

IGBT 的演進強化交換式電源轉換技術

就像是功率MOSFET(金屬氧化物半導體場效應電晶體)元件一樣，IGBT(絕緣閘雙極電晶體)能實現便利的電壓控制切換，卻不會遭受傳統 MOSFET 元件因高導通電阻帶來高崩潰電壓的限制。同樣地，IGBT 已將 MOSFET 元件逐出在一些電源切換上的應用，特別是那些需要超過 500V 電壓的設備。隨著 IGBT 元件技術發展，設計人員已經把改善切換性能以降低損耗且允許更高操作頻率的要求置於優先考慮的問題。此外，改善導通性能也已實現，這將使 IGBT 元件成為正在成長的各式電源切換應用中的首要選擇。

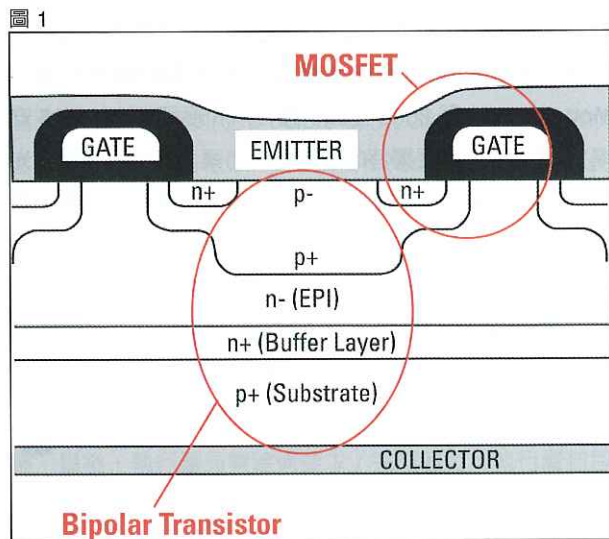
■ Satyavrat Laud/ 國際整流器公司應用工程師

IGBT 技術及工作原理

IGBT元件看上去或許更像一個PNP型雙極型電晶體，它可以通過電壓信號進行開啓或關閉，這點如同 MOSFET。這使得設計者利用其優秀的導通性能和高電流等級實現雙極型電晶體功能，當然這也得益於 MOSFET 元件直驅動的安排。

在諸如電燈泡安定器、低至中階功率馬達驅動器、焊接設備變頻器、UPS(不斷電系統)以及一些交換式電源供應器(SMPS)類型等電源轉換系統中，IGBT 元件正在成為切換元件的首選。

圖 1 顯示了 IGBT 的矽結構圖。在最簡單的情況下，



IGBT 可以看作一個 PNP 雙極性電晶體和一個控制它的 N 通道 MOSFET。從 IR 新引進的一系列 IGBT，採用了擁有專利的損耗阻滯溝壑技術。這些元件在切換損耗和導通損耗間達到最佳的平衡，而且和穿通型(PT)以及非穿通型元件相比擁有更高的性能。如今市場上大多數 IGBT 都是穿通型的。但是，今天這三種 IGBT 元件 IR 均有供應，便於設計人員根據特定應用場合，選擇最合適的元件。

IGBT 屬於少數載體元件，而不像 MOSFET 屬於多數載體元件。比如 N 通道功率 MOSFET，其電流只由電子決定的。而 IGBT 中在電流流過元件的角色上，與電子與電洞這兩種載體均有關係。透過如下一個典型的 N 通道穿通型元件可以理解 IGBT 的導通和關斷機制。

導通：當在集極相對於射極加一正電壓，閘極至射極偏壓低於臨界電壓，此時元件關斷，集極至射極之間無電流通(除微量的漏電流外)。當一正偏壓被施加於閘極上，相對於射極，電子被吸引到閘極下的 P+ 區。若此偏壓高於元件的臨界電壓時，閘極區域就聚集了足夠多的電子，在 N+ 區(位於射極和閘極下)和 N 型磊晶區(位於基極下)之間形成了 N- 通道。

這樣就能讓電子從射極下的 N+ 區通過建立的 N 通道，流到 N 型磊晶區。電子的流動就意味著傳統電流從 PNP 的基極流走(P+ 基區，N 型磊晶區，射極下的 P+ 區)。這樣就導通了 PNP 雙極性電晶體，並且建立起了從集極端流向射極端的電流。同

時，P+ 基區和N+ 緩衝層之間的接面二極體正向偏置，形成大約 0.7V 的導通電壓降。

由於電子流入 N- 磊晶層(PNP 電晶體的基極)和正向偏置二極體(P+ 基區到N- 磊晶層)，電洞就從 P+ 基區注入到了 N- 磊晶區。隨著 IGBT 的集極正電壓的升高，電洞的注入速度也隨著升高，直到 N- 磊晶區中電洞的濃度超過了本底摻雜的濃度。實際上，N- 磊晶層的負極性開始降低。當注入的電洞濃度進一步增加，隨著 N- 磊晶層電荷的複合，電洞和電子的濃度變得相等。但是雖然兩者濃度相等，它們仍遠高於初始的本底摻雜的濃度。這樣就大大降低了 N- 磊晶層的阻抗。

因為 N- 磊晶層是最大的電阻層，此製程可以有有效的調變元件的傳導率。此一“傳導調變”相較於 MOSFET 來說，是導通狀態優越性能的關鍵。與 MOSFET 同樣的晶片面積下，傳導調變可以顯著降低 IGBT 的導通壓降，減小對工作溫度和額定電壓的依賴(MOSFET 的 $R_{ds(on)}$ 非常依賴溫度)。

關斷：要關斷元件，閘極終端和射極終端要短接，這樣閘極到射極的電壓 V_{ge} 為 0V(或為負，不超過最大限值)。N 通道(也叫做反型層)不再維持，N- 磊晶層停止提供電子。這樣就開始了元件的關斷過程。但是元件要直到高濃度的少數載體(電洞)注入到 N- 磊晶區被複合後才算關斷。這就造成了較長的關斷時間，而 MOSFET 沒有任何的少數載體需要被複合。

IGBT 其他重要的特性：

- IGBT 在大電流時的導通損耗要小很多，而且其可用電流密度是 MOSFET 的 2 到 3 倍。這樣在同樣的電流下，可以減小體積，從而節約成本。
- 單個 IGBT 可以替代並聯的多個 MOSFET 或者任何超大型的單個 MOSFET，釋放多餘的材料成本。
- IGBT 和 MOSFET 之間的一個重要的區別就是 IGBT 結構中不含寄生反向二極體。在變頻器應用中，要在外部跨集極和射極之間接一個快速恢復二極體(陽極接射極，陰極接集極)。此二極體被選用的原因在於它比 MOSFET 的體二極體快很多，這樣可以大大降低切換損耗(由於二極體的反向恢復)。在變頻器的應用中，相對於功率 MOSFET 內部整合的二極體來說，設計人員可以選擇適合的外接二極體，以達到最佳的反向恢復特性。對組合

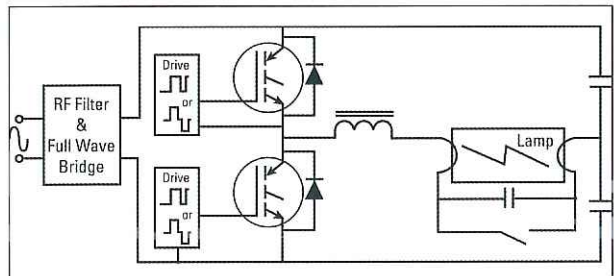
封裝元件也提供了一種可行的選擇，內建一個 IGBT 和一顆超快的軟恢復二極體。

IGBT 對溫度的依賴是最小的，而對功率 MOSFET 的影響很大。

MOSFET 通道中改進的性能

在照明安定器應用中，封裝了快速恢復二極體的 600V IGBT 變得非常常用了。在照明中典型的切換頻率是 25kHz 到 35kHz，也在現今 IGBT 的最大切換頻率範圍之內。圖 2 顯示了在半橋驅動的振盪器中，IGBT 如何取代傳統的 MOSFET。這是一個安定器電路典型的拓撲結構。

圖 2



在一些低功率的馬達驅動器中，由於使用了外部的快速恢復二極體，IGBT 的切換損耗較低，而若用 MOSFET，體二極體的存在讓切換損耗得不到降低。在三相變頻器中，MOSFET 體二極體會使整個系統的損耗加倍，從而需要更大的散熱片，增加用戶的成本。除了切換損耗外，由於體二極體還會產生電磁干擾問題，需要增加緩衝電路，增加了元件和成本。而有外部二極體的 IGBT 成功的排除了這些問題。

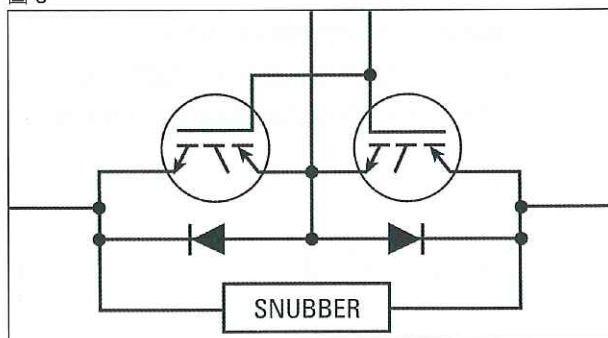
變頻式熔接機(inverter welders)是透過變頻電路得到需要的電能，IGBT 在變頻式熔接機中同樣替代了 MOSFET。在使用軟切換或諧振切換的全橋變頻器中，IGBT 的作用更大。軟切換降低了切換損耗，讓高速的 IGBT 運行在較高的切換頻率來提高整個變頻器的效率。

在其他應用場合中，低成本的不斷電系統(UPS)可以用來保護各種辦公室電腦系統。在這方面，IGBT 也能滿足對 UPS 不斷增長的需求。所有的 UPS 拓撲結構都要有一個變頻級把直流電池電源轉換成所要的交流電線路輸出，不管 MOSFET 或 IGBT 都可以用來實現。在 UPS 的橋式變頻器拓撲中，IGBT 變成了更受青睞的切換元件，這是因為設計人員可以選擇最適宜的反向恢復二極體用來和元件反

並聯。反向恢復二極體的恢復速率決定了變頻器的工作速度。因此對二極體的自主優化選擇，大大提高了UPS的性能，而這在 MOSFET 中卻是實現不了的。

UPS 還結合了一個交流切換來對負載提供電源。通常 IGBT 和 閘流體都可以用在這些切換上。這兩者之中，當切換關斷的命令顯示後，IGBT 能夠即刻回應，而閘流體則延遲命令。圖 3 顯示了用 IGBT 建立的交流切換電路圖。

圖 3



設計者同樣可以用 IGBT 設計低成本交換式電源供應器應用，以滿足對成本敏感的應用，比如離線式切換。它們也被應用在家庭娛樂設備中，比如電漿顯示板，還有如洗衣機、冰箱、空調和感應式電磁爐等現代化家電中。

MOSFET 取代的標準

大體而言，最新一代 IGBT 的切換特性給設計者提供了低成本的解決方案，可以達到與工作在 150kHz 甚至更高頻率的 MOSFET 相同性能。表 1 作為指南，顯示了國際整流器公司 (IR) 目前部份 IGBT 系列產品的操作頻率工作範圍。

表 1：IGBT 頻率和切換性能的範圍

IGBT 速度標準	切換頻率範圍
標準	0 ~ 1kHz
快速	1 ~ 8kHz
超快速	8 ~ 60kHz
WARP 速度	60 ~ 150kHz

由於封裝成本對 IGBT 和 MOSFET 來說都一樣，在較高的功率等級上用 IGBT 來代替 MOSFET 好處更多。實際中包括 500/600V 和 MOSFET 功率超過 250W 的情況，這些都要求元件的晶片尺寸為 5 或者更大。

對較小晶片尺寸的 MOSFET，成本很小而沒有必要替換。但隨著晶片尺寸的增長，用 IGBT 替換 MOSFET 的優勢就越來越明顯。相對於大型並聯晶片來說，這種優勢是最佳的。

IGBT 抗崩潰能力也是值得注意的。因此，如果功率 MOSFET 工作在崩潰模式，更換合適的 IGBT 就應該要有稍高的額定電壓。比如應選定一個 600V 的 IGBT 取代工作在崩潰模式的 500V MOSFET。要提醒的是崩潰操作會耗散掉出驚人的大量功率，用較高電壓的 IGBT 工作在非崩潰模式，可以提高系統的效率，減少功耗。

如果 MOSFET 並不是工作在崩潰模式，就可以安全的用同等額定電壓的 IGBT 來取代。

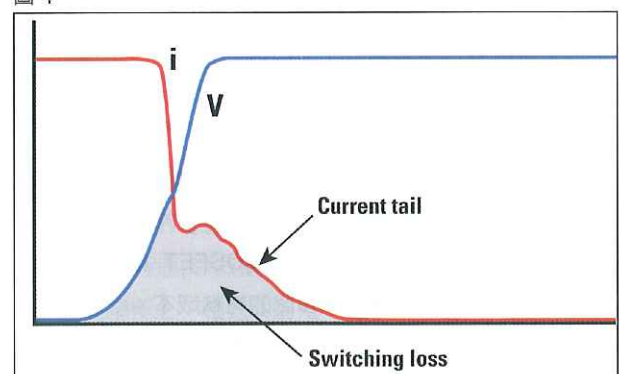
技術的進展

為了給工程師提供一個更廣闊的設計視窗，並儘量擴大應用範圍，許多廠商都同時增強了 IGBT 的功效，以及解決傳統的缺陷。和所有功率半導體一樣，其重點都是在較廣的工作範圍內，儘量減少損耗。

正如前面所討論的，因為不能像 MOSFET 那樣立即關斷，IGBT 關斷損耗最大。這樣，開始時集極-射極電流突然減小，然後隨著複合電流的逐漸降低，產生了電流拖尾，最後才降至零。當所有的電洞和電子複合後，集極-射極電流才終止。

圖 4 顯示了典型的 IGBT 切換波形，可以看到在和 MOSFET 可比較的等級內，拖尾電流的存在是如何增加了切換損耗，降低了最大的切換頻率。拖尾電流同樣要求增加半橋的兩個傳導元件之間的死區時間。

圖 4



因此，目前 IGBT 技術的發展，著重在減小拖尾電流，以減少損耗，提高切換頻率，以此來擴大其性能和應用範圍。溝槽 IGBT 就是基於此開發的產品。元件設計者還在採取措施，以減少導通電阻，增加電流密度，其他包括進一步簡化閘極驅動等其他開發目標。

其他一些新的發展包括薄晶圓技術，精細光罩幾何形狀與集極區內更低的摻雜量。這些已經減少了儲存電荷，降低關斷損耗，從而幾乎消除了拖尾電流。閘極導通電荷 Q_g 也已經減少。傳統壽命限制技術和添加 N^+ 緩衝層在關斷時來聚集少量載體，都可以加速複合速度。這些改進能使 IGBT 切換頻率高達 150kHz，如 WARP 和 WARP2 型元件。

至於 IGBT 的傳導性能，這可以藉由減小 MOSFET 的導通電阻和減低 PNP 雙極電晶體的壓降來改進。然而，由於 IGBT 的射極覆蓋了整個晶粒區，其效率和傳導壓降已經大大優於相同尺寸的雙極電晶體。只有提高 PNP 電晶體的增益，才能減小壓降，但考慮到門鎖以及耐壓能力，這個是有限制的。另一方面，增加晶片尺寸或晶胞密度均為減小整合型 MOSFET 導通電阻的有效技術。

直到如今，在半橋拓撲中，IGBT 需要負驅動偏壓，以保證在較高的 dv/dt 條件下充分關斷。這除了使驅動電路複雜外，也不便於設計者使用標準的閘極驅動 IC。IR 的 IGBT 不需要用負偏壓來關斷，且可以只用正電壓來進行閘極驅動。這樣就不需要輔助電源，簡化了控制電路。IR 的 600V 和 1200V 閘極驅動積體電路，採用了靴帶式 (bootstrap) 技術，使驅動 IGBT 更簡單，強固性更高。

由於採用了溝槽技術，和上一代的 IGBT 比起來，降低了 IGBT 的集極-射極飽和電壓 ($V_{ce(on)}$) 和總體切換損耗 (E_{ts})。這些特性降低功耗並提高功率密度，在同一封裝下電流均方值 (RMS) 提高了近 60%。其他好處包括減小了百分之五十的散熱面積。溝槽式 IGBT 特別適用於工作在寬範圍切換頻率的馬達控制中，例如家用電器、空調、通風風扇、工業驅動和循環泵等。三種類型 IGBT 的切換功耗和飽和電壓分別列在圖 5a 和 5b 中。

圖 5a

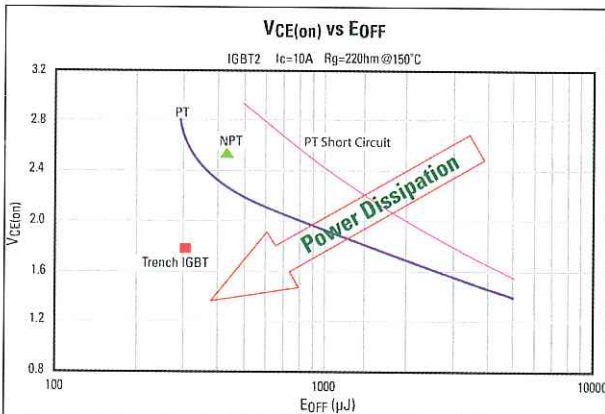
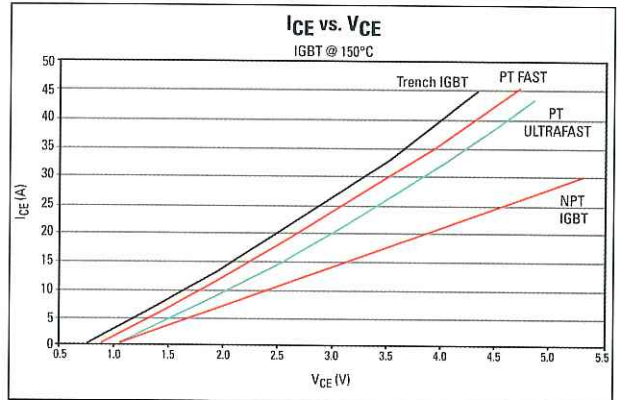


圖 5b



除了重新設計元件的製程，改進晶圓製造光罩步驟，也便於實現更精細的幾何形狀。舉例來說，IR 合併了植入與擴散階段，省卻了兩個完整的光罩步驟。這減少的光罩步驟，能改善元件接合的自對準，提高元件製造的可重複性。這使得設計師能夠預測到更高的元件可靠性，因而無需過多的設計餘量。因此設計師可以指定更小，成本更低的元件。

結論

IGBT 允許設計者在高直流電壓下，實現高效率切換模式的功率轉換，而並不以犧牲電壓的便利控制為代價。最近強化之處在於進一步改善了 IGBT 的效率，尤其是在有關切換性能和導通阻抗方面。

本文所介紹大部份強化之處，著重在優化包括 MOSFET 在內的性能。因此 IGBT 正在演變為 "傳導調變型 MOSFET"，帶來的優勢包括更高的操作速度、更低的壓降和高效率的矽利用率。CTA