

二氧化硅薄膜材料热传导尺寸效应的实验研究 *

胡志新^{1,2}, 王宏亮², 张 陵¹

(1. 西安交通大学 力学系, 陕西 西安 710049; 2. 西安石油学院 信息科学系, 陕西 西安 710065)

摘 要: 对微米 SiO_2 薄膜材料沿膜面方向热传导尺寸效应进行了实验研究。结果表明, 膜厚从微米数量级的尺寸开始, 其传热热导率就已开始体现出鲜明的膜厚尺寸依赖特性(即 size effect), 经由微观能量输运理论分析后, 得到了实验与理论相吻合的结果。

关键词: 微米尺寸; 介质薄膜; 热导率; 尺寸效应

中图分类号: TQ174

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 9787(2003)05 - 0013 - 02

Experimental study of the thermal conduction size effect for silicon dioxide film

HU Zhi-xin^{1,2}, WANG Hong-liang², ZHANG ling¹

(1. Dept of Mech, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Dept of Info Sci, Xi'an Petroleum Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The thermal conduction size effect along surface layer of micrometer SiO_2 film is studied. The result indicates that the thermal conductivity of the film from the beginning of micrometer scale size shows clear size effect. The experiment result is as well as the analysis result by analyzing microscopic energy transport.

Key words: micrometer size; medium film; thermal conductivity; size effect

0 引 言

在所有微电子机械和热工材料的设计与加工应用中, 传热是非常突出而重要的问题, 进入 21 世纪, 作为“能量系统微型化”的一场革命, 正在悄然来临。研究微尺寸材料传热问题具有战略性意义。对经过沉积在硅基底上并采用蚀刻技术处理的 SiO_2 薄膜材料沿其表面方向传热热导率进行了一系列的测试, 从实验结果发现, 薄膜厚度减到微米量级的尺寸时, 其热导率不再为一定值, 而是随膜厚的减小而显著地减小。

1 薄膜导热的一维实验模型

薄膜一维导热的实验装置模型如图 1 所示。

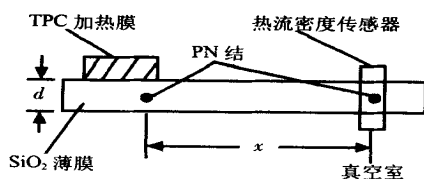


图 1 测定热导率实验装置

Fig 1 Equipment of determining thermal conductivity

小型 TPC 薄膜型加热器通以恒定的电流时, 沿膜面方向产生一维稳定的热流, 并沿薄膜正反两面传播, 若用微型点结式半导体 PN 结温度传感器测得加热器 TPC 薄膜处的温度 T_H 和热流密度传感器外侧处的温度 T_L , 由一维稳态导热模型得

$$\lambda = \frac{q}{\Delta T} x, \quad (1)$$

式中 λ 为薄膜材料沿膜面方向的热导率; q 为流经膜截面的热流密度; $\Delta T = T_H - T_L$; x 为热源到热流密度传感器外侧间的距离。

又由温差热电效应可知

$$q = CU, \quad (2)$$

式中 C 为 n 对微型热电偶薄片串接在一起组成热流密度传感器^[1] 的转换系数; U 为经热流密度传感器转换后输出的热电势, 综合式(1), 式(2) 可得

$$\lambda = CU \frac{x}{\Delta T}. \quad (3)$$

式(3) 即为测定薄膜材料沿膜面的热导率的数学模型式。为了消除空气中的热对流的影响, 将实验

收稿日期: 2003 - 02 - 20

* 基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2000C34)

装置中的导热系统封于约 10^2 Pa 的真空室中进行实验研究。

2 实验结果及分析

在 327 K 的加热温度下测定了 SiO_2 薄膜材料在 9 种不同厚度 d 时(在 ΔT 为 277 K 时) 相应的热流密度 q 及热导率 λ , 结果见表 1 所示。

表 1 SiO_2 薄膜沿膜面热导率的测试结果

Tab 1 Testing result of the thermal conductivity along surface layer of SiO_2 film

参 数	$d(\mu\text{m})$								
	38.4	27.4	26.8	21.6	20.0	18.5	16.7	15.4	14.4
$q(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	39.08	38.93	37.80	26.38	23.07	17.96	17.54	16.47	16.38
$\lambda(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.586	0.584	0.567	0.396	0.346	0.269	0.263	0.247	0.246

实验结果表明, 薄膜厚度在 $26.8\mu\text{m}$ 和 $18.5\mu\text{m}$ 附近薄膜的热导率 λ 出现了拐点。薄膜介质材料在微米以下尺寸时, 反映能量输运规律的热导率随膜厚尺寸降低而显著减小的这一依赖特性不再遵循各向同性介质中的 Fourier 导热定律。它反映了微观粒子运动所致的热量输运。要从理论上认识这种微观尺寸下的导热规律, 就需要从微观的能量输运本质出发揭示薄膜材料微观结构中的能量输运机制。此处, 基于 Boltzmann 输运理论导出沿 x 方向的一维热传导方程

$$q_x(x) = - \frac{\partial T}{\partial x} \int_x^2 \tau \frac{df_0}{dT} \mathcal{E} D(\mathcal{E}) d\mathcal{E}, \tag{4}$$

式中 v_x 为声子沿 x 方向的平均速率; τ 为简化不同粒子的散射及碰撞机制而引入的松弛时间; f_0 为平衡态下的分布函数; T 为温度场中的温度参量; $\mathcal{E}$ 是作为动量函数的粒子能量; $D(\mathcal{E})$ 为引入的状态密度函数。式(4) 与建立在宏观唯象模型基础之上的 Fourier 导热定律 $q = - \lambda \text{grad } T$ 比较, 其积分部分即为热导率, 记为 λ , 由于松弛时间 τ 及速度 v_x 均独立于粒子能量 $\mathcal{E}$, 因此, 热导率为

$$\lambda = v_x^2 \tau \int \frac{df_0}{dT} \mathcal{E} D(\mathcal{E}) d\mathcal{E} = \frac{1}{3} C v_x^2 \tau = \frac{1}{3} C v_x l, \tag{5}$$

式中 对于半导体介质材料来说, C 应为声子比热容; l 为声子的平均自由程。

由式(5) 可以看出, 在一定温度下, 当薄膜介质材料的膜厚尺寸 d 远大于粒子的平均自由程, 即 $d \gg l$ 时, 粒子(电子 - 声子) 在边界散射的概率很小, 这种散射效应对热量输运的贡献可忽略, 粒子在碰撞过程中的平均自由程可保持不变, 因而, 热导率

将在一定温度下保持一定值, 这就是建立在宏观经验上的唯象模型中的宏观导热; 当 d 与 l 相当或 $d < l$ 时, 粒子在边界散射的概率增大, 这种散射效应对热量输运的贡献就必须考虑在内, 这就使得粒子在碰撞过程中的平均自由程变小, 因而热导率减小; 当 $d \ll l$ 时, 这种随膜厚尺寸变小而热导率变小的依赖特性更为显著, 这就是建立在微观能量输运理论基础上的微观导热。

当然, 产生上述尺寸效应除传导热载子的边界散射外, 还应考虑膜中的杂质及结构上的缺陷等。

3 结束语

现有薄膜材料厚度尺寸的实验结果与采用声子输运分析所得到的结论是一致的。并与 Asheghi 等人^[2]测定底材 SOI 上单晶硅层的热导率随温度变化(平均自由程的变化) 的结果相吻合。Goodsoon 等人^[3]研究了无定形电介质层的热导率的变化是相当显著的, 这一事实也证实了热导率这一尺寸效应的结论是基本正确的。

参考文献:

[1] 王宏亮, 傅维刚. RDL-1 热导率自动检测仪的设计[J]. 西北纺织学院学报, 1999, 13(1): 28 - 32.

[2] Asheghi M, Touzelbaev M N, Goodsoon K E, et al. Temperature - dependent thermal conductivity of single-crystal silicon layers in SOI substrates[J]. [ASME] Journal of Heat Transfer, 1998, 120: 31 - 36.

[3] Goodson K E, Flik M I, Su L T, et al. Prediction and measurement of the thermal conductivity of amorphous dielectric layers [J]. [ASME] Journal of Heat Transfer, 1994, 116: 317 - 323.

作者简介:

胡志新(1965 -), 男, 陕西西安市人, 讲师, 在读博士, 主要从事测试技术和传感器等方面的研究。