



高性能 GaN 热评估——红外显微镜的限制

Dylan Murdock, 机械工程师 - 高级封装、基础设施和国防产品, Qorvo 公司
Mark C. Woods, 机械工程师 - 高级封装、基础设施和国防产品, Qorvo 公司

摘要

本白皮书旨在探讨红外显微镜用于测量高性能微波 GaN HEMT 器件和 MMIC 时的限制。此外，本白皮书还将描述 Qorvo 采用建模、实证测量（包括微型拉曼热成像）和有限元分析 (FEA) 的综合热分析方法。该方法极为有效，且经过实证检验。通过确认红外显微镜的限制，可实现比采用较低功率密度技术开发的传统方法更精确的预测和测量。

GaN 器件热估算

Qorvo GaN 产品数据手册的热估算方法遵循图 1 所示流程。为构建特定工艺的基准热模型，使用场效应晶体管的非线性模型进行 GaN 器件的电气仿真，以获得针对发热量的估算数据，从而可对热性能做出初步预测。然后对器件进行实体制造与测试。

实证热数据通过电气测量和微型拉曼测量来收集。拉曼热成像是一种基于拉曼散射光谱的非侵入式光学技术，可实现亚微米空间内的温度测量，时间分辨率可达纳秒级别。¹它探测材料中由温度引起的、声子相对于基准声子频率的偏移（声子频率在环境温度下测定）。²更多有关微型拉曼热成像的实验设置与应用详情请参见 [1,2]。

拉曼热成像已成为针对较小物理尺寸的一种重要的高保真方案。它经过改进，能为低至 0.5 μm 以及微米级的深度分辨率提供经过验证、精确且可重复的空间分辨率，以实现真 3D 热成像。传统红外 (IR) 热成像测量所涉及的横向空间平均值计算会导致器件峰值温度被低估，拉曼热成像针对这一情况进行了改进，以下将展开讨论。

适用于高级 GaN 技术的 Qorvo 热模型建模流程

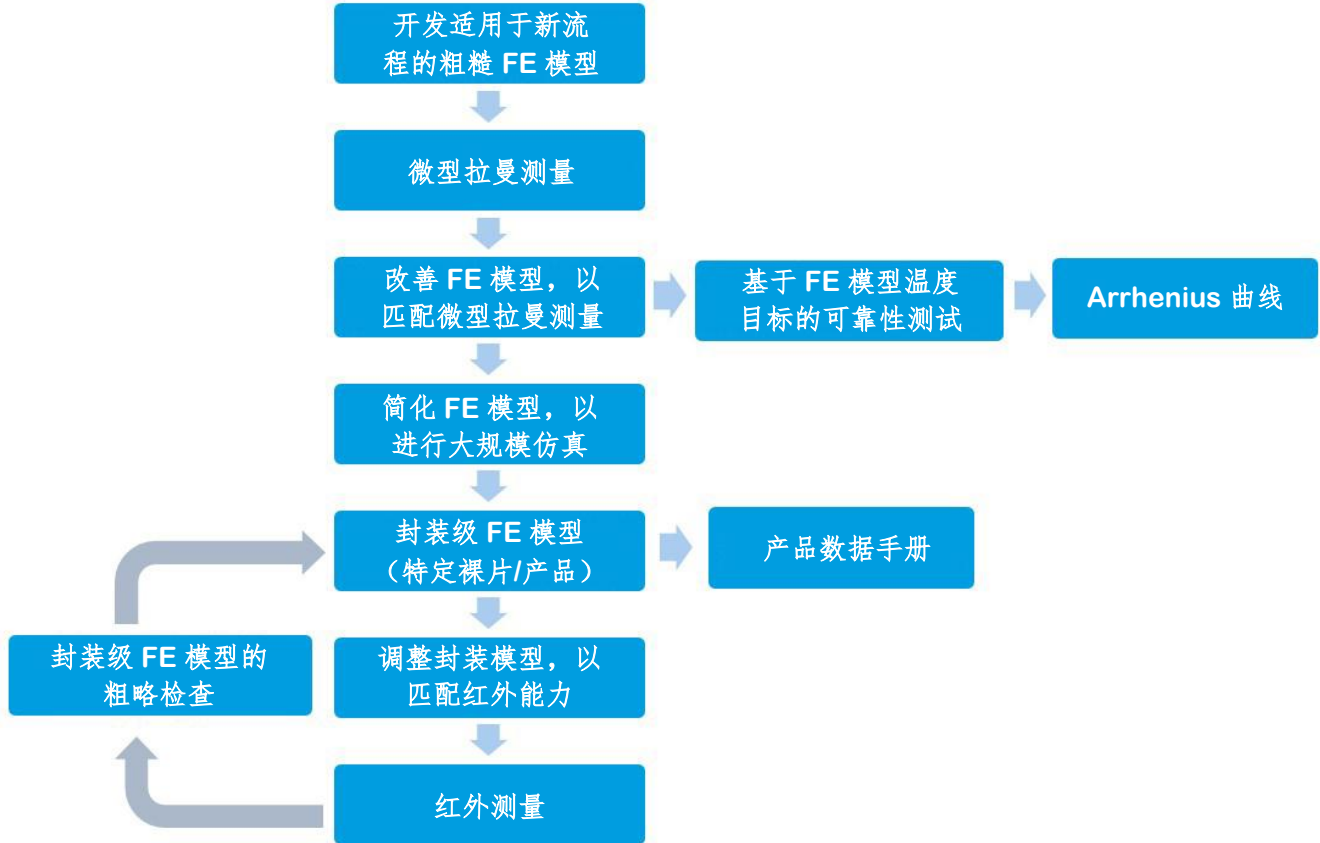


图 1: GaN 热建模流程

包括微型拉曼和电气测量在内的组合式测量法应与热仿真一同使用，以获得有关 GaN 器件热属性的精确信息。

采用测量数据作为实证基准可构建 FEA 模型；该模型可用作热性能建模和预测的基准。微型拉曼测量和 FEA 之间通常需多次迭代才能构建模型，进而提供不同几何尺寸与材料堆叠的良好相关性。

有限元仿真用来确定在特定较高温度下使器件工作所需的功率和环境条件，以便正确加速和测量器件寿命。测得的寿命数据用于构建器件可靠性 Arrhenius 曲线。如今的 GaN 晶体管包括尺寸小至 $0.15\mu\text{m}$ 及以下的栅极长度，这意味着微型拉曼热成像依然对部分区域进行了平均值计算。采用这种方法，则这些平均值反映在热模型和器件可靠性 Arrhenius 曲线中。该工艺实现了紧密耦合的平均无故障时间 (MTTF) 曲线与产品级热分析，可精准预测产品寿命。

完成基准热模型开发后，便可利用 FEA 精准预测产品级通道温度和热阻。FEA 始于裸片级仿真，经过封装级直至系统级，并在系统级检查已封装产品的下一级较高装配性。图 2 显示了典型的器件级 FEA 热模型。

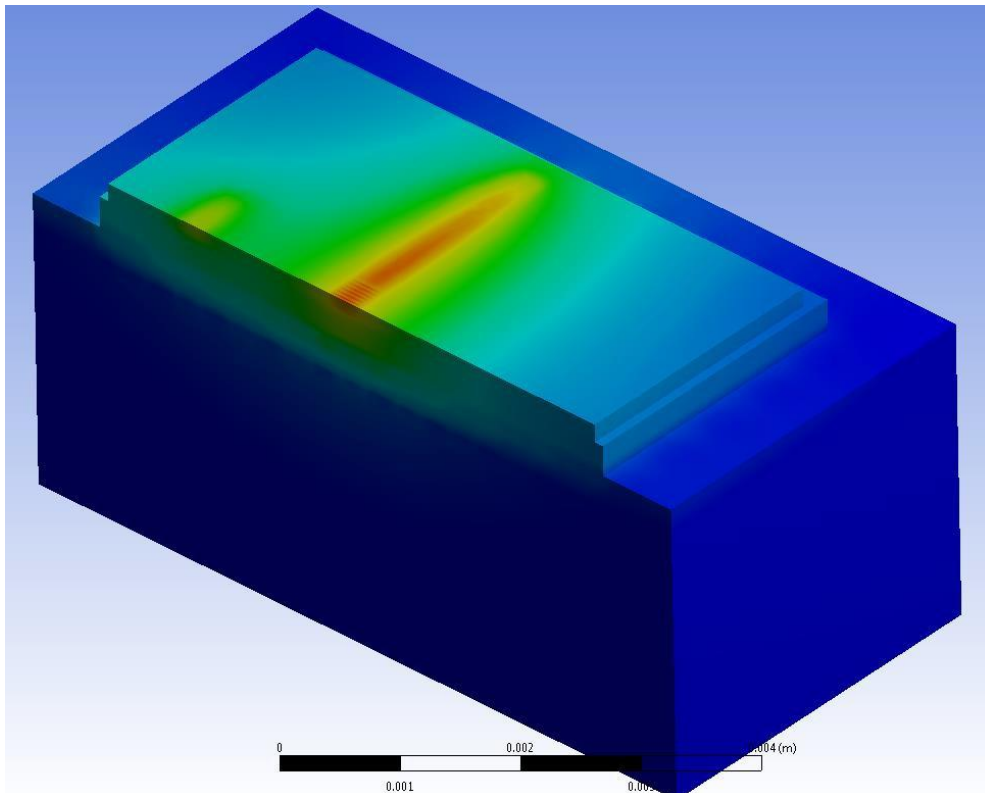


图 2: GaN 器件级热模型

建模与测量热生成和热消散时，选择适当的边界条件并理解这些假设的影响很重要。一般而言，会针对温度和热消散边界条件做出不实际或不恰当的假设。不实际的预测和测量经常会导致产品设计在数据手册中显示工作良好，但在应用中会出故障。

最后，简化 FEA 模型以显示红外显微镜能够解析的低分图像，及其综合值较低的测量结果。然后，将这个经过修改的模型与红外显微镜测量进行比较，以便对过失误差进行实证检查。

使用配备 GaN 器件的红外显微镜

红外 (IR) 显微镜使用广泛，通过寻找半导体器件中的热点来确定故障位置。但是，热特性中的红外应用受到空间分辨率不兼容的限制。红外显微镜无法解析 GaN 晶体管活跃面积那样小尺寸的点。因此，红外测量需对温度较低的非活跃区域和要测量的活跃区域进行平均计算。换言之，假设对仅有 $0.25\mu\text{m}$ 宽度的区域进行红外测量，则测得的温度读数可能比该区域的峰值温度低 25%。分立式 GaN 晶体管的红外图示例如图 3 所示。

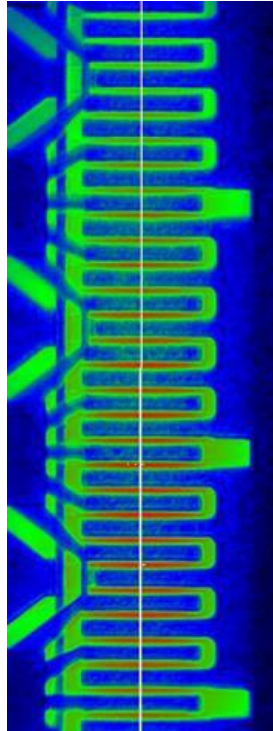


图 3: 典型 GaN FET 单管的红外图

典型的红外显微镜采集中波红外 (MWIR) 频谱光线。MWIR 测量的空间分辨率理论极限值可通过瑞利分辨率准则计算得出:

$$D = \frac{0.61\lambda}{\text{N.A.}}$$

D = 可解析目标之间的距离

λ = 波长 (MWIR 为 3-5 μm)

N.A. = 数值孔径 (不得超过 1, 通常在应用中接近 0.9)

得出的结果是尺寸约 2.5 μm 的点的理论下限。由于当今的 GaN 几何尺寸小一个数量级, 所以无法解析峰值通道温度。

为了演示测量 GaN 器件时红外分辨率限制的影响, 构建了一个 GaN 器件的半对称有限元模型。假设该模型对于 y 轴左右对称。该仿真将器件置于 0.040 英寸厚的铜钨合金基板上, 并贴装 AuSn 裸片。在 CuW 基板上施加 85°C 边界条件。

在通道下方施加典型的 GaN 器件容积热载荷，得到的 3D 温度场如图 4(a) 的等高线图所示，相应的表面温度如图 4(b) 所示。

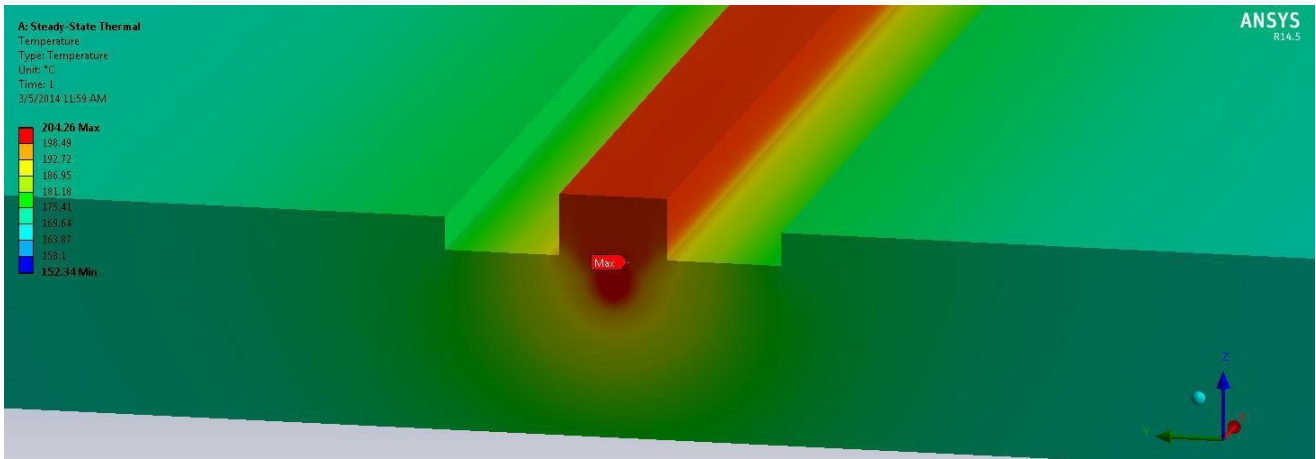


图 4(a): SiC 基板上方厚度约为 2 微米的 GaN 层温度场

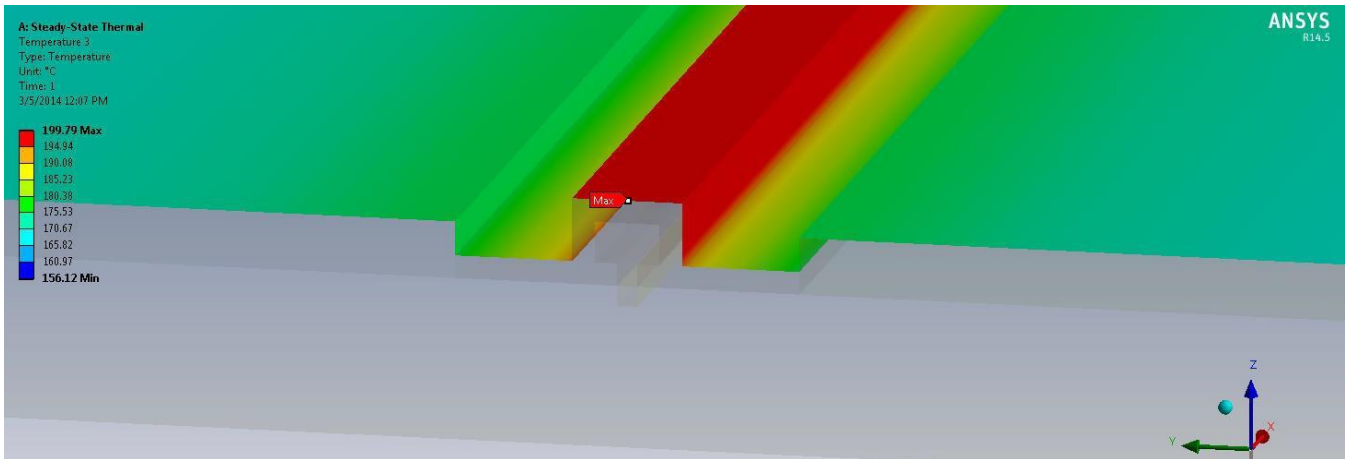


图 4(b): 栅极上方的表面温度

仿真期间记录的峰值温度为 204°C，位于 GaN 通道中点（对此半模型为 $x = 0$ ）。该条件发生在基板表面下方，无法通过红外热成像显现。

表 1 列出了红外显微镜（空间分辨率极限值为技术样例）记录的表面区域的最高温度和平均温度。这些表面区域如图 5(a) 到 5(d) 所示。

表 1: FEA 温度解决方案与红外测量、分辨率误差

测量主体或区域	尺寸 ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	像素排列至热点	真正的最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)	红外测量的表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
仿真 GaN 器件	-	-	204.3	-
表面区域 #1	2.5 x 2.5	居中	-	195.9
表面区域 #2	2.5 x 2.5	偏移	-	189.1
表面区域 #3	5.0 x 5.0	居中	-	188.3
表面区域 #4	5.0 x 5.0	偏移	-	183.0

在这个理想示例中，使用红外热成像来对通道上方的 $2.5\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m}$ 表面区域成像（具有代表性的红外分辨率限制），得到的测量值低估了峰值通道温度，低估值为 $8\text{-}15^{\circ}\text{C}$ 。偏移范围是由于无法精确对齐通道最热区域顶部的一个像素中点所导致的。图 5(b) 和 5(d) 显示使通道处于像素成像区域边界的像素对齐影响。这种情况下， $2.5\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m}$ 区域的平均表面温度会低估最高通道温度，低估值超过 15°C 。使用 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 面积会使误差扩大到 21°C 。

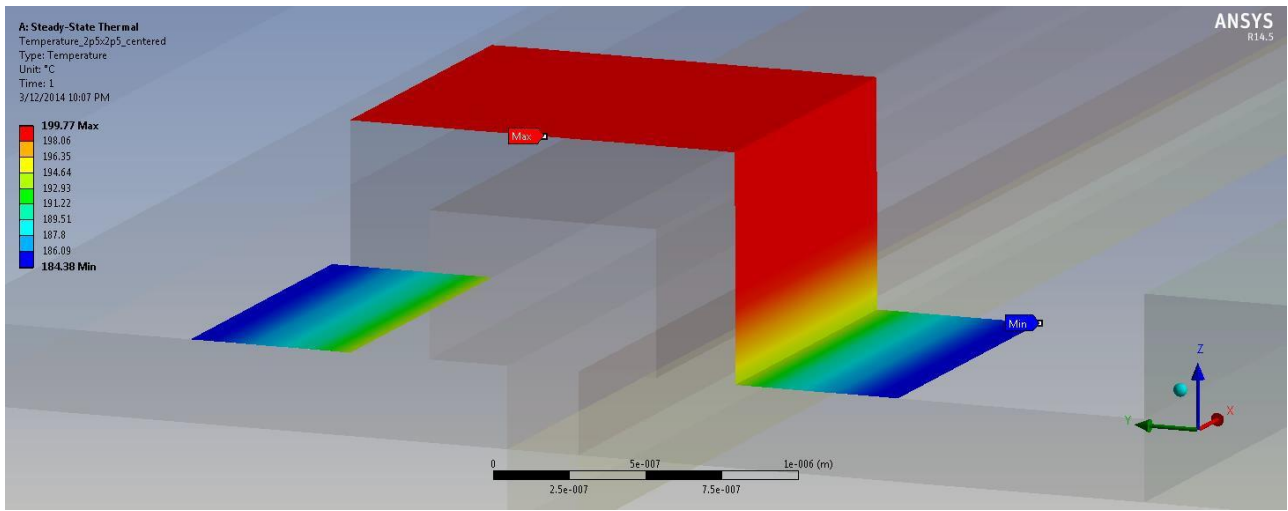


图 5(a) 表面区域 #1: 宽度 = 2.5 微米 (通道最热部分居中)

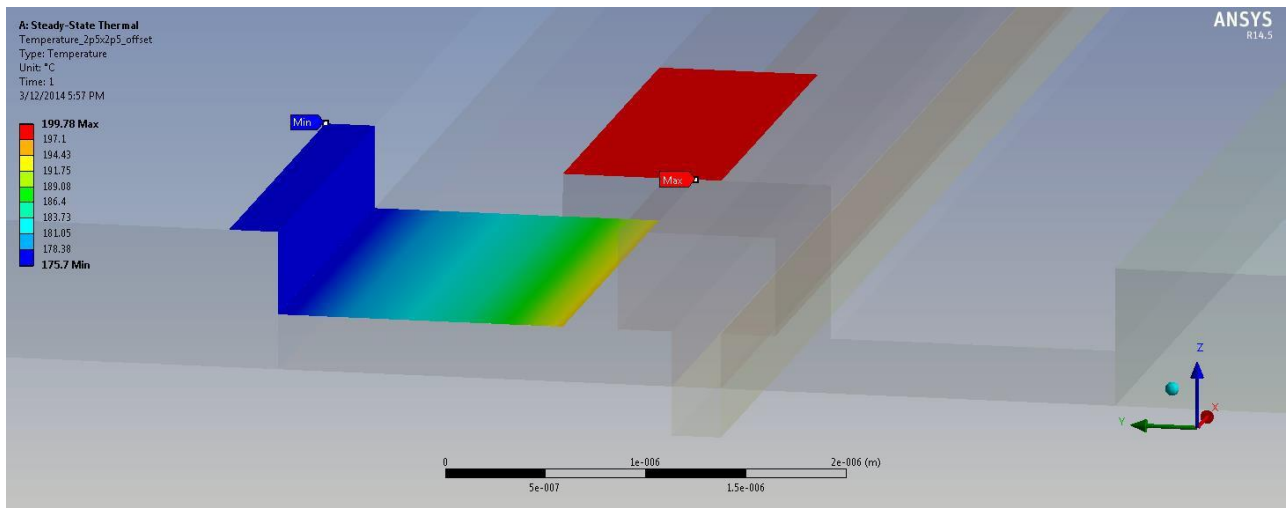


图 5(b) 表面区域 #2: 宽度 = 2.5 微米 (x 和 y 偏移)

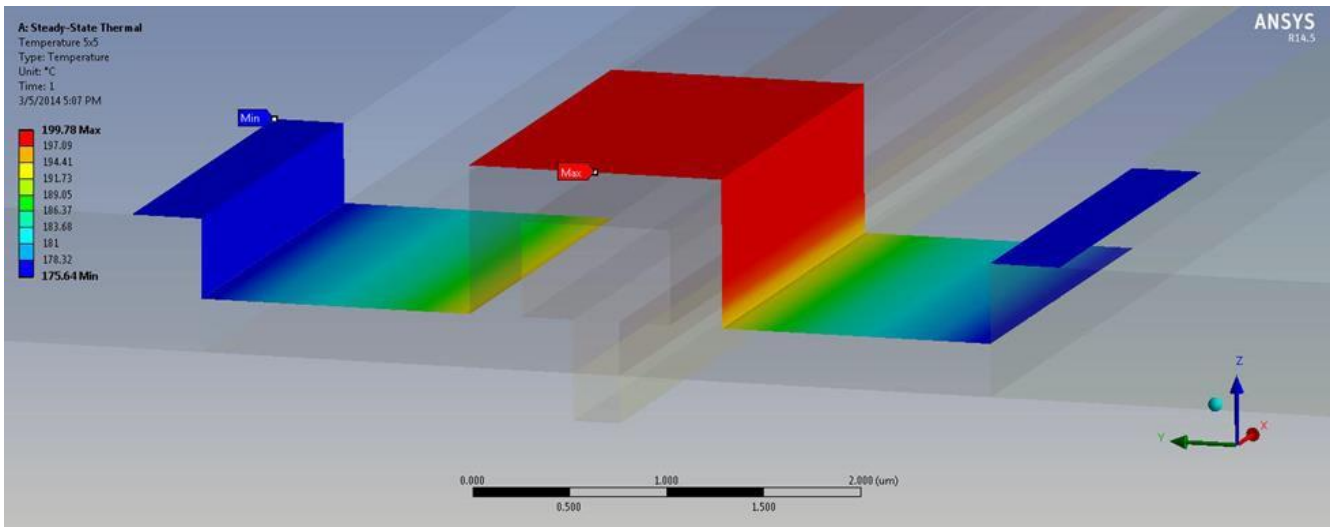


图 5(c) 表面区域 #3: 宽度 = 5 微米 (通道最热部分居中)

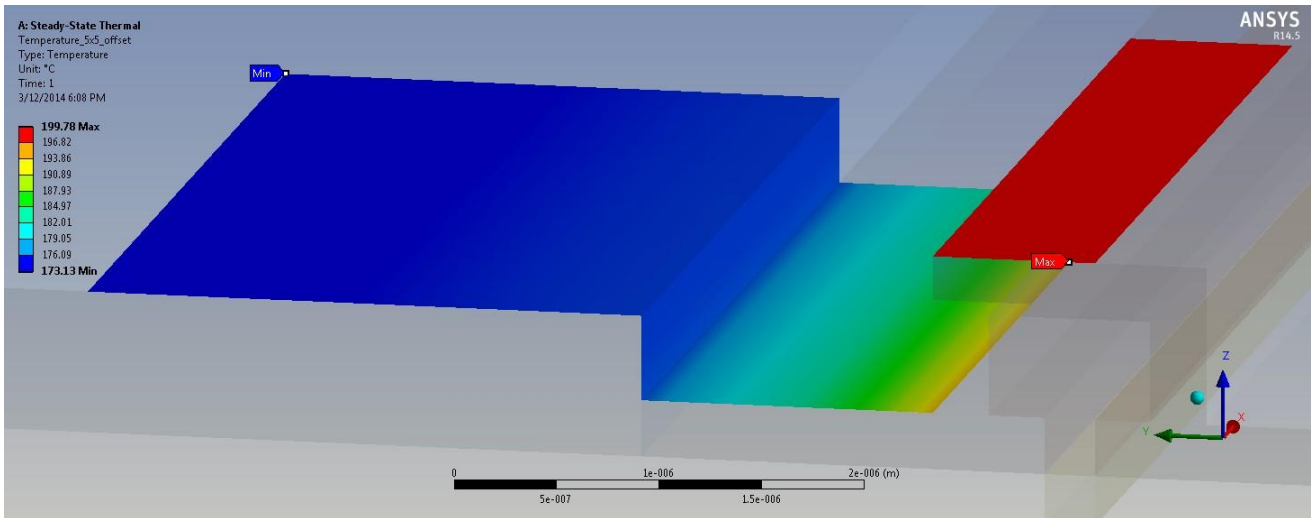


图 5(d) 表面区域 #4: 宽度 = 5 微米 (x 和 y 偏移)

对于 GaN 热分析，亚微米工艺常用来制造晶体管，其热点远小于 0.25 微米，而红外显微镜只能解析尺寸数量级更大的——得到完整的细节——数量级更大的。

此外，红外热成像仅测量晶体管的表面温度，而峰值温度实际上发生在表面下方的氮化镓外延层。在半导体材料的热时间常数超出热源的脉冲工作情况下，这种测量温度的降幅将扩大，影响测量温度范围。

最后，裸片表面的辐射系数 (ϵ) 快速变化。常见的解决方案是在裸片上喷涂哑光黑，以得到接近 $\epsilon = 1$ 的结果，但无法真正创建一个持续的黑体。这会产生另一个挑战，即涂料对裸片产生介电负荷，它可能难以预测，且通常是不连续的。这会改变 RF 性能，进而影响精确性和可重复性。

表 2: FEA 温度解决方案与红外测量、总误差

测量主体或区域	尺寸 ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	辐射系数	真正的最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)	红外测量的表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
仿真 GaN 器件	-	-	204.3	-
表面积	2.5 x 2.5	1.00	-	189.1
表面积	2.5 x 2.5	0.85	-	171.7
表面积	5.0 x 5.0	1.00	-	183.0
表面积	5.0 x 5.0	0.85	-	164.9

这里展开讨论了上述示例中辐射系数的影响。假定测量条件如上所述，可以看到红外热成像低估了峰值 GaN 通道温度，低估值高达 40°C 。

上述建模结果表明，兼容统一的热测量技术对 GaN 器件来说至关重要。采用最初针对低功耗半导体技术和/或更大几何尺寸开发的工具和技术会产生明显误差；这些误差可能会导致可靠性估计错误，并且会损害产品功能。Qorvo 采用当今最灵敏的测量工具开发出了针对 GaN 的热设计和分析流程，具备业界领先的精确性。



参考文献

1. N. Killat 和 M. Kuball, 布里斯托大学, H.H.Wills Physics Laboratory; T.-M. Chou, U. Chowdhury, 和 J. Jimenez, Qorvo 公司, *AlGaIn/GaN HEMT 温度评估: 拉曼、电气和红外热成像对比研究 (Temperature Assessment of AlGaIn/GaN HEMTs: A Comparative study by Raman, Electrical and IR Thermography)*
2. J. Pomeroy, M. Bernardoni, M. Kuball, H.H.Wills Physics Laboratory, 布里斯托大学; D.C. Dumka, D.M.Fanning, Qorvo 公司, *通过 3D 拉曼热成像对低热阻金刚石氮化镓晶体管进行表征 (Low Thermal Resistance GaN-on-Diamond Transistors Characterized by 3-D Raman Thermography Mapping)*
3. S. Kiefer, M. Nair, P. Sanders, J. Steele, M. Sutton, R. Thoma, S. Wilson, 摩托罗拉数字化 DNA 实验室; G. Albright, C. Li, J. McDonald, Quantum Focus 公司, *用于集成电路故障定位的红外微热成像 (Infrared Microthermography for Integrated Circuit Fault Location); 灵敏度和限制 (Sensitivity and Limitations)*