

宜普eGaN®FET的熱性能



宜普電源轉換公司John Worman及馬豔萍

熱阻是判斷分立功率元件性能的一個主要因素。我們可以根據一個元件的熱特性為用戶的應用推算最大功耗和最大電流。我們十分明白傳統矽MOSFET的熱性能，但測量氮化鎵場效應電晶體(eGaN FET)的熱性能則需要進一步的解釋。本應用筆記討論測量eGaN FET熱阻的測試方法和結果。

熱測量方法

宜普的eGaN FET是基於氮化鎵的增強型高電子遷移率電晶體(HEMT)，它們非常像矽功率MOSFET。在閘極上施加一個相對源極為正的偏置電壓，可以產生一個吸引電子的場效應，從而在汲極和源極之間形成一個雙向通道。當從閘極撤除偏置電壓時，閘極下方的電子將擴散進GaN，重新形成耗盡區，進而再次具有阻斷電壓的能力。表一展示了宜普的eGaN FET特性。

使用傳統矽MOSFET的用戶知道共有三個對溫度敏感的參數，用以指示元件的結溫

(T_J)。然而，eGaN FET有一些限制。第一個限制是沒有固有的體二極體可以用來評估結點溫度。宜普的eGaN FET沒有像矽MOSFET一般具備寄生雙極結點，而這些eGaN FET的反向導通具有一種不同的機制。當閘極到源極電壓為零V時，會發生反向導通，但源極-汲極電壓實際上不會隨溫度而變化。第二個限制是閘極閾值電壓($V_{GS(TH)}$)非常低，隨溫度變化的 $V_{GS(TH)}$ 斜率與矽MOSFET相比相當平坦。由於實際儀器限制的原因，這意味著 $V_{GS(TH)}$ 並不易於使用。剩下的對溫度靈敏度的參數是元件導通電阻($R_{DS(on)}$)，因此這成為了測量結點溫度的首選參數。

$R_{DS(on)}$ 是一個優秀的結點溫度指示器，其缺點是校準作為 T_J 函數的 $R_{DS(on)}$ 是相當耗時的一個過程，需要使用出色的檢測儀器技術。然而，將 $R_{DS(on)}$ 用作測量對溫度靈敏度的參數的主要優勢是：我們可以在確實的發熱物理位置上，測量到真實的升溫值，而體二極體 V_{DS} 或 $V_{GS(TH)}$ 測試都不能真實反映升溫值。

要校準 $R_{DS(on)}$ 溫度敏感參數有兩個步驟。第一步是計算作為溫度函數，因溫度變化所呈現的 $R_{DS(on)}$ ，這需要利用高閘極電壓使待測元件(DUT)導通，以便元件進入飽和狀態。為了評估eGaN FET，閘極到源極電壓(V_{GS})應為+5 V。然後在汲極到源極之間施加一個低電流偏置，典型值為0.3 A至1 A，具體取決於晶片尺寸和關聯的 $R_{DS(on)}$ 。這個校準電流需要足夠的大電流，以獲得良好的 V_{DS} 分辨率同時又不會大幅對結點加熱。在這些偏置條件下，DUT被放進環境試驗室內，並與汲極和源極保持Kelvin連接，還會用一個典型值為0.01 Ω 的合適電流觀察電阻。環境室溫度將在+25°C和+125°C之間以約+25°C的步距升溫，然後我們採集得到如表二的數據。因溫度變化所呈現的 $R_{DS(on)}$ 可以用 V_{DS}/I_D (漏電流)計算得到。

Part Number	LGA Package (mm)	Mode Ch	V_{DS}	V_{GS}	Max $R_{DS(on)}$ (m Ω) @5V	Q_G @5V	Q_{GS} Typ	Q_{GD} Typ	V_{th} Typ	Q_R	I_D
EPC1014	1.7 x 1.1	EN	40	6	16.0	3.0	1.0	0.6	1.4	0	10
EPC1015	4.1 x 1.6	EN	40	6	4.0	11.6	3.8	2.2	1.4	0	33
EPC1009	1.7 x 1.1	EN	60	6	30.0	2.4	0.8	0.6	1.4	0	6
EPC1005	4.1 x 1.6	EN	60	6	7.0	10.0	3.0	2.5	1.4	0	25
EPC1007	1.7 x 1.1	EN	100	6	30.0	2.7	0.8	1.0	1.4	0	6
EPC1001	4.1 x 1.6	EN	100	6	7.0	10.5	3.0	3.3	1.4	0	25
EPC1013	1.7 x 0.9	EN	150	6	100.0	1.7	0.4	0.7	1.4	0	3
EPC1011	3.6 x 1.6	EN	150	6	25.0	6.7	1.5	2.8	1.4	0	12
EPC1012	1.7 x 0.9	EN	200	6	100.0	1.9	0.4	0.9	1.4	0	3
EPC1010	3.6 x 1.6	EN	200	6	25.0	7.5	1.5	3.5	1.4	0	12

表一：eGaN FET電氣特性總結

註：圖表內的數據有可能更改。詳情請參閱網頁上的相關產品資料，網址是www.epc-co.com/epc/tw。

我們可以利用Table Curve®從表二估算出數據並設立一個數學函數，類似以下這個：

$$y = \exp(a + bx) \quad (1)$$

where $x = \text{temperature}$ and $y = R_{DS(on)}$

第二個步驟是估算作為漏電流(I_D)函數的 $R_{DS(on)}$ 在+25°C時的值，因為 $R_{DS(on)}$ 也被 I_D 所調製。為了完成這個任務，我們可以使用曲線跟蹤器，但根據作者的經驗，曲線跟蹤器的脈衝時間太長，在較大電流時可在DUT中產生熱量。因此我們需要搭建一個專門對應 I_D 的 $R_{DS(on)}$ 測試夾具，它能在數十毫秒內採集 $R_{DS(on)}$ 數據。一般這種測試是以數據手冊中定義的DUT脈衝電流額定值做的單點測試。這樣可以確保DUT一直在輸出特徵曲線的飽和區域內。

我們然後可以使用一般公式: $y = m x + c$ 在大電流和小電流之間進行在+25°C時的直線近似值。表三展示了這個函數的輸出例子，其中 $x=I_D$ 。

使用從兩個數據取得的公式，並從作為 T_J 函數，因溫度變化所呈現的 $R_{DS(on)}$ ，減去作為 I_D 函數的 $R_{DS(on)}$ ，我們可以得到作為 T_J 函數的“真實 $R_{DS(on)}$ ”。然而值得注意的是，溫度為25°C時，作為 T_J 函數的 $R_{DS(on)}$ ，減去作為 I_D 函數的 $R_{DS(on)}$ ，會相等於零。因此，為了糾正這種偏差，在+25°C時的 $R_{DS(on)}$ 必須加回到公式中，從而取得所有 T_J 值。

$$R_{DS(on)} = (R_{DS(on)} @ T_J) - (R_{DS(on)} @ I_D) + (R_{DS(on)} @ 25^\circ\text{C}) \quad (2)$$

從上述數學方法產生的曲線來看，熱阻 R_θ 的計算方式是簡單直接的。熱阻可以用這個一般公式計算出來：

$$R_\theta = \frac{\Delta T_J}{P_D} \quad (3)$$

結溫變化(ΔT_J)是從功率脈衝末尾的FET結點溫度，減去起始結溫的差值。

$$\Delta T_J = T_{\text{Power-Pulse}} - T_{\text{Ambient}} \quad (4)$$

結溫變化 ΔT_J 是從功率脈衝PD末尾的 $R_{DS(on)}$ 計算出來的。使用從公式1得到的a和b值：

$$\Delta T_J = \left(\frac{\ln(R_{DS(on)}) - a}{b} \right) - T_{\text{Ambient}} \quad (5)$$

我們已表明不是所有結溫下熱阻都是常數。一般來說結溫降低時這些值也會減小。因此為了接近實際應用，製造商將熱阻值規定為或接近數據手冊中的 $T_{J(MAX)}$ 值。對於eGaN FET來說， $T_{\text{Power-Pulse}}$ 溫度典型值為+125°C±5°C。當 R_θ 及熱阻 Z_θ 的測試過程確定後，我們可以用多種方式評估eGaN FET的熱性能。以下部分內容討論了用於這些元件的三個熱規格。

Temperature °C	Drain-Source Voltage mV	Apparent $R_{DS(on)}$ Calculation Ω
24.9	14.4	0.0180
54.5	17.2	0.0215
79	19.6	0.0245
102	22.08	0.0276
130.2	25.68	0.0321

表二：EPC1010的 $R_{DS(on)}$ 與溫度關係數據表的一個例子

$R_{DS(on)}$ vs. I_D Curve fit	
c =	0.01803
m =	0.000298
I_D	$R_{DS(on)}$
1	0.01833
2	0.01863
5	0.01953
10	0.02101
20	0.02399
40	0.02995

表三：EPC1010的 $R_{DS(on)}$ 與 I_D 關係數據表例子

關於作者

馬豔萍博士現任職於宜普電源轉換公司，為產品品質及可靠性監控部門主管。她在1996年從美國加州柏克萊大學取得材料科學和工程學博士學位，在2009年加入宜普公司之前，從1996年至2008年期間任職於國際整流器公司，曾擔任矽元件研發工程，專注於矽功率MOSFET設計及產品開發的工作。

John Worman畢業於北亞利桑那大學，從1986年至今在功率半導體業界擔任應用工程師及表徵工程師職位，至今發表了22份技術文章，專注MOSFET熱阻、安全操作區域及非鉗位式感應開關等領域。

$R_{\theta JB}$: 熱阻 - 結點到錫球

$R_{\theta JB}$ 也許是最重要的熱指標，因為絕大多數的應用會使用它。正如圖1所示， $R_{\theta JB}$ 是在不考慮安裝電路板類型或尺寸的情況下，從元件結點到錫球底部的熱阻。因此，如果最終用戶知道熱特性和應用環境，那麼將所有子部件的熱阻以代數方式累加起來就可以得到整個系統的總熱阻值。

$R_{\theta JC}$: 熱阻 - 結點到外殼

$R_{\theta JC}$ 用於當最終用戶想在eGaN FET頂部增加額外散熱器的情況。圖2顯示了測量 $R_{\theta JC}$ 所需的典型測試裝置。

圖2中的水冷散熱器，通過環流加熱/冷卻器調整溫度來保持+25°C 常溫。“QFN板”是一塊非常小而且簡單的測試電路板，能以電氣方式連接到DUT。不導熱的“隔離墊片”(Shim Spacer)加在非常小的元件中，以防止發生元件傾斜和對齊問題。10 Ω電阻能防止可能發生的閘極震盪，因為DUT和測試電路之間的導線長度在0.3米左右。所有電源線都以Kelvin方式連回儀器，目的是消除電源線上的I×R壓降。DUT和水冷散熱器之間的熱介面材料是水，附有少量表面活性劑，以增加表面濕度。DUT系統被氣壓固定在某個位置上。熱電偶用於監視從錫球和電路板散發出來的熱量，以估算只是被水冷散熱器除去的熱量，進而計算出真實的 $R_{\theta JC}$ 。

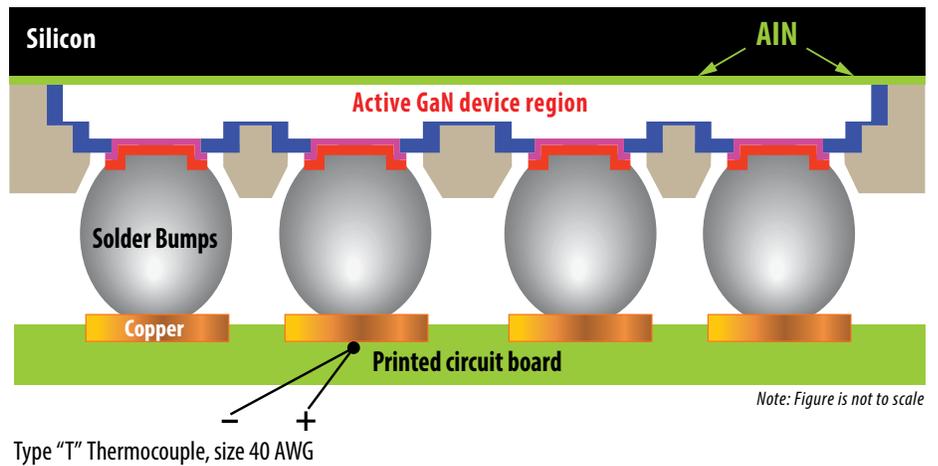


圖1: $R_{\theta JB}$ 是在不考慮安裝電路板類型或尺寸的情況下，從元件結點到錫球底部的熱阻

$R_{\theta JA}$: 熱阻 - 結點到環境

$R_{\theta JA}$ (結點到環境的熱阻)是當器件安裝在一平方英寸電路板上時，明確說明熱阻的一個方式。圖3顯示了用於熱阻測量的電路板版圖。DUT安裝在單面、兩盎司的FR-4電路板上，電路板上有一個1平方英寸的銅區域(645.16mm²)。其中有一半銅(平方英寸)連接到源極，另一半通過器件的錫條連接到汲極。

當最終用戶想把eGaN安裝到應用的電路板上又不想增加散熱器時， $R_{\theta JA}$ 是最有用的。

在元件表徵過程中,DUT懸掛在一立方英尺(0.02832立方米)密閉盒的中心，並處於靜止空氣和25°C起始溫度下。DUT在結溫為+125°C條件下，加“導通”偏置，並保持1000秒，然後根據公式3就可以計算出 $R_{\theta JA}$ 。

由於應用設計沒有必需在一個一平方英寸(645.16平方毫米)電路板進行，圖4展示了銅焊盤面積減少而使熱阻增加的函數關係，並歸一化為645.16平方毫米(1平方英寸)。

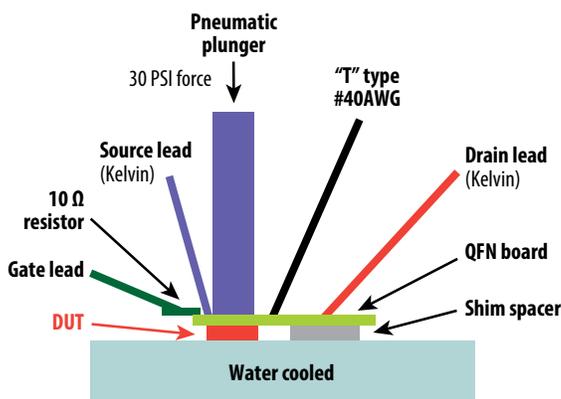


圖2: 測量 $R_{\theta JC}$ 所需的典型測試裝

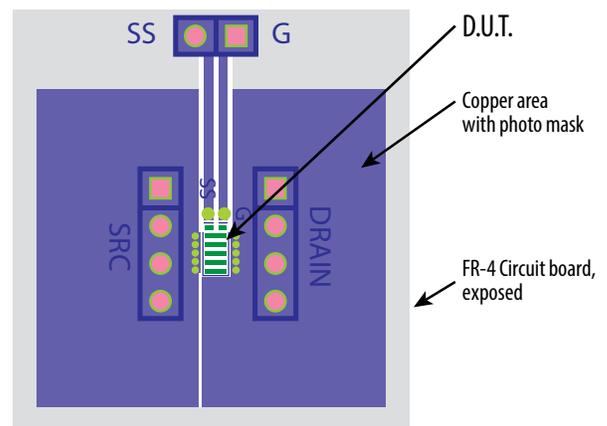


圖3: 用於測量 $R_{\theta JA}$ 的電路板版圖，具1平方英寸的銅區域。其中有一半銅連接到源極，另一半則連接到汲極

測量結果

表四列出了與元件型號有關的各種熱阻值： $R_{\theta JC}$ 、 $R_{\theta JB}$ 和 $R_{\theta JA}$ 。EPC1010和EPC1012的熱阻值是測量出來的，其他型號的熱阻值則是按比例用近似值計算出來的。圖5顯示了宜普產品線的歸一化 $Z_{\theta JB}$ 曲線集。在元件表徵過程中，我們發現EPC1010和EPC1012的歸一化熱阻曲線($Z_{\theta JB}$)是幾乎完全相同的。

總結

像eGaN FET等使用表面安裝方法的電晶體可以有種物理安裝方式。根據用戶的應用，安裝元件方法對功耗和最大電流能力有顯著影響。所有這些元件參數中的限制因素是控制分立元件的最大結點溫度。測量eGaN FET結溫的最佳方法是通過表徵和測量 $R_{DS(on)}$ 的變化。本應用筆記討論了一種可以接受的方法，並提供了測量各種元件的熱阻的結果。

Normalized Thermal Resistance Multiplier, Junction-to-Ambient versus Copper Board Area

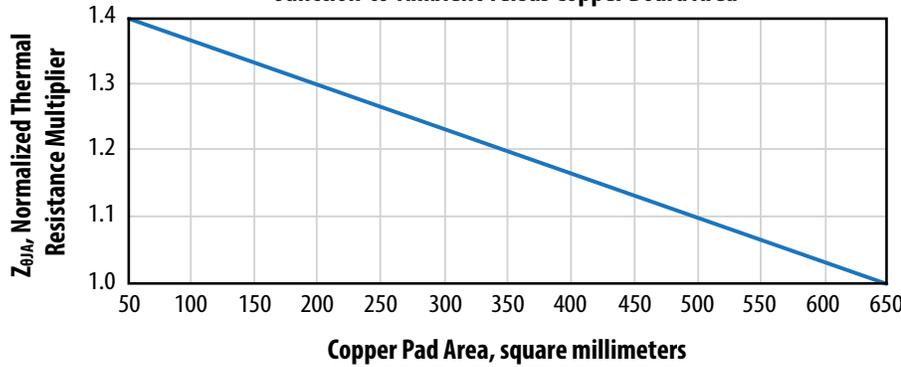


圖4：減少銅焊盤面積致使熱阻增加的函數關係，並歸一化為645.16平方毫米

Part Number	Side 1 mm	Side 2 mm	Die Area mm²	$R_{\theta JC}$ °C/Watt	$R_{\theta JB}$ °C/Watt	$R_{\theta JA}$ °C/Watt
EPC1001	1.6	4.1	6.56	1.56	15	54
EPC1007	1.1	1.7	1.87	6.5	32	80
EPC1010	1.6	3.6	5.76	1.8	16	56
EPC1012	0.9	1.7	1.53	8.2	36	85
EPC1014	1.1	1.7	1.87	6.5	32	80
EPC1015	1.6	4.1	6.56	1.56	15	54

表四：熱阻一覽表

Normalized Maximum Transient Thermal Impedance

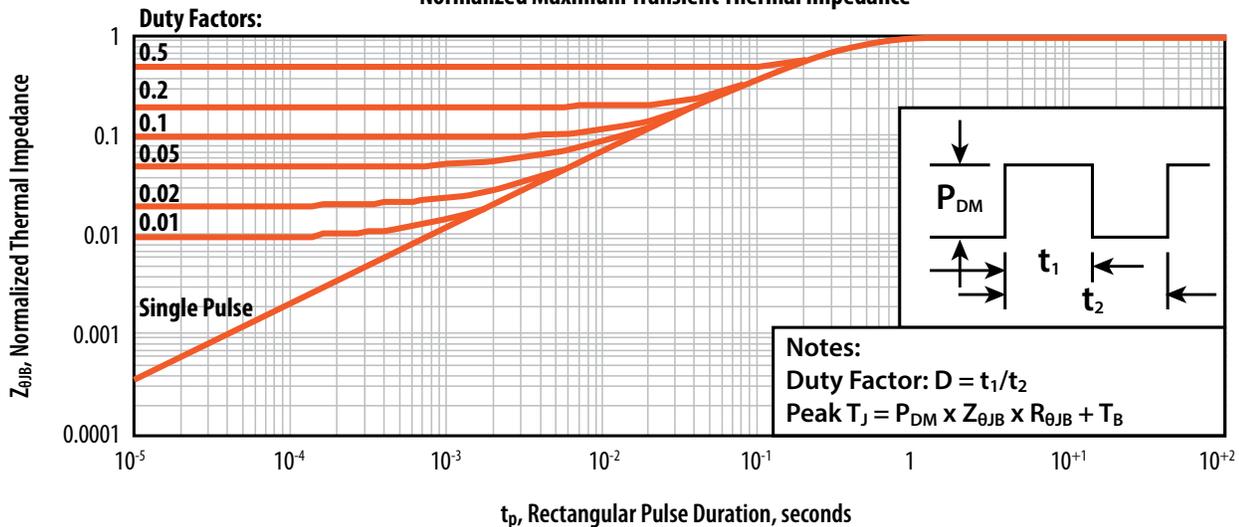


圖5：宜普產品線的歸一化 $Z_{\theta JB}$ 曲線集