

直流法测试薄膜热导的数值模拟研究*

黎威志[†] 王军

(电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2011 年 6 月 15 日收到; 2011 年 10 月 10 日收到修改稿)

薄膜的热导率是薄膜热学性能的最重要参数之一, 相对于多数文献的二维或三维测试结构, 本文采用一维双端支撑悬臂梁结构研究了薄膜热导率的测试方法. 悬臂梁包含上层的兼做加热电阻及测温电阻的金属条和下层的待测试薄膜. 利用一维热传导方程推导并获得了在直流电流加热条件下, 悬臂梁的温升分布 (ΔT) 及加热电阻两端电压增量 (ΔU) 表达式与薄膜热导率之间的关系. 采用 ANSYS 有限元软件仿真了不同仿真参数时的 ΔT 及 ΔU , 仿真结果与温升表达式计算结果符合得很好. 与常用的 3 倍频率法 (3ω) 薄膜热学性能测试方法相比, 一维悬臂梁直流法测试结构及手段较为简单且可以获得更为精确的结果.

关键词: 热传导, 薄膜热导率, ANSYS

PACS: 44.10.+i, 07.10.Cm

1 引言

对于集成度成倍增加的现代集成电路及微型传感器件而言, 器件内部的散热性能日益成为制约电路及器件性能的主要因素之一, 散热不良而引起的热量累积最终往往导致器件的失效. 因此, 获得器件结构单元以及构成结构单元的各功能薄膜的热学性能参数, 特别是热导参数十分必要, 这样能为最佳的器件结构设计和布局提供依据. 对于与热学相关的微电子机械系统 (microelectronic mechanical system, MEMS) 器件, 最为典型的如非制冷红外焦平面阵列探测器, 支撑结构的热导直接决定着器件的成败, 热导过大将导致温升信号过小而降低器件信噪比, 热导过小又可能降低器件的响应频率^[1]. 因此必须对各功能薄膜的热导率 κ 进行精确的测量, 从而为支撑结构设计和器件性能预测提供参考.

为精确测量薄膜的热导率参数 κ , 需要设计并制备适当的微机械结构, 因为测试结构直接影响到最终测试结果的准确性. 已经有很多关于

薄膜热导测试的报道^[2–20], 其中 3 倍频率 (3ω) 交流法^[8,12,14,17] 得到多数研究者的认可和采用. 如 Cahill^[14] 采用 3ω 法测试了厚度约为 100 μm 量级的二维非晶态氧化硅薄膜以及其他已标定热导率的标准薄膜 (派热克斯玻璃 7740 (Pyrex 7740) 和耐热高温玻璃 9606 (Pyroceram 9606)) 的热导率, 其测试结果与标准样品数据符合得很好. Yamane 等^[17] 采用 3ω 法测量了不同厚度及不同工艺所制备的氧化硅薄膜的热导率, 测试结果表明, 薄膜热导率与工艺和薄膜厚度均有关系. 厚度越大, 薄膜热导率越大, 当薄膜厚度达到 1000 nm 时, 热导率基本不再随厚度变化; 工艺方面, 只有采用热氧化生长的氧化硅薄膜与氧化硅玻璃体材料热导率一致, 而其他工艺, 如化学气相沉积 CVD 法、溅射法以及蒸发法所制备薄膜热导率均明显较低.

在包括以上测试方法在内的大多数薄膜热导测试中, 均采用二维甚至三维热传导测试结构, 这一方面使得测试结构温升表达式较为复杂, 不利于提取待测参数, 另一方面使结构加工变得困难. 此外, 仅有极少数研究者对测试结构进行热学仿真以验证其理论模型及推导的正确性, 使其测试结果缺

* 国家自然科学基金 (批准号: 60736005, 61006036) 资助的课题.

[†] E-mail: lwz393@hotmail.com

乏理论依据.

针对上述问题, 本文提出了一种简单的用于薄膜热导率测试的一维热传导结构及理论模型, 并采用 ANSYS 有限元工具对测试结构的热学性能进行了详细的仿真分析. 仿真结果证明了理论模型的正确性, 并且表明利用一维热传导结构只需采用简单的直流测试方法即可获得薄膜的热导率参数.

2 理论分析

2.1 悬臂梁温升表达式

如图 1 所示, 热导率测试结构为双端支撑悬臂梁, 悬臂梁由上层的窄而长的金属电阻条 (兼做加热电阻及测温电阻) 和下层的待测薄膜构成. 设悬臂梁长度为 l , 待测薄膜及金属条的横截面积分别为 $S_1 = w_1 \times d_1$ 以及 $S_2 = w_2 \times d_2$, 其中 $w_1(w_2)$ 和 $d_1(d_2)$ 分别为待测薄膜 (金属电阻条) 的宽度和厚度. 设 x 轴沿 l 方向, 在金属电阻与待测薄膜之间以及两支撑端处 ($x = 0$ 和 $x = l$) 悬臂梁与衬底之间有良好的热接触. 由于衬底体积远大于悬臂梁, 因此对于悬臂梁而言衬底可以看作理想的热沉. 给加热电阻中通直流电流 I , 加热电阻中将产生焦耳热. 很明显, 只要 $l \gg w_1 w_2$ 和 $d_1(d_2)$, 悬臂梁的热传导问题可以看作一维热传导.

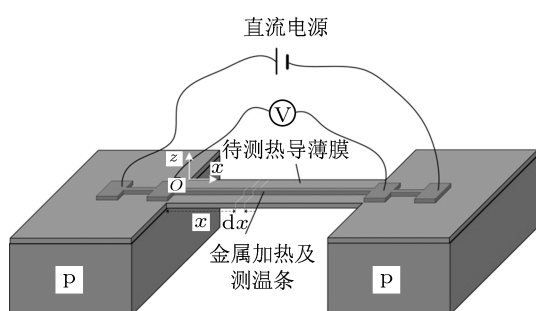


图 1 用于热导率测试的双端支撑悬臂梁结构

根据热平衡方程可得到温升 $\Delta T(x, t)$ 的微分方程为

$$(c_1 \rho_1 S_1 + c_2 \rho_2 S_2) \Delta T_t(x, t) = (k_1 S_1 + k_2 S_2) \Delta T_{xx}(x, t) + I^2 \cdot \rho_\Omega / S_2, \quad (1)$$

其中, $c_1(c_2)$, $\rho_1(\rho_2)$ 分别是待测薄膜 (加热条) 的热容率和密度, $\Delta T_t(x, t)$ 表示 $\Delta T(x, t)$ 对时间 t 的偏微分. κ_1 和 κ_2 分别为待测薄膜和加热条的热导率, $\Delta T_{xx}(x, t)$ 表示 $\Delta T(x, t)$ 对 x 的二阶偏导, ρ_Ω 为加

热条电阻率. 当悬臂梁达到热平衡后, 悬臂梁温升将不再随时间变化, 即 $\Delta T_t(x, t) = 0$. 根据 (1) 式有

$$\Delta T_{xx}(x, t) = \frac{d^2 \Delta T}{dx^2} = -\frac{I^2 \cdot \rho_\Omega / S_2}{k_1 S_1 + k_2 S_2}. \quad (2)$$

(2) 式右端与 x 无关, 令其等于 $2C_2$, 即

$$C_2 = -\frac{I^2 \cdot \rho_\Omega / S_2}{2(\kappa_1 S_1 + \kappa_2 S_2)}. \quad (3)$$

对 (2) 式两次积分并考虑到边界条件 $\Delta T(0) = \Delta T(l) = 0$, 可得

$$\Delta T(x) = C_2(x^2 - lx). \quad (4)$$

由 (4) 式容易得出悬臂梁最高温升处位于中点位置, 即

$$\begin{aligned} \Delta T_{\max} &= \Delta T(l/2) = -\frac{l^2}{4} C_2 \\ &= \frac{l^2 \times I^2 \times \rho_\Omega / S_2}{8(k_1 S_1 + k_2 S_2)} \\ &= \frac{l^2 \times I^2 \times \rho_\Omega}{8k_2 w_2 d_2 (\kappa_1 w_1 d_1 + k_2 w_2 d_2)}. \end{aligned} \quad (5)$$

从 (5) 式可以看出, 只要知道其他参数, 通过改变 d_1 或 d_2 (在测试结构确定后, 很容易通过薄膜沉积时间来改变薄膜厚度) 测得两个不同的 $\Delta T_{\max}$, 便可获得 $k_1(k_2)$.

如果悬臂梁上再增加一层待测薄膜, 则 (3) 式应改写为

$$C_2 = -\frac{I^2 \cdot \rho_\Omega / S_2}{2(\kappa_3 S_3 + \kappa_1 S_1 + \kappa_2 S_2)}, \quad (6)$$

其中 κ_3 和 S_3 分别为所增加的待测薄膜的热导率和横截面积. 因为 κ_1 和 κ_2 已经获得, 通过重新测得的 $\Delta T_{\max}$ 即可获得 κ_3 .

在以上推导中我们认为 ρ_Ω 不随温度变化. 但事实上, 所有金属材料都具有电阻温度系数 (temperature coefficient of resistance, TCR), 即 ρ_Ω 随温度变化. 设这里的加热电阻的 TCR 为 α , (2) 式应改写为

$$\frac{d^2 \Delta T}{dx^2} = -\frac{I^2 \cdot \rho_\Omega (1 + \alpha \Delta T) / S_2}{k_1 S_1 + k_2 S_2}. \quad (7)$$

结合边界条件 $\Delta T(0) = \Delta T(l) = 0$ 不难求解以上二阶非齐次微分方程, 其解为

$$\Delta T_{\text{TCR}}(x) = \frac{1}{\alpha} \left(\cos Cx + \tan \frac{Cl}{2} \cdot \sin Cx - 1 \right), \quad (4')$$

式中

$$C = \left(\frac{I^2 \cdot \rho_\Omega \cdot \alpha}{S_2 (k_1 S_1 + k_2 S_2)} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

而下标 TCR 表示推导 $\Delta T(x)$ 时考虑了加热条的电阻随温度的变化以区别于 (4) 式.

2.2 测试方法

从 (5) 式看到, 通过测试悬臂梁中点处的温升可以获得热导率参数. 但是在实际测试中这样做将增加结构的复杂性和加工难度, 因为必须在悬臂梁中点处加工另外的测温电阻, 而该测温电阻还要与加热条绝缘, 且要有引线引出. 最简单的方法是利用加热条本身的电阻温度效应将其作为测温电阻, 以避免增加测试结构的复杂性, 这也是多数文献采用的方法. 下面推导因温升 $\Delta T(x)$ 引起的加热条电阻变化 ΔR . 由图 1 可知, 在 $x-x+dx$ 段因 $\Delta T(x)$ 引起的电阻变化 $d\Delta R(x)$ 为

$$d\Delta R(x) = \rho_{\Omega} \frac{dx}{S_2} \cdot \alpha \cdot \Delta T(x), \quad (9)$$

因此整个加热条电阻变化应等于 $d\Delta R(x)$ 从 0 到 l 的积分, 即

$$\begin{aligned} \Delta R &= \int_0^l d\Delta R(x) \\ &= \frac{\rho_{\Omega} \cdot \alpha}{S_2} \int_0^l \Delta T(x) dx \end{aligned} \quad (10)$$

或

$$\Delta R_{\text{TCR}} = \frac{\rho_{\Omega} \cdot \alpha}{S_2} \int_0^l \Delta T_{\text{TCR}}(x) dx. \quad (10')$$

分别将 (4) 和 (4') 式代入 (10) 和 (10') 式并化简可得

$$\begin{aligned} \Delta R &= -\frac{C_2 \cdot \alpha \cdot \rho_{\Omega} \cdot l^3}{6S_2} \\ &= \frac{I^2 \cdot \alpha \cdot \rho_{\Omega}^2 \cdot l^3}{12S_2^2(\kappa_1 S_1 + \kappa_2 S_2)} \end{aligned} \quad (11)$$

或

$$\Delta R_{\text{TCR}} = \frac{\rho_{\Omega}}{S_2} \left(\frac{2}{C} \cdot \tan \frac{Cl}{2} - l \right). \quad (11')$$

很明显, $\Delta R(\Delta R_{\text{TCR}})$ 可以用常用的四点法通过测量加热电流在加热条两端产生的电压降变化进行精确测量 (如图 1 所示), 即

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta R \cdot I \\ &= \frac{I^3 \cdot \alpha \cdot \rho_{\Omega}^2 \cdot l^3}{12S_2^2(\kappa_1 S_1 + \kappa_2 S_2)} \end{aligned} \quad (12)$$

及

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{TCR}} &= \Delta R_{\text{TCR}} \cdot I \\ &= \frac{I \cdot \rho_{\Omega}}{S_2} \left(\frac{2}{C} \tan \frac{Cl}{2} - l \right). \end{aligned} \quad (12')$$

从 (12) 和 (12') 式可知, 只要得到加热条两端的电压降变化量 $\Delta U(\Delta U_{\text{TCR}})$ 便可获得热导率 κ_1 和 κ_2 .

3 仿真

以上我们推导了待测薄膜热导率与测试量 $\Delta T(\Delta T_{\text{TCR}})$ 以及 $\Delta U(\Delta U_{\text{TCR}})$ 的关系式. 为验证以上关系的正确性, 我们选择 ANSYS 有限元软件对图 1 所示悬臂梁结构的温升及电压降变化情况进行了仿真.

3.1 单元选择

ANSYS 软件中, 进行仿真分析的第一步是选择建模用到的单元类型. 考虑到加热电阻条的长度远大于其厚度和宽度, 我们选用 LINK68 单元作为金属电阻条的建模单元. 对于待测薄膜, 因为其宽度与长度在同一数量级上, 我们选用 PLANE55 作为建模单元.

3.2 参数选择

根据参考文献 [2—18] 并考虑到悬臂梁的机械性能, 选择悬臂梁长度 $l \leq 200 \mu\text{m}$. 待测薄膜厚度及宽度的典型值分别为 500 nm 和 $20 \mu\text{m}$, 金属电阻条的横截面积典型值为 $5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, 对应于厚度为 50 nm 和宽度为 $1 \mu\text{m}$.

由于镍铬合金 (NiCr) 和氮化硅介质薄膜 (SiN_x) 在 MEMS 器件中, 尤其是非制冷红外探测器领域 [1,2] 得到了广泛应用, 我们分别将其作为金属加热条和待测薄膜. 表 1 和表 2 给出了仿真用到的参数, 建好的仿真模型如图 2 所示.

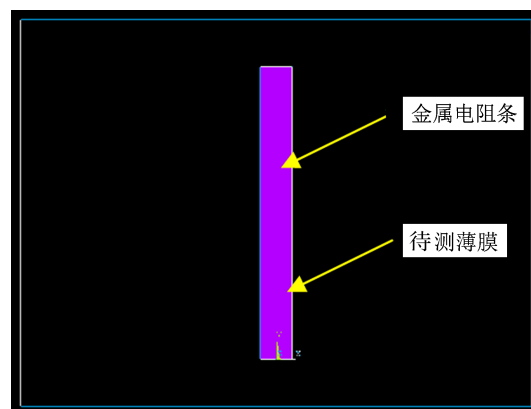


图 2 用于一维双端支撑臂梁结构的仿真模型

表 1 待测薄膜的仿真参数 [8,11,13,15,20,21]

参数	建模				面积网格化	边界条件 (两端)
	$l/10^{-6}$	$d_1/10^{-6}$ m	$w_1/10^{-6}$ m	$\kappa_1/\text{W}\cdot\text{mK}^{-1}$	单元尺寸/m	温度/K
变化范围	20—180	0.05—0.5	2—20	1—10	—	—
典型值	180	0.5	20	1	10^{-6}	300

表 2 加热电阻的仿真参数 [2,11,20,21]

参数	建模				面积网格化	边界条件 (两端)	
	$l/10^{-6}$ m	$S_2/10^{-14}$ m ²	$\kappa_2/\text{W}\cdot\text{mK}^{-1}$	$\rho\Omega/10^{-8}$ Ωm	单元尺寸/m	温度/K	I/mA
变化范围	20—180	0.5—5	10—100	1—10	—	—	(0.1—1)
典型值	180	5	100	6.8	10^{-6}	300	0.1

仿真时改变某一仿真参数 (几何尺寸、物理参数或电流 I), 保持其他参数为其对应典型值, 从而获得不同仿真结果. 再将仿真结果与 (4) 和 (4') 以及 (12) 和 (12') 式的计算结果相比较从而考察其正确性.

4 结果与讨论

4.1 温升结果

4.1.1 不考虑金属电阻条电阻随温度的变化

图 3 给出了不同悬臂梁长度时的温升仿真结果. 从图 3 可以看出, 随着悬臂梁长度的减小, 悬臂梁横截面逐渐偏离等温面. 这是由于随着悬臂梁长

宽比减小, 热传导逐渐从一维传导过渡到二维热传导问题, 此时 (3) 式不再成立. 因此, 根据不同悬臂梁长度仿真结果, 实际测试结构中悬臂梁的长宽比应不小于 9.

根据图 3(a) 的仿真结果数据, 可以作出不同悬臂梁位置处的温升, 即 $\Delta T(x)$ - x 关系, 如图 4 所示. 同时, 图 4 还给出了通过 (4) 式得到的 $\Delta T(x)$ - x 关系. 从图 4 中可以看到, (4) 式的结果与仿真结果符合得非常好. 若定义仿真结果与计算结果之间的差别量为

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta T_{\text{计算}} - \Delta T_{\text{仿真}}}{\Delta T_{\text{计算}}} \right| \times 100\%, \quad (13)$$

则图 4 中的 $\varepsilon_{\text{max}} < 1\%$.

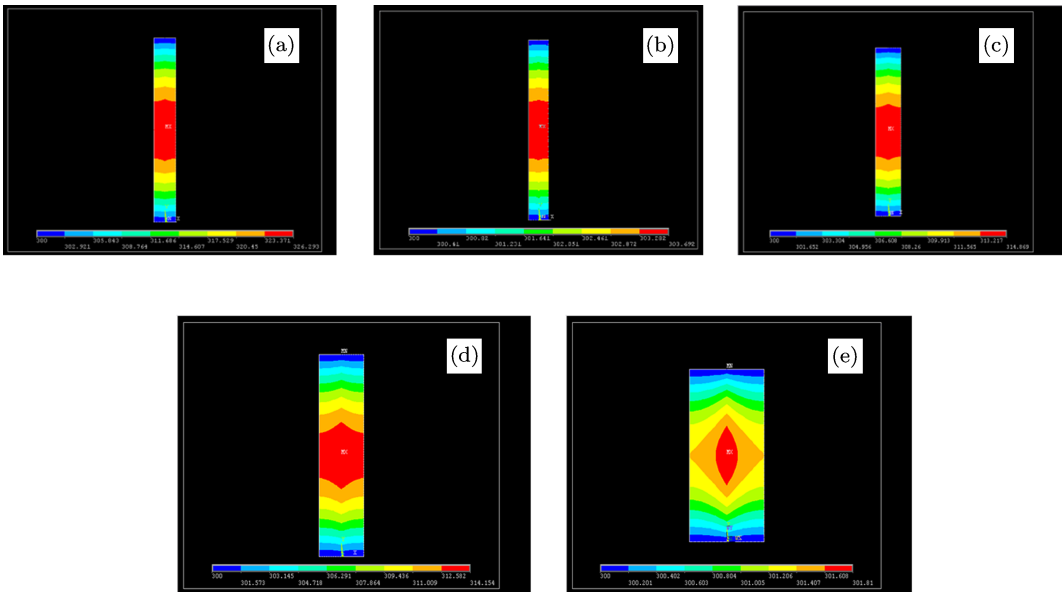


图 3 不同悬臂梁长度的温升仿真结果 (a) $l = 180 \mu\text{m}$; (b) $l = 160 \mu\text{m}$; (c) $l = 120 \mu\text{m}$; (d) $l = 80 \mu\text{m}$; (e) $l = 40 \mu\text{m}$

改变其他参数,如薄膜厚度、宽度、金属条横截面积、材料参数、加热电流等,进行仿真,并与(4)式的计算结果进行比较,部分结果如表3所示.由表3可以看出,所有仿真结果均与(4)式计算结果相符合.因此,当不考虑金属电阻条电阻随温度的变化时,(4)式正确表达了悬臂梁的温升分布.

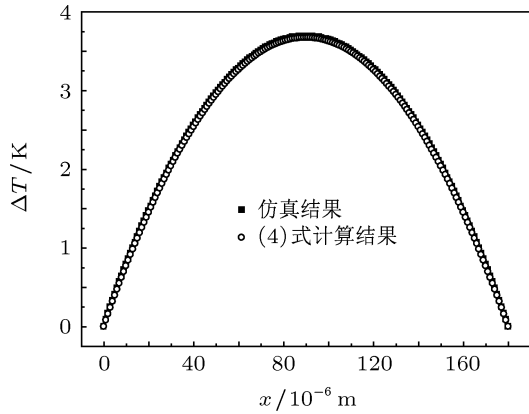


图4 根据图3(a)和(4)式得到的 $\Delta T(x)$ - x 关系

仿真.图5为 $\alpha = 0.5\%$ 时的仿真结果.从图5可以看到,悬臂梁最高温升从图3(a)时的 3.692 K 变为 3.75 K,增加了约 2%.根据不同 TCR 时的仿真结果做出 $\Delta T(x)$ - x 关系,如图6所示.可以看出,随着 TCR 增大,仿真结果与(4)式计算结果区别增大,当 $\alpha = 2\%$ 时, $\varepsilon_{\max} > 6\%$.

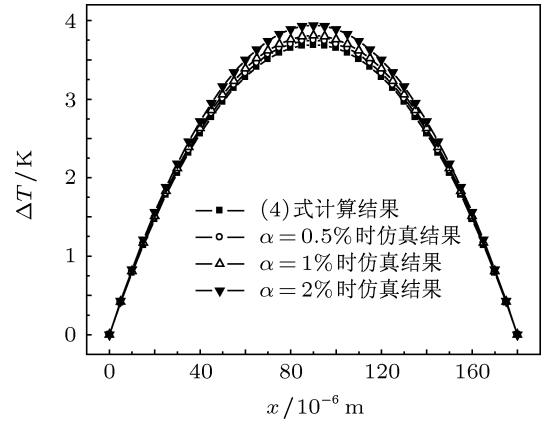


图6 不同 TCR 时的 $\Delta T(x)$ - x 关系

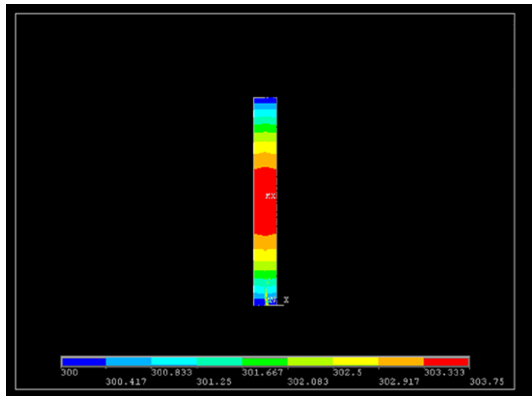


图5 $\alpha = 0.5\%$ 时的仿真结果

根据(4')式得出的 $\Delta T(x)$ - x 关系如图7所示,并与 $\alpha = 2\%$ 时的仿真结果相比较,可以看到,仿真结果与(4')式计算结果符合得很好.

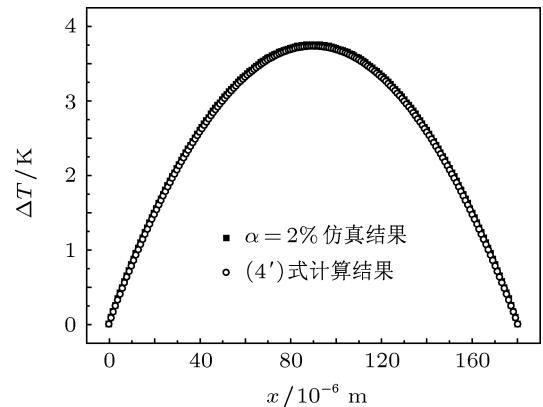


图7 (4')式得到的 $\Delta T_{\text{TCR}}(x)$ - x 关系与 $\alpha = 2\%$ 时的仿真结果比较

4.1.2 考虑金属电阻条电阻随温度的变化

分别取金属电阻条的 $\alpha = 0.5\%, 1\%, 2\%$ 进行

表3 根据(4)式计算的 $\Delta T_{\max}$ 及 C_2 的部分结果与仿真结果比较

参数		$\kappa_1/\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$		I/mA		$S_2/10^{-14}\text{ m}^2$		$d_1/10^{-6}\text{ m}$		$W_1/10^{-6}\text{ m}$		$\rho_{\Omega}/10^{-8}\text{ }\Omega\text{m}$	
		2	5	0.2	0.3	0.5	2	0.05	0.2	2	10	1	10
$\Delta T_{\text{max}}/\text{K}$	计算	2.20	1.00	14.77	33.23	52.80	11.48	9.18	6.12	9.18	5.51	0.54	5.40
	仿真	2.22	1.01	14.77	33.23	52.87	11.55	9.19	6.14	9.18	5.51	0.54	5.43
$C_2/10^{-8}$	计算	-2.72	-1.24	-18.13	-40.80	-6.48	-14.17	-11.33	-7.56	-11.33	-6.80	-6.67	-6.66
	仿真	-2.73	-1.24	-18.20	-40.90	-6.49	-14.20	-11.31	-7.57	-11.31	-6.80	-6.67	-6.68

4.2 电压降结果

图 8 给出了 $\alpha = 0, 0.5\%$ 时金属电阻条的电压降仿真结果. 根据仿真结果容易得到 $\alpha = 0.5\%$ 时电压降变化为 $\Delta U_{\text{TCR}} = 0.024778 - 0.024480 = 0.000298 \text{ V}$. 另一方面, 通过 (12) 和 (12') 式也可计算 ΔU 及 ΔU_{TCR} . 表 4 总结了不同 α 时的计算及仿真结果. 从表 4 容易看出, α 越大, (13) 式计算结果与仿真结果相差越大. 如 $\alpha = 2\%$ 时, $\varepsilon > 6\%$, 而 (13') 式与仿真结果之间的差别量始终为 $\varepsilon < 2\%$.

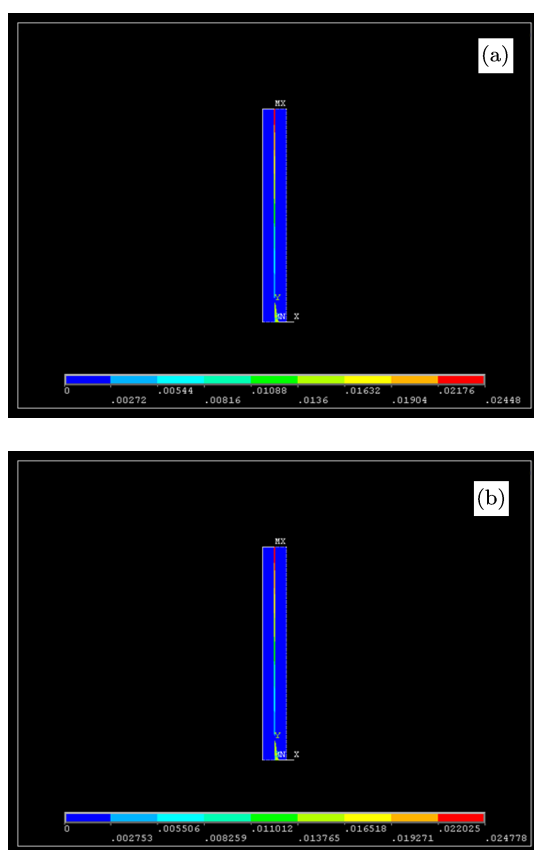


图 8 不同 α 时加热条电压降仿真结果 (a) $\alpha = 0$; (b) $\alpha = 0.5\%$

根据以上讨论可知, 仿真结果证实了理论推导的正确性. 其中, 由于 (12') 式考虑了金属电阻条的电阻温度系数, 因此更能准确地表达测试量与待测热导率的关系. 不过由于几乎所有金属材料的 α 都小于 1% , 实际测量中通过 (12) 式计算热导率结果也可行.

相对于常用的 3ω 交流热导率测试方法, 直流法的测试平台更容易搭建, 更好地排除了因测试电路带来的噪声信号的影响. 因此, 本文所采用的直流测试法可以获得更为精确的结果. 我们正在设计热导测试结构加工中所需的掩模图形, 实际热导率测试工作将在不久后开展.

表 4 不同 α 值时计算和仿真得到的 ΔU 和 ΔU_{TCR} 结果

$\alpha/\%$	仿真得到的 $\Delta U/\text{V}$	(12) 式计算得到的 $\Delta U/\text{V}$	(12') 式计算得到的 $\Delta U_{\text{TCR}}/\text{V}$
0.5	0.000298	0.000300	0.000304
1	0.000622	0.000599	0.000617
2	0.001280	0.001200	0.001270

5 结论

利用一维热传导方程推导并获得了在直流加热电流条件下一维双端支撑悬臂梁的温升分布, 以及加热电阻两端电压降变化与薄膜热导率之间的关系. 用 ANSYS 有限元软件的仿真结果证实了理论推导的正确性, 表明一维双端支撑悬臂梁的确可用于薄膜热导率测试. 同时, 仿真结果表明, 考虑了加热电阻的电阻温度效应后得到的温升及电压降增量表达式与仿真结果的误差小于 2% . 与通常的 3ω 交流法测试薄膜热导率相比, 直流测试法更为简单且容易获得更为精确的结果.

- [1] Kruse P W, Skatrud D D 1997 *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems* (1st Ed.) (San Diego: Academic Press) pp17–75
- [2] Greenspan J 1998 *MS Dissertation* (Montreal: McGill University)
- [3] Sberveglieri G, Hellmich W, Muller G 1997 *Microsyst. Technol.* **3** 183
- [4] Eaton W P, Smith J H 1997 *Smart Mater. Struct.* **6** 530
- [5] Yang J, Zhang J, Zhang H, Zhu Y 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 114902
- [6] Zhang Y L, Hapenciuc C L, Castillo, Borca-Tasciuc T, Mehta R J, Karthik C, Ramanath G 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 062107
- [7] Mavrokefalos A, Pettes M T, Zhou F, Shi L 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 034901
- [8] Jain A, Goodson K E 2008 *J. Heat Transfer* **130** 102402
- [9] Paul O, Ruther P, Plattner L, Baltes H 2000 *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **13** 159
- [10] Volklein F 1990 *Thin Solid Films* **188** 27
- [11] Arx M, Paul O, Baltes H 2000 *J. Microelectromech. Syst.* **9** 136
- [12] Cahill D G, Fischer H E, Klitsner T, Swartz E T, Pohl R O 1989 *J.*

- Vac. Sci. Technol. A* **7** 1259
- [13] Mastrangelo C H, Tai Y C, Muller R S 1990 *Sensors and Actuators A* **21-23** 856
- [14] Cahill D G 1990 *Rev. Sci. Instrum.* **61** 802
- [15] Eriksson P, Anderson J Y, Stemme G 1997 *J. Microelectromech. Syst.* **6** 55
- [16] Sultan R, Avery A D, Stiehl G, Zink B L 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 043501
- [17] Yamane T, Nagai N, Katayama S, Todoki M 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 9772
- [18] Qiu L, Wang D W, Zheng X H, Su G P 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 045106
- [19] Benard W L, Kahn H, Heuer A H, Huff M 1998 *J. Microelectromech. Syst.* **7** 245
- [20] Brand O, Fedder G K, (translated by Huang Q A, Qin M) 2007 *CMOS MEMS Technology and Applications* (Nanjing: Southeast University Press) pp62–119 (in Chinese) [Brand O, Fedder G K, (黄庆安, 秦明译) CMOS MEMS 技术与应用 (南京: 东南大学出版社) 第 62—119 页]
- [21] Zhu X Y 2007 *College Physics Experiment Course* (1st Ed.) (Beijing: Science Press) pp311–313 (in Chinese) [朱孝义 2007 大学物理实验教程 (第一版) (北京: 科学出版社) 第 311—313 页]

Numerical simulation of direct current method of measuring thermal conductivities of thin films*

Li Wei-Zhi[†] Wang Jun

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 15 June 2011; revised manuscript received 10 October 2011)

Abstract

Thermal conductivity is one of the most important physical properties of thin films. Different from two- or three-dimensional measurement structures in most reports, in this work, one-dimensional (1D) two-end supported cantilever beam is provided. The structure of cantilever includes a metal heater (which also serves as a thermometer) and thin film(s) underneath for measurement. 1D heat flow equation is employed to obtain the expression of temperature rise distribution ($\Delta T(x)$) along the cantilever beam and voltage drop changes along the heater (ΔU) when a direct current (DC) follows in the heater. To confirm the correctness of theoretical deduction, ANSYS finite element software is employed to simulate $\Delta T(x)$ and ΔU . Results demonstrate that the simulations are in good agreement with the theoretic calculations obtained from expressions of $\Delta T(x)$ and ΔU . Compared with conventional 3-times frequency (3ω) method, the DC method with 1D cantilever beam is relatively simple and accurate.

Keywords: heat transfer, thermal conductivities of thin films, ANSYS

PACS: 44.10.+i, 07.10.Cm

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60736005, 61006036).

[†] E-mail: lwz393@hotmail.com