金属电学探针高温接触传热特性研究

梁睿轩^{1*#}, 俞泓泽^{1*}, 汤如俊^{1#}, 彭 斌², 张万里²

¹苏州大学物理科学与技术学院,江苏 苏州 ²电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室,四川 成都

收稿日期: 2024年11月7日; 录用日期: 2024年12月5日; 发布日期: 2024年12月13日

摘要

探针台广泛应用于半导体行业、光电行业和集成电路的电学性能测试。在航空航天等特殊的情况下,有 些材料需要承受较高的温度。高温的环境下,材料的电性能测试需要用到高温探针台,金属电学探针的 高温物理性能对测试结果会产生影响。因此,为了确保在高温环境下高温探针台可以精准测量材料的物 理性能,对高温探针台中金属探针的传热特性进行研究十分有必要。研究结果表明镀金钨钢材料的金属 探针远离针尖部分的温度随与高温接触的时间增加呈非线性上升关系。电学探针高温接触传热中,距离 针头越近的位置温度变化较快,随着加热时间增加,在接触时间接近5秒后整个金属电学探针温度趋于稳 定。因此,实际应用时,可通过预加热方式减小温度分布不均匀影响。本文的研究可以为电子材料和器 件高温性能的优化测试提供基础。

关键词

金属探针,导热系数,传热特性,有限元方法

Study of High Temperature Contact Heat Transfer Characteristics of Metallic Electrical Probes

Ruixuan Liang^{1*#}, Hongze Yu^{1*}, Rujun Tang^{1#}, Bin Peng², Wanli Zhang²

¹School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou Jiangsu ²State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 7th, 2024; accepted: Dec. 5th, 2024; published: Dec. 13th, 2024

*相同贡献。 #通讯作者。

Abstract

Probe tables are widely used in the semiconductor industry, optoelectronics industry and integrated circuits for testing electrical properties. In special cases such as aerospace, some materials need to withstand higher temperatures. The high temperature environment requires the use of high temperature probe stations for testing the electrical properties of materials, and the high temperature physical properties of metal electrical probes can have an impact on the test results. Therefore, in order to ensure that the high-temperature probe stage can accurately measure the physical properties of materials in a high-temperature environment, it is necessary to study the heat transfer characteristics of metal probes in the high-temperature probe stage. The results of the study show that the temperature of the metal probe of gold-plated tungsten steel material away from the tip portion of the probe increases nonlinearly with the increase of the time of contact with high temperature. Electrical probe high-temperature contact heat transfer, the closer the location of the needle temperature changes faster, with the increase in heating time, in the contact time close to 5 seconds after the entire metal electrical probe temperature tends to stabilize. Therefore, in practical applications, the effect of uneven temperature distribution can be reduced by preheating. The research in this paper can provide a basis for the optimized testing of high temperature performance of electronic materials and devices.

Keywords

Metal Probe, Thermal Conductivity, Heat Transfer Characteristics, Finite Element Method

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

近年来,随着科学技术的不断发展和经济的高速发展,集成电路制造技术也逐渐进步,集成电路也 朝着尺寸更小和速度更快的趋势不断发展。集成电路制造技术的进步伴随着半导体科学技术的发展,使 得新的检测与分析技术不断出现、完善、提高。半导体材料的检测与分析已经成为半导体科学体系中不 可缺少的部分。如果没有半导体材料的检测与分析研究,半导体的科研和生产将会陷入困难,而今天的 集成电路制造技术也不可能发展。高温探针台是半导体制造过程中用于对半导体器件材料进行测试的关 键设备,可见高温探针台作为半导体制造的一部分,有着极其重要的作用[1][2]。

高温探针台是一种用于对半导体器件进行电性能测试的重要设备。通常由精密的机械结构,高性能的金属电学探针针头和电性能测试仪器组成[3]。探针台可以对集成电路和半导体芯片等其他微电子器件进行电性能测试,为科学研究提供有价值的信息。

高温探针台可以确保新产品开发的品质,同时也可以减少开发时长和节约资源成本。随着半导体技术的不断发展,探针台也在不断的进步。在航空航天等特殊情况下有些材料需要承受一定的高温,高温环境下部分电子材料的性能测试需要使用到高温探针台,其中金属电学探针的各项物理性能对测试的结果十分有影响[4][5]。为满足特殊环境下的测试需求,显然高温探针台需要更好的环境适应性,其中高温探针台中对于金属电学探针的研究显得尤为重要,同时在关于高温探针台中金属电学探针的传热特性方面研究十分欠缺,其传热性能的高低与稳定性,直接关系高温探针台在特定环境下的使用,具有重要的

研究价值以及改善半导体市场中对于高温探针台的重大需求[6]。

COMSOL 软件是一种融合多种物理场的功能十分强大的有限元分析软件,包括结构力学模块 (Structure Mechanics Module),热传递模块(Heat Transfer Module)等,其优势在于可以高效的计算性能和 多物理场耦合的分析能力实现了高度精确的数据仿真,目前已经在许多领域得到了广泛的应用[7][8]。其 中传热模块主要用于研究能量由一个系统转移到另一个系统的传递方式和过程。主要应用于热量传递三 种方式以及这三种传递方式任意结合复杂问题,都可以用传热模块进行分析[9][10]。

2. 理论模型

2.1. 模型的建立

图 1 为金属探针的结构图,探针长 70 mm,针杆半径 2.5 mm,针尖顶半径为 0.1 mm。材料为钨钢。 考虑到探针主要受温度和作用力影响,其具体参数见表 1。



Figure 1. Structure diagram of metal probe 图 1. 金属探针结构图

 Table 1. Specific parameters of metal probes

 表 1. 金属探针的具体参数

材料类别	导热系数/(W/(m·K))	泊松比λ	密度/(g/cm ³)
钨钢	110	0.28	15.63

模型中金属探针的针尖部分接触高温样品,尾部则是固定在较冷探针夹具上。计算过程所用传热模型方程为:

$$PC_{p}\frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_{p}u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{red}$$
⁽¹⁾

$$q = -k\nabla T \tag{2}$$

式(1)中: ρ 为金属探针密度, C_p 为金属探针密度,T为温度,u为温度流速场, ∇T 为不同方向的温度梯度, $\nabla \cdot q$ 为热传导速率,Q为热源, Q_{red} 为增加热源。式(2)中,q为热通量矢量场,k为物质的导热系数,单位均为国际单位。

2.2. 网格划分及其精准性

采用 COMSOL Multiphysics 中网格划分的功能,对模型进行网格划分,网格划分的疏密程度会在一定程度上影响计算机工作量的大小,并且对计算精度会产生影响。密集的网格有助于提高精度,但也会增加计算时间,为了提高时间中数据的精确度,决定对模型采用超细化网格进行研究。

2.3. 模型的简化

高温探针台中测试被测材料性能金属电学探针对被测材料为热接触,参考真实高温探针台中金属电 学探针的结构,为便于模型的简化,做出以下假设:

1) 对于金属电学探针的工作环境设置为真空,所以不考虑与空气热对流,温度条件设定为室温 20℃。

2) 各物理参数保持恒定,同时将金属电学探针与被测材料之间的热接触中热阻值视为零,并且只考虑热传导和热辐射不考虑热对流。

3) 设定金属电学探针初始温度为室温 20℃,根据真空中高温接触的特性给予金属电学探针针头 1000℃ 高温,并设定探针表面对环境热辐射,对外发射率为 1。

2.4. 多物理场的耦合

应用 COMSOL Multiphysics 软件中固体传热单元,保证模拟实验与实际实验中的各种条件相一致。 采用瞬态法研究,由固体传热模块计算出金属电学探针的热传导。在计算传热过程中,设定时间长度为 30 秒,步长为 0.05 秒,其中每个步长均要对金属电学探针传热进行计算,从而更新传热特性,实现整个 高温接触传热特性的模拟计算。

3. 分析与讨论

3.1. 模拟结果分析

图 2(a)~(e)表明,在给予金属电学探针 1000℃高温条件下,3 秒周期内探针不同位置温度的变化。可以看出在3 秒时间内,探针不同位置的温度随时间升温,其中越靠近针尖的位置温度越高。进一步分析可看出,在0.1 秒至2 秒内探针各位置升温较为迅速,在2 秒至3 秒内温度趋于稳定。



Figure 2. (a)~(e) temperature distribution of the probe at 0.1 s, 0.5 s, 1 s, 2 s and 3 s 图 2. (a)~(e) 探针分别在 0.1 秒, 0.5 秒, 1 秒, 2 秒和 3 秒时的温度分布



图 3.30 秒时探针温度分布

最终加热 30 秒后,温度趋于稳定状态,此时金属电学探针针尾的温度为 783℃,温度分布如图 3 所示。

3.2. 温度分布分析

图 4 为 1 mm 到 20 mm 处探针在 30 秒加热时间内的温度变化图。给予金属电学探针 1000℃高温条 件下,对探针在 30 秒加热时间内的温度变化进行分析。可以看出金属电学探针高温接触传热中距离针头 越近的位置温度变化较快,随着加热时间的增加,整个金属电学探针趋于温度稳定状态。





图 5 为探针各位置在 0 秒到 15 秒时刻的温度分布图。可以看出在 5 秒时温度均趋于稳定。进一步分 析得出,越靠近针头的位置温度变化在短时间内较为缓慢,远离针头的位置温度变化在短时间较为剧烈。



Figure 5. Temperature distribution at each position of the probe from 0 to 15 seconds 图 5. 探针各位置在 0 秒到 15 秒时刻的温度分布

4. 总结与展望

本文基于通过有限元法分析了金属探针的传热特性在高温情况下的变化特性。研究结果表明镀金钨 钢材料的金属探针远离针尖部分探针的温度随与高温样品接触的时间增加呈非线性上升关系。电学探针 高温接触传热中距离针头越近的位置温度变化较快,随着加热时间增加,在接触时间接近 5 秒后整个金 属电学探针温度趋于稳定。因此,实际应用时,可通过预加热方式减小温度分布不均匀影响。

本文设计的金属电学探针模型可以解决课题中金属电学探针整体的传热特性,同时也发现以下问题 值得探究:实际实验中,金属电学探针接触表面的热流密度分布受到多个因素的影响,包括接触压力和 表面粗糙度等。在高温条件下,金属电学探针接触表面的氧化膜会对传热产生何种影响。此外可以通过 优化金属电学探针枕头的形状和尺寸,使热流分布更加均匀,采用表面处理技术减少表面粗糙度,提升 传热效率。

基金项目

本论文感谢科技部国家重点研发项目(2021YFB3801701)的支持。

参考文献

- Chen, Y., Wu, X., Shao, Y. and Zhong, W. (2024) Experimental and Numerical Study of Heat Transfer Characteristics of Supercritical CO₂ in Rectangular Channel PCHE. *Journal of Thermal Science*, 33, 2299-2317. <u>https://doi.org/10.1007/s11630-024-2051-8</u>
- [2] Liu, S., Yang, B. and Yu, X. (2025) Thermal Transfer Performance and Flow Instability Analysis of Direct Steam Generation for Parabolic Trough Solar Collectors. *International Journal of Thermal Sciences*, 208, Article 109412. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109412</u>
- [3] Chen, R., Cheng, C., Liu, Z., et al. (2024) Heat Transfer Characteristics during Bottom-Blown Bubble Coalescence. International Journal of Heat and Mass Transfer, 233, Article 126005. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126005

- [4] Xu, Y., Li, Z., Zhang, Q., Liu, X. and Ma, C. (2024) Heat Transfer Characteristics of Oil-Water Two-Phase in Pipeline Transportation during Shutdown. *Thermal Science*, 28, 1795-1806. <u>https://doi.org/10.2298/tsci230612208x</u>
- [5] 李艳宁, 张云川. 防护热板法装置热板功率损失的补偿方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(1): 71-75.
- [6] 张向, 黄振宇, 徐立. 导热系数的测量方法研究现状与发展趋势[J]. 应用物理, 2018, 8(7): 301-308.
- [7] 王补宣,韩礼钟.同时测定绝热材料 a 和 k 的常功率平面热源法[J].工程热物理学报, 1980, 1(1): 80-87.
- [8] Parker, W.J., Jenkins, R.J., Butler, C.P. and Abbott, G.L. (1961) Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity. *Journal of Applied Physics*, 32, 1679-1684. <u>https://doi.org/10.1063/1.1728417</u>
- [9] Liu, X., Wen, Z., Su, F., Du, Y., Zhang, S. and Lou, G. (2024) Simulation of Motion and Heat Transfer Characteristics of Blast-Furnace Slag Particles in a Cyclone Separator. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 48, 2131-2142. <u>https://doi.org/10.1007/s40997-024-00768-9</u>
- [10] Cheng, W., Chen, M., Ouyang, D., Weng, J., Zhao, L. and Chen, Y. (2024) Investigation of the Thermal Performance and Heat Transfer Characteristics of the Lithium-Ion Battery Module Based on an Oil-Immersed Cooling Structure. *Journal of Energy Storage*, **79**, Article 110184. <u>https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110184</u>