适用于GaN HEMT的片上分布式集成温度传感技术研究

杨金淮，高　欢，周　琦
（电子科技大学，成都 611731）

摘　要： 针对于目前主流的GaN HEMT的温度监测存在的准确度不足、破坏性大、非实时监测等问题，提出了一种适用于GaN HEMT的片上分布式集成温度传感技术，通过热仿真找出发热极值区域，在该区域分布式集成温度传感器，分布式集成温度传感技术的传感功能表征准确度高、工艺简单、兼容性高、多电位检测以及成本低廉。经实验证实，这些传感器不会对GaN HEMT的电学性能造成不良影响。最后，针对传感器的温度特性进行表征验证工作，结果表明，传感器展现出极为优异的线性度（≥0.999 7）、高灵敏度（≥0.23 mV/℃）以及高达96%的准确度。本研究中的集成分布式传感技术，能够精准检测芯片发热的极值区域，可用于优化芯片版图设计，有效提升芯片及功率系统的热稳定性。

关键词： 氮化镓；分布式集成；高电子迁移率晶体管；温度传感
中图分类号：TN386；TP212.11　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004-3365(2025)06-1056-07
DOI：10.13911/j.cnki.1004-3365.250086

Research on On-Chip Distributed Integration Temperature Sensing Technology for GaN HEMT

YANG Jinhuai, GAO Huan, ZHOU Qi
(*University of Electronic Science and Technology of China*, *Chengdu* 611731, *P. R. China*)

Abstract: The existing mainstream temperature monitoring of GaN HEMTs faces various challenges, such as insufficient accuracy, high destructiveness, and non-real-time monitoring. In this study, we proposed an on-chip distributed integrated temperature sensing technology suitable for GaN HEMTs. The area with the extreme heat generation was determined via thermal simulation, and temperature sensors were distributed and integrated in this area. The sensing function of the distributed integrated temperature sensing technology was characterized by high accuracy, simple process, high compatibility, multi-potential detection, and low cost. The experimental results indicate that these sensors do not adversely affect the electrical performance of GaN HEMTs. Lastly, the temperature characteristics of the sensors were characterized and verified. The results indicate that the sensors exhibit excellent linearity (≥0.999 7), high sensitivity (≥0.23 mV/℃), and an accuracy as high as 96%. The proposed integrated distributed sensing technology can accurately detect the extreme heat generation area of the chip, and can be used to optimize the chip layout design, thereby improving the thermal stability of the chip and the power system.

Key words: GaN; distributed integration; HEMT; temperature sensor

收稿日期：2025-02-28；**定稿日期：**2025-04-09
基金项目：四川省科技项目（2023YFG0138）
作者简介：杨金淮（1999－），男（汉族），吉林松原人，硕士研究生，从事氮化镓应用和测试研究工作。
周　琦（1981－），男（汉族），云南昆明人，教授，从事第三代宽禁带新型半导体材料、器件及其集成技术的研究。通信作者。

0　引　言

相比于传统硅材料，第三代半导体材料具有更大禁带宽度、更高临界击穿电场和更高电子饱和速度等优秀材料特性，使用该半导体材料制造的功率器件，适用于高温、高压、高频、低功耗和高转换效率的功率集成系统中，GaN HEMT在学术界和工业界受到广泛关注[1]。其与硅基工艺的兼容性显著降低了制造成本，因此被广泛应用于消费电子、数据中心及能源转换等领域。尤其在快速充电应用中，GaN HEMT通过更小的体积实现更高的功率密度，性能显著优于传统硅基器件。然而随着功率密度的提升，GaN器件的自热效应愈发显著，导致器件工作于较高温度的环境中。高温环境下，GaN器件面临多重可靠性挑战。短期内，自热效应会降低GaN器件二维电子气的迁移率，导致饱和区漏极电流下降，进而增大器件的功耗，最终降低电源系统效率[2]。长期而言，功率芯片温升还会引发GaN HEMT的阈值电压漂移[3]以及栅极漏电流增大[4]。因此，对器件进行实时温度监测至关重要。

发展GaN功率器件温度监测技术，是从电源系统电路拓扑和器件驱动控制层面实现GaN功率器件智能控制的基础，既有利于抑制GaN功率器件芯片过热导致的电源系统效率下降，也可提升器件在实际应用中的长期可靠性。常见温度监测技术包括光学测量法[5]、电学参数测量法[6]以及物理接触法[7]。其中，电学与光学参数测温属于间接测量器件温度的方法：光学测量法需监测器件表面温度或破坏器件结构以获取结温信息；电学参数测量法通过监测MOS管物理参数转换器件温度，但无法检测器件沟道温度极值。

对于集成式晶圆温度传感器的物理接触法实现实时温度监测的方案，学术界已有若干研究。文献[8]提出了一种基于P-GaN/AlGaN/GaN异质结构的温度传感器设计，其原理是通过将二维电子气电阻与二极管进行串联。该方法巧妙利用二极管正向电压与二维电子气电阻温度系数相反的物理特性，实现了较高的检测灵敏度，但存在温度依赖性非线性的问题。这种间接温度表征方法对精确预测GaN HEMT器件温度仍存在一定困难。此外，二维电子气的不均匀性导致不同传感器间电阻温度系数存在差异，使得单个晶圆上的温度监测能力呈现显著差异，阻碍了其在工程中的应用。针对高压GaN HEMT功率器件中的线性温度传感器，文献[9]提出了一种创新性方案：通过在器件单元间集成传感器，简化工艺流程并降低成本。但该研究在集成传感器时未考虑主要热点区域的布局，可能导致器件结温监测值偏低，造成器件驱动控制失配，进而威胁器件可靠性。

目前的主流方法面临着测量温度准确性不够高、对器件的破坏性较大和难以实时测量等问题。本次工作针对这些问题提出分布式集成温度传感技术，结合仿真发现极值区域通过分布式集成温度传感器实现多电位的区域温度检测。将该技术运用于本文的GaN HEMT，该器件的温度传感器实现了高灵敏度（≥0.23 mV/℃）与高线性度（≥0.999 7），并且具有高工艺兼容性、低成本以及高准确性等优点。

文章第1节详细阐释了分布式集成温度传感方法的设计理念、具体架构以及运行机制；第2节展示了使用该技术且流片的器件电学性能与分布式温度传感器的热学性能的测试结果；第3节给出了研究所得出的结论。

1　分布式集成温度传感方法的设计

受氮化镓异质外延材料本征特性及二维电子气（2DEG）浓度非均匀性影响，功率器件在芯片区域内存在热点与温度场分布不均现象。为确保监测单元与热点的紧密热耦合，并且实现精准实时的温度监测，合理确定结温监测单元在器件元胞中的嵌入位置至关重要。除需精确监测器件元胞的最高结温点外，还需结合多胞器件的电流导通路径与器件热阻网络进行热点分布分析，据此实现结温监测单元的分布式布局设计。该方案可突破器件发热非均匀性限制，实现全功率器件芯片最高温度的精准监控，既为器件提供有效的温度监测，更为提升器件的工作效率与可靠性提供重要保障。

如图1所示，通过TCAD Sentaurus工具对器件开展电热耦合仿真，明确GaN HEMT器件的热点主要集中于栅极漏侧附近。为了减小温度传感器的监测误差，本工作所设计温度监测单元位于器件的栅极漏测区域附近，以提高温度监测的精度。

器件的测温原理如下：在器件温度极值区域沉积镍金合金作为温度监测传输线，利用其电阻率随温度线性变化这一特点实现温度监测。在片温度监测单元（Temperature Sensor）的位置设计需考虑减小对器件源极场板电场调制作用的影响，并覆盖器

件热点及其向漏极扩展区域[10]。具体器件元胞结构与Sensor位置如图2所示，栅漏间距离为2 350 nm，Sensor位于栅极漏侧与漏极之间，其长度为1 μm，将其沉积于SiN钝化层之上，左侧距离场板SFP边缘140 nm，右侧距离漏金属电极边缘750 nm。

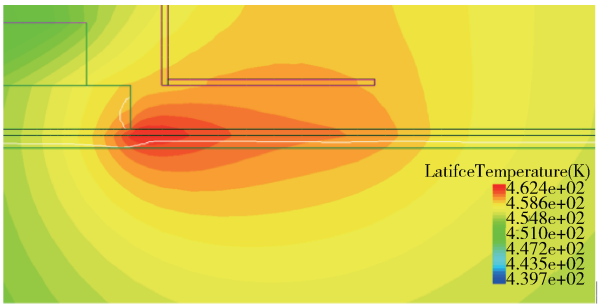


图1　p-GaN HEMT温度分布模拟仿真

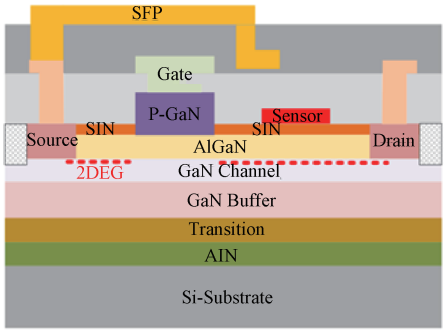


图2　集成温度传感器的p-Gan HEMT的结构示意图

该器件基于带有GaN外延层的8英寸硅衬底，在GaN HEMT中集成了嵌入式分布式温度监测单元。每个p-GaN HEMT单元（其传感器集成于p-GaN漏极侧，单元长度为1 μm，栅极宽度为250 μm）是包含400个并联单元的阵列组成部分，总栅极宽度达到100 mm。图3展示了带有嵌入式温度监测单元的p-GaN栅极GaN HEMT器件的布局设计。红色高亮区域表示温度监测单元的沉积区域，每个区域包含10组传感器，每组传感器由4条欧姆金属条构成。这些传感器精密布置在漏极指状结构周围，通过随机组合带有和不带有嵌入式温度监测单元的器件，实现了分布式温度监测架构。整个p-GaN栅极GaN HEMT器件的布局因此被配置用于分布式温度检测。当特定电流流经两个pad之间时，传感器两端的电压信号可指示器件不同区域的温度，从而实现对器件各区域的分布式温度监测。

图4为器件的实物图，温度监测单元嵌入芯片版图的4个方位，4个嵌入位置分别为左下区域、左上区域、右下区域和右上区域，温度监测单元位置呈对称分布。T1-T5为外部PAD，当T1和T2外接工作电压时，可实现器件左下区域温度的监测，依此类推，任意2个PAD之间外接工作电压即可实现对应区域结温的实时监测。例如T1和T3工作时可监测器件版图左侧部分的温度；当T1和T5工作时，则可监测整个器件版图的平均温度。

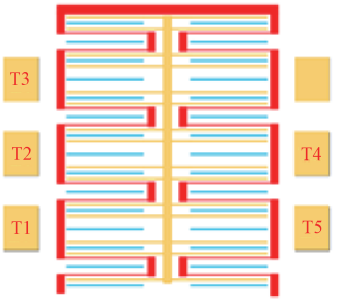


图3　温度监测单元分布式设计原理图

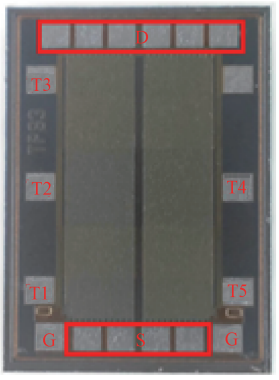


图4　分布式集成温度传感器p-Gan HEMT实物图

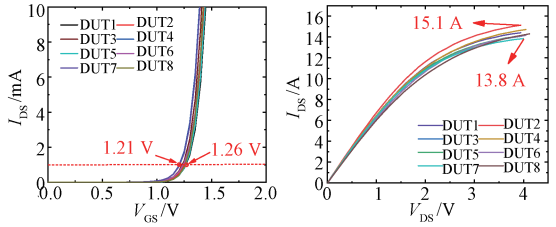
2　器件的性能测试结果

2.1　器件的电学性能结果

本文研究的GaN HEMT在8英寸晶圆上完成流片。为评估8英寸晶圆制备器件的基础特性和一致性，本研究随机选取多个器件在Keysight B1505A半导体器件分析仪上进行测试，从输出特性、转移特性和漏电特性3个维度评估器件的静态电学性能。图5(a)展示了8个p-GaN HEMT器件的转移特性曲线，器件的阈值电压约为1.2 V，阈值电压波动范围（ΔV_{TH}）为0.05 V。图5(b)展示了输出特性曲线，其最大饱和输出电流达到15.1 A。采用相同测试方法对其他器件进行测试，测得最大输出电流值均分布在13.8 A到15.1 A区间内。

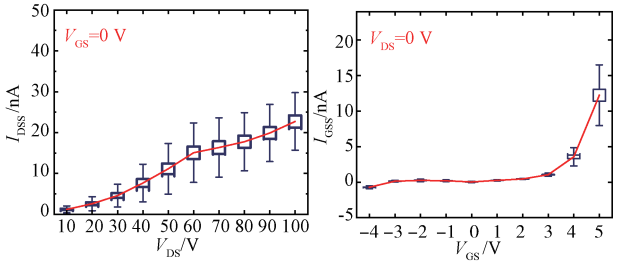
图6展示了器件的漏电流测试特性，图6(a)展

示在 V_{GS}=0 V、V_{DS}从 0 V 扫描至 100 V 条件下，器件的漏极漏电流测试结果，漏极漏电流 I_{DSS}≤30 nA。图 6(b)展示器件 V_{DS}=0 V、V_{GS}从－4 V 扫描至 5 V 条件下器件的漏极漏电流测试结果。在该条件下，器件的栅极漏电流低于 20 nA。该结果证明了本工作所制备器件在漏电特性方面的优异性能，且表现出良好的一致性。



(a) 转移特性曲线　　(b) 输出特性曲线

图 5　p-GaN HEMT 器件的特性测试结果



(a) 漏极漏电流特性曲线　　(b) 栅极漏电流特性曲线

图 6　p-GaN HEMT 漏电特性测试结果

本文通过温度监测单元对功率半导体器件内部结温进行实时监测，因此温度监测单元需与 GaN 功率器件同时运行。考虑到温度监测单元的正常工作可能会对 GaN 器件的电学特性产生影响，有必要对比温度监测单元工作与不工作时 GaN 功率器件的转移特性和输出特性，从而探究温度监测单元工作时对 GaN 功率器件电学性能的影响。

测试电路架构如图 7 所示，使用源表和功率分析仪对传感器施加电流应力与不施加电流应力进行 2 次测试，对比传感器工作前后器件的输出曲线与阈值电压。结果如图 8 所示，传感器工作前后器件的阈值电压和输出电流均未发生改变，器件输出曲线基本重合。传感器工作对器件本身的影响可以忽略不计，说明将传感器集成在 GaN HEMT 的栅极和漏极之间用于实际工程应用的可行性。

2.2　Sensor 的热学性能测试结果

本文设计的分布式集成温度检测单元采用镍铝合金材料制备，其灵敏度和线性度对芯片温度的精确监测至关重要。本部分重点表征温度传感器在器件工作温度区内的热学特性。

实验采用恒温砂浴加热箱对器件持续加热 5 分钟，确保器件的温度监测单元与热砂达到热平衡状态。保持其温度的稳定。通过源表向传感器施加 10 μA 恒定电流，以降低传感器自热效应对传感器的热学特性的影响，通过测量传感器两端电压变化，实现传感器在工作温度区内的温度特性表征。测试温度范围设定为 40 ℃～150 ℃(温度步进 25 ℃)。

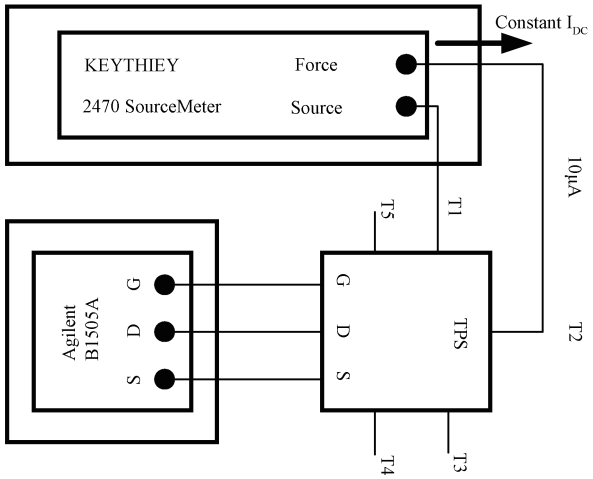
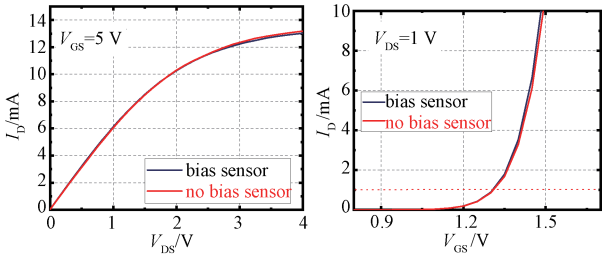


图 7　用于测试传感器对器件影响的表征平台架构图



(a) 输出特性曲线　　(b) 转移特性曲线

图 8　在传感器激活及未激活状态下器件基础特性对比图

图 9 展示了 4 个区域的传感器在 10 μA 电流驱动下的电压-温度特性曲线，从 图中可以看出器件的四个区域传感器表现出良好的一致性和线性度，由于工艺的差异，各区域的表现存在不同。在 T3-T4 区域，该部分的曲线最为集中，一致性最佳。

表 1 详细列出了各传感器电压-温度(V-T)曲线的灵敏度与线性度测试结果。实验数据显示，在功率器件工作温度区域内，传感器电压随温度呈线性增长趋势。值得注意的是，不同器件中相同区域的传感器在灵敏度与线性度方面均展现出卓越的一致性，当施加 10 μA 电流时，传感器线性度(R^2)≥0.999 7，灵敏度超过 0.23 mV/℃。

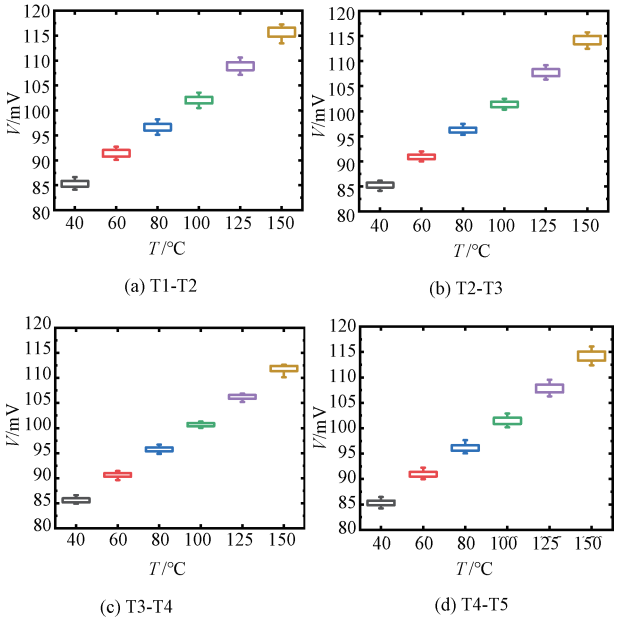


图9　10个器件的各区域的传感器电压与温度的关系

表1　温度传感器不同区域温度传感器的传感性能

区域	灵敏度/(mV/℃)	灵敏度变化/(mV/℃)	线性度	线性度变化
T1-T2	0.289	0.027	0.999 8	0.000 9
T2-T3	0.279	0.029	0.999 9	0.000 6
T3-T4	0.247	0.016	0.999 7	0.005 1
T4-T5	0.274	0.035	0.999 9	0.000 6

本工作设计的器件的分布式集成技术可以用于检验器件的结构布局是否合理，通过分布式集成测温单元找出发热的极值区域，为器件版图优化提供支持。本测试采用栅漏注入技术，使器件处于工作状态（V_{GS}=5 V，I_{DS}=2 A）以诱发器件发热。全程监测传感器的热演化过程。需要注意的是，由于工艺波动，每个器件4个区域沉积传感器的总阻值存在一定的差异。为消除传感器初始阻值差异的影响，绘制了传感器电压变化量ΔV，即（$V-V_{initial}$）与时间（t）的关系曲线（图10）。测试结果表明，所有被测器件的4个区域热行为基本一致，说明器件4个区域内部热分布具有均匀性，验证了布局设计的合理性。

为验证传感器温度检测功能的准确性，本研究采用红外测温法进行结果校核。针对温度监测单元的准确性验证，拟定如下方案：对器件施加一定的栅极电压，通以不同大小的电流，使器件工作在不同温度下，同步利用温度监测单元对器件内部温度进行实时监测，并借助外部红外测温仪测定器件表面温度，通过对比二者所获数据，评估温度监测单元的功能有效性与测量精度。

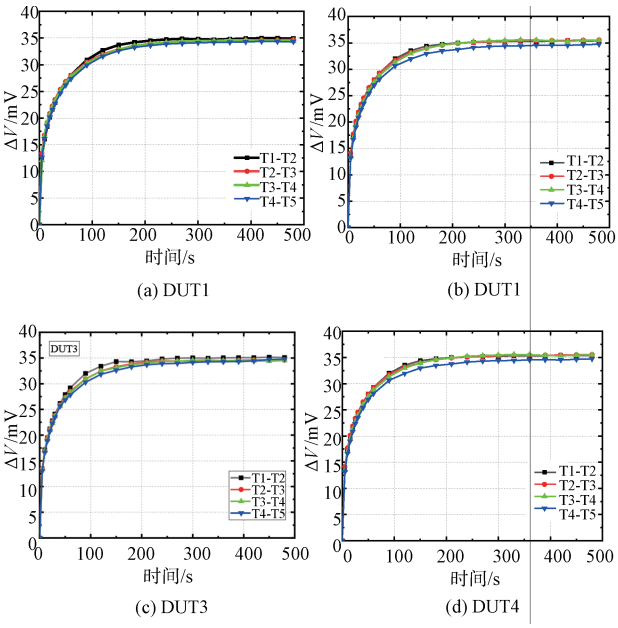
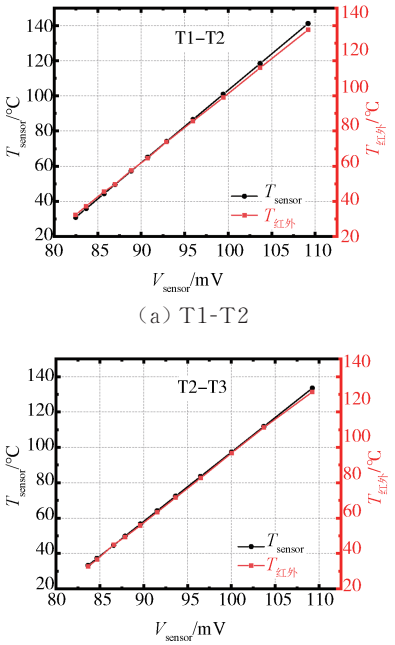


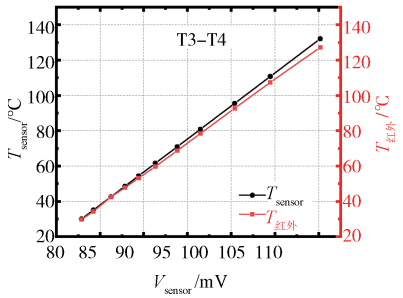
图10　4个器件自热条件下各区域传感器电压变化值ΔV与时间t的关系

由图11可知，图中红线代表红外线测温仪测量结果，黑线表示传感器测试结果。经对比分析，传感器与红外测温仪的温度读数呈现出高度的一致性。鉴于热量耗散的影响，传感器测得的芯片内部温度值相较于红外测温仪测得的表面温度略高。此外，受工艺因素影响，不同区域的Sensor在性能表现上会存在细微差异。

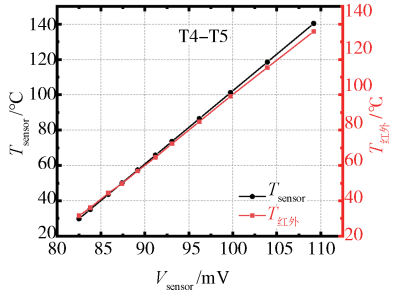


（a）T1-T2

（b）T2-T3



（c）T3-T4



（d）T4-T5

图 11　器件各区域红外温度与传感器温度对比图

为进一步精准验证不同区域温度监测单元的准确度，首要是对用于在器件外部探测器件表面温度 $T_{红外}$ 的红外温度测试仪开展校准工作。该仪器的测量精度对后续关于温度监测单元准确性的分析结果有着直接的影响，故校准环节不可或缺。在校准实施过程中，采用硅油浴加热至特定设定温度的方式，运用红外温度测试仪进行测温比对操作，通过这一过程，能够系统地获取该仪器的测试误差数据。相关测试结果详细汇总于表 2。

表 2　硅油浴加热仪温度与红外测试仪温度对比

硅油浴温度/℃	红外温度/℃	误差
40.06	41.9	4.60%
59.97	61.8	3.05%
79.97	82.1	2.66%
99.97	103.1	3.13%
119.97	122.9	2.44%
139.92	142.3	1.70%

经硅油加热仪校准后，红外测温仪的测温误差最大为 5%，并且随着温度升高，二者之间的绝对误差越来越小，硅油浴设定温度在 140 ℃时，两者温度相差 2 ℃，误差仅为 1.70%。接下来将对传感测温和红外测温进行比对，验证分布式集成温度传感器测温的准确性。

如表 3 所示，测试温度从 30 ℃测试到 130 ℃，随着测试温度的不断升高，器件的温度监测单元与红外传感的测量值的绝对差异不断增大，并且红外温度低于传感器测试温度。从测试原理剖析，温度监测单元所测得的 T_{sensor} 是器件内部极热区域的结温，而红外测试仪所测得的 $T_{红外}$ 则表征器件表面的温度。二者绝对差值由两部分构成：一是器件内部与表面之间的温度差，二是温度监测单元自身的监测误差。二者之中，内外温度差占主要部分。由于当器件温度升高时，器件表面热量流失速度加快，红外测温得到的数据偏低，进而致使器件内外的温度差不断变大。即便如此，在不同温度的测试结果下，两者绝对差最大在 5 ℃左右，器件的监测准确度可达 96% 以上。

表 3　T_{sensor} 与 $T_{红外}$ 对比

T_{sensor}/℃	$T_{红外}$/℃	相差
30.0	29.7	1.10%
35.1	34.3	2.29%
42.6	42.5	0.23%
48.6	47.8	1.57%
54.4	53.1	2.44%
61.6	59.7	3.11%
70.9	68.7	3.23%
80.8	78.4	3.09%
95.5	92.7	3.01%
110.7	107.4	3.11%
132.1	127.2	3.84%

3　结　论

本文提出了一种集成分布式温度传感技术，并将该技术应用于 GaN HEMT 上，并在 8 英寸晶圆上成功流片。通过对批量器件进行系统测试，验证了其电学特性。本工作的分布式集成技术应用在器件上，即在栅漏极间通过仿真分析得到的极热区域上采用成本较低的互连金属化工艺集成镍铝合金传感器，经过实验验证该技术的优势：

1）工艺兼容性：传感器制备流程与 GaN HEMT 制造工艺无缝集成，工艺复杂度低且成本可控；

2）性能无损性：在实现传感器灵敏度≥0.23 mV/℃、线性度 R^2≥0.999 7 的同时，未对器件电学特性造成负面影响；

3）性能一致性：不同器件相同区域传感器的温度响应曲线差异小；

4）监测准确性：适用于 GaN HEMT 的精准温度监控，红外对比测试证实其温度检测误差≤10%。

该技术方案通过分布式传感网络实时捕获器件的热分布,并且可以验证器件版图设计的合理性。

参 考 文 献:

[1] 周琦,陈万军,张波. 硅基GaN功率半导体技术[J]. 电力电子技术,2012,46(12):22-33.

[2] CHANG J, YIN Y L, DU J H, et al. On-chip integrated high-sensitivity temperature sensor based on p-GaN/AlGaN/GaN heterostructure [J]. IEEE Electron Device Letters, 2023, 44(4): 594-597.

[3] KWAN A M H, GUAN Y, LIU X S, et al. A highly linear integrated temperature sensor on a GaN smart power IC platform[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(8): 2970-2976.

[4] ARIVAZHAGAN L, MOHAMMED JARNDAL A H, CHANDER S, et al. Self-heating analysis of GaN-HEMT for various ambient temperature and substrate thickness [C]//2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems. Coimbatore, India. 2020: 267-270.

[5] LANDESMAN J P. Micro-photoluminescence for the visualisation of defects, stress and temperature profiles in high-power III - V's devices[J]. Materials Science and Engineering: B, 2002, 91: 55-61.

[6] LI L, WAKEJIMA A. Polarization-engineered quaternary barrier InAlGaN/AlGaN heterostructure field-effect transistors toward robust high-frequency power performance in AlGaN channel electronics[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(11): 5535-5540.

[7] MADHUSOODHANAN S, SANDOVAL S, ZHAO Y, et al. A highly linear temperature sensor using GaN-on-SiC heterojunction diode for high power applications [J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(8): 1105-1108.

[8] SARUA A, JI H F, KUBALL M, et al. Integrated micro-Raman/infrared thermography probe for monitoring of self-heating in AlGaN/GaN transistor structures[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2006, 53(10): 2438-2447.

[9] NIROULA J, TAYLOR M A, XIE Q Y, et al. Record high temperature performance in scaled AlGaN/GaN-on-Si HEMTs up to 500℃ [C]//2024 Device Research Conference. College Park, MD, USA. 2024: 1-2.

[10] SUN J, WEI J, ZHENG Z , et al. Short circuit capability characterization and analysis of p-GaN gate HEMTs under single and repetitive tests [J] IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(9): 8798-8807.