

特约专栏

大功率器件及材料的热特性表征技术研究进展

郭怀新¹, 黄语恒¹, 黄宇龙¹, 陶 鹏², 孔月婵¹, 李忠辉¹, 陈堂胜¹

(1. 南京电子器件研究所 微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室, 江苏 南京 210016)

(2. 上海交通大学材料科学与工程学院 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 以氮化镓(GaN)为代表的第三代半导体高功率密度的发展受限于自身热积累效应引起器件结温升高问题, 严重导致器件性能和可靠性的下降。因此, 器件的热管理已成为大功率器件研发和应用领域的一个重要研究方向, 而器件本身及其材料的热特性表征贯穿于功率器件散热技术开发的整个过程, 是评估和指导热管理研发的重要途径。为此, 综述了国内外正在开展的器件芯片级热特性表征技术研究进展, 系统分析了器件结温、外延薄膜热导率、界面热阻等热性能表征技术的优势及局限性, 并阐述了这些热性能表征技术对芯片级热管理开发提供的技术指导及其面临的技术挑战。

关键词: 功率器件; 热管理; 结温; 热导率; 界面热阻

中图分类号: TN386 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2018)12-1017-07

Research Progress on the Thermal Characterization Technology of High Power Device and Material

GUO Huaixin¹, HUANG Yuheng¹, HUANG Yulong¹, TAO Peng²,
KONG Yuechan¹, LI Zhonghui¹, CHEN Tangsheng¹

(1. Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

(2. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With development toward high power density of the third-generation semiconductor, represented as GaN devices, the performance and reliability of power devices will be degraded seriously, limited by heat accumulation problem which leads to the rise of junction temperature. Thus, the thermal management has become an important area in the research and application of power device, and the thermal characterization of the device and self material, which appears throughout the whole development process of dissipation techniques, is a critical evaluation and direction about thermal management. For this, research progress of advanced thermal characterizations for chip-level heat dissipation technology is reviewed in detail, and the advantages and limitations of thermal characterizations, including junction temperature of device, thermal conductivity of epitaxial film and thermal boundary resistance, are analyzed systemically. Meanwhile, the technical guidance and challenges of those thermal characterizations for chip-level thermal management are expressed.

Key words: power device; thermal management; junction temperature; thermal conductivity; thermal boundary resistance

1 前 言

随着半导体器件的功率、射频、集成度的不断提高, 产生的高功耗会使器件芯片的工作温度急剧增加, 近而

导致器件性能及可靠性等指标的迅速恶化, 尤其是对以氮化镓(GaN)为代表的第三代功率器件来讲, 其热效应导致其大功率性能优势远未充分发挥, 这也对大功率器件的热管理提出了越来越高的要求^[1-3]。可以说, 热管理已经成为制约以 GaN 为代表的大功率器件进一步发展和应用的最大瓶颈, 而器件的热管理技术包括散热材料及对应的器件工艺兼容性开发和评估, 从材料角度来讲, 器件自身材料的热特性评估则贯穿于器件热管理开发的整个过程, 是表征和指导散热技术优化和设计的重要途径; 而从器件角度来讲, 器件温度是影响其性能的重要

收稿日期: 2018-05-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0406100); 重点实验室基金资助项目(6142803030203)

第一作者: 郭怀新, 男, 1984 年生, 高级工程师, Email: guohuaixin@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.12.09

因素之一，是对器件寿命及可靠性评估的主要方法^[3-5]。因此，随着以氮化物为代表的第三代功率半导体技术和应用的发展，大功率器件及材料的热特性表征技术已成为器件热管理技术的重要研究热点之一。

目前，功率器件热管理技术已由传统的系统级向封装级和芯片级方向发展。系统级和封装级热管理由于尺寸的宏观性，其热管理材料的热特性测试评估技术十分完善；而芯片级热管理由于涉及芯片结构和材料的微纳尺寸维度，其热管理过程中涉及的热特性评估由单纯的系统级材料散热能力表征扩展到对器件结温、界面热阻及微纳薄膜热导率等热性能的表征^[1-7]。由于功率器件芯片级散热技术的开发较晚，导致热管理过程中涉及的微纳薄膜热导率、界面热阻和器件结温等热特性的精确表征技术的研究较为滞后，已成为芯片级热管理领域急需解决的关键问题。

2 半导体外延薄膜及界面材料热性能表征

以 GaN 为代表的第三代半导体功率芯片的材料组成包含衬底层和 GaN 外延功能层，其功能层因不同的芯片结构设计而不一致，但其外延层材料厚度在几十纳米至几个微米之间，且器件的热源区位于功能外延层中，其外延材料的传热能力严重影响到器件性能和可靠性。同时，在器件封装级和芯片级热管理开发过程中不可避免地遇到纳米级或微米级的异质界面，该界面的传热能力也严重制约器件的散热能力。但目前针对半导体器件尤其是 GaN 器件的外延薄膜及界面材料热性能研究报道较

少，这是由于适合于热测试技术的样品制备困难，且微纳尺度薄膜材料的测试技术也未有统一的标准，应用到半导体微纳材料热物性测试中的有时域热反射法 (time-domain thermorelectance, TDTR)、 3ω 法、基于拉曼光谱的微桥法和基于拉曼光谱仿真拟合法。

2.1 TDTR 测试法

TDTR 是基于飞秒激光的时间分辨率泵浦-探测技术，于 80 年代开发的测试途径，但直到 90 年代才公布其详细的测试方案。其原理是利用飞秒激光对样品进行加热，在 ps 级时间内用探测光对样品表面的反射率进行测量，利用表面反射率随时间的变化来获取温度变化趋势从而获取材料的热学性质，如图 1a 和 1b 所示^[8, 9]。该测试技术的优势是采用飞秒激光探测，时间分辨率高，不仅可以测试薄膜热导率还可以测试其界面热阻；但由于待测样品表面需要蒸镀吸热层导致其测试精确性受影响，且测试台需自行搭建，测试复杂、经济性较差。该技术的难点是测试光学平台的合理搭建和吸热层的控制，目的是提升测试精度。目前，以美国 DARPA 为主的芯片级热管理项目中多采用该测试技术进行分析，主要用于超薄薄膜的表征和界面热阻的测试。2015 年，Cho 等利用该测试技术对化学气相沉积法生长的 AlGaIn 势垒层的热性能进行分析，测试得到其热导率为 $(16.6 \pm 3.2) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，如图 1c 和 1d 所示^[2]。

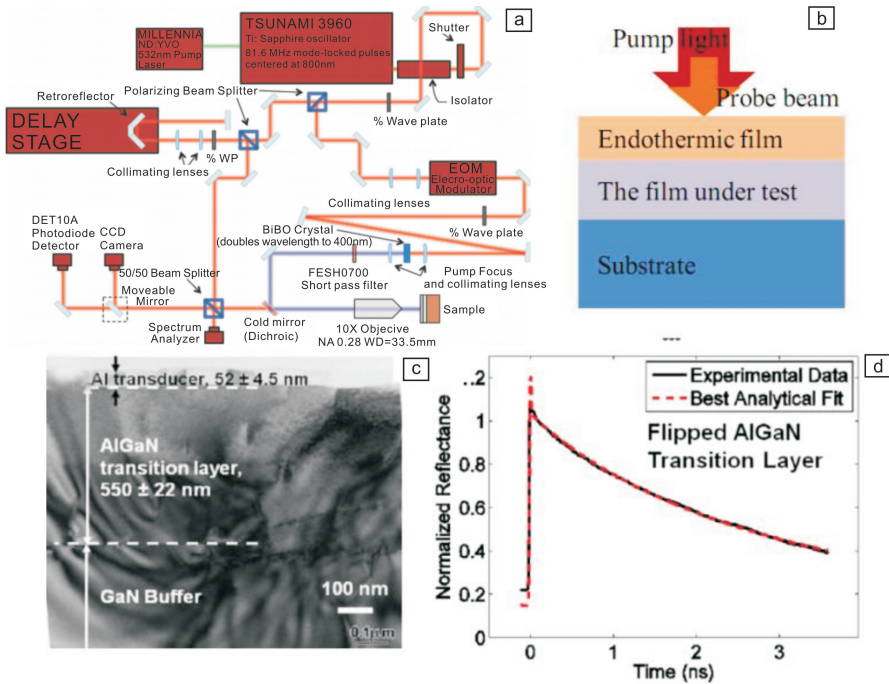
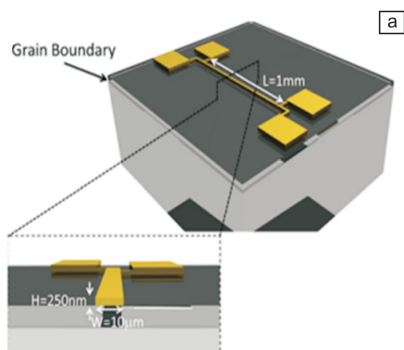


图 1 时域热反射测试技术：(a) 系统^[9]，(b) 结构，(c) AlGaIn 样品的 SEM 照片^[2]，(d) AlGaIn 势垒层的热性能测试结果^[2]

Fig. 1 Time-domain thermorelectance technology: (a) test system^[9], (b) structure, (c) SEM image of AlGaIn sample^[2], (d) test result of thermal performance of AlGaIn barrier layer^[2]

2.2 3ω 测试法

3ω 测试法是 80 年代末提出的一种用于块体材料的热导率测试技术, 随着测量手段的发展和进步, 已扩展到微米级薄膜材料的热导率测量。如图 2a 所示, 其原理是通过电极结构设计, 对待测材料施加以 ω 频率震荡的交流电, 使加热功率以 2ω 频率震荡, 温度和电阻也以 2ω 频率震荡, 反馈出 3ω 的电压信号, 进而获得待测材料的热学性质^[7, 10]。该测试技术的优势是将热学信号转化为稳定的电信号, 易于获取和处理; 但却受限于加热频率范围, 热穿透深度大, 对 $10\ \mu\text{m}$ 以上的薄膜材料



测试更为准确, 同时需制备电极, 增加了测试误差。该技术的难点是如何有效设计电极和通过工艺控制附加热阻, 使电极的自身热影响降低到最低。因此, 利用该技术针对半导体器件薄膜材料热导率测试的报道并不多, Liu 等利用该测试方法对蓝宝石衬底上外延生长 GaN 半导体结构的 GaN 薄膜层和不同 Al 掺杂含量的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 薄膜进行评估, 其中 GaN 层的厚度为 $18.5\ \mu\text{m}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层厚度在 $0.3\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 之间, 测试结果如图 2b 所示, GaN 外延层的热导率测试值随温度的变化规律符合理论变化, 而 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的热导率整体略高于文献报道的均值水平^[11]。

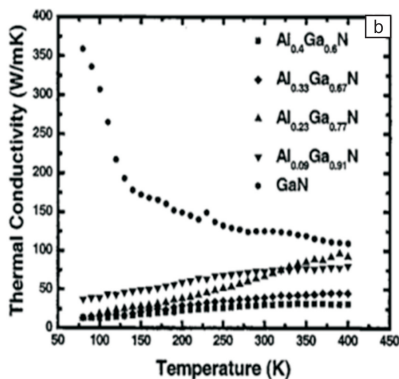


图 2 3ω 测试技术: (a) 结构示意图^[10], (b) GaN 薄膜和不同 Al 掺杂含量的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 薄膜的热导率随温度变化的曲线^[11]

Fig. 2 3ω test technology: (a) schematic of the test structure^[10], (b) variation curves of thermal conductivity of GaN film and different Al-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ films with temperature^[11]

2.3 基于拉曼光谱微桥法

基于拉曼光谱的微桥测试方法是近几年由 University of Bristol、Element Six Technologies 和 University of Ulm 等大学和研究机构合作开发, 用于测试金刚石薄膜和 GaN 器件集成散热技术中的金刚石多晶外延薄膜的热导率。其原理是吸取微桥法的测试结构和优点, 结合拉曼光谱法测试出热源中心区域的温度分布, 并利用数值仿真技术进行拟合求得待测薄膜热导率(图 3a)^[12]。图 3b 和 3c 为设计的微桥结构的正面和侧面示意图, 其衬底刻蚀尺寸决定了测试精度, 一般选取 $1000\ \mu\text{m}\times 250\ \mu\text{m}$ 的刻蚀结构, 且在薄膜中心表面蒸镀线性热源^[5, 12, 13]。该方法的优势是拉曼光谱的分辨率高, 可精确测试出其热源区的温度分布, 利用不同热源功率, 结合仿真计算, 拟合的热导率可直观反映出其偏离度和精确性; 缺陷是测试结构制备困难, 受衬底刻蚀工艺的限制, 同时仅适合各项同性薄膜材料的热性能测试。该表征技术的难点是需要结合热仿真计算进行拟合, 对测试人员的专业水平要求较高。目前该技术多应用于半导体器件热管理开发中薄膜材料的热导率测试, 2015 年 Anaya 等^[5]利用该测试方法, 对 Si 衬底上微波等离子体化学气相沉积法 (MWCVD) 外延生长的金刚石多晶薄膜进行测试研究,

为了提升测试精度, 在金刚石薄膜测试点生长 Si 纳米线, 结果表明金刚石多晶薄膜厚度为 $680\ \text{nm}$ 时, 其热导率为 $(75\pm 5)\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 如图 3d 所示。

2.4 基于拉曼光谱-仿真拟合技术

基于拉曼光谱-仿真拟合技术的开发主要是对半导体器件的界面热阻进行表征, 其原理是基于拉曼光谱测试出界面层两侧材料的温度分布, 并结合数值仿真技术进行拟合求得待测界面的热阻, 如图 4a 和 4b 所示^[6]。该技术的优势是可以借助拉曼光谱技术直接得到界面两侧的温度, 空间分辨率高, 直接体现为温度测试精度高; 再结合数值仿真技术拟合, 其测试方法简单, 可直接对 GaN 器件中的界面热阻进行测试, 更直观经济, 且是无损检测, 实用性强。但该表征技术存在一定局限性, 测试材料受到拉曼光谱的限制, 即所采用的拉曼光需对界面及两侧的材料具有一定穿透性, GaN 和 GaAs 等半导体材料即可满足该拉曼测试要求。因此, 目前国际上先进的芯片级热管理研发机构多采用该方法对器件的热阻进行测试分析。Pomeroy 等^[14]利用该测试技术分析了金刚石和 GaN 芯片近结集成的界面热阻, 如图 4c 所示, 依据测试得到 GaN 层和 Diamond 层热分布, 进一步拟合可得 GaN-Diamond 界面热阻为 $27(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{GW}$, 为集成键合工艺的进一步优化作指导。

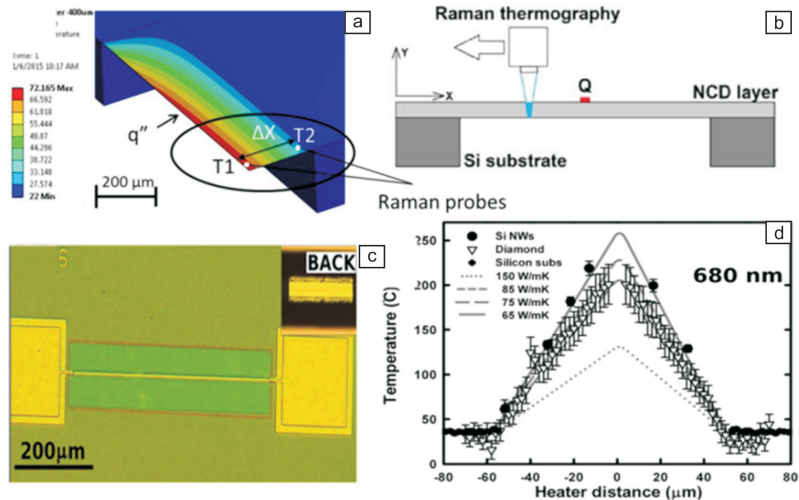


图 3 基于拉曼光谱微桥法: (a)原理示意图^[12], (b)微桥结构正面示意图^[12], (c)微桥结构侧面示意图^[5], (d) 金刚石多晶薄膜
导热率测试结果分析^[5]

Fig. 3 Raman thermography assisted by micro-bridge method: (a) schematic of test principle^[12], (b) frontal^[12] and (c) side^[5] schematic of
micro-bridge structure, (d) analysis of thermal conductivity of diamond polycrystalline films^[5]

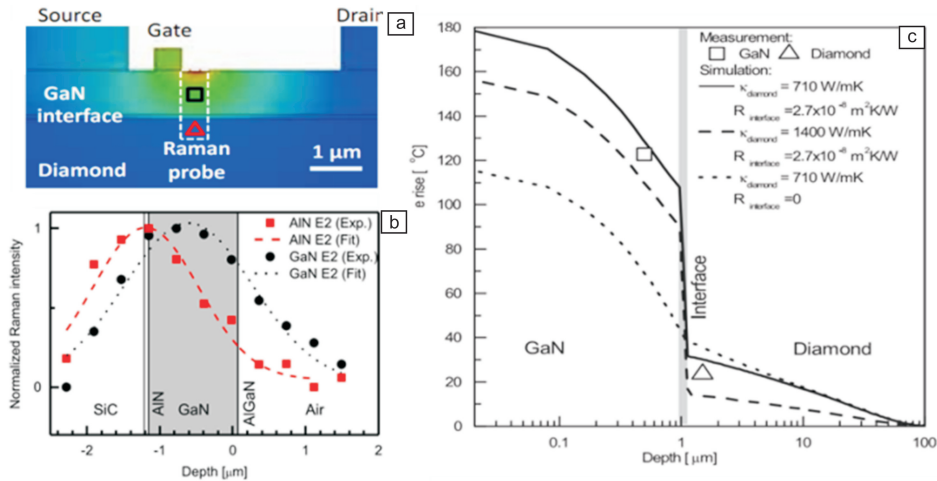


图 4 基于拉曼光谱-仿真拟合技术: (a)界面热阻测试结构^[6], (b)界面热阻测试原理^[14], (c) GaN/Diamond 界面热阻结果分析^[6]

Fig. 4 Raman thermography assisted by simulation fitting technology: (a) test structure of interface thermal resistance^[6], (b) theory of interface
thermal resistance^[14], (c) result analysis of GaN/Diamond interface thermal resistance^[6]

3 器件结温表征技术

功率器件的温升严重影响其性能和可靠性,对功率器件自身材料进行热特性表征可以优化和指导热管理技术的开发,但无法反映器件整体的散热能力及其对器件性能的影响。因此,开展功率器件的结温测试对器件的应用极为重要,目前针对功率器件的结温测试方法较多,应用较为广泛的为电学法、红外热成像法和拉曼光谱法。

3.1 电学法

电学法的本质是基于器件的温度敏感性参数(TST),针对 GaN 功率器件其原理是利用器件结温的电压和温度

的线性关系(为 K 系数,单位 K/mV),通过静态法或动态电学测试途径,结合计算得到器件在不同功率下的实际结温,如图 5a 所示^[4]。该表征方法的优势是技术成熟、经济便捷,然而通过测试计算得到的温度为平均温度,且器件自身热阻的影响会导致测试精度变差,故仅能作为器件整体结温的评估。该技术的难点是线性 K 系数的标定, K 系数的线性特征是假定测试电流为恒定的情况下得到,然而因器件自热特性导致电流难以恒定,因此不同电流情况下的 K 系数会发生变化。目前该测试技术多应用于半导体器件产品的结温和结壳热阻的评估上,极少用于器件热管理开发中。如 Sommet 等^[15]利用该技术对 GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)环境温度对

器件自热效应的影响进行了分析; Mohammad 等^[16] 利于该技术测试了 0.15 μm 栅长 GaN HEMT 器件的结温在不

同直流功率下的变化, 并对 K 系数进行了标定, 如图 5b 所示。

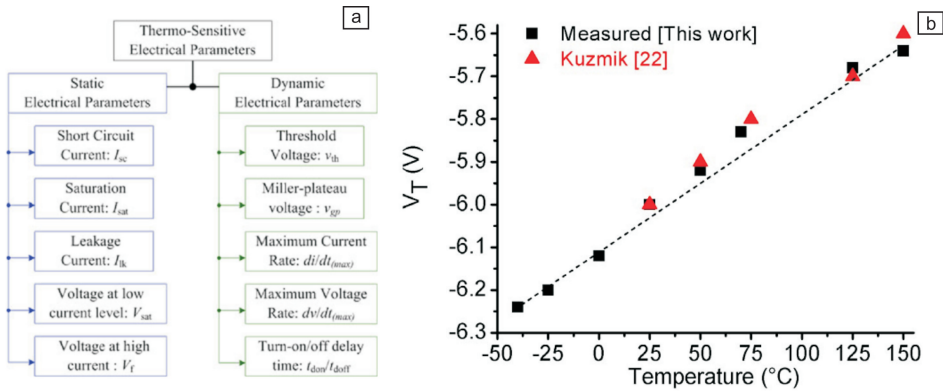


图 5 电学法: (a)测试步骤^[4], (b) K 系数结果分析^[16]

Fig. 5 Electrical method: (a) test process^[4], (b) result analysis of K coefficient^[16]

3.2 红外热成像法

红外热成像法的本质是基于材料因热产生红外辐射, 其原理是红外检测仪器通过光学系统将被测样品表面的红外辐射接收并聚焦在红外探测器上, 且把目标的红外辐射信号转换成便于直接处理的电信号, 并经放大处理, 近而以二维热图像的形式显示被测试样品表面的温度值或温度场分布^[3, 17, 18], 如图 6a 所示。其优势是该表征技术可测试二维平面热分布, 且已形成固定的测试设备和规范, 过程便捷、经济。然而, 其测试精度受发射率和光路散热因素影响, 难以消除; 且空间分辨率因红外波

段自身的限制, 大于 3 μm , 导致测试得到的温度为区域平均温度, 目前难以满足 GaN 功率器件对 1 μm 内空间分辨率的要求。但由于该技术的成熟度高、便捷性好等优势, 也被广泛用于半导体产品的热评估和热管理开发中。如 Hirama 等^[17] 利用该技术对比了 SiC 衬底上和开发的Diamond衬底上的 GaN 芯片在相同功率密度下的结温, 发现当功率密度为 3.2 W/mm 时, Diamond 衬底 GaN 的芯片结温下降了 27.8%, 如图 6b 所示, 可以看出测试结果直观地体现了器件表面的二维温度分布。

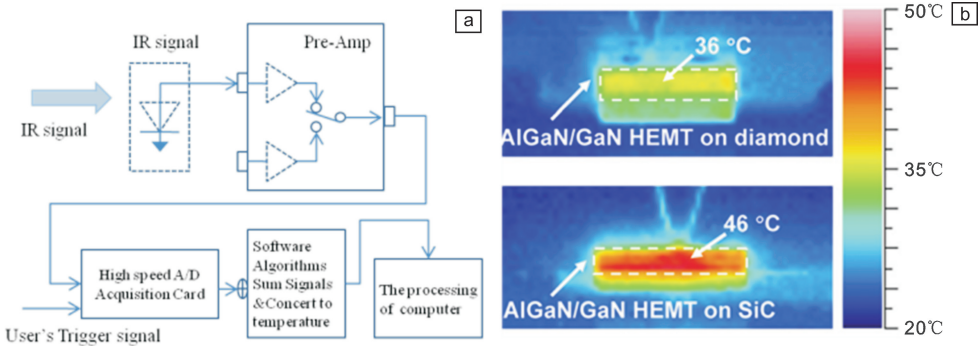


图 6 红外热成像法: (a)原理示意图, (b) Hirama 等测试的不同衬底上的 GaN 芯片在相同功率密度下的结温^[17]

Fig. 6 IR imaging method: (a) schematic of test principle, (b) junction temperature of GaN on different substrates at the same power density tested by Hirama *et al.*^[17]

3.3 拉曼光谱法

拉曼光谱测温技术是 21 世纪初由英国布里斯托大学 Kuball 教授研究团队^[19] 首先应用于 GaAs、GaN 等微波功率器件的测试方法, 现已建立成熟的结温测量体系。其原理是基于半导体材料的晶格振动频率会随温度变化而变化, 即可通过测量其材料拉曼峰的改变来表征被测器件或材料聚焦区域的温度^[19, 20], 如图 7a 和 7b

所示。该测试技术的优势是具有较高的空间分辨率(可达 0.5 μm), 同时对于透明材料可进行三维空间的温度分布测试, 这是其他方法不具备的特色。该方法缺陷是测试成熟度低, 只能进行点测试, 尚未形成专有测试设备, 且对测试过程中操作人员的操作水平和专业水平要求较高^[19-22]。目前该技术主要应用于半导体器件的热管理开发中的热特性表征, Hodges 等^[19] 基于该技术对

GaN 芯片近结区域的热分布进行了分析,测试出芯片热源区三维方向的温度分布及梯度(图 7c);而 Power 等^[21]则利用该技术测试出 GaN 有源区的水平方向温度分布

(图 7d),分析了不同深度 GaN 层的温度情况,同时对仿真结果更为精确地分析了 GaN 器件有源区域的温度分布情况。

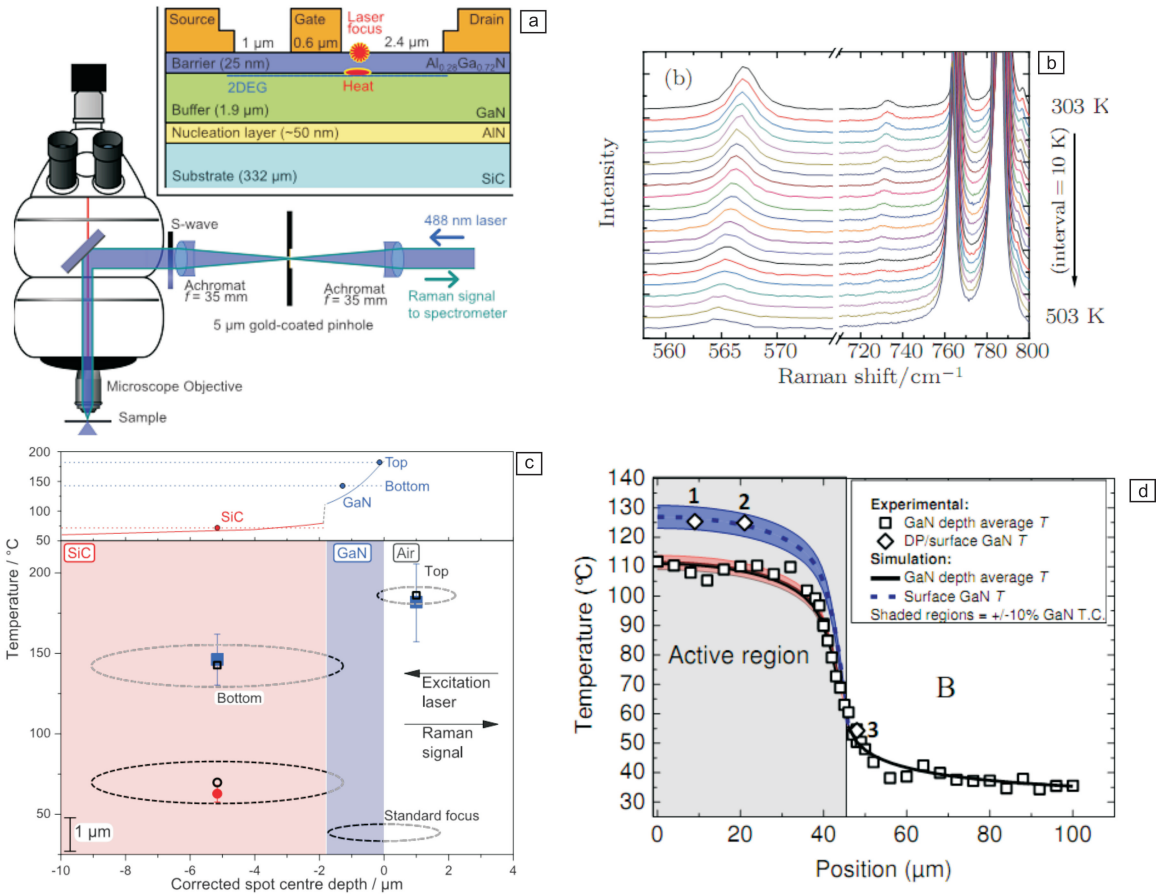


图 7 拉曼光谱法: (a) 系统示意图^[19], (b) 原理^[20], (c) Hodges 等测试的 GaN 芯片热源区三维方向的温度分布及梯度^[19], (d) Power 等测试的 GaN 有源区的水平方向温度分布^[21]

Fig. 7 Raman thermography method: (a) schematic of test system^[19], (b) theory^[20], (c) temperature distribution and gradient in three dimensional direction of GaN heat source region tested by Hodges *et al.*^[19], (d) horizontal temperature distribution in GaN active zone tested by Power *et al.*^[21]

4 结 语

基于半导体功率器件对芯片级热管理开发的迫切需求,人们进而对器件及材料热特性的评估技术提出了更高要求。目前半导体外延材料界面热阻的测试方法主要有时域激光热反射、基于拉曼光谱的微桥法和基于拉曼光谱-仿真拟合技术,其中时域激光热反射技术的光路平台搭建极为复杂;基于拉曼光谱的表征技术的样品制备困难,且在测试过程中需要较高的热领域专业技术。因此,如何固化测试流程、简化测试过程、统一测试规范是未来研究面临的极大挑战。而针对器件结温测试技术,从产品散热能力评估方面,电学法和红外热成像法可以满足生产应用的要求;但从高集成度、高功率密度器件

的研发和热管理技术开发方面,仍然需要借助拉曼光谱测试技术,因其高空间分辨率和三维测试特性使其满足现有功率器件的发展要求,但该技术依然处于实验室的自建平台表征阶段,并无规范性和统一性;因此,该技术可挖掘的潜力巨大,是未来高集成度芯片级热评估的重要途径。

参考文献 References

[1] Athikom M, Pomeroy J W, Lossy R, *et al.* *Solid-State Electronics* [J], 2011, 57(1): 14-18.

[2] Cho J W, Li Z J, Elah B G, *et al.* *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*[J], 2013, 3 (1): 9-85.

[3] Baker N, Dupont L, Stig M N. *IEEE Transactions on Power Electronics* [J], 2017, 32(4): 3099–3111.

[4] Luo H Z, Chen Y Y, Sun P F, et al. *IEEE Transactions on Power Electronics* [J], 2016, 31(7): 5122–5131.

[5] Anaya J, Rossi S, Alomari M, et al. *Applied Physics Letters* [J], 2015, 106(22): 223101.

[6] Dumka K, Fanning D M, Kuball M. *Applied Physics Letters* [J], 2014, 104(8): 083513.

[7] Paskov P, Slomski M, Leach J H. *AIP Advances* [J], 2017, 7(9): 095302.

[8] Ziade E, Yang J, Brummer G. *Applied Physics Letters* [J], 2017, 110(3): 031903.

[9] Bougher T L, Yates L, Lo C F. *Nanoscale and Microscale Thermo Physical Engineering* [J], 2016, 20(1): 22–32.

[10] Tai K P, Lawrence A, Harmer M P, et al. *Applied Physics Letters* [J], 2013, 102(3): 034101.

[11] Liu W, Balandin A A. *Journal of Applied Physics* [J], 2005, 97(7): 073710.

[12] Kuball M, Pomeroy J W, Calvo J A, et al. *Novel thermal management of GaN electronics: diamond substrates* [C]// American Society of Mechanical Engineers; *Proceedings of the ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems*. California: American Society of Mechanical Engineers, 2015: V003T08A001-V003T08A001.

[13] Hodges C, Calvo J A, Stoffels S, et al. *Applied Physics Letters* [J], 2013, 103(20): 202108.

[14] Pomeroy J W, Kuball M. *Journal of Applied Physics* [J], 2015, 118(14): 144501.

[15] Sommet R, Mougnot G, Quere R. *Microelectronics Journal* [J], 2012, 43(9): 611–617.

[16] Mahammad A A, Rezazadeh A A, Christophe G. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* [J], 2016, 64(11): 3483–3489.

[17] Hiram K, Taniyasu Y, Kasu M. *Applied Physics Letters* [J], 2011, 98(16): 162112.

[18] Yazawa K, Kendig D, Shakouri A. *International Conference on Electronic Packaging & Imaps All Asia Conference* [C]. Kyoto: ICEP-IAAC Proceedings, 2015: 395–401.

[19] Hodges C, Pomeroy J, Kuball M. *Journal of Applied Physics* [J], 2014, 115(6): 064504.

[20] Xue Xiaoyong(薛晓咏), Xu Shengrui(许晟瑞), Zhang Jincheng(张进成). *Chinese Physics B*(中国物理B) [J], 2012, 21(2): 027803.

[21] Power M, Pomeroy J W, Otoki Y, et al. *Physica Status Solidi* [J], 2015, 212(8): 1742–1745.

[22] Batten T, Manoi A, Uren M J. *Journal of Applied Physics* [J], 2010, 107(7): 074502.

(编辑 吴 锐)

热点追踪

【编者按】2018 年 10 月，美国总统行政办公室发布了《美国先进制造业领先地位战略》报告（《Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing》，以下简称报告）。该报告由美国国家科学技术委员会下属的先进制造分委会起草。报告分析了影响美国先进制造业创新和竞争力的 9 大关键因素，以及借此愿景的实现将助力的 3 大战略目标。笔者研读报告全文，梳理了报告中的重点、亮点内容，以帮助读者快速了解美国先进制造业的领先优势及相关战略措施，促进我国先进制造业的快速提升。

《美国先进制造业领先地位战略》报告解读

1 影响美国先进制造业创新和竞争力的 9 大关键因素

- (1) 技术的快速发展及其与经济的结合，正在改变产品和服务的构思、设计、制造、分发和支持的方式；
- (2) 先进制造业的增长需要先进的技术型基础设施；
- (3) 对先进制造业的投资依赖于可靠和可预测的知识产权；

- (4) 新兴市场、出口和贸易受到先进制造业的影响；
- (5) 先进制造业领先地位需要得到能够保护和促进美国工业的贸易政策的支持；
- (6) 制造业带动全球经济；
- (7) 稳固的国防工业基础及具有弹性供应链能力的国内制造业部门，对国家安全和繁荣至关重要；
- (8) 先进制造业劳动力需要具备科学、技术、工程和数学(STEM)方面的知识基础；

(9) 先进制造业需要联邦、州和地方政府的共同支持。

2 美国先进制造业的战略愿景

报告围绕美国旨在实现的“维持美国先进制造业的领先地位, 以确保国家安全和经济繁荣”愿景目标, 提出 3 大战略措施及目标:

(1) 开发和推广新的制造技术 包含 5 个具体目标: 夺得智能制造领域的未来市场、开发世界领先的材料和加工技术、确保通过本土制造获取医疗产品、保持电子设计和制造的领先地位、加强食品和农业制造业的机会。

(2) 教育、培训和劳动力输送 包含 4 个具体目标: 吸引并培养未来劳动力、更新并扩大职业和技术教育途径、推广学徒制并获得业界认可的证书、实现技术工人与所需行业相匹配。

(3) 扩大国内制造业供应链能力 包含 4 个具体目标: 增加中小型制造商在先进制造业中的作用、鼓励制造业创新生态系统的建立、加强国防制造业基础研究、加强农村社区先进制造业的发展。

3 高性能先进材料的重要地位

报告指出, 未来新兴市场将由多种技术进步共同驱动, 包括智能制造和数字制造系统、工业机器人、人工智能、增材制造、高性能材料、半导体和混合电子、光子学、先进纺织品、生物制造、食品和农业制造业等。

报告中特别强调, 高性能先进材料对于开发新产品以及国家和经济安全至关重要。它们的应用涉及国防、能源、运输、航空航天和医疗保健等多个工业部门。但不幸的是, 一般从材料发现到市场应用需要 20 年甚至更长的时间。通常, 材料的性能推动其应用, 先进材料的定义也往往取决于材料的预期应用。例如, 目前的先进材料可以包括用于高超声速飞行器的极端温度复合材料、高能材料、高强度轻金属合金、合成生物材料、用于先进过滤系统的防腐膜、用于发电厂高效涡轮机的超高温结构材料等等。

美国正积极准备开发世界领先的先进材料及加工技术, 此目标包含高性能材料、增材制造和关键材料研发 3 个技术优先方向:

(1) 高性能材料: 现代轻质金属、复合材料和其他

先进材料的发现和发展, 在国防、能源、运输和其他部门具有显著提高材料性能的潜力。美国一部分高科技公司使用昂贵的先进材料和加工技术, 使其产品性能保持在国际最前沿; 而另外一部分公司则是大批量、低成本生产的领导者, 在降低生产成本方面具有丰富的经验。若非竞争对手, 高技术型公司和大批量生产型公司之间可进行专业知识转移, 这样既可以降低高性能产品的成本, 又可以提高低成本产品的性能, 为整个行业带来显著益处。使用高性能计算预测材料行为的强大新方法将促进这种知识转移, 例如材料基因组计划开创的计算方法, 可以计算出先进材料系统在加工和使用中的可能属性, 从而最大限度地减少目前设计新材料所需要的昂贵且耗时的实验。

(2) 增材制造: 使用三维印刷和相关技术直接创建结构材料的能力, 正在从每个部件的成本到系统性能多方面, 深刻地影响着美国的商业和国防制造。例如, 单片高性能金属零件的增材制造可以为航空航天领域带来可观的重量减轻和性能提升。类似的, 生物细胞印刷有望在未来直接培育出人体组织和器官。

报告指出, 增材制造在制造行业的充分应用取决于能否可靠地设定加工参数, 从而在不同机器和不同地点之间产生可靠和可重复的生产, 需要机器/工艺标准化和可靠成分的材料质量。随着增材制造生产能力的扩大, 需要在基础研究的支持下进行新的标准化工作, 以确保生产零件的可重复性和可靠性。

另外, 在过程控制和过程监控方面还需继续进步, 以确保增材制造技术成为可行的生产替代方式。研究开发新的方法来测量和量化材料和加工技术之间的相互作用, 以更好地理解材料-工艺-结构关系。建立新的标准来支持增材制造过程数据的表示和评估, 以确保零件的质量和重复性。扩大研究工作, 将计算技术应用于增材制造技术, 包括仿真和机器学习。

(3) 关键材料: 包括关键矿产资源, 它们是支撑美国能源生产、国防技术、工业品和整体经济的众多先进技术的关键组成部分, 它们都面临资源枯竭的风险。这些材料通常具有独特性质, 难以用替代材料系统复制。然而, 由于缺乏强劲而有弹性的国内生产能力, 使得某些关键材料的供应链明显脆弱。

(西北有色金属研究院朱宏康 编译)