

車用功率模組設計製造及AEC-Q101可靠度測試技術

Car Power Module Design Manufacture and AEC-Q101 Reliability Testing Technology

梁明沅 M. K. Liang

工研院電光所(EOL/ITRI) 正工程師

本研究從模組封裝設計，建立IGBT功率模組封裝製程技術及可靠度驗證。透過3D Extractor全波電性模擬分析，突破封裝元件路徑上之(R/L/C)寄生效應及大電流啟動的電性失效問題；高強度低阻抗互連端子設計，解決大電流產生高熱無法散熱問題。封裝製程之高電壓大電流高接合強度打線、高熱傳固晶及超低孔隙率DBC基板接合技術與高介電矽膠材填充封裝技術，達到低孔隙高可靠度之IGBT功率模組封裝。以IEC 60747-9規範建立IGBT電性參數量測方法，依據AEC-Q101規範建立符合車規的IGBT模組可靠度驗證技術。

This study is IGBT power module package design to set up manufacture technology and reliability certify. To use 3D extractor full wave electric simulation to void package wire to product (R/L/C) parasitism and big current start to induce electric failure, high strength and low electric resistance connector, and to void high current to induce high heat problem. High voltage and current wiring process to have strength bonding, high transfer heat and low void in DBC solder bonding, high dielectric constant silicon coating. Electrics and reliability testing with AEC-Q101 and IEC 60747-9 specification.

關鍵詞/Key Words

功率模組(Power Module)、絕緣柵雙極晶體管(Insulated Gate Bipolar Transistor; IGBT)、銅直接焊接(Direct Bond Copper; DBC)、封裝(Package)

前言

根據IC Insight的預測，整體功率電晶體市場營收將在2013~2018年間，取得6.4%的複合年平均成長率(CAGR)，在2015年達到137億美元規模。絕緣柵雙極晶體管

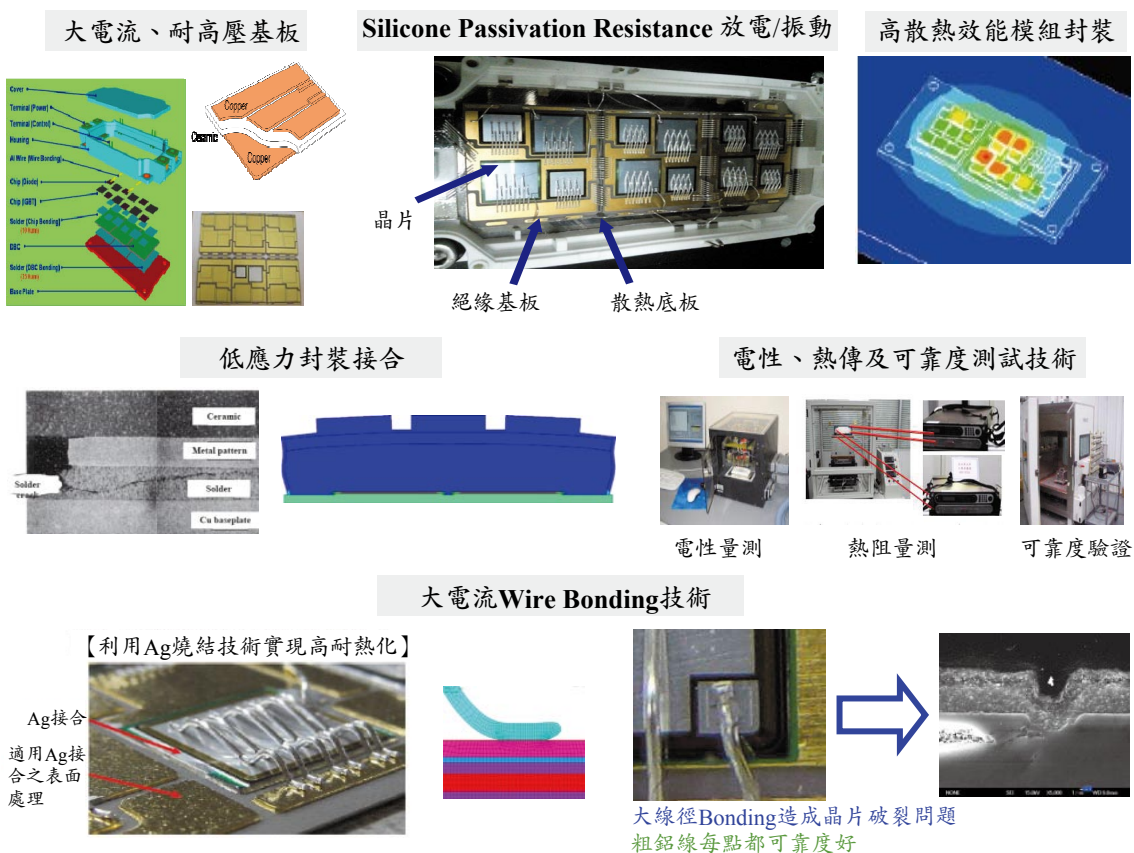
(Insulated Gate Bipolar Transistor; IGBT)模組在2010~2015年間的CAGR預測為7.0%，在2015年達到32億美元營收規模。近年來由於環境的破壞日益嚴重，國際上對於環保問題越來越重視，如何降低碳排放及提高馬達效率已成為各國努力的焦點。台灣

尚未針對高功率IGBT模組封裝(Package)技術、優化綠能環保電動車及重工業產業投入。工研院電光所經由圖一模組封裝設計，建立IGBT功率模組(Power Module)封裝製程技術。封裝設計以破壞模式分析方法掌握失效行為，透過3D Extractor全波電性模擬分析，突破封裝元件路徑上之(R/L/C)寄生效應及大電流啟動的電性失效；高強度低阻抗互連端子設計、封裝結構破壞模式分析及直接液冷散熱提升模組效能，突破大電流產生高熱無法散熱問題。封裝製程之高電壓/大電流/高接合強度打線、高熱傳固晶及超低孔隙率DBC基板接合技術

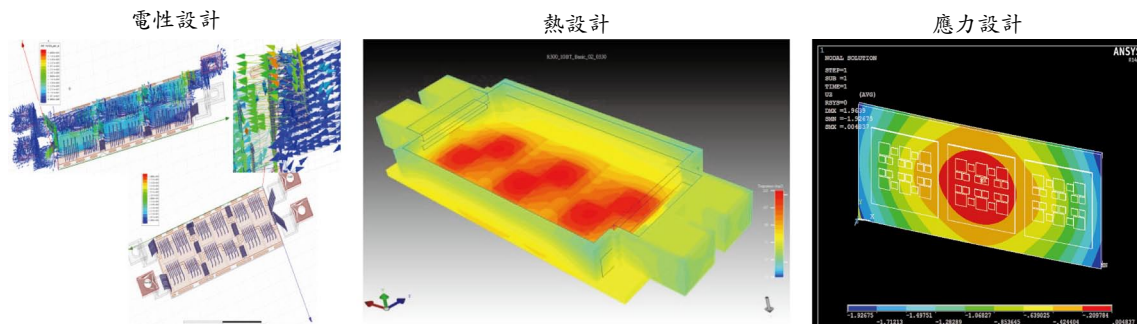
與高介電矽膠材填充封裝技術，達到低孔隙、高可靠度之IGBT功率模組封裝，突破使用環境震動造成的機械應力。封裝驗證以IEC 60747-9規範建立IGBT電性參數量測方法，電動車領域之關鍵元件IGBT功率模組技術非常重要，在國際正處於萌芽階段之時刻，非常適合台灣產業切入，除可即早掌握其中關鍵技術之自主性，亦可開拓我國半導體產業新市場，成為下階段半導體產業成長的驅動力。

設計技術

大電流/高電壓/高發熱量/高應力的功



▲圖一 開發功率模組所需設計製造及AEC-Q101可靠度測試技術



▲圖二 功率模組封裝電性、熱及應力模擬技術

率模組封裝設計如圖二所示，由電性、熱傳導及應力的封裝設計技術著手，可發展出耐高壓高電流全波電性模擬分析技術、高強度低阻抗互連端子設計、封裝結構熱疲勞分析技術、直接液冷散熱設計技術及封裝結構破壞模式分析方法。耐高壓高電流全波電性模擬分析車用IGBT功率模組電壓電流（600V、450A），晶片間需耐大電流高電壓降低電性Noise及IGBT Chip大晶片面積製作困難，封裝設計上透過3D Extractor全波電性模擬分析，突破封裝元件路徑上之(R/L/C)寄生效應避免功率模組電性失效問題。

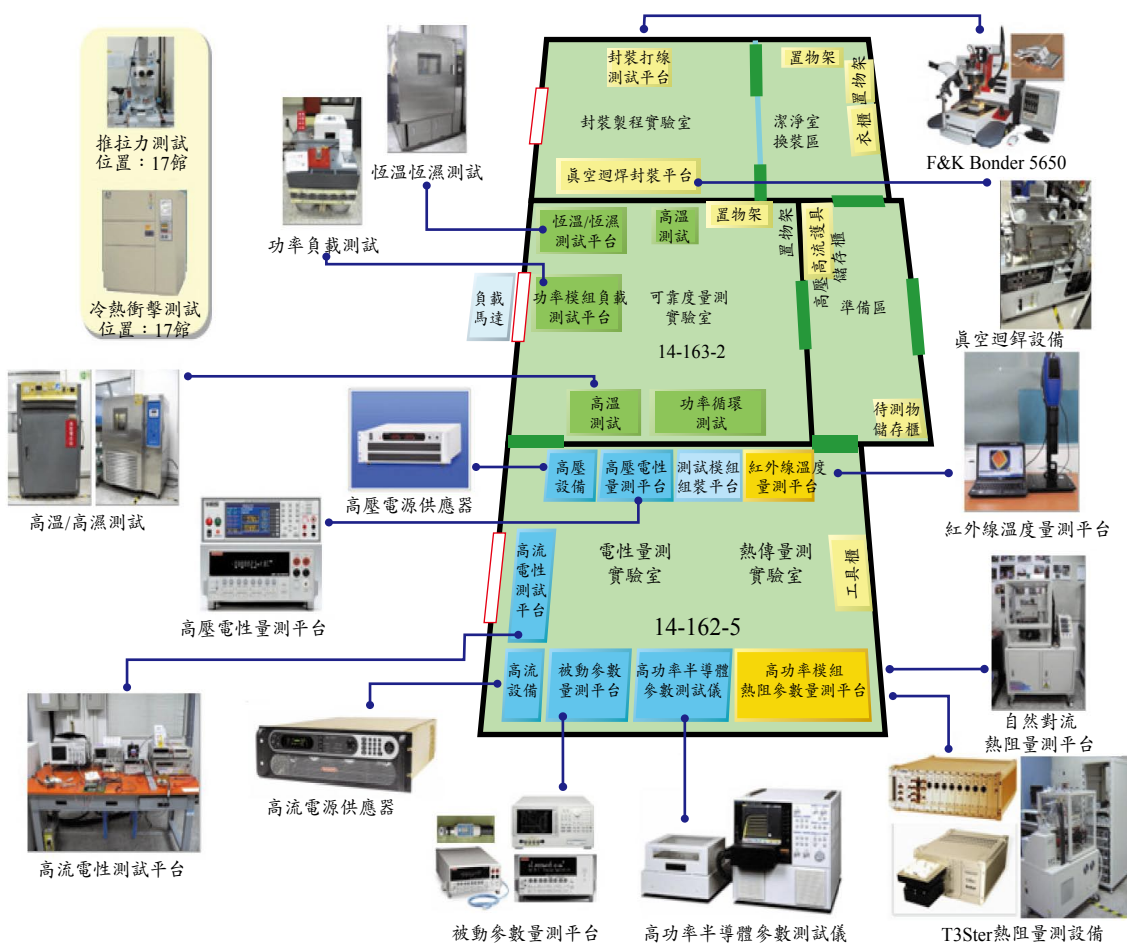
IGBT功率模組封裝製程技術

矽基IGBT模組在使用過程中的最高Junction溫度為150°C，具高熔點與高強度特性的錫銀系無鉛鉚錫，錫膏中的助鉚劑是接點中孔隙的來源，且高溫迴鉚製程將引發殘留應力與介金屬過度成長，導致界面缺陷生成等疑慮，進而衍生長期可靠性問題。傳統晶片封裝打線方式（如金線）無法承受IGBT功率模組需流通的大電流，因此需用粗鋁線（300~500 μm）做為晶片、基板及電極的连接。而打線的形狀、介面條件及

強度影響大電流高電壓之負載。封裝製程之Fluxless無鉛鉚錫固晶困難點在於鉚點氣孔面積之控制低於5%之技術難題。大線徑鋁線Bonding Force接合因Oxide破裂，造成Gate and Emitter短路技術難題。

IGBT電性參數量測和AEC-Q101可靠度測試

依據AEC-Q101及IEC 60747-9之IGBT電性參數量測方法，建構出量測600V、450A IGBT功率模組之電性量測測試系統架構，如圖三所示，並且實際透過此系統架構可測得：靜態參數-集射極崩潰電壓 V_{CES} 、閘射極崩潰電壓 V_{GES} 、集射極最大電流 I_C 、集極至射極的洩漏電流 I_{CES} 、閘極至射極之洩漏電流 I_{GES} ；動態參數-導通時間 T_{ON} 、截止時間 T_{OFF} 。IGBT功率模組可靠度驗證技術(AEC-Q101)，國內尚無加速壽命驗證能力，協同可靠度測試廠商建立符合車規的熱、電性及應力之可靠度驗證技術。對於功率模組電力循環的測試，其功率模組可靠度壽命評估是最缺乏也最具挑戰性的電力循環測試，需建構一電源供應模組，按電力循環測試方法實施開關機行為，模擬功率模組使用環境，此階段功率模組將導致



▲圖三 功率模組AEC-Q101測試架構和製程實驗室

高熱源產生。建構一溫控模組使待測物將熱源消散，並記錄溫差，建構一組足以判定樣本是否失效之準則評估產品的可靠度。

1. AEC-Q101 HTRB Reliability Testing

①Chamber : 125°C、500Hr監控80% of
Device Breakdown Voltage °

②高溫反向偏壓(High-temperature Reverse Bias; HTRB)是依IEC 60747 Part 9。

③允收標準：80% of $\Delta V_{CE(sat)}$ 、 ΔV_f 、 $\Delta V_{GE(th)}$ 、 ΔI_{CES} 、 ΔI_{GES} 必須全數通過(Pass)；

且 I_{CES} 和 I_{GES} 不能大於規格。

由表一得知 $\Delta V_{CE(sat)}$ 、 ΔV_f 和 $\Delta V_{GE(th)}$ 小於20%， I_{CES} 和 I_{GES} 沒大於規格。

2. IGBT模組平台與實車測試

利用測試平台，將IGBT模組置放馬達驅動系統內，並實測其負載功率輸出為10 kW~50 kW。其測試平台架構如圖四所示。

結果及討論

Power Module是電動車、工業馬達、

▼表一 測試樣品HTRB前後 $V_{CE(sat)}$ 、 V_f 、 $V_{GE(th)}$ 、 I_{CES} 、 I_{GES} 測試結果

測試前後	B10	C18	D40	D42
$V_{CE(sat)}$	2.41→2.51	2.56→2.67	2.60→2.66	2.46→2.50
$\Delta V_{CE(sat)}$	+4.15%	+4.30%	+2.31%	+1.63%
V_f	2.34→2.43	2.47→2.58	2.47→2.53	2.37→2.42
ΔV_f	+3.85%	+4.45%	+2.37%	+2.11%
$V_{GE(th)}/V$	6.15→6.15	6.20→6.21	6.16→6.15	6.23→6.25
$\Delta V_{GE(th)}$	0%	0.1%	-0.2%	0.3%

檢測條件	測試項目
控制器溫度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ 運作時間 $\geq 30\text{ min}$	額定輸出功率測試 $\geq 25\text{ kW}$ (合格)
控制器溫度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ 運作時間 $\geq 30\text{ sec}$	最大輸出功率 $\geq 50\text{ kW}$ (Pass)
依機械所馬達測試	控制器最高效率 $\geq 95\%$ (Pass)
UDDS行車行態驗證 過程間無任何故障 導致車輛停駛	車輛行車耗能/ 性能測試 (Pass)
行程100 KM 過程間無任何故障 導致車輛停駛	商用车實路運行測試 (Pass)

▲圖四 EOL 600V/450A-實車測試流程

Air Conditioner及家電產業半導體關鍵零組件，以往多掌握在歐美日先進已開發國家之大企業，而國內缺乏設計、製造、AEC-Q101可靠度測試技術及系統應用，電光所已建立此技術，也取得AEC-Q101認證，並



▲圖五 顯示商用车UDDS實路運行測試

通過商用车UDDS實路運行測試（圖五）。能獨立開發任何Power Module技術，替國內系統開發一新領域，國內產業如對Power Module有任何需要和意見，歡迎至Power Module Lab.參觀和指教（新竹縣竹東鎮中興路4段195號03-5917090 梁先生）。☎