

# 應用氮化鎵場效應電晶體設計高壓開關電源

本文將探討氮化鎵場效應電晶體 (GaN FET) 的基本原理，展示其在開關模式電源電路中相對於傳統矽元件的優勢，介紹 Nexperia 元件在高電壓電源設計中的實際案例，並對其應用進行了討論。

■作者：Digi-Key 北美編輯

面對社會和監管要求，電源效率一直是電子系統的優先事項。特別是對於從電動汽車 (EV) 到高電壓通訊和工業基礎設施的應用，電源轉換效率和功率密度是設計成功的關鍵。

為了滿足這些要求，開關模式電源系統的設計者需要從使用傳統的矽 (Si) 基金屬氧化物場效應電晶體 (MOSFET) 和絕緣閘雙極電晶體 (IGBT) 轉為使用其它元件，因為矽元件正在迅速接近其理論極限。

因此設計者需要考慮基於寬能隙 (WBG) 材料的元件，如氮化鎵 (GaN)。GaN 元件的開關速度比矽元件快，能處理更高的電壓和功率水平，在既定功率水平下體積小得多，而且運行效率高得多。

本文將探討氮化鎵場效應電晶體 (GaN FET) 的基本原理，展示其在開關模式電源電路中相對於傳統矽元件的優勢，介紹 Nexperia 的實際案例，並對其應用進行了討論。

## GaN FET 基礎知識

電源轉換電路的基本元件是高電壓半導體開關。設計人員一直專注於透過以下方式提高這些元件的性能：透過減少導通狀態下的串聯電阻來減少傳導損耗，透過提高轉換速度來減少開關損耗，以及減少寄生效應等。整體來說，這些設計工作對矽 MOSFET 和 IGBT 來說是成功的，但隨著這些元件的運行速度達到其理論極限，改進的速度也在減緩。

表 1：區分寬能隙半導體 (如 GaN 和 SiC) 與矽半導體的關鍵屬性摘要。(表格來源：Art Pini)

屬性	GaN	Si	SiC
能隙 (eV)	3.4	1.12	3.3
$E_C$ - 臨界電場 (MV/cm)	3.3	0.3	3.5
$V_S$ - 飽和漂移速度 ( $\times 10^7$ cm/s)	2.5	1.0	2.0
$\mu$ - 電子遷移率 ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	990-2000	1500	650

因此，在過去的幾年裡，使用碳化矽 (SiC) 和 GaN 的 WBG (寬能隙) 元件已經推出，並達到了批量生產的程度。這些元件提供了更高的工作電壓範圍、更快的開關時間和更高的效率。

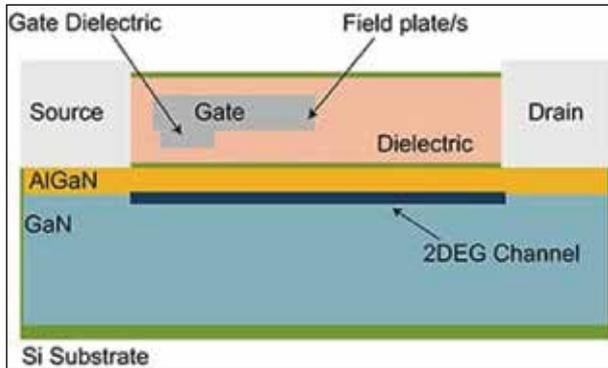
半導體的能隙是激發電子使之從束縛狀態釋放至自由狀態，以進行導電所需的最小能量 (表 1)。

用寬能隙半導體製造的元件相比傳統半導體材料 (如矽) 具有更高的工作電壓、頻率和溫度。更寬的能隙對於允許元件在更高的溫度下工作尤為重要。耐高溫意味著，在正常條件下這些元件可以在更高的功率水平上運行。具有較高臨界電場和較高遷移率的寬能隙半導體具有最低的漏源導通電阻 ( $R_{DS(ON)}$ )，進而減少了傳導損耗。

大多數寬能隙材料也有很高的自由電子速度，這使它們能夠以更高的開關速度工作。

GaN 和 SiC 屬複合半導體，與能隙為 1.12 電子伏特 (eV) 的矽相比，其能隙分別為 3.4 eV 和 3.3 eV，高出約三倍。這意味著兩者都能支援更高的電

圖 1：基於矽基底的 GaN FET 橫截面圖。



圖片來源：Nexperia

壓和更高的頻率。

GaN 更高的電子遷移率使之更適合於高性能、高頻率應用。GaN 功率 FET 實現了更快的開關速度和更高的工作頻率，進而改善了訊號控制，實現了截止頻率更高的被動濾波器設計，並降低了漣波電流。這樣就可以使用更小的電感、電容和變壓器，進而減少了整體尺寸和重量。

GaN FET 被稱為高電子遷移率電晶體 (HEMT)。高電子遷移率是 FET 結構的一個功能 (圖 1)。

GaN FET 利用的是現有的矽 CMOS 生產設施，因此性價比高。在純 GaN 層生長之前，透過沉積種子層和做為隔離層的氮化鎵鋁 (AlGaIn) 緩變層 (圖中未顯示)，在矽基底上形成氮化鎵層。第二個 AlGaIn 層則沉積在 GaN 層上面。這樣就建立了壓電極化，緊接著在 AlGaIn 下面產生過量的電子，這是一個高度導電的通道。這種過量的電子稱為二維電子氣 (2DEG)，這個名字反映了在該層中有非常高的電子遷移率。

閘極下面形成了一個耗盡區。閘極的操作類似於一個 N 溝道、增強模式功率矽 MOSFET。在該元件閘極施加一個正電壓即可導通。

重複多次這種結構，即可形成一個電源元件。最終形成一個絕對簡單、優雅的高性價比電源開關解決方案。

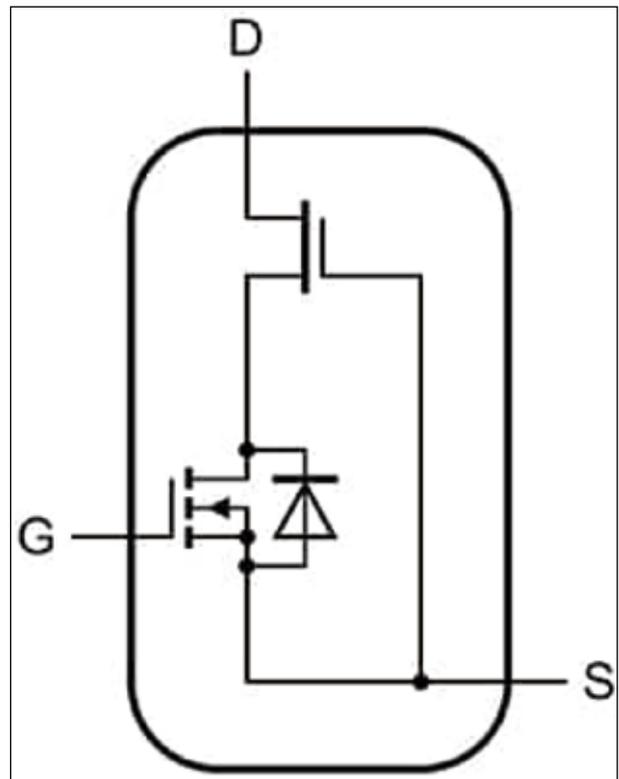
為了讓元件電壓更高，可增加汲極和閘極之間的距離。由於 GaN 2DEG 的電阻率非常低，與矽元件相比，增加阻斷電壓能力對導通電阻的影響要小

得多。

GaN FET 的工作模式可以構造為兩種配置，即增強模式或耗盡模式。增強模式 FET 是常閉的，因此必須在閘極上施加相對於汲極/源極的正電壓，以使 FET 導通。耗盡型 FET 是常開的，因此必須施加相對於汲極/源極的負閘極電壓來關斷 FET。耗盡型 FET 在電源系統中是有問題的，因為在給系統通電之前，必須對氮化鎵耗盡型 FET 施加負偏壓。

解決這個問題的一個方法是將低壓矽 FET 與耗盡型 GaN FET 組合在一個共源共閘放大電路配置中 (圖 2)。

圖 2：低壓矽 MOSFET 與耗盡型 GaN FET 的共源共閘配置，會使矽閘極結構的穩健性與 GaN 元件的高電壓時鐘特性得到改善，並且使用耗盡型 GaN FET 時讓複合元件在供電時關斷。

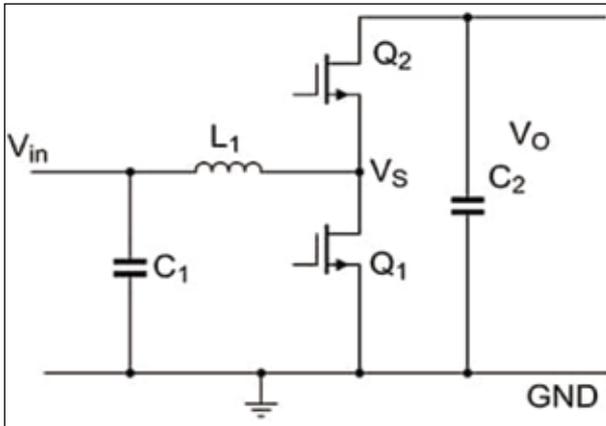


圖片來源：Nexperia

該共源共閘放大電路採用了 Si MOSFET 閘極結構，其優點是與現有的 MOSFET 閘極驅動器 IC 相匹配的閘極驅動極限更高，而且耗盡型 GaN FET 在供電時是關斷的。

GaN FET 的主要特點之一就是其高效率。這

圖 3：圖示為一個半橋升壓轉換器的原理圖，用於比較 Si MOSFET 和 GaN FET 的效率，透過用每種類型元件替換電晶體 Q1 和 Q2 即可。



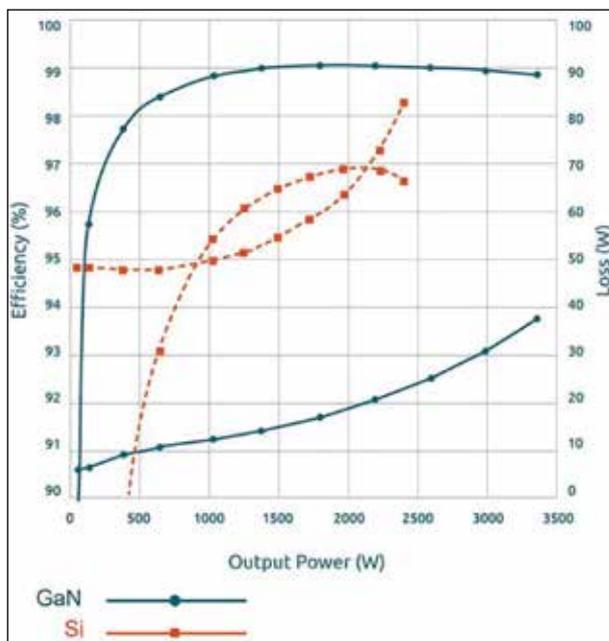
圖片來源：Nexperia

是由於：低串聯電阻降低了傳導損耗；它們的開關速度較快，降低了開關損耗；以及它們的反向恢復電荷較少，這也是它們的反向恢復損耗較低的原因。

使用常見的半橋升壓轉換器拓撲時，可以比較 GaN FET 和 Si MOSFET 的效率差異（圖 3）。

升壓轉換器的輸入電壓為 240 伏特，輸出電壓為 400 伏特，開關頻率為 100 千赫茲 (kHz)。在最高 3500 瓦特的功率範圍內比較了它們的效率和損

圖 4：在一個相同的電路中，對 GaN FET 和 Si MOSFET 的效率和功率損耗進行比較，顯示了 GaN FET 的優勢。



圖片來源：Nexperia

失（圖 4）。

與 MOSFET 相比，GaN FET 的工作效率高約 20%，功率損耗低約 3 倍。在 2000 瓦特時，MOSFET 的損耗約為 62 瓦特；在 GaNFET 中，損耗僅為 19 瓦特。這意味著冷卻系統可以更小，進而提高升壓轉換器的體積效率。

不太明顯的是，由於 GaN FET 的最大電壓限制較高，因此測量功率幾乎進行到了 3500 瓦特。因此，GaN FET 具有絕對優勢。

## 用氮化鎵啓動高電壓元件設計

對於更高的電壓應用，Nexperia 提供了兩種 650 伏特的 GaN FET：GAN063-650WSAQ 和 GAN041-650WSBQ。兩者均為常閉型 N 溝道場效應電晶體。GAN063-650WSAQ 處理的額定最大汲源電壓為 650 伏特，可承受 800 伏特的瞬態（脈衝寬度小於一微秒）。其額定漏電流為 34.5 安培 (A)，在 25°C 時的功率耗散為 143 瓦特。汲源導通電阻通常為 50 毫歐姆 (mΩ)，最大極限為 60 mΩ。

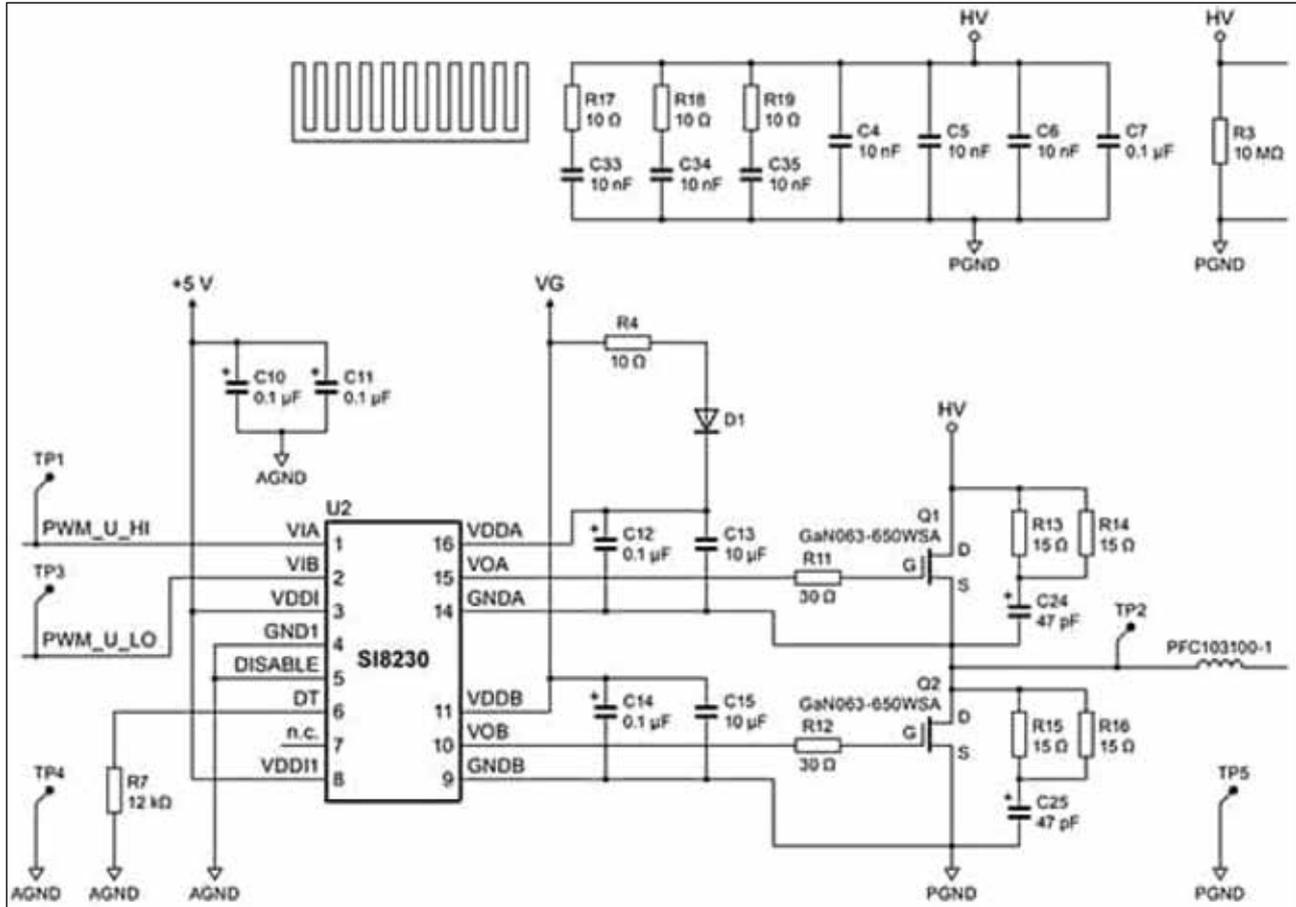
GAN041-650WSBQ 具有相同的 650 伏特額定最大汲源電壓和 800 伏特瞬態極限電壓。其不同之處在於，在室溫下可以處理 47.2 A 的最大汲電流和 187 瓦特的最大功率耗散。其典型的通道電阻為 35 mΩ，最大為 41 mΩ。

圖 5 顯示了在半橋配置中使用 GAN063-650WSAQ 的 Nexperia 參考設計。

該原理圖顯示了 Si8230 高/低雙隔離閘極驅動器，可用於驅動 GaN FET 的閘極。該閘極驅動器的輸出透過一個 30 Ω 的閘極電阻器連接到閘極，這是所有 GaN 元件都需要的。閘極電阻器控制閘極電容的充電時間，影響動態開關性能。FET 汲極和源極之間的 R-C 網路也有助於控制開關性能。GaN FET 的閘極驅動電平在 0 和 10 至 12 伏特之間。

GaN FET 的高開關速度（通常在 10 至 11 納秒 (ns) 範圍內）需要精心佈局，以儘量減少寄生電感，並使用 RC 吸收電路來抑制電壓和電流瞬變引起的暫態振盪。在設計中，高電壓電源和地面之間要設

圖 5：使用 GAN063-650WSA GaN FET 的半橋功率級的推薦設計。該原理圖只顯示了 FET 驅動器和半橋輸出級以及相關元件。



圖片來源：Nexperia

置多個 RC 吸收電路 (R17 至 19 和 C33 至 35)。吸收電路減少了因 GaN FET 和旁路網路的相互作用引起的暫態振盪。吸收電路連接應盡可能靠近高電壓側 FET 的汲極。它們採用表面黏著電阻器和低有效串聯電阻 (ESR) 陶瓷電容器，以儘量減少接線電感。

由  $R_4$ 、 $D_1$ 、 $C_{12}$  和  $C_{13}$  組成的元件網路是高壓閘極驅動器的自舉電源。 $D_1$  應該是一個快速、低容二極體，因為其結電容會造成開關損耗。 $R_4$  限制突波充電電流；數值在 10 至 15 $\Omega$  之間效果為佳。

## 結語

從電動汽車到通訊和工業基礎設施，人們對更高電力轉換效率和更高功率密度的需求不斷增加，這就要求從傳統矽結構元件轉而使用其他材料元件。綜上所述，氮化鎵場效應電晶體 (GaN FET) 透

過提供更高的工作電壓、更快的開關速度和更高的效率，為下一代設計提供了一條出路。現成即用的零組件，加上某些參考設計支持，將幫助設計者將專案快速啟動並使之運轉。

## 小編的話：

GaN 已經在 PD 快速充電這類設計中得到廣泛應用，並正在向資料中心伺服器 and 汽車等工業領域拓展。提高工作電壓有利於 GaN 元件擴展其應用範圍，相信本文介紹的 GaN FET 元件在高電壓電源中的應用和設計方法，能夠給大家帶來有益的參考。您是否採用 GaN 元件進行電源設計？在高壓設計中有哪些心得和疑惑？歡迎留言、分享和交流！ 