### (三)針對熱點區域用光學顯微鏡直接觀測異常點

在晶片上有了準確的定位後，便可大幅縮小須檢視的區域。接著用高解析度光學

表1 各電性量測分析設備的使用時機表

設備	OBIRCH	Thermal EMMI	InGaAs
偵測目標	電晶體/金屬層	金屬層/封裝/ 印刷電路板	電晶體/金屬層
失效模式	漏電、短路、高阻值	漏電、短路、高阻值	漏電、短路、功能失效

顯微鏡檢查，此時往往就能發現故障點的蛛絲馬跡，如圖7所示，可以成功進行定位。

#### (四)背向DB-FIB或TEM切片分析，順利找到異常點

不論是在光學顯微鏡下發現疑似異常點，或是已經有準確的熱點定位，接下來都可以進行背向雙束聚焦離子束(Dual-beam FIB, DB-FIB)與穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscopy, TEM)切片分析，來對異常點進行結構確認，以進一步釐清失效原因(圖8)。

#### 可使用Nano-Prober在正面取得精準定位

除了背向亮點定位之外，在步驟一之後，亦可使用Nano-Prober在正面取得精準定位，並用DB-FIB或TEM切片分析。在某些特殊情況下，無法透過上述電性機台定出異常點位置時，也可使用奈米探針電性量測(Nano-Prober)在樣品的正面進行異常點定位分析，包括電子束感應電流(Electron Beam Induced Current, EBIC)、電子束吸收電流(Electron Beam Absorbed Current, EBAC)、與電子束感應阻抗偵測(Electron Beam Induced Resistance Change, EBIRCH)等定位法(圖9)。當透過上述分析手法精準找到異常點後，亦可再透過DB-FIB或是TEM來對異常點進行結構確認。

基板移除技術，從樣品的背面定位出熱

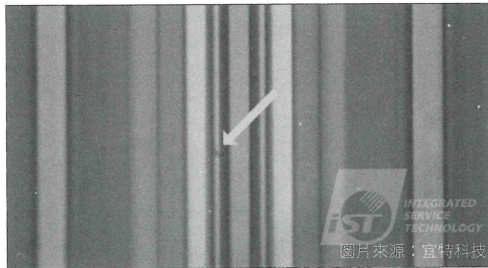


圖7 使用針對熱點區域用光學顯微鏡直接觀測異常點

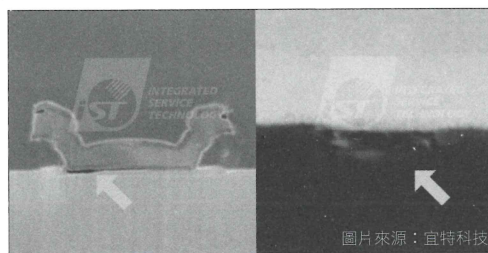


圖8 DB-FIB切片分析(左圖)和TEM分析(右圖)，可以發現結構細部出現異常

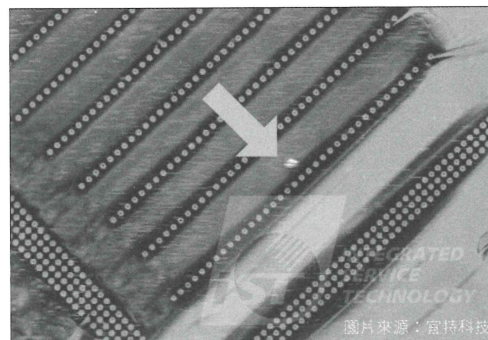


圖9 EBIRCH異常點定位分析，可以更精確的鎖定異常點位置，以利後續執行DB-FIB或TEM

點，解決了GaN晶片故障分析的困難。並結合電性量測和物性故障等一站式分析，成功提升故障點定位率。此突破有助GaN技術在多個應用領域快速發展，帶來高效能和可靠的半導體元件。EN

(本文作者為宜特故障分析工程處技術經理)