Applications of Electrical Method, Infrared Method and Thermoreflectance Method in Junction Temperature Measurement of β-Ga_2O_3 SBD

ZHAI Yuwei, LIU Yan, REN Yulong, JING Xiaodong, WU Aihua*
(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: In response to the junction temperature measurement requirements of β-Ga_2O_3 Schottky barrier diode, a typical β-Ga_2O_3 SBD is subjected to junction temperature measurement using electrical, infrared, and themoreflectance methods. The junction temperature is measured by an electrical thermometer that complies with JESD51-14 standards, a mid-infrared-band micro infrared thermal imager, and a thermoreflectance thermal imager illuminated by 470 nm light source. Thermal simulation is conducted on the DUT by using a finite elements simulation software. The junction temperature measured by electrical method is lower about 5 ℃ ~ 10 ℃ than the peak junction temperature obtained by infrared method, themoreflectance method, and finite element simulation, and is basically consistent with the average temperature of the chip obtained by infrared method and finite element simulation. After analysis, lack of spatial resolving capability and average effect are the main reasons for lower junction temperature measured by electrical method. Infrared or thermoreflectance method should be chosen to measure the peak junction temperature of β-Ga_2O_3 SBD.

Key words: β-Ga_2O_3 SBD; junction temperature; electrical method; infrared method; thermoreflectance method
EEACC: 7320R **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.009

电学法、红外法、热反射率法在 β-Ga_2O_3 SBD 结温测量中的应用

翟玉卫, 刘 岩, 任宇龙, 荆晓冬, 吴爱华*
(中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 针对 β-Ga_2O_3 肖特基势垒二极管的结温测量需求, 采用电学法、红外法、热反射率法对一款典型 β-Ga_2O_3 SBD 进行了结温测试。分别采用符合 JESD51-14 标准的电学法测温仪器、中红外波段显微红外热像仪和 470 nm 光源照明的热反射率热像仪对被测件进行了结温测量。利用有限元仿真软件对被测件进行了热仿真。电学法测得的结温低于红外法、热反射率法和有限元仿真得到的峰值结温约 5 ℃ ~ 10 ℃, 与红外法和有限元仿真得到的芯片平均温度基本一致。经分析, 认为不具备空间分辨能力和平均效应是造成电学法测温结果偏低的主要原因。应采用红外法或热发射率法对 β-Ga_2O_3 SBD 进行峰值结温测量。

关键词: β-Ga_2O_3 肖特基势垒二极管; 结温; 电学法; 红外法; 热反射率法
中图分类号: TN325+.3; TH811 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0779-04

近年来, 基于超宽禁带半导体材料 β 型氧化镓(β-Ga_2O_3)的功率器件成为研究热点。β-Ga_2O_3 材料禁带宽度达 4.8 eV, 远高于三代半导体 GaN 的 3.4 eV 和 SiC 的 3.3 eV, 其巴利加优值是 GaN 材料的 4 倍、SiC 材料的 10 倍、Si 材料的 3 400 倍[1]。上述特性使得 β-Ga_2O_3 成为制备功率器件如功率开关器件的优选材料之一, 在高压、高功率电子和射频电子方面也有着较好的潜力。然而, β-Ga_2O_3 材料热导率为 0.1 W/(cm/K) ~0.3 W/(cm/K), 仅为 Si 的 33%, GaN 的 10%, SiC 的 5%[2]。较低的热导率会导致器件在高功率条件下由于自热效应而产生高温, 这必然会限制 β-Ga_2O_3 材料在高功率场合的应用。改善 β-Ga_2O_3 功率器件的散热性能[3-6], 降低其结温成为一个重点研究方向。

多种技术手段被用于 β-Ga_2O_3 功率器件的结温测量[7-10], Wang 等[2]用电学法测量了双面封装的垂直 β-Ga_2O_3 肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)的结温和热阻, Noh 等[11]采用热反射率(thermoreflectance)法和拉曼(Raman)法对金刚石衬底的 β-Ga_2O_3 场效应晶体管进行了结温测量。考虑到不同测温技术都有着自身的适用范围, 测量结果会受到被测件结构、材料等因素的影响[12-13]。氧化镓功率器件方面, 目前研究主要集中在 SBD 以及 MOSFET 两类器件。相对于 MOSFET, β-Ga_2O_3 SBD 制备难度低, 可行性更强, 有望率先实现应用, 已成为国际研究热点和焦点。这里采用电学法[14-15]、红外法[16-17]、热反射率法[18-19]对一款 β-Ga_2O_3 SBD 进行了结温测量, 并结合有限元仿真对测温结果与器件结构、材料的关系进行了分析和讨论。

收稿日期: 2024-09-09 **修改日期**: 2024-11-11

1 实验

1.1 被测件

被测件为一款单面封装的垂直 β-Ga_2O_3 SBD，其芯片结构如图 1 所示，金属电极表面积为 2 mm×2 mm，半导体结构表面积为 2.8 mm×2.8 mm。

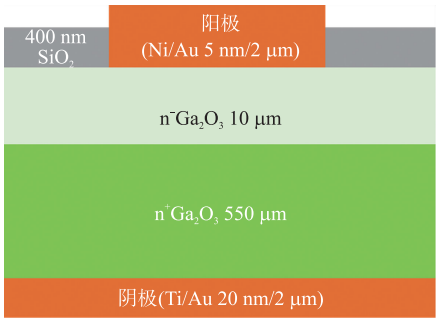

图 1 被测件芯片的结构示意图

封装后的结构如图 2 所示。

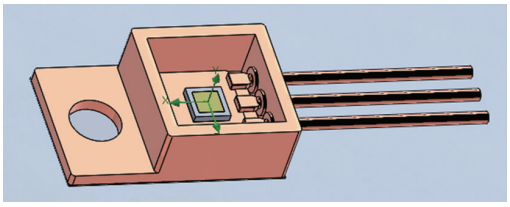

图 2 封装后被测件结构示意图

被测件放置在控温平台上，管壳与控温平台之间涂抹一层导热硅脂，以保证良好的热接触。

1.2 结温测试

采用符合 JESD51-14 标准的电学法测试仪器，以 SBD 的正向导通结电压为温敏参数，直接测量结电压经计算后得到结温。设定控温平台温度为 50 ℃，分别在 1.0 A、1.5 A、2.0 A 三个电流条件下进行结温测量，测得温度变化曲线如图 3 所示，根据电学法测温原理，取温度变化曲线与纵轴的交点为结温 T_J。

采用显微红外热像仪进行结温测量。该仪器敏感波长位于中红外波段，具备发射率修正功能。设定控温平台温度为 50 ℃，在 1.0 A、1.5 A、2.0 A 三个电流条件下对被测件表面温度进行测量，图 4 所示是 1.5 A 下被测件的表面温度分布。采用图像分析工具提取不同区域的温度数据，图中 C1 代表峰值温度区，R1 代表整个芯片表面。

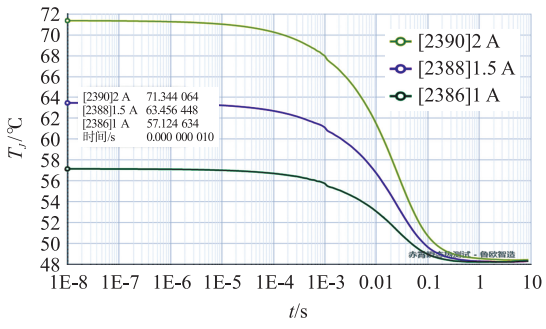

图 3 电学法测得的结温

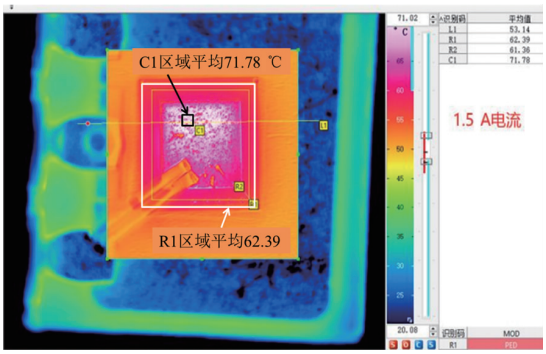

图 4 红外法测得的结温

采用热反射率热像仪进行结温测量。该仪器采用 470 nm LED 作为光源。设定控温平台温度为 50 ℃，在 1.0 A、1.5 A、2.0 A 三个电流条件下对被测件进行了表面温度测试。由于热反射率热像仪视野较小，所以，只对其金属电极峰值温度区域进行了测量。图 5 所示是 1.5 A 电流下的测温结果，为避免金属电极形貌对测温结果的影响，取图中所示较为均匀的白框区域温度平均值为结温。

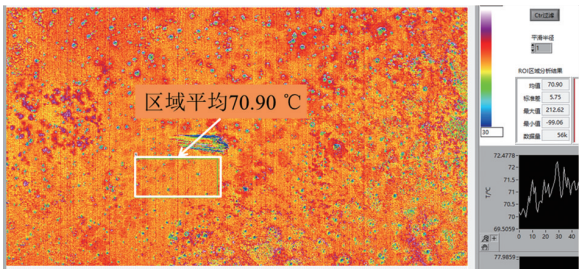

图 5 热反射率法测得的结温

被测件工作在恒流模式下可以保证采用三种方法分别进行测温时消耗在芯片上的功率是相同的。表 1 汇总了三种方法测得的结果。

表 1 结温测试结果对比

加热电流/A	电学法测得结温/℃	红外法测得芯片平均温度/℃	红外法测得峰值温度/℃	热反射率法测得峰值温度/℃
1.0	57.0	56.7	62.7	62.9
1.5	63.0	62.4	71.8	70.9
2.0	71.1	69.0	82.0	81.1

2 有限元仿真

采用有限元仿真手段对被测件进行了稳态热仿真，根据被测件实际结构构建了仿真模型，设定控温平台为 50 ℃，其模型如图 6 所示。

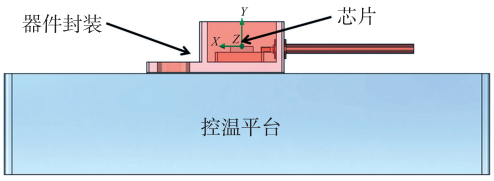

图 6　仿真模型

仿真模型的材料特性参数见表 2。

表 2　材料特性表

部位	材料	热导率/(W/mK)
上电极	Ni/Au	100
半导体	β-Ga_2O_3	18.5
下电极	Ti/Au	25
基板及管壳等	Cu	398

根据 SBD 工作原理,主要的功率消耗点应在金属电极与半导体接触形成的肖特基结区,因此,仿真中设定功率均匀地消耗在肖特基结区。图 7 是 1.5 A 时仿真结果。

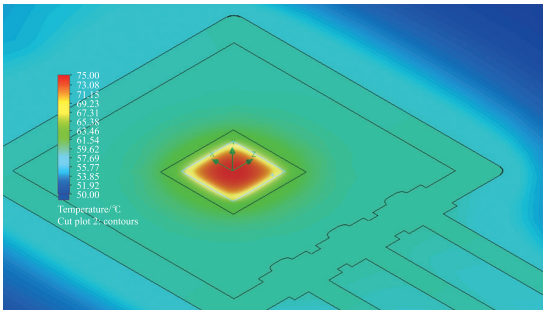

图 7　1.5 A 加热电流时的仿真结果

分别从仿真结果中提取峰值结温和芯片平均温度,并与实验测得的结果进行比较,比较情况见图 8。

测量结果与仿真结果一致性较好。由图 8 的对比可以推断,对于本次测量的 β-Ga_2O_3 SBD,电学法测得结温接近于芯片的平均温度,而红外法和热反射法测得的结温接近于峰值温度。

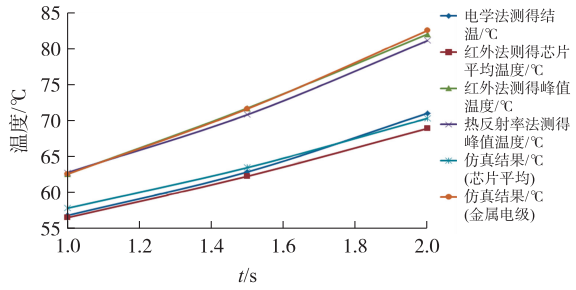

图 8　测量结果与仿真结果对比

3　分析与讨论

这里采用的被测件肖特基结是由于上电极金属与半导体材料的肖特基接触而形成,其面积应与上电极相同。根据电学法测温的原理,理想情况下电学法测得的结温是肖特基结处的温度。由于电学法不具备空间分辨能力,其测得的结温应是整个肖特基结区的平均温度。而通过红外法测温结果可见,肖特基结区的温度分布是不均匀的,红外法和热反射率法具备空间分辨率,可以提取峰值温度,所以,其测温结果高于电学法是合理的。红外法在测量金属时,一般认为由于金属发射率较低所以测温准确度较差。但是,这里的被测件上电极虽然是金属材料,但通过图 4 和图 5 可以观察到其表面较为粗糙,因此具备较高的发射率,结温测试准确度得以保证。

另外一方面,电学法假设测得电压分量中只有正向导通结电压是随着温度变化的。而实际测量过程中,电学法在进行结温测量时其电流从器件的阳极进入,阴极流出,如图 9 所示,其电流路径包括封装管腿、键合线、芯片、焊料、导电底板等。电学法测试仪器测得的电压不仅包括 SBD 的正向导通结电压,还包括了电流路径上其他结构的电阻压降,而电阻两端的压降也会随温度变化。

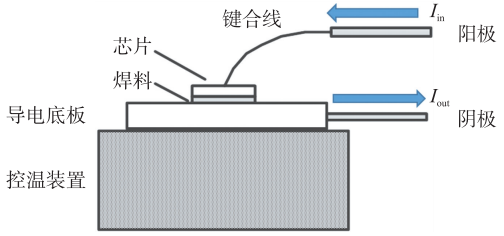

图 9　电学法测量时电流路径

对于 β-Ga_2O_3 SBD 芯片,其功率主要消耗在金属与半导体材料接触形成的肖特基结区,该区域是主要的发热区域,如图 10 所示。但是,即使忽略键合线与导电底板的影响,电学法仪器实际测得的电压也并非只是肖特基结的电压,而是整个芯片垂直方向整体的电压,所以其测得的结温也应是整个器件整体的平均效应。

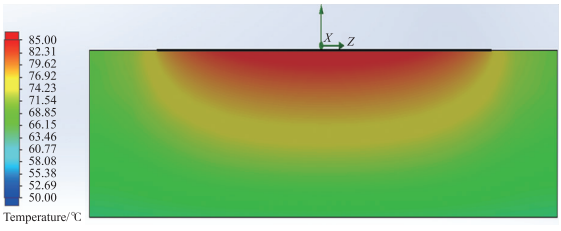

图 10　芯片内部温度分布

所以,电学法测温结果接近芯片整体平均温度具备合理性。

4　结论

利用电学法、红外法、热反射率法对一款 β-Ga_2O_3

SBD 进行了结温测量。测量结果与有限元仿真结果进行了比对。电学法由于不具备空间分辨率能力,其测得的是被测件平均温度,所以其结温测量结果低于红外法和热反射率法。所以,拟获取此类器件的峰值结温应考虑采用红外法或热反射率法。但是,红外法和热反射率法并不能替代电学法,电学法具有不开帽测温、测量效率高、结合结构函数后能分析器件内部热信息等优势,该方法在进行批量筛选、功率循环试验、甚至失效分析过程中仍是主流测温技术。

参考文献:

[1] Pearton S J, Yang J C, Cary P H, et al. A Review of Ga_2O_3 Materials, Processing, and Devices [J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(1): 011301.

[2] Wang B, Xiao M, Knoll J, et al. Low Thermal Resistance (0.5 K/W) Ga_2O_3 Schottky Rectifiers with Double-Side Packaging [J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(8): 1132-1135.

[3] Cheng Z, Wheeler V D, Bai T, et al. Integration of Polycrystalline Ga_2O_3 on Diamond for Thermal Management [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(6): 062105.

[4] Zhang Y H, Chen K J. Overcoming the Limitations of Gallium Oxide Through Heterogeneous Integration [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2020, 64(1): 122-123.

[5] Wang Y B, Xu W H, You T G, et al. β-Ga_2O_3 MOSFETs on the Si Substrate Fabricated by the Ion-Cutting Process [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2020, 63(7): 97-100.

[6] Yu Y, Xiang X, Zhou X, et al. Device Topological Thermal Management of β-Ga_2O_3 Schottky Barrier Diodes [J]. Chinese Physics B, 2021, 30(6): 562-568.

[7] Blumenschein N A, Moser N A, Heller E R, et al. Self-Heating Characterization of β-Ga_2O_3 Thin-Channel MOSFETs by Pulsed I-V and Raman Nanothermography [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(1): 204-211.

[8] Pomeroy J W, Middleton C, Singh M, et al. Raman Thermography of Peak Channel Temperature in β-Ga_2O_3 MOSFETs [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(2): 189-192.

[9] Chatterjee B, Jayawardena A, Heller E, et al. Thermal Characterization of Gallium Oxide Schottky Barrier Diodes [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(11): 114903.

[10] Wong M, Morikawa Y, Sasaki K, et al. Characterization of Channel Temperature in Ga_2O_3 Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors by Electrical Measurements and Thermal Modeling [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(19): 193503.

[11] Noh J, Alajlouni S, Tadjer M J. High Performance β-Ga_2O_3 Nano-Membrane Field Effect Transistors on a High Thermal Conductivity Diamond Substrate [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2019, 7: 914-918.

[12] Blackburn D L. Temperature Measurements of Semiconductor Devices: A Review [C]//2004 20th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, San Jose, CA, USA, 2004: 70-80.

[13] 李汝冠,廖雪阳,尧彬,等. GaN 基 HEMTs 器件热测试技术与应用进展[J]. 电子元件与材料,2017,36(9):1-9.

[14] 肖超,王立新. 基于结构函数的功率 MOSFET 器件热阻研究[J]. 电子器件,2012,35(5):489-492.

[15] Pape H, Schweitzer D, Chen L, et al. Development of a Standard for Transient Measurement of Junction-To-Case Thermal Resistance [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(7): 1272-1278.

[16] Baczkowski L, Carisetti D, Jacouet J, et al. Thermal Characterization of High Power AlGaN/GaN HEMTs Using Infrared Microscopy and Thermoreflectance [C]//2014 International Workshop on Thermal Investigations of ICs & Systems, London, UK, 2014: 1-6.

[17] Kuball M, Sarual A, Ji H, et al. Integrated Raman-IR Thermography on AlGaN/GaN Transistors [C]//2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, San Francisco, CA, USA, 2006: 1339-1342.

[18] 翟玉卫,张亚民,刘岩,等. 用热反射热成像技术测量封装 GaN/AlGaN HEMT 芯片热阻[J]. 半导体技术,2022,47(11):921-925.

[19] 杜成林,蔡小龙,孙梓轩,等. GaN HEMT 可靠性光学测试技术研究进展[J]. 半导体技术,2020,45(9):657-668.

翟玉卫(1983—),男,河北石家庄人,工学硕士,正高级工程师,主要从事半导体器件热特性测试技术研究,zhaiyw@cetc13.cn;

吴爱华(1980—),男,河北涿鹿人,硕士,研究员级高工,主要从事半导体计量测试技术研究 wuah@cetc13.cn。