

矽基電力電子半導體元件

吳孝嘉

漢磊科技股份有限公司技術開發中心

一、前言

目前全球近百分之四十的初始能源以轉換成電力的方式在使用，而最主要的發電方式仍以火力為主，隨著化石燃料逐漸枯竭，能源價格日益高漲，開發新能源與提高電能的傳輸及使用效率成為各國政府重要的發展方向。半導體功率開關元件是電能轉換及使用時最重要的元件，功率開關的性能決定了電力系統轉換及使用時的效率，不論在學術或產業領域都投入了大量資源從事電力電子元件的開發及改良。在眾多的電力電子元件中，MOSFET 與 IGBT 無疑是最重要且廣泛應用的元件，無論在汽車、家電乃至於地鐵、太陽能發電系統中都大量使用這些元件。本文就 super junction MOSFET 及 IGBT 元件的結構、原理及特性做一簡單的探討。

二、Super junction MOSFET

傳統的平面 MOSFET 結構如圖 1(a) 所示，晶片正面的複雜結構形成 MOSFET 元件，元件底部以一層輕摻雜的 N 型磊晶層與重摻雜的電極連

接，N 型磊晶層作為主要的耐壓層。當 MOSFET 處於截止狀態時，well 與磊晶層間的 PN 接面形成空乏區，空乏區中的空間電荷分布產生電場來承受加在 MOSFET 兩端的電壓，磊晶層的摻雜濃度越低則空乏區的寬度越大，電場強度越低，所能承受的電壓也越大。然而在導通狀態下，電流經過磊晶層與導通狀態下的 MOSFET 相連，磊晶層摻雜濃度低也意味著電阻增大，由於高壓 MOSFET 中磊晶層的電阻佔總導通電阻 95% 以上，低濃度的磊晶層使得 MOSFET 在單位面積下的導通電阻大幅增加。

MOSFET 的耐壓與導通電阻互相制約的問題一直是業界研究的重要課題。1991 年一個中國人提出的美國專利 [1] 提出了一個能解決此一問題的新觀念，專利中提出了以高縱深比 PN junction(稱之為 super junction，超接面)增強耐壓的技術。這個技術能使 MOSFET 在相同的耐壓下導電率提高數倍。1998 年 Infineon 公司根據這個技術推出了第一代的 super junction MOSFET 並稱之為 CoolMOS。基於其優良性能很快就取代高電壓大電流的傳統 MOS-

FET，發展至今 super junction MOSFET 年產值已超過 6 億美金並仍以超過 10% 的成長率增加中，廣泛應用於 PC，電源系統，汽車，新能源等領域。

Super junction 的主要觀念在於如何在增加 N 型磊晶層摻雜濃度的同時還維持相同的空乏區深度，其基礎理論如下圖所示。

圖 1(a) 表示傳統 MOSFET 的截面圖，當 MOSFET 處於截止狀態時，空乏區會延伸至 N- 磊晶層，電場分布依循典型 PN 接面如圖 1(a) 下方所示。當峰值電場達到臨界電場 E_c 時 MOSFET 開始崩潰，根據基本的半導體物理原理，電場強度會沿著垂直方向逐漸降低，藍色部分的面積相當於崩潰電壓。圖 1(b) 表示 super junction MOSFET 的截面圖，在 N- 磊晶層中形成規則排列的 PN 接面，PN 接面雜質濃度調整到 N 型區與 P 型區幾乎同時空乏。由於空乏區主要由橫向的 PN 接面產生，因此

當 MOSFET 處於截止狀態時垂直方向電場分布會如圖 1(b) 下方所示，藍色區域面積也相當於崩潰電壓。由圖 1(a) (b) 的比較得知，由於電場分布不同，super junction MOSFET 能達到更高的崩潰電壓。基於崩潰電壓與導通電阻的正相關特性，super junction 結構能將磊晶層濃度大幅提高同時保持相同的崩潰電壓。因此 super junction MOSFET 能得到比傳統 MOSFET 更低的導通電阻特性及更小的晶片面積。[2]

高壓 MOSFET 的磊晶層相當厚，為達到有效耐壓，PN 接面的深度必須接近耐壓層的厚度。在這樣深度下一般植入擴散所形成的 PN 接面占用面積會相當大，為了要盡量保留大面積的 N 型導電區，因此必須製作出高縱寬比的 PN 接面以有效降低 P 型區的面積。製作的方法有許多種，較成熟的技術為兩大類。第一類稱之為多層磊晶堆疊技術；第二類稱為深溝槽回填技術。

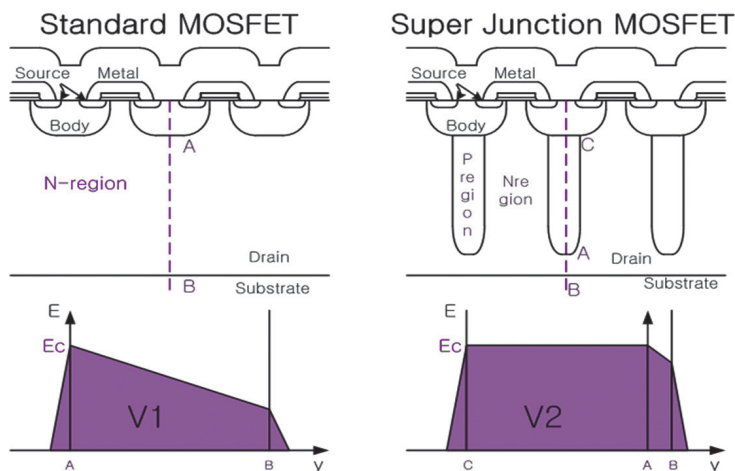


圖 1：傳統 MOSFET 與 super junction MOSFET 電場分布。(a) 傳統 MOSFET 2D 示意圖及垂直方向電場分布。(b) super junction MOSFET 2D 示意圖及垂直方向電場分布。

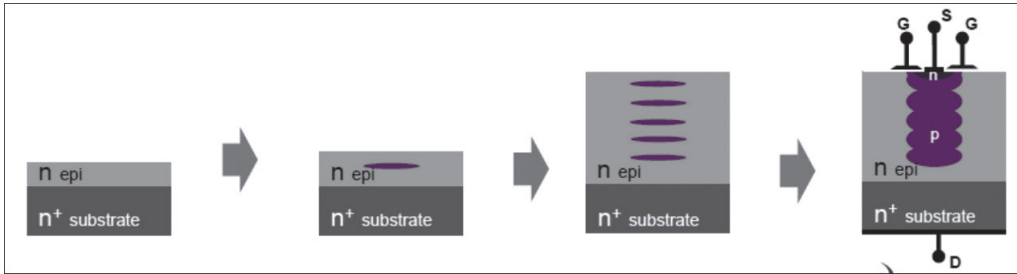


圖 2：多層磊晶 super junction 技術

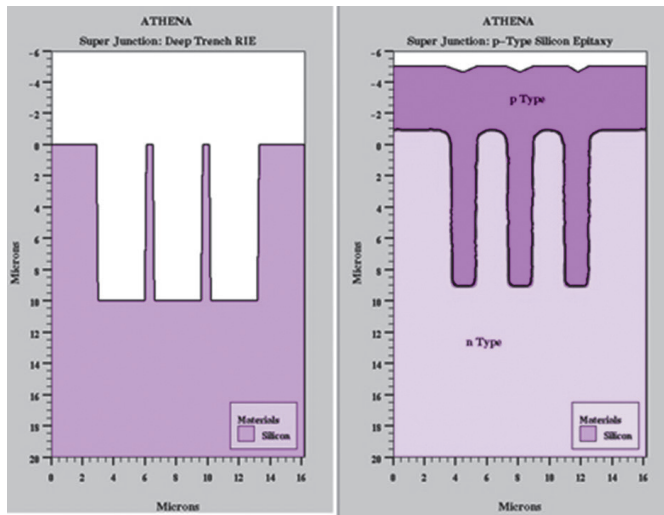


圖 3：深溝槽回填 super junction 技術

多層磊晶堆疊技術如圖 2 所示，製作的方式是在 N+ 基板上成長一層薄磊晶層並以黃光植入方式形成 PN 接面圖形，整個磊晶層是由數層薄磊晶堆疊而成。每一層磊晶層上都重複製作一 PN 接面圖形，堆疊時將每個 PN 接面對齊以形成高縱深比的 super junction。磊晶層對的堆疊完後再用擴散的方式使每個單獨的 PN 接面相接而形成最終的 PN 接面。由於 PN 接面是用擴散方式形成，擴散長度受每層磊晶層厚度限制，磊晶層越厚則擴散就越多，P 型區域的寬度受限於橫向擴散距離而無法進一步縮小，N 型導電區面積使用率無法

再提高，導致最終的導通電阻值無法進一步降低。

為了克服多層磊晶技術上述的缺點，STM 等公司開發了深溝槽回填技術來進一步提高 N 型導電區面積使用率。深溝槽回填技術如圖 3 所示：

此技術是在 N- 磊晶片上先蝕刻出高縱寬比的深溝槽，再使用離子植入、擴散或磊晶技術在溝槽內壁形成 PN 接面，接著以磊晶、CVD 等方式回填深溝槽，最後再以 CMP 方式除去表面多餘的回填材料。用這種方式形成的 PN 接面比多層磊晶技術平整，接面寬度也能更進一步縮小。然而在高壓 MOS-

FET 上深溝槽的縱寬比高達 15 至 30 倍，在深溝槽蝕刻、摻雜、回填等技術上要求更高的製程能力而使得製造成本居高不下。但另一方面由於接面寬度小因此導通電阻比多層堆疊技術更低，在大電流產品上仍有一定優勢。

在電力系統應用中，MOSFET 基於良好的開關特性及較高的導通電阻特性應用於高頻，低功率系統如圖 4 所示。較大功率的系統多半採用 IGBT 元件但受限於 IGBT 的元件特性，系統操作頻率遠低於 MOSFET 元件，MOSFET 與 IGBT 的使用範圍間並沒有太多交集。當 super junction 技術應用在 MOSFET 後，導通損耗隨電阻降低而減少，使得 super junction MOSFET 能應用在更高的功率系統上。同時由於元

件面積縮小使得寄生電容值減少，元件開關損耗降低而操作頻率得以提高。從圖 4 上可以看出，super junction MOSFET 應用區域已超越傳統 MOSFET，可以填補部分 IGBT 與傳統 MOSFET 應用區域間的空隙。

目前在市場上能提供 super junction MOSFET 的公司並不多，多為在電力電子領域耕耘多年的老牌 IDM 公司，其中 Infineon 公司的 CoolMOS 系列主要以多層磊晶技術為主，深溝槽回填技術則以 STM 的 MDMesh 系列及 Toshiba 的 DTMOS 系列為代表。除此之外眾多公司正投入大量資源持續開發新技術與產品，預期未來數年會逐步取代傳統的高壓 DMOS 步入一蓬勃發展期。

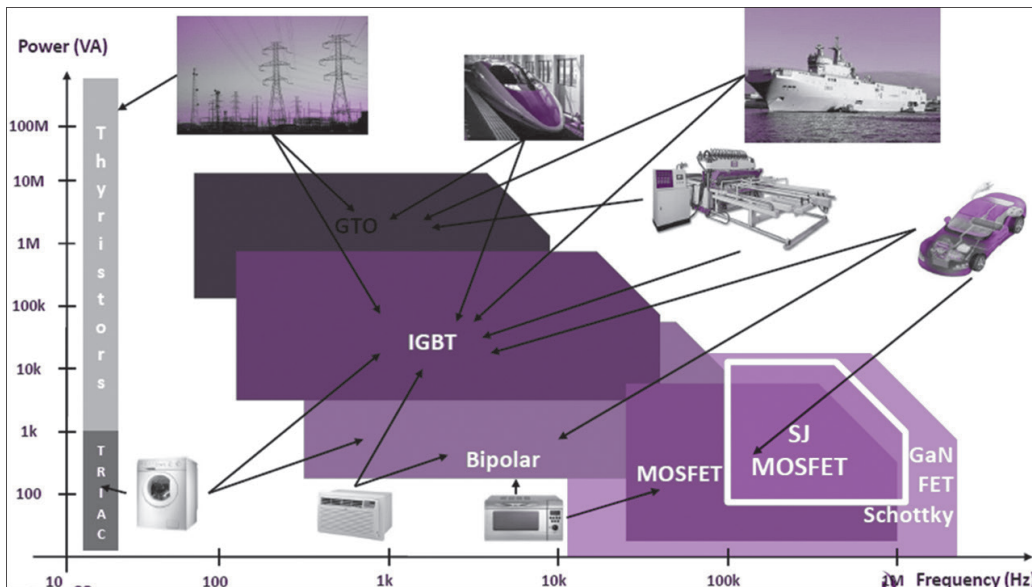


圖 4：電力電子元件的應用領域。IGBT 一般應用於較大的功率及較低的頻率，MOSFET 多應用在較高的頻率及較低的功率，二者間的交集並不多。Super junction MOSFET 藉由較高的功率密度正好可填補兩者之間的區域。

三、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGBT 自 80 年代問世以來，憑藉優良的功率密度特性已逐漸取代雙極電晶體成為電力電子系統的主要元件之一，已廣泛應用於電能傳輸管理，軌道交通，電機驅動，風力 / 太陽能發電等領域，是目前發展最快的電力電子元件之一。[3] IGBT 結合了雙極電晶體與 MOSFET 的優點，具有 MOSFET 的輸入阻抗高、控制功率小、驅動電路簡單，開關速度高等優點，同時也有具備雙極電晶體的電流密度大、飽和電壓低等優點。比起其它電力電子元件在高壓、大電流、開關速度三方面有無可替代的優點。

IGBT 的結構如圖 5(a) 所示，晶片正面的結構與傳統 DMOS 相似，晶片背面則與 DMOS 不同是個 PN 接面。因此形成了一個垂直方向的 PNP 雙極電晶體且 PNP 的基極受到表面 MOSFET 的控制。圖 5(b) 顯示 IGBT 的等

效電路圖。當 gate 上施加電壓時 MOSFET 導通，導通的電流提供垂直 PNP 基極電流而使得 PNP 也開始導通，當導通電流到達某一程度時觸發 IGBT 中的 PNP 結構，大量的載子注入使得 IGBT 導通在雙極電晶體飽和狀態，導通阻抗因少數載子注入的電導調製效應而大幅降低。當 gate 上電壓消失使得 MOSFET 截止，IGBT 由於基極電流消失而截止，兩端施加的電壓與 DMOS 類似由 N 型 drift region 承受。[4]

從 IGBT drift region 的結構設計上可以分成三種。最早出現的是穿通 (Punch-Through, PT) 型 IGBT 如圖 6(a) 所示。基極厚度約在數十至一百多微米之間，使用 P 型晶圓材料及厚 N 型磊晶層，為了增加載子再結合速度採用重金屬摻雜或電子輻照方式產生局部缺陷來降低少數載子壽命。PT-IGBT 的正向飽和電壓 ($V_{ce.sat}$) 具有負溫度係數，當溫度增加時飽和電壓反而下降，電流容易集中在飽和電壓較低的區域而誘發二次崩潰，因此元件在高溫下穩定型較差，不利於並聯使用。PT-IGBT 晶片

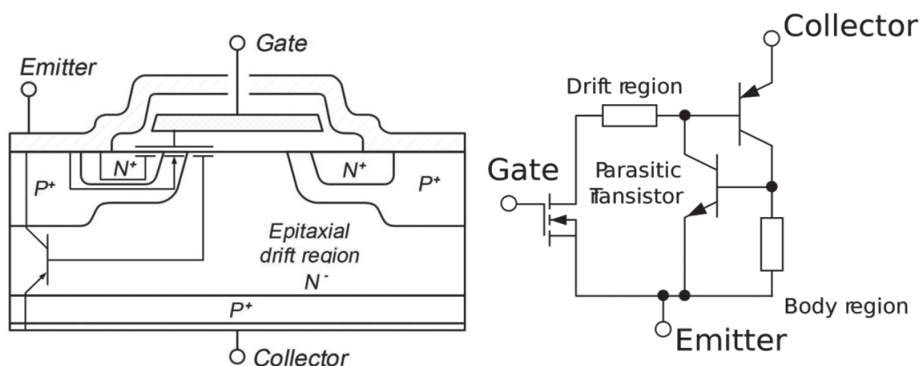


圖 5：(a)IGBT 結構示意圖。(b)IGBT 等效電路圖。

的厚度較厚因此較容易製造，因此在 600V 以下應用較廣。

Infenion 公司在約 1988 年推出第二種非穿通 (Non Punch-Through, NPT) 型 IGBT 如圖 6(b) 所示。NPT 型 IGBT 捨棄了昂貴的磊晶晶圓改採便宜的高阻值 FZ 晶圓，因而大幅降低了製造成本。NPT IGBT 的製造方式前段與 PT-IGBT 相同，當正面結構完成後將晶圓研磨到耐壓所需的厚度，背面再使用離子植入形成一層很薄，發射效率較低的 P+ 集極。由於 P+ 集極厚度很薄，當 IGBT 截止時 drift region 中的大量電子能很快地直接穿過 P+ 集極流出，以此 NPT-IGBT 可以不需要額外的載子壽命控制技術就可以實現快速截止。由於 drift region 區域內載子壽命較長，因此正向飽和電壓具有正溫度係數，電流不容易集中在局部區域，在大電流應用時容易並聯使用。

場截止 (Field Stop, FS) 型 IGBT 是目前大家最看好的新型 IGBT 元件，

FS IGBT 的結構如圖 6(c) 所示，FS 型 IGBT 的結構設計是在 NPT 型 IGBT 的 N- 漂移區和集極間增加了一層 N 型場截止層。這層場截止層濃度設計成垂直電場在截止層內降低到零。由於這層場截止層改變了電場分布，使得漂移區單位厚度下耐壓強度比 NPT 型 IGBT 大，因此可以用更薄的漂移區達到相同的耐壓，因為漂移區的厚度降低導致導通時的飽和壓降就大幅降低，功率密度因而大幅增加。和 NPT IGBT 類似，FS 型 IGBT 的飽和壓降也具有正溫度係數，容易並聯使用。[4][5] 在 FS IGBT 結構中，drift region 的厚度幾乎等於耐壓層所需的厚度，因此在較低壓如 600-1200V 的應用下晶圓片必須研磨的非常薄 (在 600V 應用下晶圓片厚度接近 100 微米)。如此薄的晶圓片還必需在背面製造出 N 型場截止區及 P 型集極，製造的困難度及成本將大幅提高。

不同類型的 IGBT 有其不同的特點，表 1 針對上述三種常見的 IGBT 特

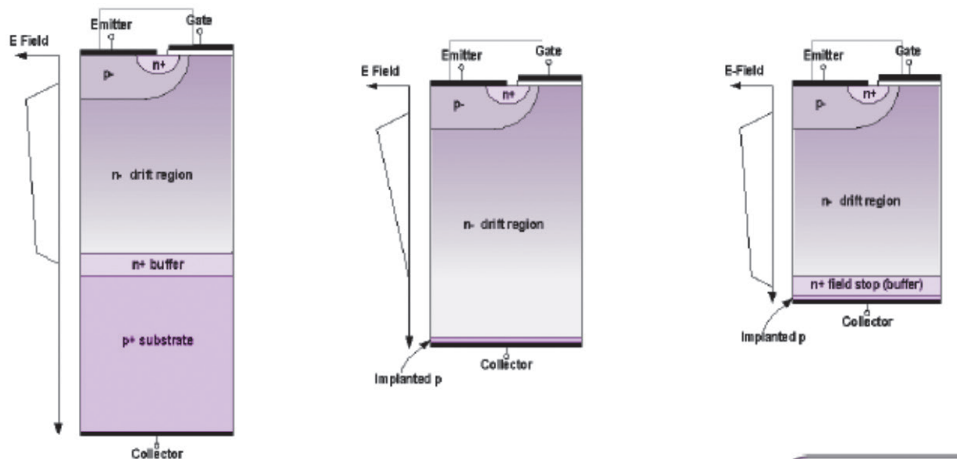


圖 6：(a) PT 型 IGBT 結構及垂直電場分布。(b) NPT 型 IGBT 結構及垂直電場分布。(c) FS 型 IGBT 結構及垂直電場分布。

性做一整理比較，在各種 IGBT 中，隨著特性，應用環境，製造成本，系統設計等不同的考量各佔有一部分市場，但隨著製造成本逐年下降，FS 型 IGBT 有逐漸取代 PT 及 NPT 型 IGBT 的趨勢。

與 MOSFET 不同，IGBT 在晶片背面是 PN 接面來形成少數載子注入。雖然大幅提高了 drift region 導電率，但同時並聯於兩端的寄生二極體也隨之消失。在沒有寄生反向二極體的情形下，IGBT 截止時會有相當大且時間長的反向截止電流。這個反向截止電流不但造成不必要的功率消耗，同時也限制了 IGBT 的操作頻率無法提升，因此在實

際使用時 IGBT 都必須並聯一個快速恢復二極體 (Fast Recovery Diode, FRD) 來抑制反向截止電流，圖 7 是 IGBT 反向截止時電流變化的示意圖，黑色曲線表示單獨 IGBT 的反向截止電流；紅色曲線代表 IGBT 與 FRD 並聯後的反向截止電流曲線。從圖上可以看出，並聯 FRD 後可以大幅降低 IGBT 的反向截止電流 (I_{rr}) 及反向截止時間 (t_{rr})，在一般的功率系統上是一常見且必須的設計。在一些新設計的 IGBT 上已將快速恢復二極體直接整合在同一晶片上。

少數載子注入的電導調制效應大幅降低了 IGBT 導通時在 drift region 內

表 1：不同 IGBT 的特性比較

	PT	NPT	FS
導通損耗	低	中	低
開關損耗	低	中	低
溫度特性	負溫度係數， Vcesat 隨溫度增加而減小	正溫度係數， Vcesat 隨溫度增加而增加	正溫度係數， Vcesat 隨溫度增加而增加
並聯能力	困難	容易	容易
短路能力	低	高	中
晶片厚度	厚	中等	薄

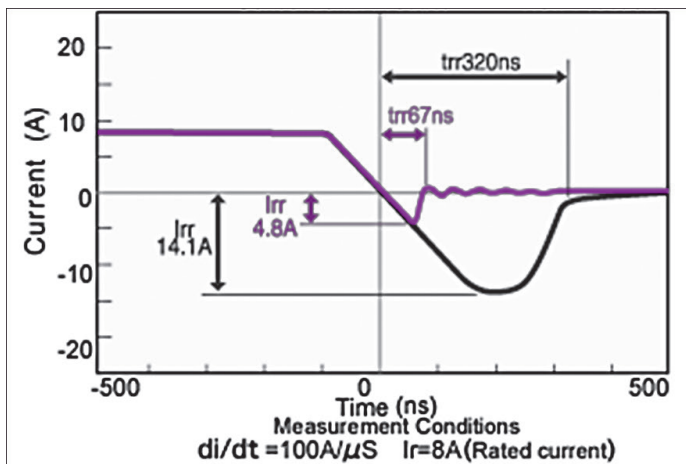


圖 7：IGBT 反向截止電流， I_{rr} ，及反向截止時間， t_{rr} 。黑色曲線表示獨立 IGBT 的反向截止特性；紅色曲線表示 IGBT 與 FRD 並聯後的反向截止特性。

的損耗，因此 MOSFET 部分的導通損耗所佔的比例就大幅提高到無法忽視的程度。近年來，結合低電壓溝槽 MOSFET 技術與 IGBT 技術所衍生出的溝槽式 IGBT 藉由較低的成本及優良的性能在某些應用領域逐漸成為主流。溝槽式 IGBT 的結構如圖 8 所示，晶片正面 MOSFET 的結構與低壓溝槽式 MOSFET 類似，MOSFET 是一個縱向結構，溝槽的側壁形成 gate oxide，gate 電極在溝槽當中；晶片的背面結構與 IGBT 相同，隨著 NPT 或 FS 型做不同的調整。利用面積使用率高的溝槽技術可以使得 IGBT 的面積及寄生阻抗都能有效縮小，大幅降低成本及提升開關速度，現已成為 IGBT 未來發展的新方向之一 [5]。

目前馬達驅動占全球電子能源消耗 45%，因而促進各地政府定立新的節能法規去推動採用電子變速控制，如電視或電腦電源等其他設備都須遵循

「能源之星 (Energy Star)」等環保設計的指導原則，必須從待機到滿負載狀態實現高節能效率。

一般在最高約 250 伏特 (V)，而額定輸出功率低於 500 瓦 (W) 的低壓應用中，推薦採用 MOSFET。與 IGBT 相比，MOSFET 有較低的開關損耗，及允許更高的運作頻率，從而可採用更小的濾波元件。最新一代 MOSFET 是典型的功率元件，用於電訊、網路和電腦中的直流對直流 (DC-DC) 同步降壓轉換器中。

IGBT 推薦用於更高電壓，特別是高於 1,000V 電壓，而輸出功率在 5kW 或更高的範圍之內的應用。由於 IGBT 具有雙極性電晶體的輸出開關和導通特性，所以其緩慢的關斷或電流拖尾，都趨向於將 IGBT 的開關頻率限制在少於 20-50kHz。另外，絕緣閘極架構允許元件受電壓控制，與 MOSFET 類似，從而可以簡化閘極驅動電路的設計。

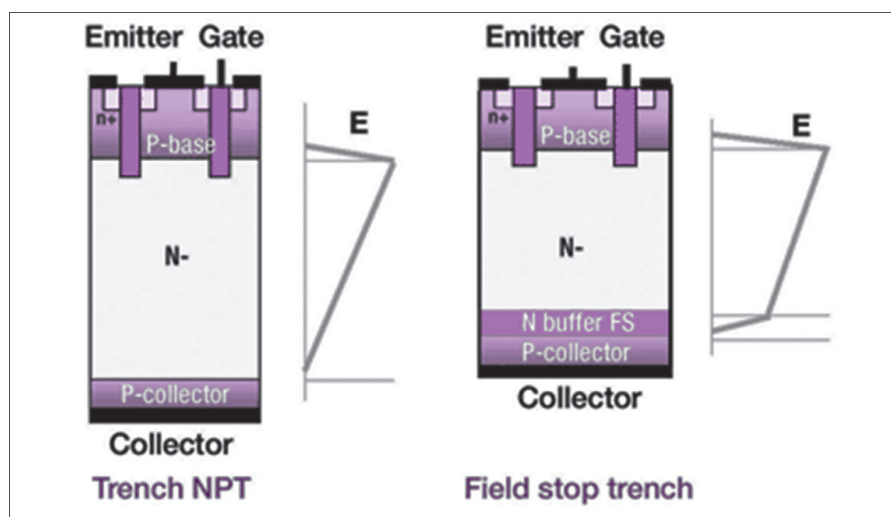


圖 8：(a) 溝槽式 PT-IGBT。(b) 溝槽式 FS-IGBT。

在電力電子系統中，一般認為 IGBT 最佳用於低頻和高壓應用，而 MOSFET 更適用於較低電壓和高頻的應用。儘管這種觀點仍然適用，但晶片和封裝的改進，使這兩種元件於愈來愈廣泛的操作環境中，同樣能夠發揮強大的性能。

四、結論

隨著化石能源逐漸枯竭，地球環境逐漸惡化，全球紛紛開始重視節能減碳並開發各種新能源。各國政府陸續制定了不同的法規標準來提高能源的使用效率。電能作為主要能源之一，提升電能的使用效率自然成為重中之重，先進電力電子元件的重要性自然大幅提高。Super junction 技術不但可以使用在 MOSFET，更可以應用在各種電力電子元件如二極體，雙極電晶體等，已成為提升現有高壓大電流元件性能最主要的方式之一。MOSFET 與 IGBT 做為眾多元件中使用最為廣泛的元件之一，未來必將迎接高速的發展期。

五、Reference

- [1] US patent US5216275 A, 1991.
- [2] “Advanced Power MOSFET Concepts” . B.J. Baliga.
- [3] B. J. Baliga, M. S. Adler, P. V. Gray, R. P. Love and N. Zommer, “The Insulated Gate Rectifier: A New Power Switching Device” , IEDM Technical Digest, Abstract 10. 6, 1982.
- [4] “IGBT Theory and Design” , Vinod Kumar Khanna.
- [5] “Trench Stop-IGBT -Next Generation IGBT for Motor Drive Application” , Application Note, V1.0, Oct. 2004.

作者簡介

吳孝嘉

經歷：漢磊科技股份有限公司技術開發中心
副總經理