

宜普eGaN® FET的热性能



宜普电源转换公司John Worman及马艳萍

热阻是判断分立功率器件性能的一个主要因素。我们可以根据一个器件的热特性为用户的应用推算最大功耗和最大电流。我们十分明白传统硅MOSFET的热性能，但测量氮化镓场效应晶体管(eGaN FET)的热性能则需要进一步的解释。本应用笔记讨论测量eGaN FET热阻的测试方法和结果。

热测量方法

宜普的eGaN FET是基于氮化镓的增强型高电子迁移率晶体管(HEMT)，它们非常像硅功率MOSFET。在栅极上施加一个相对源极为正的偏置电压，可以产生一个吸引电子的场效应，从而在漏极和源极之间形成一个双向沟道。当从栅极撤除偏置电压时，栅极下方的电子将扩散进GaN，重新形成耗尽区，进而再次具有阻断电压的能力。表一展示了宜普的eGaN FET特性。

使用传统硅MOSFET的用户知道共有三个对温度敏感的参数，用以指示器件的结温(T_J)。然而，eGaN FET有一些限制。第一个限制是没有固有的体二极管可以用来评估结温。宜普的eGaN FET没有像硅MOSFET一般具备寄生双极结点，而这些eGaN FET的反向导通具有一种不同的机制。当栅极到源极电压为零V时，会发生反向导通，但源极-漏极电压实际上不会随温度而变化。第二个限制是栅极阈值电压($V_{GS(TH)}$)非常低，随温度变化的 $V_{GS(TH)}$ 斜率

与硅MOSFET相比相当平坦。由于实际仪器限制的原因，这意味着 $V_{GS(TH)}$ 并不易于使用。剩下的对温度灵敏度的参数是器件导通电阻($R_{DS(on)}$)，因此这成为了测量结点温度的首选参数。

$R_{DS(on)}$ 是一个优秀的结点温度指示器，其缺点是校准作为TJ函数的 $R_{DS(on)}$ 是相当耗时的一个过程，需要使用出色的检测仪器技术。然而，将 $R_{DS(on)}$ 用作测量对温度灵敏度的参数的主要优势是：我们可以在确切的发热物理位置上，测量到真实的升温值，而体二极管 V_{DS} 或 $V_{GS(TH)}$ 测试都不能真实反映升温值。

要校准 $R_{DS(on)}$ 温度敏感参数有两个步骤。第一步是计算作为温度函数，因温度变化所呈现的 $R_{DS(on)}$ ，这需要利用高栅极电压使待测器件(DUT)导通，以便器件进入饱和状态。为了评估eGaN FET，栅极到源极电压(V_{GS})应为+5 V。然后在漏极到源极之间施加一个低电流偏置，典型值为0.3 A至1 A，具体取决于晶片尺寸和关联的 $R_{DS(on)}$ 。这个校准电流需要足够的大电流，以获得良好的 V_{DS} 分辨率同时又不会大幅对结点加热。在这些偏置条件下，DUT被放进环境试验室内，并与漏极和源极保持Kelvin连接，还会用到一个典型值为0.01 Ω 的合适的电流观察电阻。环境室温度将在+25°C和+125°C之间以约+25°C的步距升温，然后我们采集得到如表2的数据。因温度变化所呈现的 $R_{DS(on)}$ 可以用 V_{DS}/I_D (漏电流)计算得到。

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电气特性总结

图表内的数据有可能更改。详情请参阅网页上的相关产品资料，网址是www.epc-co.com.cn。

我们可以利用“Table Curve®”软件从表二估算出数据并设立一个数学函数，类似以下这个：

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

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

第二个步骤是估算作为漏电流(I_D)函数的 $R_{DS(on)}$ 在+25°C时的值，因为 $R_{DS(on)}$ 也被 I_D 所调制。为了完成这个任务，我们可以使用曲线跟踪器，但根据作者的经验，曲线跟踪器的脉冲时间太长，在较大电流时可在DUT中产生热量。因此我们需要搭建一个专门对应ID的 $R_{DS(on)}$ 测试夹具，它能在数十毫秒内采集 $R_{DS(on)}$ 数据。一般这种测试是以数据手册中定义的DUT脉冲电流额定值做的单点测试。这样可以确保DUT一直在输出特征曲线的饱和区域内。

我们然后可以使用一般公式： $y=mx+c$ 在大电流和小电流之间进行于+25°C时的直线近似值。表三展示了这个函数的输出例子，其中 $x=I_D$ 。

使用从两个数据取得的公式，并从作为TJ函数，因温度变化所呈现的 $R_{DS(on)}$ ，减去作为 I_D 函数的 $R_{DS(on)}$ ，我们可以得到作为TJ函数的“真实 $R_{DS(on)}$ ”。然而值得注意的是，温度为25°C时，作为TJ函数的 $R_{DS(on)}$ ，减去作为ID函数的 $R_{DS(on)}$ ，会相等于零。因此，为了纠正这种偏差，在+25°C时的 $R_{DS(on)}$ 必须加回到公式中，从而取得所有TJ值。

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

从上述数学方法产生的曲线来看，热阻 R_θ 的计算方式是简单直接的。热阻可以由这个一般公式得出：

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

结温变化(ΔT_J)是从功率脉冲末尾的FET结点温度，减去起始结温的差值。

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

结温变化 ΔT_J 是从功率脉冲PD末尾的 $R_{DS(on)}$ 计算出来的。使用从公式1得到的a和b值：

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

我们已表明不是所有结温下热阻都是常数。一般来说结温降低时这些值也会减小。因此为了接近实际应用，制造商将热阻值规定为或接近数据手册中的 $T_{J(\text{MAX})}$ 值。对于eGaN FET来说， $T_{\text{Power-Pulse}}$ 温度典型值为+125°C±5°C。

当 R_θ 及热阻 Z_θ 的测试过程确定后，我们可以用多种方式评估eGaN FET的热性能。以下部分内容讨论了用于这些器件的三个热规格。

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 $R_{DS(on)}$ 与温度关系数据表的一个例子

$R_{DS(on)}$ 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 $R_{DS(on)}$ 与 I_D 关系数据表例子

关于作者

马艳萍博士现任职于宜普电源转换公司，为产品质量及可靠性监控部门主管。她在1996年从美国加州柏克莱大学取得材料科学和工程学博士学位，在2009年加入宜普公司之前，从1996年至2008年期间任职于国际整流器公司，曾担任硅器件研发工程，专注于硅功率MOSFET设计及产品开发的工作。

John Worman毕业于北亚利桑那大学，从1986年至今在功率半导体业界担任应用工程师及表征工程师职位，至今发表了22份技术文章，专注MOSFET热阻、安全操作区域及非钳位式感应开关等领域。

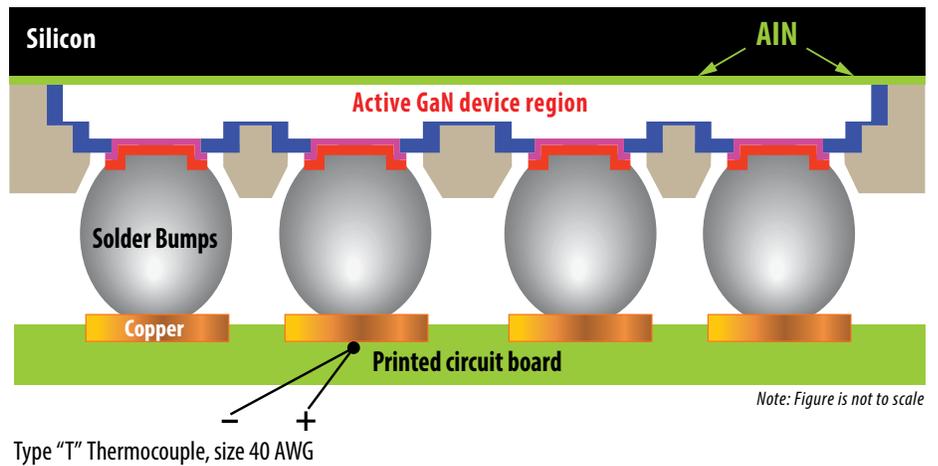
$R_{\theta JB}$: 热阻—结点到锡球

$R_{\theta JB}$ 也许是最重要的热指标, 因为绝大多数的应用会使用它。正如图1所示, $R_{\theta JB}$ 是在不考虑安装电路板类型或尺寸的情况下, 从器件结点到锡球底部的热阻。因此, 如果最终用户知道热特性和应用环境, 那么将所有子部件的热阻以代数方式累加起来就可以得到整个系统的总热阻值。

$R_{\theta JC}$: 热阻—结点到外壳

$R_{\theta JC}$ 用于当最终用户想在eGaN FET顶部增加额外散热器的情况。图2显示了测量 $R_{\theta JC}$ 所需的典型测试装置。

图2中的水冷散热器, 通过环流加热/冷却器调整温度来保持+25°C常温。“QFN板”是一块非常小而且简单的测试电路板, 能以电气方式连接到DUT。不导热的“隔离垫片”(Shim Spacer)加在非常小的器件中, 以防止发生器件倾斜和对齐问题。10 Ω电阻能防止可能发生的栅极振荡, 因为DUT和测试电路之间的导线长度在0.3米左右。所有电源线都以Kelvin方式连回仪器, 目的是消除电源线上的 $I \times R$ 压降。DUT和水冷散热器之间的热界面材料是水, 附有少量表面活性剂, 以增加表面湿度。DUT系统被气压固定在某个位置上。热电偶用于监视从锡球和电路板散发出来的热量, 以估算只是被水冷散热器除去的热量, 进而计算出真实的 $R_{\theta JC}$ 。



Type "T" Thermocouple, size 40 AWG

图1: $R_{\theta JB}$ 是在不考虑安装电路板类型或尺寸的情况下, 从器件结点到锡球底部的热阻

$R_{\theta JA}$: 热阻—结点到环境

$R_{\theta JA}$ (结点到环境的热阻)是当器件安装在一平方英寸电路板上时, 明确说明热阻的一个方式。图3显示了用于热阻测量的电路板版图。DUT安装在单面、两盎司的FR-4电路板上, 电路板上有一个1平方英寸的铜区域(645.16mm²)。其中有一半铜(平方英寸)连接到源极, 另一半通过器件的锡条连接到漏极。当最终用户想把eGaN安装到应用的电路板上又不想增加散热器时, $R_{\theta JA}$ 是最有用的。在器件表征过程中, DUT悬挂在一立

方英尺(0.02832立方米)密闭盒的中心, 并处于静止空气和25°C起始温度下。DUT在结温为+125°C条件下, 加“导通”偏置, 并保持1000秒, 然后根据公式3就可以计算出 $R_{\theta JA}$ 。

由于应用设计没有必需在一个一平方英寸(645.16平方毫米)电路板进行, 图4展示了铜焊盘面积减少而使热阻增加的函数关系, 并归一化为645.16平方毫米(1平方英寸)。

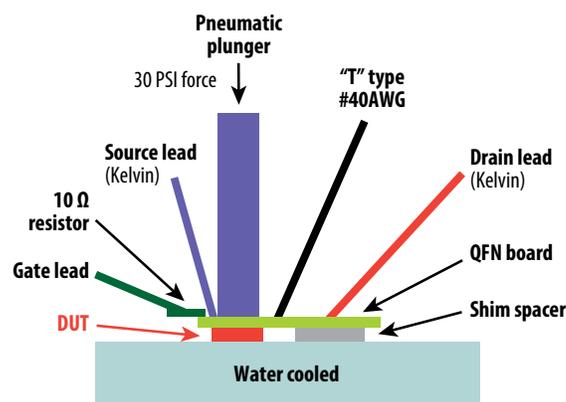


图2: 测量 $R_{\theta JC}$ 所需的典型测试装

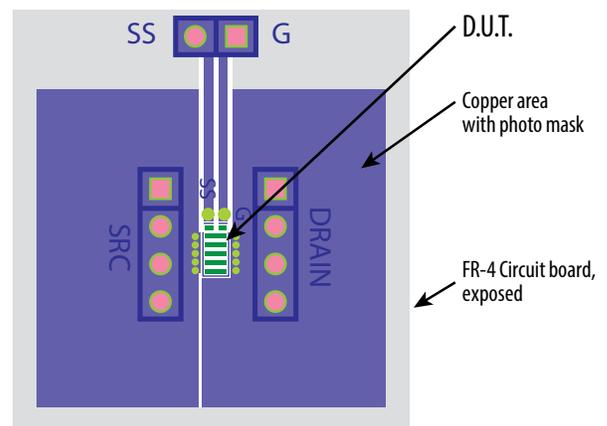


图3: 用于测量 $R_{\theta JA}$ 的电路板版图, 具1平方英寸的铜区域。其中有一半铜连接到源极, 另一半则连接到漏极

测量结果

表四列出了与器件型号有关的各种热阻值: $R_{\theta JC}$ 、 $R_{\theta JB}$ 和 $R_{\theta JA}$ 。EPC1010和EPC1012的热阻值是测量出来的, 其它型号的热阻值则是按比例用近似值计算出来的。图5显示了宜普产品线的归一化 $Z_{\theta JB}$ 曲线集。在器件表征过程中, 我们发现EPC1010和EPC1012的归一化热阻曲线($Z_{\theta JB}$)是几乎完全相同的。

总结

像eGaN FET等使用表面安装方法的晶体管可以有多种物理安装方式。根据用户应用, 器件安装方法对功耗和最大电流能力有显著影响。所有这些器件参数中的限制因素是控制分立器件的最大结点温度。测量eGaN FET结温的最佳方法是通过表征和测量 $R_{DS(on)}$ 的变化。本应用笔记讨论了一种可以接受的方法, 并提供了各种器件的热阻的测量结果。

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

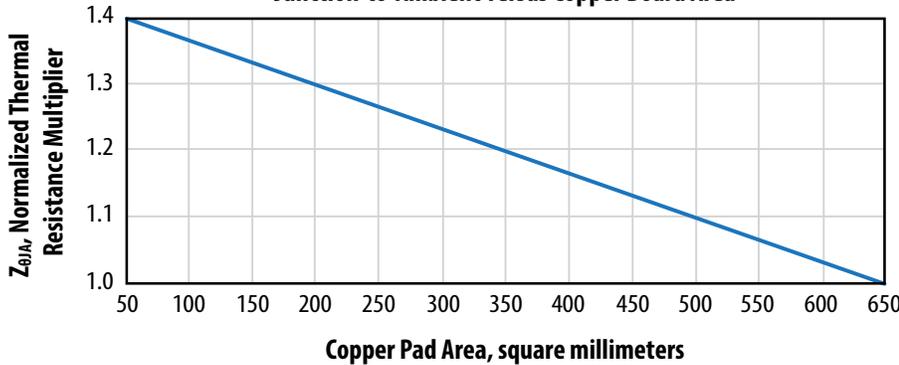


图4: 减少铜焊盘面积致使热阻增加的函数关系, 并归一化为645.16平方毫米

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: 热阻一览表

Normalized Maximum Transient Thermal Impedance

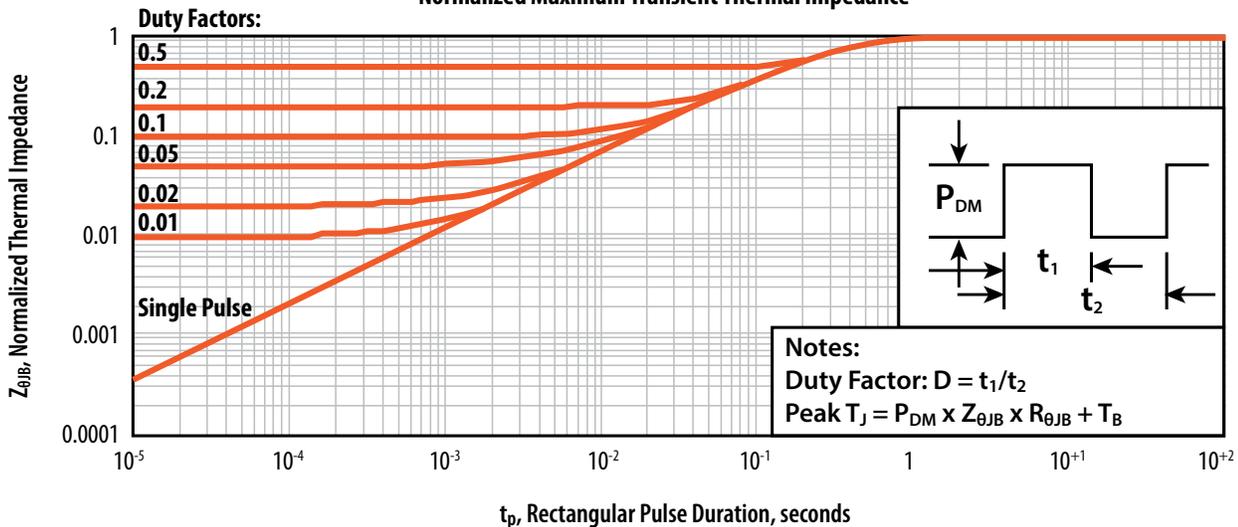


图5: 宜普产品线的归一化 $Z_{\theta JB}$ 曲线集