

# 氮化鎵功率電晶體的基礎



宜普電源轉換公司 Stephen L. Colino 及 Robert A. Beach

我們對功率半導體最基本的要求是其性能、可靠性、管控性及成本效益。它的高頻率性能，可切合穩壓器系統於體積及瞬態響應方面的需要而具更高價值，並為D類功率放大器提供高保真度。一個新元件結構如果不高效、不可靠的話，根本不可能商品化。市場上有很多新結構及原料可供選擇，有些成功地取得經濟效益；有些則是接受度有限。不過，現在有氮化鎵 (Gallium Nitride/GaN) 增強型功率管控元件問世，具有高導電性、極快開關、矽元件之成本結構及基本操作模式等優異性能，其代表就是宜普公司的突破性新產品。

## 操作

宜普氮化鎵電晶體的表現跟矽功率MOSFET非常相似。在閘極上，相對於源極，一個正偏壓會產生吸引電子的場效應，構成汲極與源極之間的相向通道。由於電子被集中在一起，不會零散地困於某一格位置，這個通道的電阻因而很低。從閘極移去偏壓，下面的電子會分散至氮化鎵層，重新產生耗盡區域，從而再次構成阻隔電壓的能力。

## 元件結構

一個元件的成本效益，從現有生產基礎設施開始計算。宜普公司的製程技術，基於不昂貴的矽晶圓片。利用現有矽製程設備，在矽基板上加上一薄層氮化鋁 (Aluminum Nitride/AlN)，用於隔離元件結構和基板。如果產品的額定電壓為200V及200V以下，基板和有源元件之間的隔離電壓超過300V。在這隔離層上是一層厚的高阻性氮化鎵，電晶體就建立於這個基礎上。由鋁、鎵和氮 (Al-GaN) 組成的電子產生材料疊加於GaN之上。

這個層將在下方產生大量自由電子。再經進一步處理即可在閘極下方形成一個耗盡區。為了增強電晶體性能，將用與導通n通道增強型功率MOSFET同樣的方式在閘極上施加一個正電壓。圖1顯示了這個元件結構的剖面圖。最後的結果是一個具簡單基礎、簡要明確及成本效益的電源開關解決方案。該元件的表現跟矽功率MOSFET相似，當然也有不同之處，我們將再作闡釋。

最後的結果是一個  
具簡單基礎、簡要  
明確及成本效益的  
電源開關解決方案

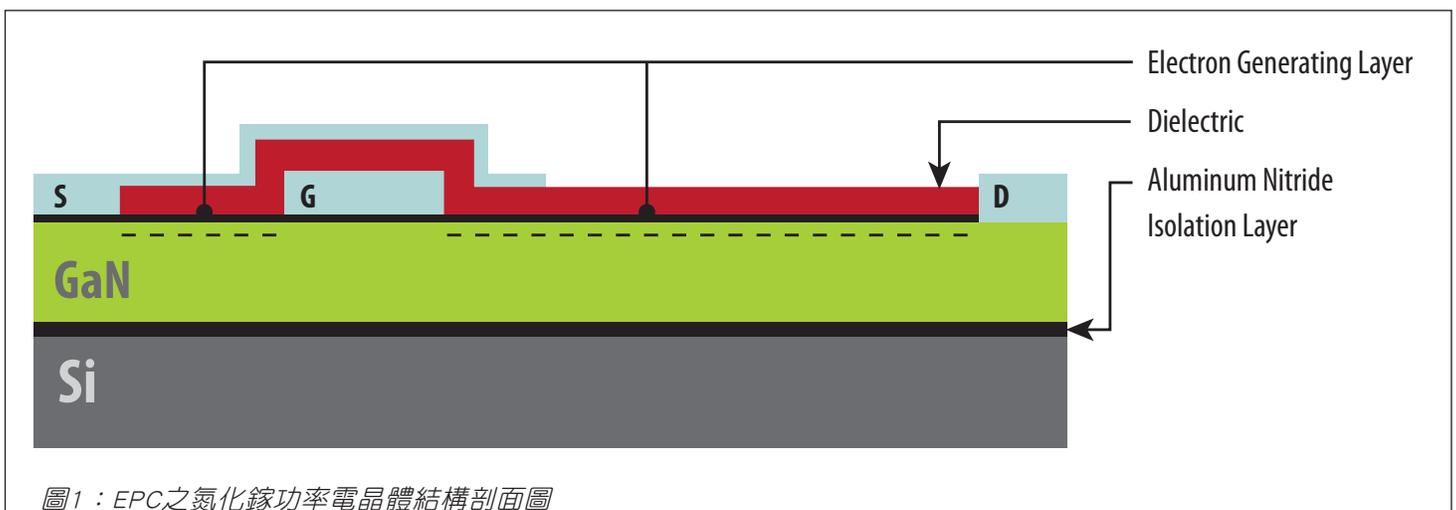


圖1：EPC之氮化鎵功率電晶體結構剖面圖

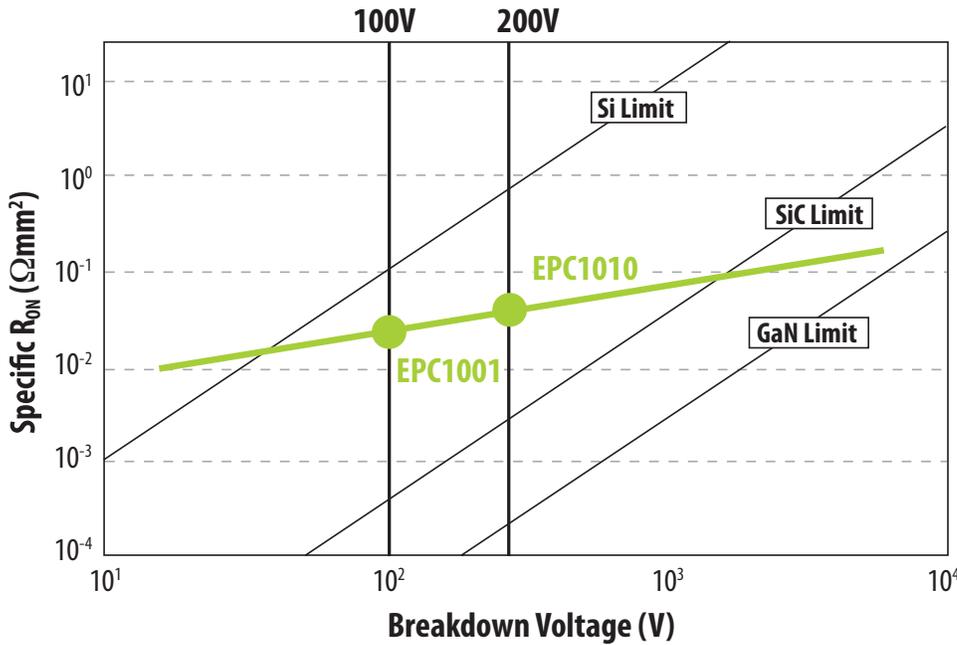


圖2：氮化鎵及矽元件於不同電壓下的性能

要製成一個高壓元件，需增加汲極與閘極之間的距離。由於氮化鎵的電子被集中在一起的電阻非常低，所以縱使增加阻隔電壓之能力，若與矽元件相比，其對電阻的影響會更少。圖2顯示了理論上的氮化鎵及矽元件於不同電壓下的性能極限，及宜普第一代元件的效能。

各位電子工程界朋友均知道矽製 MOSFET 已開發了三十年，其表現已接近理論上的極限，若希望其表現再進一小步，將需要龐大

資源去開發。相對來說，氮化鎵元件處於產品發展周期的起步階段，在數年內將可預見其重大進展。

### 閘極臨界

氮化鎵電晶體的臨界比矽功率 MOSFET 低，這樣是有可能的，因為臨界不會隨溫度變化及具備很低的閘極至汲極間電容 ( $C_{GD}$ )。圖3顯示了宜普 EPC1001 (100V, 5.6mΩ) 的電晶體傳輸特徵曲線。當元件在 1.6V 電壓時開始傳導大量電流，於  $dV/dt$  整流轉變時，閘極到

源極之間需要保持低電阻。

### 電阻

阻抗 ( $R_{DS(on)}$ ) 及閘極至源極電壓 ( $V_{GS}$ ) 曲線圖是跟 MOSFET 相似的。宜普第一代氮化鎵電晶體專為 5V 驅動器操作而設。圖4顯示了宜普 EPC1001 的一系列曲線圖。當閘極電壓越接近最高水平，汲極對源極的電阻則會持續下降。由於閘極驅動器損耗極少，所以氮化鎵電晶體應以 5V 電壓驅動。氮化鎵電晶體之電阻  $R_{DS(on)}$  溫度系數為正數，但幅度比矽 MOSFET 小很多，例如，在 125°C 時，宜普 EPC1001 系數為 25°C 的 1.45 倍，而矽功率 MOSFET 則是 1.7 倍。這個優勢會隨着電壓增加而增強。

### 電容

氮化鎵電晶體的橫向結構使其具備極低電荷特性，能夠在數納秒內切換數百伏特，切換頻率可達數兆赫，這個性能可縮小功率轉換器體積，並使 D 類功率放大器具有更高的保真度。閘極間電容 ( $C_{GD}$ ) 是最重要的，因為它最能影響切換功率損耗。由於結構是橫向， $C_{GD}$  由閘極一角而產生。宜普氮化鎵場效應電晶體因為具備極低  $C_{GD}$ ，致使電壓切換非常迅速。閘源極間電容 ( $C_{GS}$ ) 由從閘極到通道的結點和閘極與場板之間的電介質電容組成。

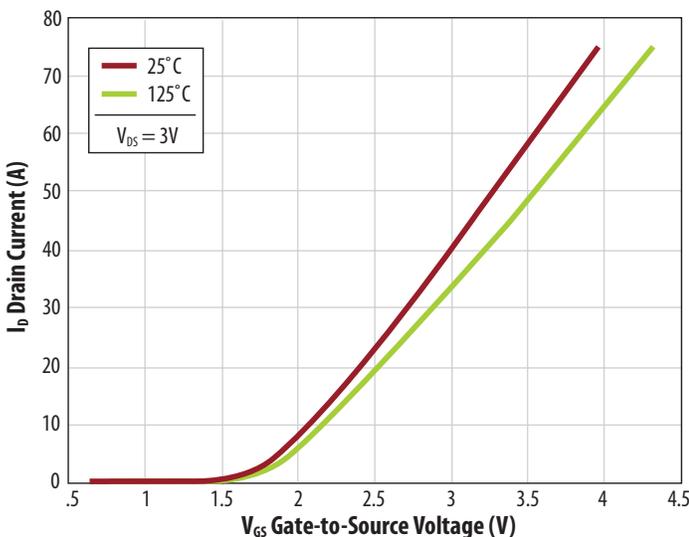


圖3：傳輸特徵曲線圖

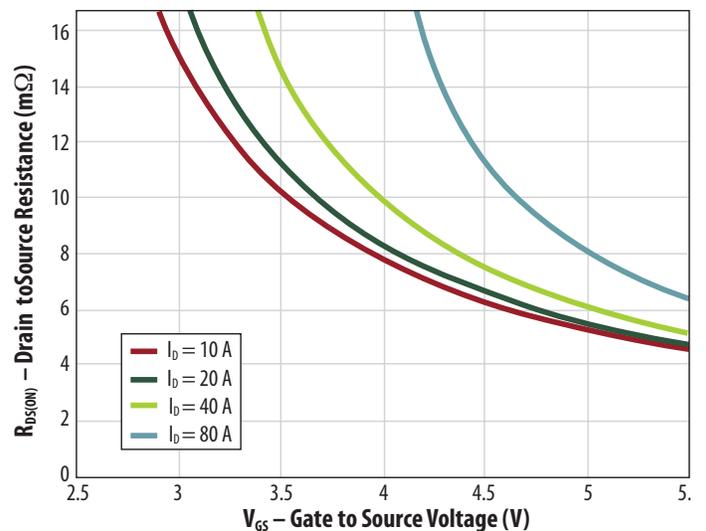


圖4：不同電流下  $R_{DS(on)}$  與  $V_{GS}$  的比較

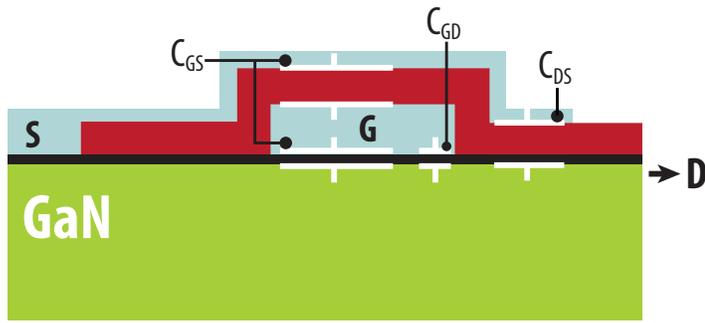
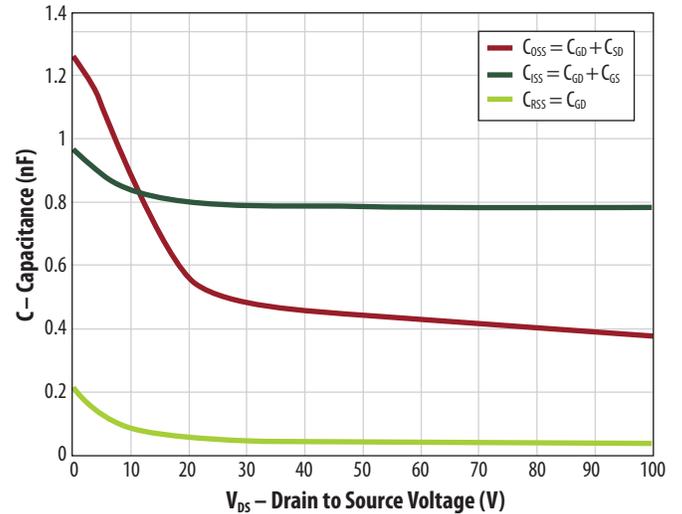


圖5(上圖)：電容所在位置

圖6(右圖)：宜普EPC1001的電容曲線圖



相比 $C_{GD}$ ，閘源極間電容( $C_{GS}$ )較大，使氮化鎵電晶體擁有優異的 $dV/dt$ 抗擾性能。相比矽MOSFET，閘源極間電容( $C_{GS}$ )較少，延遲時間很短，因此應用於低負載周期時具極佳管控制能力。

根據實例證明，一個1至48V降壓穩壓器使用宜普之100V氮化鎵電晶體，可於1MHz切換頻率下表現理想。與矽MOSFET比較，氮化鎵電晶體之 $C_{DS}$ 也較小，僅限於從場板到汲極的電介質上的電容。電容所在位置見圖5，在相同電阻下，雖然GaN的電容相對電壓曲線與矽元件相似，最大不同之處是氮化鎵電晶體之電容是極低及更快降至最低。圖6顯示了宜普EPC1001的電容曲線圖。

### 並聯閘極電阻及閘極漏電流

並聯閘極電阻( $R_G$ )限制了FET的電容充電或放電速度。矽MOSFET只能用多晶矽或混合材料類的金屬硅化物；氮化鎵電晶體則用金屬閘極，閘極的電阻很低，少於 $1\Omega$ ，這樣低閘極電阻可提高 $dV/dt$ 抗擾能力，並且不會以氧化增生來隔離閘極，是以相比矽MOSFET，氮化鎵電晶體閘極漏電流較大，預計在1mA。由於這些元件具低閘極驅動電壓，由閘極漏電流所引致的損耗是很低的。

### 優異指標

總閘極電荷( $Q_g$ )是 $C_{GS}$ 加 $C_{GD}$ 除以電壓。常用的指標FOM是 $R_{DS(on)}$ 乘以 $Q_g$ ，顯示了元件在開啓狀態及切換時的表現。圖7展示了氮化鎵電

晶體與最優異矽MOSFET 100V器件之FOM比較。當電壓增加，其 $R_xQFOM$ 更具優勢。圖8則展示了200V元件之FOM比較。

### 基板二極體

從圖1可見，宜普氮化鎵電晶體結構是一個橫向元件，沒有矽MOSFET常見的寄生雙極介面。嚴格來說，其反向偏壓與二極體具相似功能但機理不同。如果閘源電壓是零偏壓，閘極下方就沒有電子。當電流從源極至汲極，汲極電壓會減弱。相比飄移區域，閘極上正偏壓形成後會把電子注入閘極下面。在閘極臨界時，將有足夠電子形

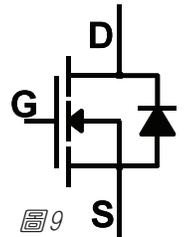


圖9

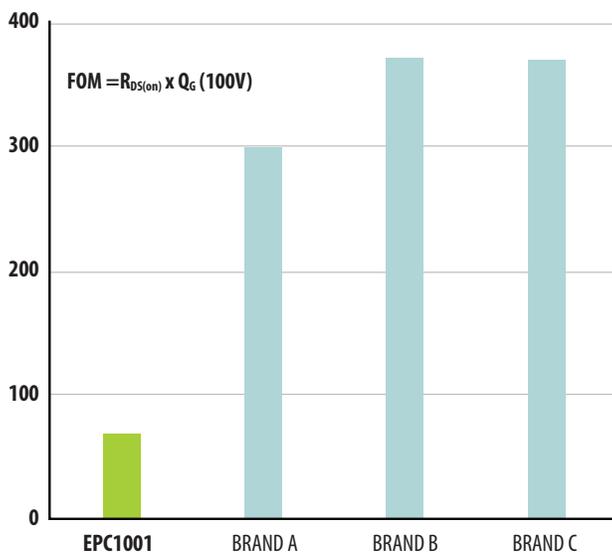


圖7：氮化鎵電晶體與最優異100V矽MOSFET元件之FOM比較

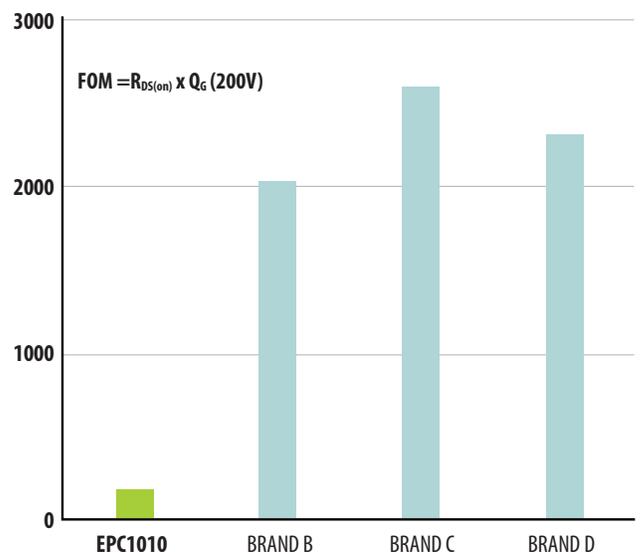


圖8：氮化鎵電晶體與200V矽MOSFET元件之FOM比較

成一個傳導通道，其好處是在傳導中沒有少數載流子，所以沒有反向恢復損耗。當 $Q_{RR}$ 是零時，輸出電容 $C_{OSS}$ 需要在每次開關周期內充電或放電。相比矽MOSFET，若元件的 $R_{DS(on)}$ 相若，則氮化鎵電晶體具更低的 $C_{OSS}$ 。氮化鎵電晶體在反向時需臨界電壓去開啓，二極體之正向電壓會比矽晶體為高，所以必需把二極體導電減至最小。氮化鎵電晶體的基本操作原理與矽MOSFET相似，它們均可以圖表表示，如圖9所顯示。

## 封裝

宜普氮化鎵電晶體與底層絕緣，這種方法能以單片方式製造出任何結構的多個電晶體元件，並且本身就具有高效通用的散熱機制，在元件和散熱器之間不需要絕緣層。它可以在晶圓片的一邊湊集汲極及源極電流。若果要湊集電流的金屬層具低電阻，這些通道必需短小。要做到這樣，可利用芯片級線柵門陣列封裝，把汲極及源極線交替排列。標準的線距是0.4mm及0.6mm。圖10展示了宜

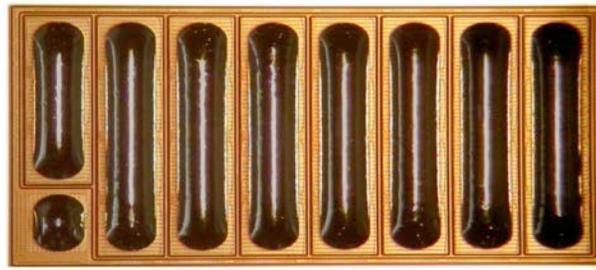


圖10：宜普EPC1010電晶體

普EPC1010電晶體封裝(200V，25mΩ)。如果任何部份之沿面放電距離不能達到安全要求，可用底部填充方法來達到其所需安全距離。

## 應用及價值

宜普設計的增強型氮化鎵電晶體，具有高效、高頻、低負載周期功率轉換的優勢。其他新穎科技的成本可以是高得令人卻步或使用耗盡型模式。但耗盡型元件當無電源時會失去控制能力，必須重新開發控制積體電路。氮化鎵電晶體可於頻率高於AM band時，透過高效開關，大幅提升D類功效音頻放大器技術。因沒有線性放大器之的體積及重量

的所有限制，保真度可接近A類及AB類放大器系統水準，並可把高質素放大器放進只有細小元件空間的產品裡，如平面電視、電腦及揚聲器。

於處理信息及儲存系統方面，整個功率架構可重新評估，以發揮其優異的開關性能。當AC/DC轉換器輸出電壓增加，效率會更高；當總線電壓增加，傳輸效率會提高；當頻率增加，體積會更小。如果應用為同步整流器，可同時提高AC/DC轉換效率。如果只是一次轉換，可撤用中間階段轉換器，省卻中間階段轉換器之體積及成本。

## 總結

宜普氮化鎵電晶體於性能表現及體積方面，比矽元件優勝很多。當應用要求及成本結構與矽元件相同時，其優勢可體現為高效、體積更小，或二者均可兼得。功率設計工程師應利用氮化鎵電晶體重新考慮系統設計。氮化鎵電晶體的將來就是現在。