

高导热3C、4H和6H碳化硅晶圆 热导率测试方法选择

Selection of Thermal Conductivity Test Methods for High Heat Conductance 3C, 4H and 6H Silicon Carbide Wafers

摘要：做为新一代半导体材料的3C、4H和6H碳化硅，其显著特点之一是具有比银和铜更高的热导率。热导率是评价这些高导热碳化硅晶圆的重要技术指标，而准确测试碳化硅晶圆热导率则需要对测试方法进行合理的选择。本文将针对高导热碳化硅晶圆，介绍目前常用的几种热导率测试方法，并做出分析，对热导率测试方法的选择给出参考意见。

一、高导热碳化硅及其常用测试方法

做为新一代半导体材料的3C、4H和6H碳化硅，其显著特点之一是具有比银和铜更高的热导率，如依据日本东芝公司的报道[1]，一些典型半导体材料的物理性能如表1所示。

表1 一些典型半导体材料的物理性能

Property	Unit	Si	4 H-SiC	6H-SiC	3C-SiC	GaN	GaAs	Diamond
Bandgap	eV	1.12	3.26	3.02	2.23	3.39	1.43	5.47
Electron mobility μ_e	cm ² /Vs	1400	1000 ⊥ to c-axis 1200 to c-axis	450 ⊥ to c-axis 100 to c-axis	1000	900	8500	2200
Hole mobility μ_h		600	120	100	50	150	400	1600
Electric breakdown field E_c	V/cm	3.0×10^5	2.8×10^6	3.0×10^6	1.5×10^6	3.3×10^6	4.0×10^5	1.0×10^7
Thermal conductivity λ	W/cmK	1.5	4.9	4.9	4.9	2.0	0.5	20
Saturated electron drift velocity V_{sat}	cm/s	1.0×10^7	2.2×10^7	1.9×10^7	2.7×10^7	2.7×10^7	2.0×10^7	2.7×10^7
Relative dielectric constant ϵ		11.8	9.7 ⊥ to c-axis 10.2 to c-axis	9.7 ⊥ to c-axis 10.2 to c-axis	9.7	9.0	12.8	5.5

随着电子科技技术的快速发展，对于高导热碳化硅的测试研究也得到了重视，大量文献报道了对高导热碳化硅热导率测试所进行的测试研究[2-10]，但不同工作之间存在着相互矛盾的测试结果，如4H-SiC的热导率是否高于6H-SiC就存在争议[3,6,7]。更重要的是，根据晶格结构可以判断出4H-和6H-SiC的热导率呈各向异性特征，但由于在测量精度上存在问题，使得之前有些测试研究通常会忽略这种差异[2,4,5]。文献[9]采用光热辐射法测量了6H-SiC的各向异性热导率，文献[10]基于飞秒激光的时域热反射法在250K~450K的温度范围内测量了4H和6H碳化硅的各向异性热导率。从上述文献报道可以看出，目前对于碳化硅高热导率的测试主要集中在激光闪光法、热反射法和稳态法这三类测试方法。本文将针对高导热碳化硅，特别是碳化硅晶圆，介绍目前常用的几种热导率测试方法，并做出分析，对热导率测试方法的选择给出参考意见。

二、激光闪光法

闪光法 (Flash Method) 做为一种经典和广泛应用的热性能测试方法，非常适合1~400W/mK范围内热导率测试。但对于更高热导率材料的测试，特别是高导热碳化硅圆晶这类材料，采用闪光法测试会存在巨大误差，这主要是由以下几方面因素所造成：

(1) 闪光法中加热样品前表面的光脉冲宽度一般为几十至几百微秒，在此脉冲宽度内要实现对400W/mK以上的高导热样品进行准确测量，需要样品厚度至少3mm以上，而且随着样品热导率增大，样品厚度也要相应变大。这种对样品厚度的要求是很多高导热材料无法满足的，如4H、6H-SiC圆晶厚度最大只有0.5mm。如若测量薄样品，则需将闪光脉宽缩短至几微秒量级，这往往是很多测试所忽略的造成测试误差的主要因素之一。

(2) 为了增加样品前表面吸收闪光加热的能量和提高样品背面测温的准确性，特别是对于一些透明或半透明样品，闪光法测试中通常会在样品的前后表面喷涂上石墨黑胶以提高发射率，同时阻挡加热光透过样品和避免背温测量出现误差。黑胶厚度一般约为0.05mm，但在具体使用过程中，喷涂黑胶要掌握一个原则，即相对于被测样品热阻，前后两面的黑胶热阻可以忽略不计，否则会形成三层样品结构，黑胶层会给测量结果带来严重影响，这在高导热且很薄的碳化硅和金刚石等材料测试中会非常明显，这也是闪光法无法应用在4H、6H-SiC圆晶热导率测试中的主要原因。

(3) 闪光法通常只能测量样品的热扩散率，还需进行比热容和密度的单独测量后，通过计算最终获得热导率。这些比热容和密度的测试，会给热导率结果带来相应的误差累积。

三、热反射法

热反射法 (Thermo-Reflectance) 基于前述的闪光法，但采用了超高速周期脉冲激光，脉冲宽度为纳秒 (ns) 量级，甚至可达到皮秒 (ps) 量级，非常适合测量厚度低至10nm的薄膜样品 (带或不带基片)，可测量金属、陶瓷、聚合物薄膜的热物性参数，如热扩散率、吸热率和界面热阻。如图1所示，热反射法可应用于不同测量模式，以适应于不同的样品和基片情况 (透明/不透明)。

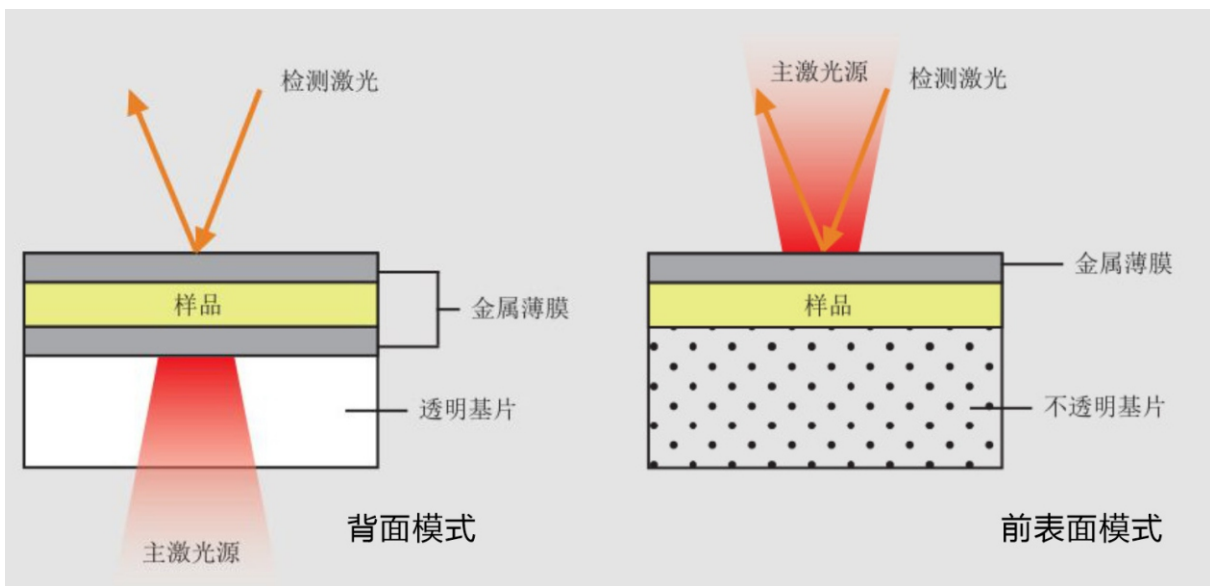


图1 热反射法基本原理

在热反射法背面测量模式中，主激光源表面背面加热样品，检测激光从上表面测量样品的温度变化过程，从而测得样品的热扩散率。这种模式与传统闪光法一样，并且适用于透明基片上的薄膜样品测量。

在热反射法前表面测量模式中，主激光源从前表面加热样品，检测激光同样从前表面测量样品的温度变化过程。这是一种经典的前表面闪光法，并且适用于不透明基片上的薄膜样品测量。

从上述热反射法原理和能力可以看出，在理论上热反射法可以进行薄的高导热材料测试，但缺点同样非常明显，到目前为止还未在工业中得到真正的推广应用，还仅停留在学术研究层面。

(1) 热反射法同样需要在被测样品上增加吸热层，由此会形成三层结构的测试模型，并且要求已知吸热层甚至基材的热物性参数，测试模型的简化和计算会给测量带来严重的系统误差。

(2) 缺乏测量准确性的评估，目前还未看到采用参考材料对热反射法进行的任何评估报道，这严重制约了热反射法的推广应用。

(3) 由于需要高速激光用来加热和探测，热反射法测试设备非常昂贵。

四、热波法和稳态法

对于高导热材料的热导率测试，典型如热导率为1800~2000W/mK的金刚石材料，已经开展了几十年的研究，业内普遍认同的测试方法是经典的稳态法，并得到了广泛应用[11,12]。

对于高导热碳化硅圆晶，稳态法是比较合适的测试方法，测试不会受到高热导率和透明等因素的影响，样品尺寸也没有大小的限制，对于直接无损测量整个圆晶更具有突出优势。这里将主要介绍一种基于稳态法发展起来的新型测试方法——热波法，稳态法只是热波法中的一种特例。

热波法基本原理是样品在非稳态条件下（温度单调缓慢上升或下降），在样品热端施加周期方波热脉冲，如图2所示，通过测量加热功率、热脉冲宽度和温度响应来确定传热方向热导率。

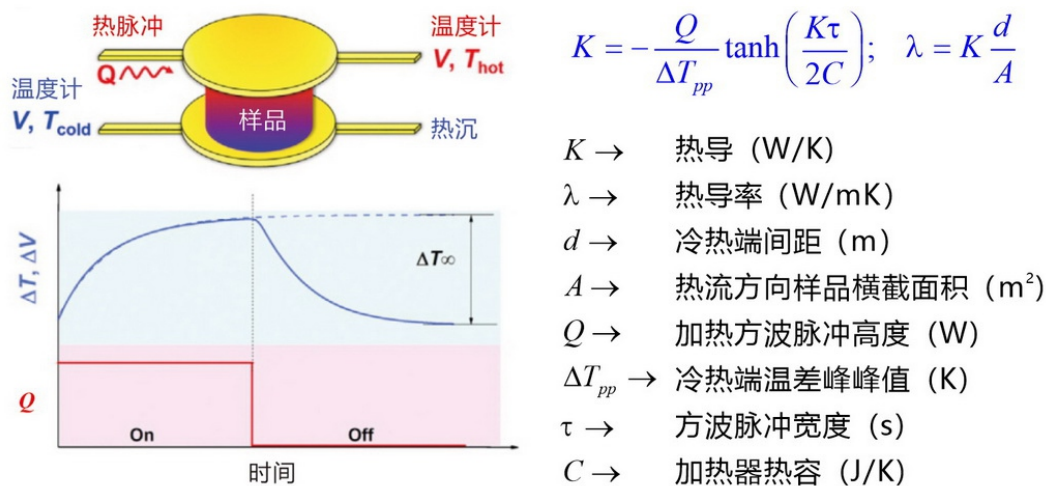


图2 热波法基本原理

热波法作为一种瞬态法，其主要特点如下：

(1) 测量装置结构与稳态法基本相同，但在测试过程中无需像稳态法那样达到热平衡状态，可在样品整体温度处于单调上升（或下降）的非平衡状态下进行测量，测试周期短。

(2) 当热脉冲宽度为无限长时间时，tanh函数将趋于等于1，则样品将达到稳态条件，测试将转变为稳态法，上述测量公式将变为稳态法公式。即稳态法是脉冲法的一种极限情况，由此在一套测量装置中可分别进行热波法和稳态法测量，其中的稳态法可用来考核和校准脉冲法。

(3) 在热波法测量装置中，可通过延长热波周期时间（或加热功率恒定），使热波法转换为稳态法进行测量，由此可覆盖宽泛的热导率测量，即采用热波法测量高热导率（10~3000W/mK），采用稳态法测量低热导率（0.1~10W/mK）。

(4) 大多数测试高导热小样品材料的瞬态法，如闪光法、温度波法（ISO 22007-3）和Angstroem法等，这些方法只能测量热扩散率，无法直接获得热导率。这里的热波法相当于一种量热测试技术的变形，可直接测量热导率，而且非常适合高导热小样品（薄带和细条等）和高导热块体材料测量，也可通过增加测温点和加热方式，来测量热扩散率和比热容。

(5) 热波法热导率测试，可以采用现有的各种热导率参考材料进行测量精度的考核和检验，有助于对测量结果有比较明确的了解。

(6) 使用热波法测试中需要特别注意的是热导率测试方向性，热波法测试方法的核心之一是在被测样品的传热方向上形成可准确测量的温差，所以热波法适合20mm以上长度的样品测试，非常适合薄膜材料面内方向上的热导率测量，但对于薄膜材料厚度方向上的热导率测试，热波法则无能为力。

五、结论

通过上述对闪光法、热反射法和热波法的介绍和分析，可以得出以下结论：

(1) 对于3C、4H和6H碳化硅的高热导率测试，比较合适的方法是热波法或稳态法，但在具体使用中需要特别注意热导率的方向性。

(2) 对于透明透红外的高热导率薄样品，不建议采用常规的闪光法测试，表面黑胶或其他金属涂层会给测量结果带来严重影响。

(3) 热反射法作为一种高速超短脉冲闪光法，非常适合测试研究薄膜材料厚度方向上的热扩散率，但因增加了额外的表面吸热金属层，会造成测试模型非常复杂，测量准确性难以保证，但用来测试研究热导率的量级大小和各向异性特征则十分有效。

总之，上述方法的选择只是针对碳化硅圆晶高热导率测试的建议，还可以采用其他方法，如经典的瞬态平面热源法（HOT DISK法），但这种方法目前只适合室温附近温度不高范围内的面内方向热导率测试，而且被测样品尺寸要求较大，一般需要100mm×100mm以上的大面积。对于瞬态平面热源法，实验验证过的能力是完全可以测试紫铜热导率（25℃时测试结果为393W/mK，样品尺寸为150mm×150mm×1.5mm）。

六、参考文献

- [1] TOSHIBA, Comparison of SiC MOSFET and Si IGBT, SiC MOSFET Application Note, 2020.
- [2] Slack, G. A., Thermal Conductivity of Pure and Impure Silicon, Silicon Carbide, and Diamond. J. Appl. Phys. 1964, 35, 3460-3466.
- [3] Brethauer, J., Mapping the Thermal Conductivity of Sic/Sic Composites, Phd Thesis; University of Illinois at Urbana-Champaign, 2017.
- [4] Wei, R.; Song, S.; Yang, K.; Cui, Y.; Peng, Y.; Chen, X.; Hu, X.; Xu, X., Thermal Conductivity of 4h-Sic Single Crystals. J. Appl. Phys. 2013, 113, 053503.
- [5] Morelli, D. T.; Heremans, J. P.; Beetz, C. P.; Yoo, W. S.; Matsunami, H., Phonon-Electron Scattering in Single Crystal Silicon Carbide. Appl. Phys. Lett. 1993, 63, 3143-3145.
- [6] Protik, N. H.; Katre, A.; Lindsay, L.; Carrete, J. u.; Mingo, N.; Broido, D., Phonon Thermal Transport in 2h, 4h, and 6h Silicon Carbide from First Principles. Materials Today Physics 2017, 1, 31-38.
- [7] Morelli, D. T.; Heremans, J. P.; Beetz, C. P.; Yoo, W. S.; Harris, G.; Taylor, C., Carrier Concentration Dependence of the Thermal Conductivity of Silicon Carbide. Institute of Physics Conference Series 1994, 137, 313-316.
- [8] Nilsson, O.; Mehling, H.; Horn, R.; Fricke, J.; Hofmann, R.; Müller, S. G.; Eckstein, R.; Hofmann, D., Determination of the Thermal Diffusivity and Conductivity of Monocrystalline Silicon Carbide (300-2300K). High Temperatures . High Pressures 1997, 29, 73-79.
- [9] Burgemeister, E. A.; von Muench, W.; Pettenpaul, E., Thermal Conductivity and Electrical Properties of 6hsilicon Carbide. J. Appl. Phys. 1979, 50, 5790-5794.
- [10] Qian X, Jiang P, Yang R. Anisotropic thermal conductivity of 4H and 6H silicon carbide measured using time-domain thermoreflectance[J]. Materials Today Physics, 2017, 3: 70-75.
- [11] Inyushkin A V, Taldenkov A N, Chernodubov D A, et al. High thermal conductivity of bulk GaN single crystal: An accurate experimental determination[J]. Jetp Letters, 2020, 112(2): 106-111.
- [12] Inyushkin A V, Taldenkov A N, Ralchenko V G, et al. Isotope Effect in Thermal Conductivity of Polycrystalline CVD-Diamond: Experiment and Theory[J]. Crystals, 2021, 11(4): 322.