

氮化鎵場效應電晶體 (eGaN®FET) 的安全工作區域

宜普電源轉換公司 John Worman 及馬豔萍

溫度是影響功率電晶體性能的一個基本因素。我們計算器件在工作時的溫度假設功耗平均分佈於器件的有源區域。但這個方法不一定總是對的，因為某些技術的參數具負溫度系數，以致電流可以集中在一個小區，從而使這個局部區域的溫度上升至導致器件發生故障。

安全工作區域 (SOA) 的曲線描述了器件可以正常工作而不會發生故障的電壓、電流及工作時間等條件的範圍。它標示了器件在具阻抗的結的散熱性能，因此受器件的熱阻 (R_{\thetaJC}) 影響。如果可以提高器件的散熱效率，將減少熱阻並提高器件在安全工作區域內的性能。

宜普公司的氮化鎵場效應電晶體在整個工作範圍內具正溫度系數，因此器件在工作時只受電壓、電流及溫度限制。本文描述與功率氮化鎵場效應電晶體的熱阻有直接關係的安全工作區域，並展示電晶體具備良好 SOA 特性之同時可以維持低電阻，以及對從熱效應推算得出與測量所得的結果進行比較。

歷史發展

功率器件的安全工作區域描述器件同時抵受電壓及電流條件下的性能，而閘極電壓處於臨界電壓或剛剛高於臨界電壓。安全工作區域之典型限制有兩方面：器件的最高結溫和因為負溫度系數所導致的電流集中效應。這個效應的其中一個例子是發生在三極管的基極發射極結點，稱為二次擊穿。

早期的功率 MOSFET 器件的轉移特性從負溫度系數轉換為正溫度系數（零溫度系數點）時的電流大幅減少。目前的器件具更高功率密度，從而提高器件的導通電阻。早期的 MOSFET 器件的數據表提供安全工作區域的理論值，這是沒有問題的，因為它具有小負溫度系數區，並沒有對電

壓、電流及溫度方面構成進一步的限制。但目前的 MOSFET 器件的轉移特性曲線具有一個明顯的負溫度系數區，以及一個高零溫度系數點。如果這點高於器件的工作電流，器件將在安全工作區域的更高功率條件下發生熱“失控”[1、2]。這個失控情況是由以上稱為熱集中效應所產生[3]。因此，要改善器件的 SOA 性能的解決方法是 MOSFET 需要在零溫度系數點以上工作，以改善它在安全工作區域的性能。雖然很多製造商仍然提供安全工作區域的理論值，有一些製造商現正利用實驗數據來量化器件的表現，從而得出在這個工作條件下所產生的限制。

宜普的氮化鎵器件改善器件 在安全工作區域的性能

在製造商的數據表中的安全工作區域的限制，可以從器件的熱阻 (Z_{\thetaJC}) 曲線得出。謹慎的製造商會基於實驗室的測試來調變出這個理想的曲線。圖 1 展示了宜普公司的歸一化瞬態熱阻。表 1 列出了宜普的產品型號及其相關的 R_{\thetaJC} 值。

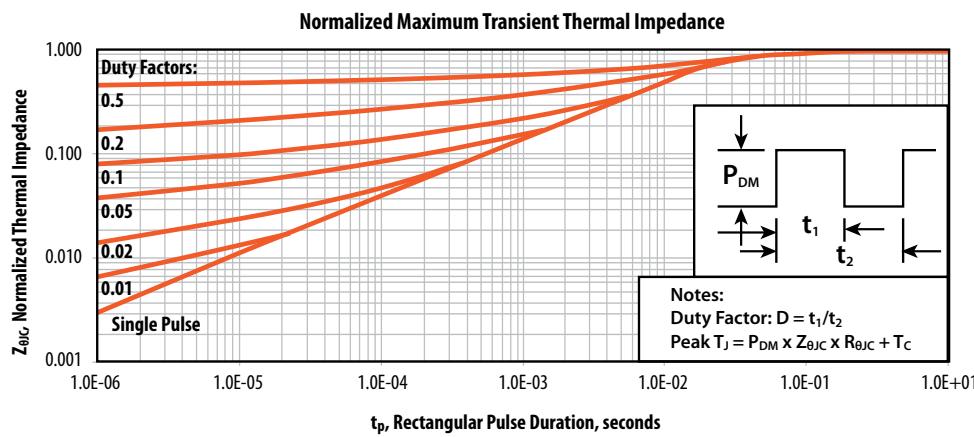


圖 1：歸一化瞬態電阻 (Z_{\thetaJC})。

Part Number	R_{\thetaJC} °C/Watt
EPC2001C	1
EPC2007C	3.6
EPC2010C	1.1
EPC2012C	4.2
EPC2015	2.1
EPC2014C	3.6
EPC2019	2.7
EPC8004	8.2

表 1：宜普公司器件型號及相關的 R_{\thetaJC} 。

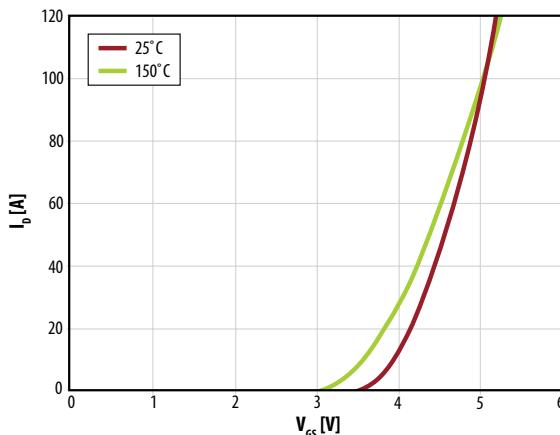
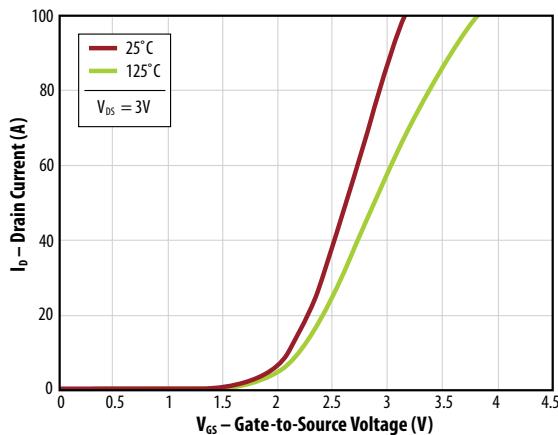


圖 2 : EPC2001 (左圖) 及 BSB056N10NN3 (右圖) 的轉移特性。

圖 2 展示了氮化鎗場效應電晶體 EPC2001 器件與英飛凌公司的功率 MOSFET (BSB056N10NN3) [4] 的轉移特性曲線的比較。EPC2001 器件是一個 100 V、7 毫歐的器件。非常明顯的是，氮化鎗場效應電晶體在它的工作範圍內具正溫度系數。這意味著當器件的局部區域溫度上升時，它的載流能力將會減小，並導致電流分散到晶片的其他區域。電流分散會均衡晶片的溫度，這是自鎮流功能。反之，功率 MOSFET 器件在閘極上的電壓低於 5 V 時有一個很明顯的負溫度系數區，並不具自鎮流功能。器件在這個區域工作時將在晶片產生局部發熱點，因此限制了晶片在安全工作區域的性能。

圖 3 展示了氮化鎗場效應電晶體 EPC2001 器件與英飛凌公司的功率 MOSFET

(BSB056N10NN3) 的安全工作區域。從 EPC2001 器件的安全工作區域曲線的邊界可以看到，最大汲極至源極電壓為 100 V 和最大脈衝電流為 100 A。在這些邊界內，電晶體在達到熱極限值之前可以工作的時間有限。

器件不可以在圖 3 的左上角區域工作，因為導通電阻太低而不可以在給定的電流下產生電壓。在兩個邊界條件之間有一組斜線，它們表明作為定時矩形功率脈衝函數的安全工作區的限制。黑線是計算出來的恒定功率線，代表將器件結溫提升至最大額定結溫之同時仍然保持恒定 25°C 瓣溫。這些黑線的斜率為 -1 (恒定功率：在 $V_{DS} = (I_{DS\text{continuous}})(R_{DS(\text{ON})})$, $\log(I_{DS}) = \log(P_D) - \log(V_{DS})$)。

雖然 EPC2001 的整個工作範圍具正溫度系數而使我們相信器件在理論上的熱限制範圍內可以安全地工作。然而，我們需要仔細審核每種新技術，以實驗方法確認我們的器件不會發生其他的失效模式。我們把二十五個 EPC2001 器件放置在突發失效的情況下工作，其中每個器件都安裝水冷散熱器。殼溫則保持在 +25°C ($\pm 2.5^\circ\text{C}$)。從圖 3 可以看到：

1. 紅線顯示了器件在直流線性偏置時的失效數據。
2. 藍線是器件在線性偏置 100 毫秒時的失效數據。
3. 綠線則是器件在線性偏置 10 毫秒時的失效數據。

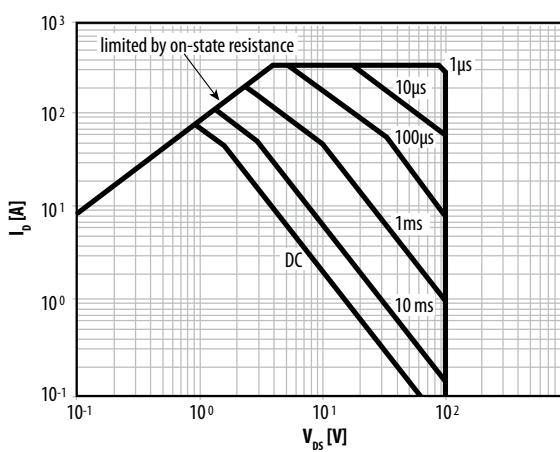
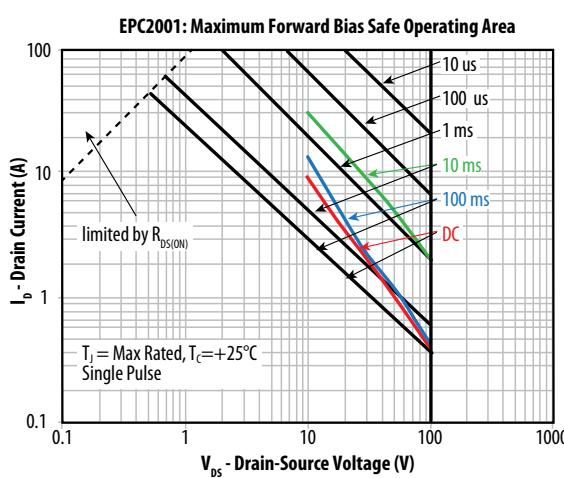


圖 3 : EPC2001 (左圖) 及 BSB056N10NN3 (右圖) 的安全工作區域。

圖 4 至圖 8 展示了其他宜普器件的安全工作區域，包括 EPC2007、EPC2010、EPC2012、EPC2015 及 EPC2014。所有器件在安全工作區域發生的故障經過實驗方法來評估。以上所定義的紅、藍及綠線代表器件的實際故障。相比已公佈的安全工作區條件，我們看到所有在 10 毫秒、100 毫秒和直流線性偏置時的失效數據都在更高功率時才出現。

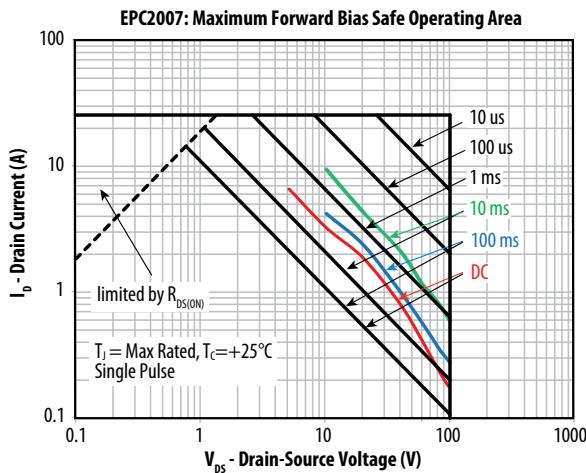


圖 4 : EPC2007 的安全工作區域。

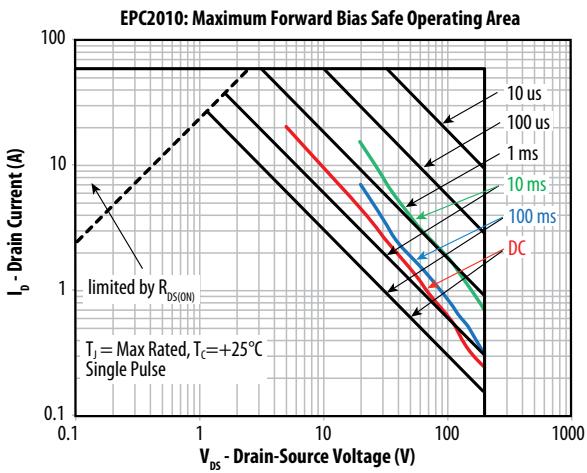


圖 5 : EPC2010 的安全工作區域。

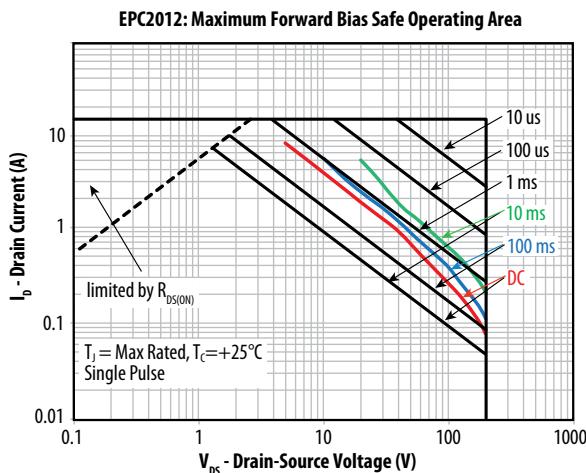


圖 6 : EPC2012 的安全工作區域。

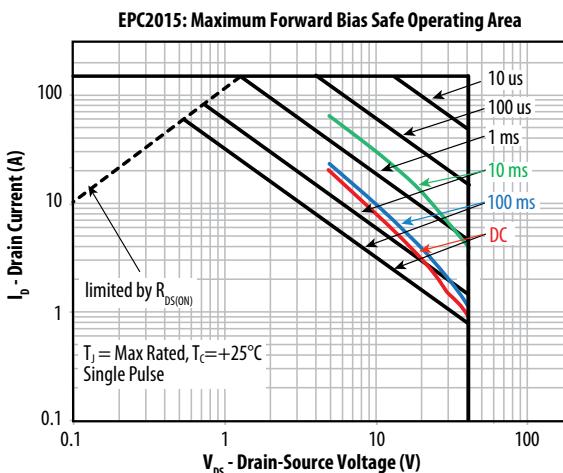


圖 7 : EPC2015 的安全工作區域。

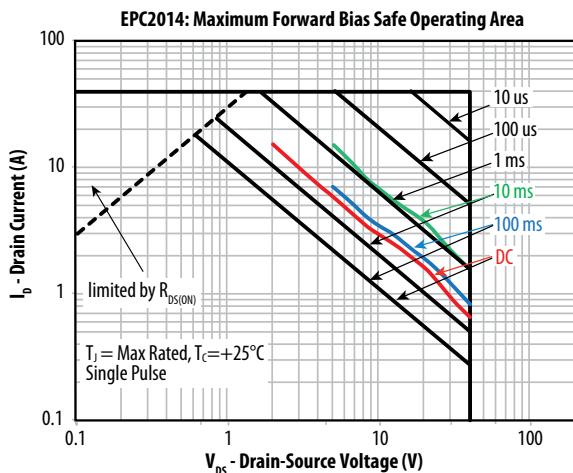


圖 8 : EPC2014 的安全工作區域。

總結

相比功率 MOSFET，氮化鎵場效應電晶體具有高電子密度和非常低的溫度系數，使它能夠在目前的高性能應用中具明顯的優勢。高電子密度產生優異的導通電阻，而正溫度系數防止晶片內產生發熱點，因此氮化鎵場效應電晶體可以在安全工作區域具有卓越的性能而不會發生故障。如果我們把並聯器件放置在一個共用的散熱器，氮化鎵場效應電晶體將具有額外的優勢 - 由於它的正溫度系數區域在零溫度系數之上，它傾向於分擔電流，因此降低對鎮流電阻器的要求。

參考文獻：

- [1] Worman, J., "New Generation Power MOSFETs and Safe Operating Area" PCIM proceedings, Chicago, 2002.
- [2] Schoiswohi, J., "Linear Mode Operation and Safe Operating Area of Power-MOSFETs," Applications Note, AP99007, Infineon, V0.92, 2010.
- [3] Ronan, H. R., Jr., "Thermal Current Focusing in Power MOSFETs" PCIM, Aug. 1998.
- [4] http://www.infineon.com/dgdl/BSB056N10NN3+G_Rev+2.5.pdf?folderId=db3a304313b8b5a60113cee8763b02d7&fileId=db3a30442e152e91012e390b9a631459