

氮化镓场效应晶体管 (eGaN® FET) 的安全工作区域



宜普电源转换公司 John Worman 及马艳萍

温度是影响功率晶体管性能的一个基本因素。我们计算器件在工作时的温度假设功耗平均分布于器件的有源区域。但这个方法不一定总是对的，因为某些技术的参数具负温度系数，以致电流可以集中在一个小区，从而使这个局部区域的温度上升至导致器件发生故障。

安全工作区域 (SOA) 的曲线描述了器件可以正常工作而不会发生故障的电压、电流及工作时间等条件的范围。它标示了器件在具阻抗的结的散热性能，因此受器件的热阻 ($R_{\theta JC}$) 影响。如果可以提高器件的散热效率，将减少热阻并提高器件在安全工作区域内的性能。

宜普公司的氮化镓场效应晶体管在整个工作范围内具正温度系数，因此器件在工作时只受电压、电流及温度限制。本文描述与功率氮化镓场效应晶体管的热阻有直接关系的安全工作区域，并展示晶体管具备良好 SOA 特性之同时可以维持低电阻，以及对从热效应推算得出与测量所得的结果进行比较。

历史发展

功率器件的安全工作区域描述器件同时抵受电压及电流条件下的性能，而栅极电压处于阈值电压或刚刚高于阈值电压。安全工作区域之典型限制有两方面：器件的最高结温和因为负温度系数所导致的电流集中效应。这个效应的其中一个例子是发生在三极管的基极发射极结点，称为二次击穿。

早期的功率 MOSFET 器件的转移特性从负温度系数转换为正温度系数 (零温度系数点) 时的电流大幅减少。目前的器件具更高功率密度，从而提高器件的导通电阻。早期的 MOSFET 器件的数据表提供安全工作区域的理论值，这是没有问题的，因为它具有小负温度系数区，并没有对电

压、电流及温度方面构成进一步的限制。但目前的 MOSFET 器件的转移特性曲线具有一个明显的负温度系数区，以及一个高零温度系数点。如果这点高于器件的工作电流，器件将在安全工作区域的更高功率条件下发生热“失控” [1、2]。这个失控情况是由以上称为热集中效应所产生 [3]。因此，要改善器件的 SOA 性能的解决方法是 MOSFET 需要在零温度系数点以上工作，以改善它在安全工作区域的性能。虽然很多制造商仍然提供安全工作区域的理论值，有一些制造商现正利用实验数据来量化器件的表现，从而得出在这个工作条件下所产生的限制。

宜普的氮化镓器件改善器件在安全工作区域的性能

在制造商的数据表中的安全工作区域的限制，可以从器件的热阻 ($Z_{\theta JC}$) 曲线得出。谨慎的制造商会基于实验室的测试来调变出这个理想的曲线。图 1 展示了宜普公司的归一化瞬态热阻。表 1 列出了宜普的产品型号及其相关的 $R_{\theta JC}$ 值。

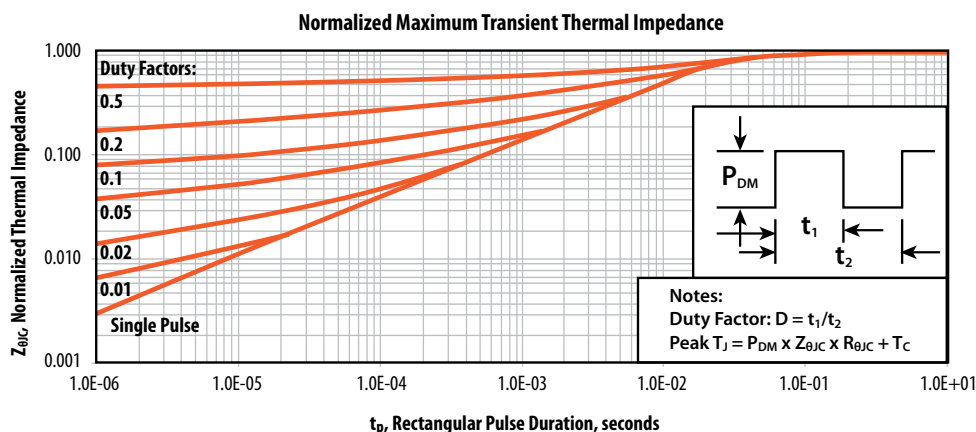


图 1：归一化瞬态电阻 ($Z_{\theta JC}$)。

Part Number	$R_{\theta JC}$ °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：宜普公司器件型号及相关的 $R_{\theta JC}$ 。

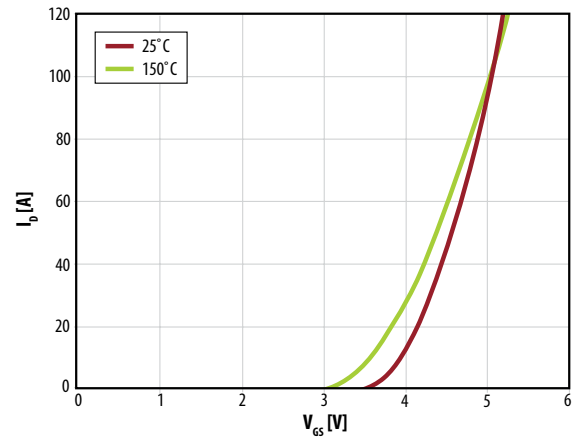
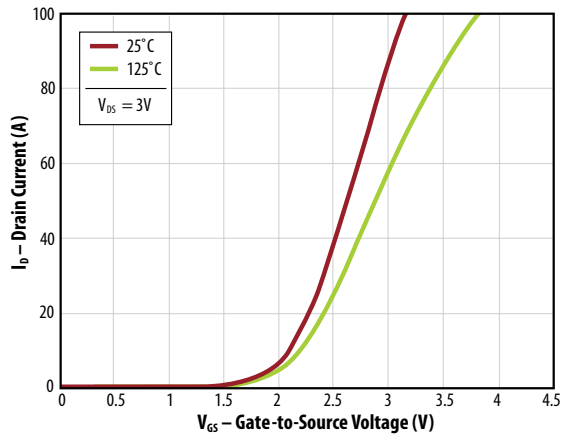


图 2 : EPC2001 (左图) 及 BSB056N10NN3 (右图) 的转移特性。

图 2 展示了氮化镓场效应晶体管 EPC2001 器件与英飞凌公司的功率 MOSFET (BSB056N10NN3) [4] 的转移特性曲线的比较。EPC2001 器件是一个 100 V、7 毫欧的器件。非常明显的是，氮化镓场效应晶体管在它的工作范围内具正温度系数。这意味着当器件的局部区域温度上升时，它的载流能力将会减小，并导致电流分散到晶片的其它区域。电流分散会均衡晶片的温度，这是自镇流功能。反之，功率 MOSFET 器件在栅极上的电压低于 5 V 时有一个很明显的负温度系数区，并不具自镇流功能。器件在这个区域工作时将在晶片产生局部发热点，因此限制了晶片在安全工作区域的性能。

(BSB056N10NN3) 的安全工作区域。从 EPC2001 器件的安全工作区域曲线的边界可以看到，最大漏极至源极电压为 100 V 和最大脉冲电流为 100 A。在这些边界内，晶体管在达到热极限值之前可以工作的时间有限。

器件不可以在图 3 的左上角区域工作，因为导通电阻太低而不可以在给定的电流下产生电压。在两个边界条件之间有一组斜线，它们表明作为定时矩形功率脉冲函数的安全工作区的限制。黑线是计算出来的恒定功率线，代表将器件结温提升至最大额定结温的同时仍然保持恒定 25°C 壳温。这些黑线的斜率为 -1 (恒定功率: 在 $V_{DS} = (I_{DSc} / R_{DS(ON)}) \cdot \log(I_{DS}) = \log(P_D) - \log(V_{DS})$)

虽然 EPC2001 的整个工作范围具正温度系数而使我们相信器件在理论上的热限制范围内可以安全地工作。然而，我们需要仔细审核每种新技术，以实验方法确认我们的器件不会发生其它的失效模式。我们把二十五个 EPC2001 器件放置在突发失效的情况下工作，其中每个器件都安装水冷散热器。壳温则保持在 +25°C ($\pm 2.5^\circ\text{C}$)。从图 3 可以看到：

1. 红线显示了器件在直线性偏置时的失效数据。
2. 蓝线是器件在线性偏置 100 毫秒时的失效数据。
3. 绿线则是器件在线性偏置 10 毫秒时的失效数据。

图 3 展示了氮化镓场效应晶体管 EPC2001 器件与英飞凌公司的功率 MOSFET

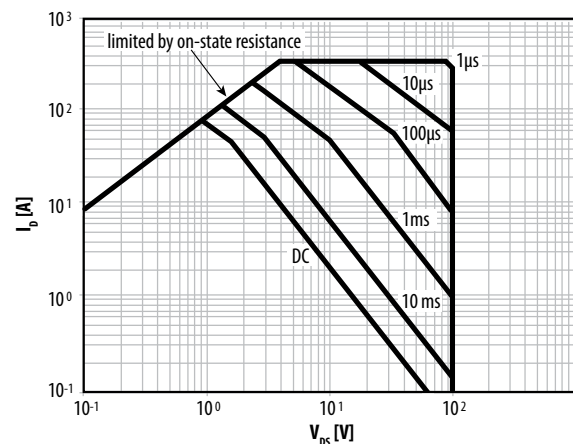
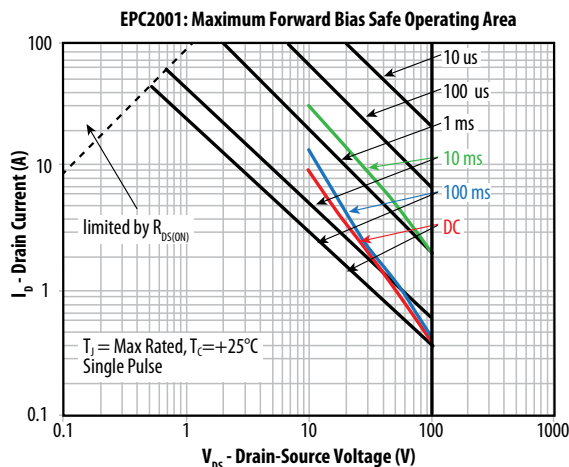


图 3 : EPC2001 (左图) 及 BSB056N10NN3 (右图) 的安全工作区域。

图 4 至图 8 展示了其它宜普器件的安全工作区域，包括 EPC2007、EPC2010、EPC2012、EPC2015 及 EPC2014。所有器件在安全工作区域发生的故障经过实验方法来评估。以上所定义的红、蓝及绿线代表器件的实际故障。相比已公布的安全工作区条件，我们看到所有在 10 毫秒、100 毫秒和直流线性偏置时的失效数据都在更高功率时才出现。

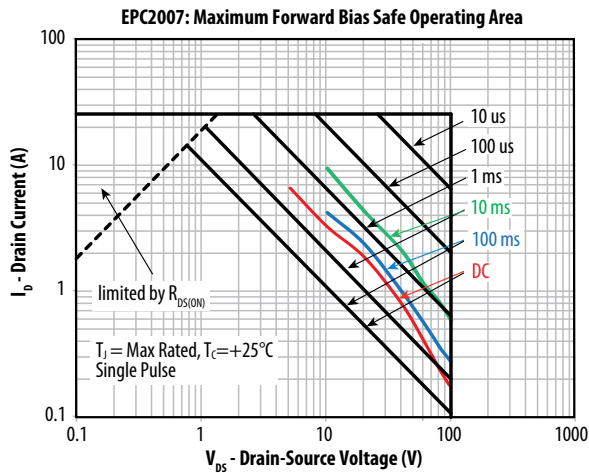


图 4：EPC2007 的安全工作区域。

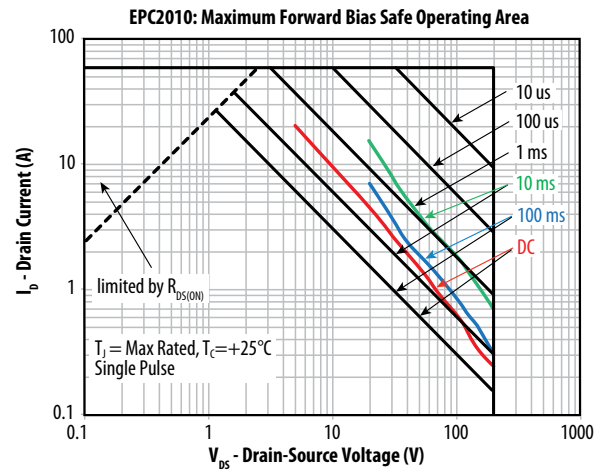


图 5：EPC2010 的安全工作区域。

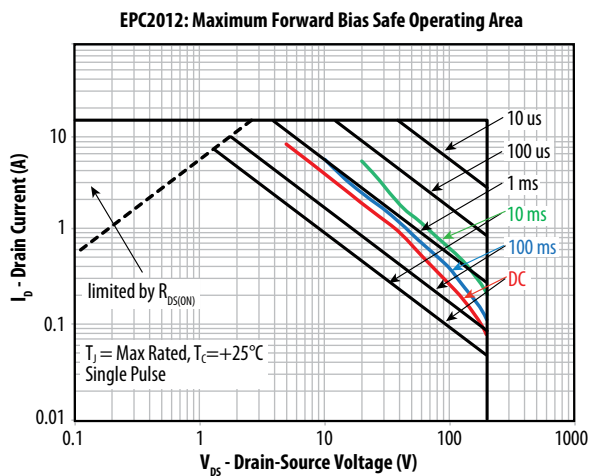


图 6：EPC2012 的安全工作区域。

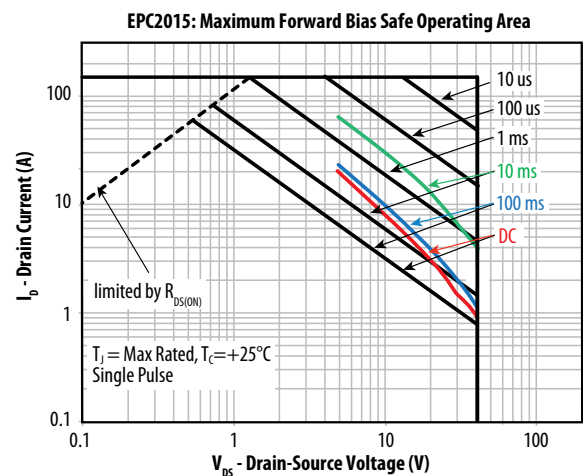


图 7：EPC2015 的安全工作区域。

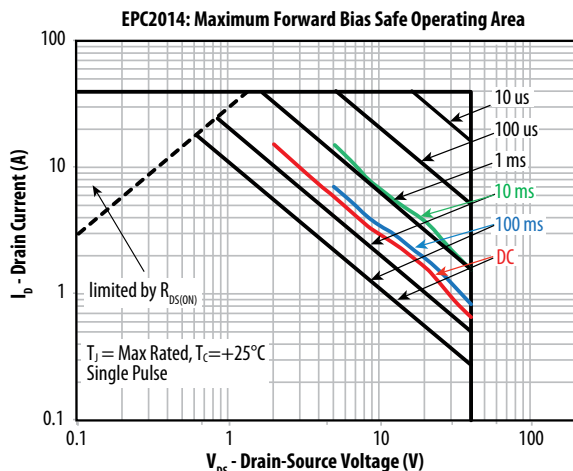


图 8：EPC2014 的安全工作区域。

总结

相比功率 MOSFET，氮化镓场效应晶体管具有高电子密度和非常低的温度系数，使它能够在目前的高性能应用中具明显的优势。高电子密度产生优异的导通电阻，而正温度系数防止晶片内产生发热点，因此氮化镓场效应晶体管可以在安全工作区域具有卓越的性能而不会发生故障。如果我们把并联器件放置在一个共用的散热器，氮化镓场效应晶体管将具有额外的优势 - 由于它的正温度系数区域在零温度系数之上，它倾向于分担电流，因此降低对镇流电阻器的要求。

参考文献：

- [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