

量測 IGBT 傳導損耗，將效能最大化

白皮書

簡介

對絕緣柵雙極晶體管 (IGBT) 的性能和效能，可以透過其在導通 (ON) 和截止 (OFF) 狀態之間轉換時的開關損耗及傳導損耗來進行量化。典型性能較高的 IGBT 由同一個半導體封裝中的 IGBT 和二極體構成。IGBT 和二極體都會產生組合損耗，需要考量它們的相互作用。

IGBT 和二極體的傳導損耗是電流流過集電極的結果，或傳導週期中導通狀態電壓（飽和電壓和陽極電壓）的結果。本白皮書介紹其中一個最有效的方法，可在轉為 ON 和轉為 OFF 階段，透過控制 IGBT 的電壓和電流波形來減低開關損耗。本文亦說明此方法如何顯著減少、甚至消除重疊時間內所發生的損耗。

IGBT 的基本知識

IGBT 的構造值得探索，以為了分析奠定基礎。幾十年前，當 IGBT 首次推出時，它們被開發成一款開關元件，其柵極有電壓控制的 MOSFET，其集電極和發射極 (emitter) 有電流控制的雙極性晶體管。這種設計有效地結合了兩個經過驗證的開關元件的優點，產生了電壓控制的雙極元件。圖 1 顯示 IGBT 等效電路，其中柵極是 MOSFET，輸出級為 PNP 雙極少數載流子元件。此外，圖 2 中的測試電路有一個 IGBT，其被標示了有關參數。

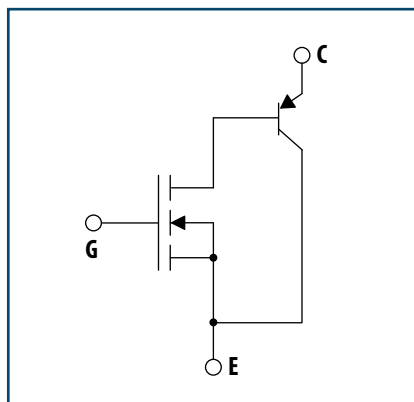


圖 1 | IGBT 等效電路

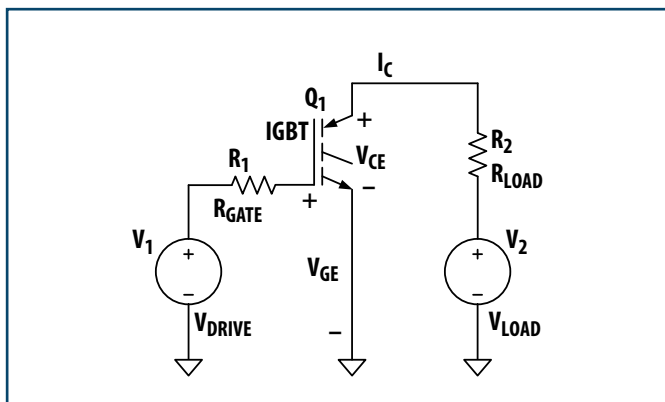
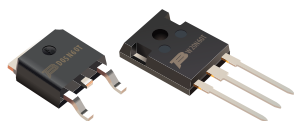


圖 2 | IGBT 測試電路



Bourns® BID IGBT 系列

量測 IGBT 傳導損耗，將效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

控制壓降

有一個固定的壓降，該壓降與它所傳導的電流不成比例。這異於 MOSFET；MOSFET 的壓降是可以量測的，為它的通道電阻乘以電流。由於 MOSFET 是一種多數載流子元件，它使用由其自身類型的載流子實現的一個傳導通道—典型是一個與電子傳導的 N 通道功率元件。MOSFET 透過改變通道的電阻來控制電流，而雙極晶體管則透過改變注入的載流子來控制電流。

在設計半導體結和單獨區域的摻雜濃度時，這些效應在內部被優化。尤其是 MOSFET 通道電阻被減少，以增加 PNP 基極電流，而這之後減少了在 IGBT 上實現相同壓降所需要的 P 電荷量。這亦會減少所儲存的電荷和尾電流。此外，減少 PNP 基底的厚度有助產生這些正面結果。

克服缺點和尾電流

[IGBT](#) 是中高電流和高電壓應用的首選元件。在硬開關應用和逆變器驅動中，相較於封裝尺寸類似的獨立 MOSFET，IGBT 可以通過更多電流。這點的附帶好處是輸入電容減低，外加成本降低。一般來說，跟 MOSFET 相比，IGBT 提供增強的傳導損耗，原因在於 IGBT 集極電流，對照之下，MOSFET 則是平方漏極電流。

但是，已知道 IGBT 的開關損耗比 MOSFET 來得更大。也就是說，IGBT 比較適合開關頻率較低的應用，原因在於少數載流子雙極輸出。具體來說，狀態之間的轉換不是瞬時的。內部 BJT 所儲存的電荷會在很短的「尾時間」產生「尾」電流，直到所有的少數載流子都被移除。在優化元件以提高效能時，前述的「尾時間」決定最大允許開關頻率，以讓開關損耗維持合理。二極體的前向壓降和尾時間之間存在著權衡。我們希望的是減少尾時間和前向壓降，以允許 IGBT 有效率地運作—更接近常見的 4 kHz 至 20 kHz 這個範圍的高端。

在許多白色大型家電應用中，所渴望的頻率是 20 kHz，主要是因為元件會產生人耳無法聽到的聲頻噪聲。在不需要隔離變壓器的馬達驅動和硬開關應用中，超出可聽範圍是沒有優點的，因為更高的頻率不會提高馬達設計的效能。這使得 IGBT 在馬達驅動和硬開關應用中是最佳的選擇。

量測 IGBT 傳導損耗，將效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

重疊導致開關損耗

晶片設計的穩健性、轉為 OFF 的開關損耗以及 ON 狀態的電壓損耗是 IGBT 設計中的主要權衡。重要的是量測和瞭解電壓、電流和損耗波形在正常 IGBT 運作期間的相互作用，以操作參數，因而將 IGBT 在各種應用中的效能予以最大化。

在使用 IGBT 作為硬開關的應用中，每次從 OFF 轉變為 ON，或從 ON 轉變為 OFF 時，均有一段定義的功率損耗期。這是因為電流流過 IGBT 時，開關集電極-發射極的連接處會出現電壓。圖 3 說明在每轉換中，所經歷的電壓、電流和損耗。

將每一點的電壓和電流波形相乘，以得到瞬時功率損耗波形。值得注意的是開關期間內的功率損耗的大脈衝。因為每個開關轉換的功率損耗是恆定的，且開關轉換是恆定的，因此開關功率損耗隨著開關頻率而增加。因此，較低的頻率會減低總開關損耗。Bourns® IGBT 的建構使用「溝槽柵場截止」（TGFS）技術。溝槽柵極（TG）結構使元件的 MOSFET 部位的通道密度更高。此外，相較於平面 IGBT 結構，TGFS 技術有助減少 ON 狀態的壓降。這有助減少傳導損耗。場截止（FS）層的存在亦有助於減少總開關能量。FS 亦有助於增加增益並縮短少數載流子壽命，這會導致尾電流在 IGBT 關閉時猝熄。與尺寸類似但沒有 FS 層的元件相比，這亦有助於提高元件的速度。

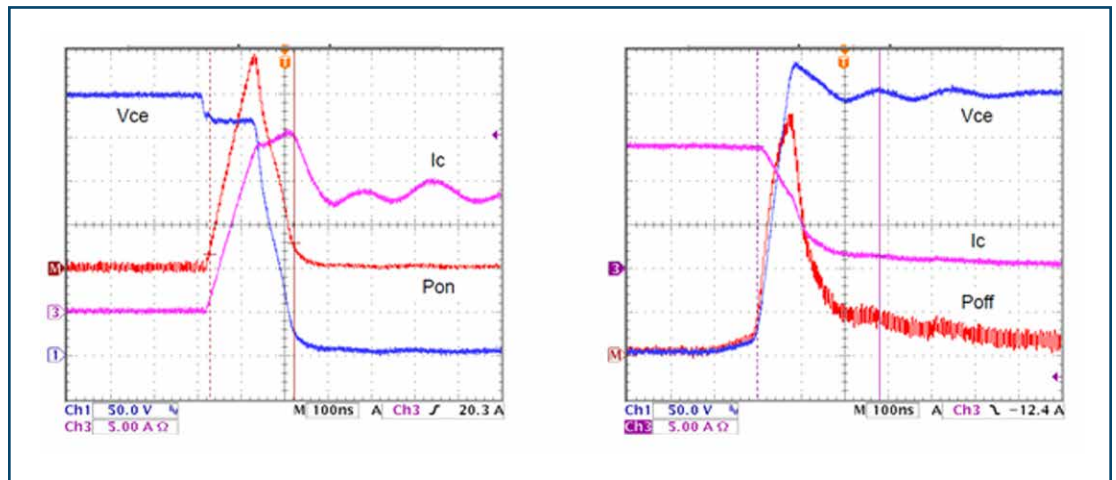


圖 3 | 圖示是 IGBT 轉為 ON 和轉為 OFF 的電壓及電流波形，藍色是電壓集極-射極，粉紅色是集極電流，紅色是功率損耗。

量測 IGBT 傳導損耗，將效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

計算傳導損耗

每次當 IGBT 或它的共同封裝的快速恢復二極體導通且在傳導電流時，都會發生傳導損耗。這個損耗的特徵是功率耗散，計算方式是將 ON 狀態的電壓乘以 ON 狀態的電流。在採用脈衝寬度調製 (PWM) 技術作為基礎的應用中，必須將占空因數 (duty factor) 納入計算之中，作為乘數，以算出平均耗散功率。

對傳導損耗的近似值，第一個要檢視的是 IGBT 和續流二極體資料表。IGBT 有一個額定電壓 ($V_{CE(sat)}$)，這個額定電壓的數值依據溫度而定；將這個數值乘以應用的預期平均元件電流即可算出 IGBT 的大概耗散功率。類似地，續流二極體資料表有一個前向壓降 (V_f)，可以跟預期的平均二極體電流相乘後算出其對總耗散功率的貢獻。必須思考占空比以取得 PWM 應用的最佳近似值。這些估算往往是保守的，因為當電流小於額定電流 (I_C) 時，在實務上， $V_{CE(sat)}$ 會低於資料表中的數值。

在低於 10 kHz 的開關頻率下，大部分的總功率損耗來自傳導損耗。低傳導損耗產生自傳導機制，這個傳統機制是負-正-負 (NPN) 雙極型功率晶體管的特色，其在集電極電流下幾乎是恆定的 V_{CE} 。這與 MOSFET 中的低電阻通道是相反的，在 MOSFET 中，壓降的計算是將電流乘以電阻。IGBT 阻斷損耗的一個計算法是將 IGBT 關斷時的阻斷電壓與漏電流相乘，但傳統上，由於其對總功率損耗的貢獻是微不足道的，因此可予忽略。

在馬達控制應用中，因傳導損耗決定了總損耗，因此飽和電壓和前向壓降成為設計中的關鍵變數。由於馬達應用的低開關速度特性，應盡可能減少 $V_{CE(sat)}$ 。受歡迎的應用權衡常在前向壓降和開關速度之間，主要目的是用來增強短路能力。

低和慢

因此，問題的重點在如何減低 V_{CE} 。答案是更難的柵極驅動、更高的電壓 (V_{CC})、更低的工作電流，以及減低的柵極驅動阻抗。

如本文件所討論的，由於元件的尾時間，IGBT 有開關速度限制。如果元件的 $V_{CE(sat)}$ 較高，則尾時間會減少。但是，這樣的交易可能不值得。一般來說，「載流子」與「 $V_{CE(sat)}$ 和開關頻率」之間存在反向關係。更多載流子的存在會導致開關頻率減慢及 $V_{CE(sat)}$ 變低。相反地，較少的載流子會產生更高的 $V_{CE(sat)}$ 和開關頻率。若干技術已被開發，試圖優化開關時間和前向壓降，且同時提供堅固耐用的短路能力。

量測 IGBT 傳導損耗，將效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

目視損耗

圖 4 顯示一個完整開關週期的開關損耗和傳導損耗的基本參數。請注意，轉換在 V_{GE} 、 I_C 和 V_{CE} 的 10% 和 90% 水平上被認為是有效的。當柵極到射極的電壓 (V_{GE}) 達到 10% 的水平時，轉為導通 (ON) 的轉換開始。當波形跨越 10% 和 90% 的水平時，量測時間的延遲。

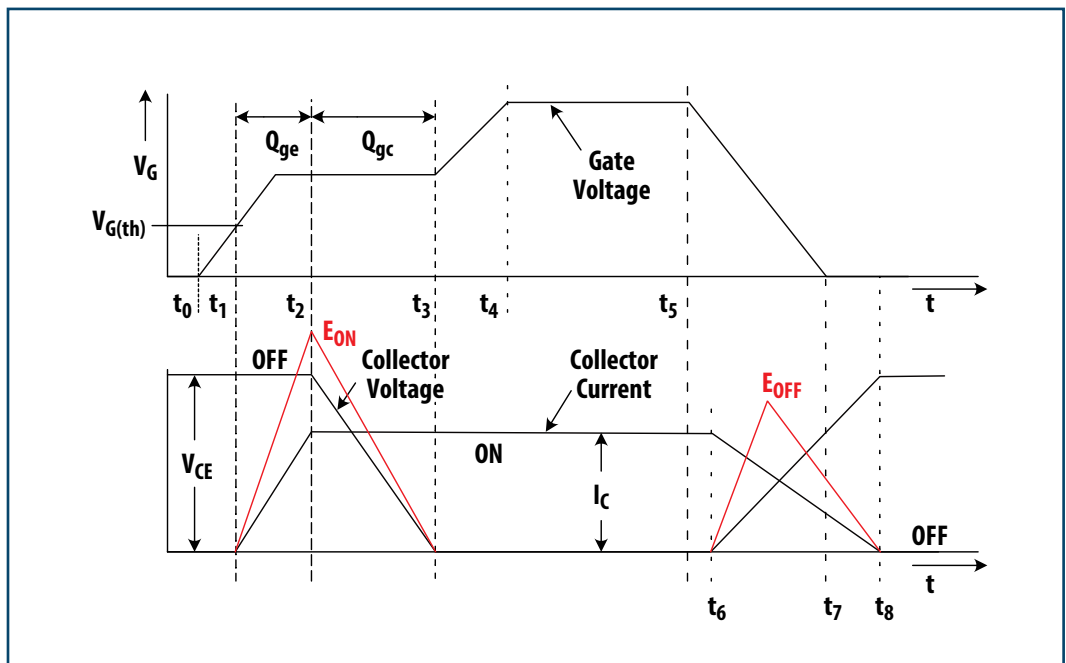


圖 4 | 圖示是一個完整開關週期的開關損耗和傳導損耗

IGBT 切換到 ON 所花的時間以 t_3-t_0 表達。從 V_{GE} 達到 10% 到 I_C 達到 10% 的時間延遲以 t_1-t_0 表達。上升時間是 I_C 從 10% 上升到 90% 所花的時間，以 t_2-t_1 表達。

E_{on} 是轉為 ON 的能量損耗，是 10% I_C 上升「 t_1 」到 90% V_{CE} 下降「 t_3-t_1 」的功率損耗波形下的面積。功率損耗波形的計算是將每個時間點的 I_C 和 V_{CE} 相乘，然後依據 E_{on} 和 E_{off} 下的陰影區得到近似值。 E_{off} 是轉為 OFF 的能量，為 10% V_{CE} 上升「 t_6 」到 90% I_C 下降「 t_7 」的曲線下方的面積。

將 IGBT 轉為 OFF 所發生的電壓轉換為高水平的延遲以 t_6-t_5 表達。檢視 90% V_{GE} 到 10% I_C 的轉變，以 t_7-t_5 表達時間。 I_C 從 90% 下降到 10% 的時間延遲是下降時間，以 t_7-t_6 表達。最後，以 I_C 下降到 10% 標記的時間點所存在的拖尾集極電流來顯示尾時間，直到所有電荷都被消除且電流到達零。在量測上，這可以量測 t_8 到 t_7 的差。

量測 IGBT 傳導損耗，將效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

結論

總結來說，對功率開關元件，所要考量的功率損耗包括：傳導損耗、轉為 ON 的開關損耗、轉為 OFF 的開關損耗，以及阻斷損耗。本文所介紹的計算和波形，其目的是幫助設計人員瞭解各種 IGBT 參數的影響及其對功率損耗和整體效能的影響。對於實際操作或特定應用分析，可使用測試台來評估性能，量測 IGBT 典型所遇到的波形。隨著 IGBT 的內建技術在效率和穩健性上不斷成熟，IGBT 的應用範圍預期將擴大。權衡將依然是一致的，位居支配地位的功率損耗將繼續是開關損耗或傳導損耗。量測和操作 IGBT 參數可使設計人員將元件的實用性和應用優勢予以最大化。

www.bourns.com

BOURNS®

Americas: Tel +1-951 781-5500
Email americus@bourns.com

EMEA: Tel +36 88 885 877
Email eurocus@bourns.com

Asia-Pacific: Tel +886-2 256 241 17
Email asiacus@bourns.com