

关键词：铜，薄膜，导热系数，闪光法

TACNANTP0002V1

摘要

本文详细介绍了使用闪光法氙灯导热仪测量高导热微米级铜薄膜样品的面内热扩散系数和导热系数的相关理论和实验设计，对 25 微米的铜薄膜进行了多次重复实验，实验数据与理论模型拟合度高，重复性优异。

引言

闪光法用于测量金属热扩散系数及导热系数的最有效方法。这种瞬态响应技术具有测量时间短、对材料完全无破坏性、并能提供优异的准确度和高重复性的特点。闪光法使用激光或者氙灯提供的能量脉冲，均匀照射一个小尺寸片状样品的前表面。通过传感器进行高速数据采集，记录对样品后表面的时间-温度历史。样品的热扩散系数可以根据样品后表面与时间相关的温升曲线、样品的厚度，并使用相关的热损耗修正模型得出。近年来，使用闪光法测量微米级薄膜的面内热扩散系数成为材料热物性表征中的难点和热点。由于其样品尺寸的特殊性，与传统的材料相比，薄膜上下表面都有热损耗，因此常用的修正模型如 Parker, Clark & Taylor, Cape-Lehman, Cowan 均不再适用，因此需要寻找新的模型来对温升信号进行修正和拟合。此外，边界条件的特殊性，也造成了薄膜测试的复杂性。

实验原理和设计

本文使用了氙灯导热仪 DXF200 (TA Instruments, USA)，进行相关的实验设计和数据分析。采用了薄膜测试夹具以及相应的修正模型，实现了对多种薄膜材料的面内热扩散系数测量。薄膜夹具的测试原理和结构如图1所示。非常短的氙灯脉冲，均匀照射一个夹持有样品的夹具前表面，样品的外缘受热后，热量由外缘沿着薄膜向圆心传递。在夹具背面圆心处，有固体探针探测器，用以测试薄膜样品中心处的温度升高信号。

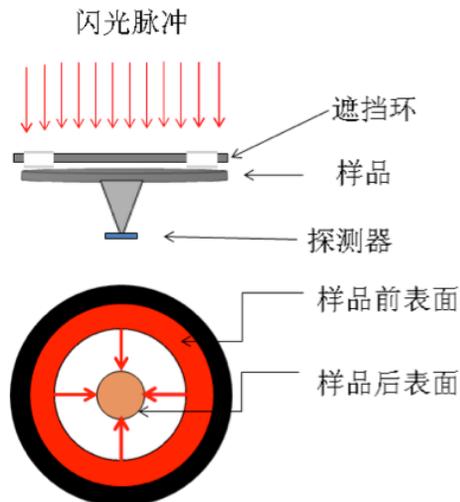


图1 薄膜面内热扩散系数测试原理

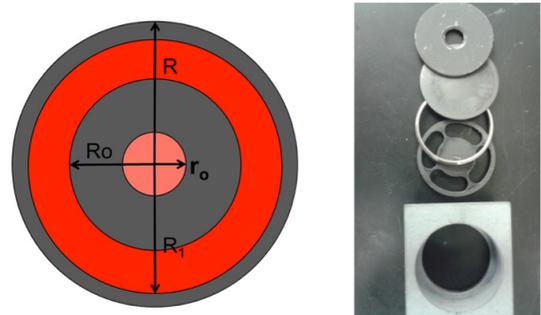


图2 薄膜夹具结构

在薄膜面内热损耗的修正上，采用了 Fin 模型，其温升信号 $T(t)$ 与横向方向的热扩散系数 α 的关系如下：

$$T(t) = \left[\frac{(R_1^2 - R_0^2)r_0^2}{4R^4} + \sum_{i=1}^{\infty} \Phi(\beta_i) \exp\left(-\beta_i^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \right] \exp\left(-m^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right),$$

$$\Phi(\beta_i) = \frac{r_0 J_1\left(\beta_i \frac{r_0}{R}\right) \left[R_1 J_1\left(\beta_i \frac{R_1}{R}\right) - R_0 J_1\left(\beta_i \frac{R_0}{R}\right) \right]}{R^2 \beta_i^2 J_0(\beta_i)^2}$$

其中： α 是横向方向的热扩散系数， J_0 和 J_1 是一类 Bessel 函数， β 是方程 $J_1(\beta)=0$ 的正数解， m 是正比于热传递系数与导热系数比值。在 Fin 模型中，沿着薄膜样品厚度方向的温度梯度远小于沿着薄膜横向方向的温度梯度，因此在温度分布的计算中不予考虑。通过引入一个正比于热传递系数和导热系数之比的参数 m ，薄膜样品表面的热损耗因此计算在内。多次重复性实验证明，通过使用 Fin 模型，能很好的对实验数据进行修正。

在已知样品密度的基础上，可以采用标准样品比较法测得样品的比热，从而得到样品的导热系数，热扩散系数、密度、比热和导热系数的关系如式 (3) 所示。在比热的测量上，也可以使用差式扫描量热仪 DSC，采用三步法测量样品的比热。也可以使用调制 DSC 技术，实现对比热的直接测量。

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

结果及讨论

在厚度为 0.0025cm 的金属铜薄膜样品上，进行了 5 次脉冲实验，得到的热扩散系数数据如下：

样品以及实验条件	热扩散系数实验数据 ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)	铜室温下热扩散系数文献值 ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)	误差范围
温度: 25 C 厚度: 0.0025 cm	1.167967	1.1644	0.3%
	1.168292		0.3%
	1.170197		0.5%
	1.167346		0.3%
	1.171567		0.6%

铜薄膜样品的原始温升曲线如图 2 所示，实验数据（红色）与 Fin 理论模型（绿色）拟合的非常好，由此证明了热扩散系数数据的真实有效。

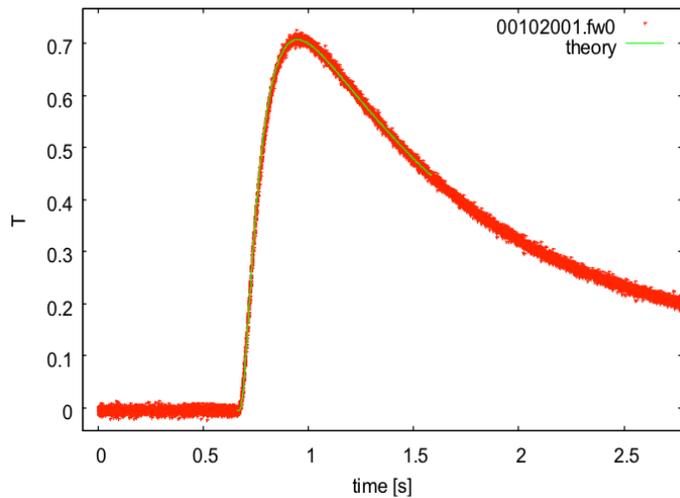


图 3 铜薄膜温升曲线

由上所述，通过采用特殊的样品夹具以及模型，闪光法导热仪可以实现对微米级薄膜样品面内（横向）热扩散系数的精确测量。测量以及分析方法简单、直接，数据可靠度高。

For more information or to place an order, go to <http://www.tainstruments.com/> to locate your local sales office information.