

在线检测多晶硅薄膜热导率测试结构 的设计与模拟

许高斌 黄庆安

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 提出了一种在线测试表面加工多晶硅薄膜热导率的结构, 推导了热学模型, 给出了测试方法, 用 ANSYS 验证了热学模型。该方法避免了测试结构放置在真空中的缺点, 有望在工艺线上得到应用。

关键词: 热导率; 表面微机械技术; 测试结构; 多晶硅薄膜

EEACC: 2575F; 8460

中图分类号: TN 402; TN 405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)04-0430-06

1 引言

多晶硅薄膜被普遍应用于 MEMS 器件和集成电路中, 是微机械器件的重要构件。在薄膜的各项参数中, 热导率对器件的性能有很大的影响。由于体材料的热导率和薄膜材料的热导率有很大的差异, 因而薄膜材料的热导率就不能用其体材料的热导率来代替, 且传统测试体材料热导率的方法也不能用于对薄膜材料热导率的测量。

很多微机械器件如微谐振器、微传感器和其他 MEMS 器件的制造工艺是使用表面微机械加工工艺或 CMOS MEMS 工艺。目前国外设计的各种多晶硅薄膜热导率测试结构大多使用 CMOS 工艺或 CMOS MEMS 制造技术且需要后处理体硅腐蚀, 测试结构复杂, 难以解决热传导中的边缘效应, 以及需要真空的测试环境和设计专门的测试装置等^[1,2], 显然这些测试方法是不能满足对表面微机械加工工艺中多晶硅薄膜热导率在线测试的要求。

本文采用表面微机械制造工艺设计的多晶硅薄膜热导率测试结构, 其制造工艺能够与其他微机械器件制造工艺完全兼容, 制造工艺简单, 测试方便可行。由于结构设计可以抵消对流散热、辐射散热、向

衬底的散热以及存在的边缘效应等问题, 使得该测试结构和测试方法可以在自然环境下得到多晶硅薄膜的热导率, 解决了以往各种测试方法需在真空中测量的不足, 从而满足了表面微机械制造工艺中对多晶硅薄膜热导率的在线测试要求, 达到监控器件制造工艺的目的。

2 结构与原理

图 1 和图 2 是本文利用表面微机械加工技术设计的多晶硅薄膜热导率测试结构的俯视图与侧视图。图中 A, B, C, D 都是铝压焊块, 用于施加电压、测量电流或电压。整个测试结构包括一个不含多晶硅悬臂梁的参考结构和两个含有长度不同、宽度厚度完全相同多晶硅悬臂梁的测试结构 1、2, 且测试结构 1、2 中的引线和加热条部分与参考结构完全一样。

设计参考结构是用来获得测试结构 1、2 中引线和加热条上的总散热系数, 设计两个含尺寸相同多晶硅悬臂梁的测试结构是用来抵消两个悬臂梁中对流散热、辐射散热和向衬底散热及边缘效应的影响, 从而可以提取到多晶硅薄膜的热导率。

该测试方法只需把测试结构芯片直接放置在实

许高斌 男, 1970 年出生, 博士研究生, 当前从事 MEMS 测试结构研究。

黄庆安 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 当前从事微电子和 MEMS 技术教学与研究。

2003-03-31 收到, 2003-06-24 定稿

©2004 中国电子学会

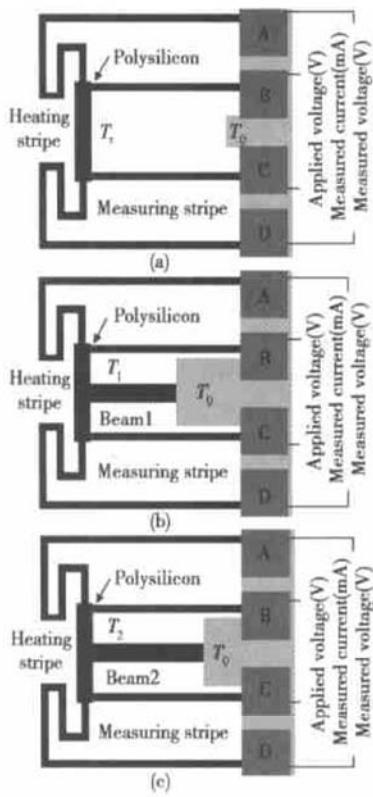


图 1 多晶硅薄膜热导率测试结构顶视图 (a) 参考结构; (b) 测试结构 1; (c) 测试结构 2

Fig. 1 Top view of test structure of thermal conductivity of polysilicon thin films (a) Reference structure; (b) Test structure 1; (c) Test structure 2

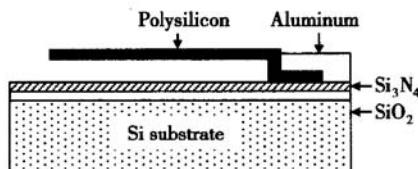


图 2 多晶硅薄膜热导率测试结构侧视图

Fig. 2 Cross-section view of test structure of thermal conductivity of polysilicon thin films

实验室常用的四探针台上,利用四探针法在自然环境下进行测量。在测试时,首先对参考结构进行测量以获得需要的总散热系数,当在其 AB 两端施加一定电压时,会在整个结构中产生温度分布,这时通过 AB 两端测得电流值从而得到加热总功率(即电流和电压的乘积),通过 CD 端测得电压值获取加热条上的温度梯度(其获取方法见下文描述),便可以得到参考结构也即测试结构 1、2 中引线和加热条上的总散热系数。同理在测试结构 1、2 的 AB 两端施加一定电压,在整个结构中也会产生温度分布,通过

AB 两端测得其电流值得到加热总功率,通过 CD 端测得其电压值获取加热条上的温度梯度,得到这两个测试结构总的传热系数。当得到所需的一个总散热系数和两个传热系数,并知道测试结构 1、2 中间悬臂梁的几何尺寸后,便可以根据建立的数学模型很方便地提取到多晶硅薄膜的热导率。

该测试结构使用标准表面微机械加工工艺,其制造工艺如下:(1)在硅衬底上热氧化一层二氧化硅;(2)沉积氮化硅;(3)沉积牺牲层并光刻形成锚区;(4)沉积多晶硅薄膜,光刻形成如图 1 的测试结构;(5)刻引线孔,沉积铝,反刻铝;(6)牺牲层腐蚀。

3 热学模型

图 3 和图 4 是测试结构中悬臂梁的俯视图和横截面及传热模型示意图。由于悬臂梁的长度远远大于其宽度和厚度,在其宽度和厚度方向上可以看作没有温度梯度,因此可以利用一维稳态传热来建立

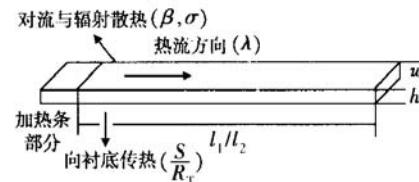


图 3 测试结构悬臂梁顶视图及传热模型示意图

Fig. 3 Top view of cantilever of test structure and schematic of heat-transfer model

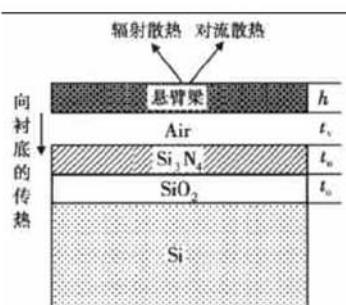


图 4 测试结构悬臂梁的横截面及传热模型示意图

Fig. 4 Sectional view of cantilever of test structure and schematic of heat-transfer model

解析模型。在建立热学模型时,需要建立一个线性化的测试条件,即 $T_1 - T_0 \ll T_0$ (T_1 表示顶端加热条的温度),目的是对辐射散热进行线性化处理。研究表明当温度变化在 100K 范围内,辐射散热是线性变化的,且温度在小于 800K 范围内辐射散热基本

是可以忽略的^[3],因此在测试和建立传热方程时,如果加热条上的温度控制在这个范围内,就可以进行线性化处理。

在图1(a)参考结构中(测试引线及加热条的总散热系数)有传热方程:

$$P_r = G_r \Delta T_r \quad (1)$$

式中 P_r 是参考结构总的加热功率; G_r 是其传热系数; $\Delta T_r = T_r - T_0$ 是温度梯度。

在图1(b)测试结构1中,有总的传热方程

$$P_1 = G_{b1} \Delta T_1 + G_r \Delta T_1 \quad (2)$$

式中 P_1 是测试结构1中总的加热功率; G_{b1} 是其悬臂梁的传热系数; $\Delta T_1 = T_1 - T_0$ 是温度梯度。

对测试结构1的悬臂梁区域建立传热方程:

$$kw h \frac{d^2 \Delta T_1}{dx^2} - (2h + w)\beta \Delta T_1 - 4(2h + w)\epsilon\sigma T_0^3 \Delta T_1 - \frac{S}{R_T} w \Delta T_1 = 0 \quad (3)$$

式中 k 是多晶硅薄膜的热导率; w, h 分别表示悬臂梁的宽度与厚度; β 是空气的自然对流系数; ϵ 是梁的辐射发射率; σ 是斯坦佛-波尔磁曼常数; $S = \frac{h}{w}(\frac{2t_v}{h} + 1) + 1$ 是形状系数; $R_T = \frac{t_v}{k_v} + \frac{t_n}{k_n} + \frac{t_o}{k_o}$ 是空气层和氮化硅层及二氧化硅层的等效热阻(t_v, t_n, t_o 和 k_v, k_n, k_o 分别是空气层、氮化硅层、二氧化硅层的厚度和热导率)^[4]。

根据(1)~(3)式,图1(b)测试结构1中悬臂梁的传热系数是:

$$G_{b1} = (\frac{P_1}{\Delta T_1} - \frac{P_r}{\Delta T_r}) = \lambda h \frac{w}{l_1} + \beta(2h + w)l_1 + 4(2h + w)\epsilon\sigma l_1 T_0^3 + \frac{S}{R_T} w l_1 \quad (4)$$

式中 l_1, w 和 h 分别是悬臂梁1的长度、宽度与厚度。

同理可得到图1(c)测试结构2中悬臂梁的传热系数是:

$$G_{b2} = (\frac{P_2}{\Delta T_2} - \frac{P_r}{\Delta T_r}) = \lambda h \frac{w}{l_2} + \beta(2h + w)l_2 + 4(2h + w)\epsilon\sigma l_2 T_0^3 + \frac{S}{R_T} w l_2 \quad (5)$$

式中 P_2 是测试结构2中总的加热功率; G_{b2} 是其悬臂梁的传热系数; $\Delta T_2 = T_2 - T_0$ 是温度梯度; l_2, w 和 h 分别是悬臂梁2的长度、宽度与厚度。

由于测试结构中两个悬臂梁是相同的薄膜,且具有相同的宽度和厚度,因而具有相同的对流传热

系数、辐射发射率和形状系数,因此根据(4)式与(5)式得到多晶硅薄膜热导率的表达式是:

$$\lambda = [(\frac{P_1}{\Delta T_1} - \frac{P_r}{\Delta T_r}) \frac{1}{l_1} - (\frac{P_2}{\Delta T_2} - \frac{P_r}{\Delta T_r}) \frac{1}{l_2}] \times \frac{1}{wh} \times (\frac{1}{l_1^2} - \frac{1}{l_2^2})^{-1} \quad (6)$$

测试结构1,2和参考结构中,加热条上的温度梯度 ΔT_i 与加热条电阻 R_i 有如下关系^[4]:

$$\Delta T_i = \frac{R_i - R_0}{R_0} \xi^{-1} \quad (7)$$

式中 R_0 是加热条的初始电阻值; R_i 是加热条被加热后的电阻值; ξ 是多晶硅的温度系数。

4 模拟分析

为了验证模型建立的正确性,我们利用 ANSYS5.7 进行模拟分析。模拟时我们分别在三个测试结构的上表面施加空气自然对流系数和辐射散热系数,并根据传热学理论把辐射散热系数转换成等效的对流系数^[5];在结构的下表面施加向衬底传热的散热系数,这个值与梁的宽度和厚度及空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率等因素有关^[4]。

图5是模拟使用的 ANSYS5.7 三维有限元热分析的网格划分示意图。图6是一定加热功率下测试结构的温度分布云图。在不同加热功率和空气层厚度下模拟得到的两个测试结构和参考结构中加热

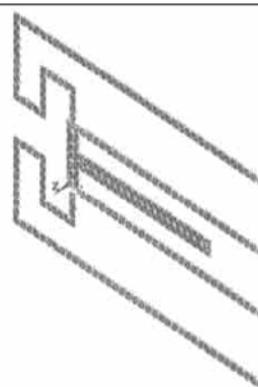


图5 ANSYS5.7 三维有限元热分析的网格划分示意图

Fig. 5 Schematic of three-dimensional finite element mesh division generated by ANSYSTM

功率、温度梯度以及空气层厚度之间的相互关系如图7、图8、图9所示。从模拟结果可以看出,加热功率与温度梯度均成线性关系,说明本文线性化处理

是合适的。图 10 反映了空气层厚度对测试结构 1, 2 与参考结构之间传热系数差值的影响。模拟分析表明, 虽然功率增大, 温度梯度也增大, 但测试结构与参考结构的传热系数差值不变, 说明本文利用线性温度关系之差确定热导率是有较高精度的。图 11 是模拟温度梯度与电阻的对应关系。一旦温度系数确定, 这个对应关系也就确定了, 且对参考结构、测试结构 1 和测试结构 2 同样适用。当测得电压值得到加热条的电阻便可以根据这个对应关系获取温度梯度。

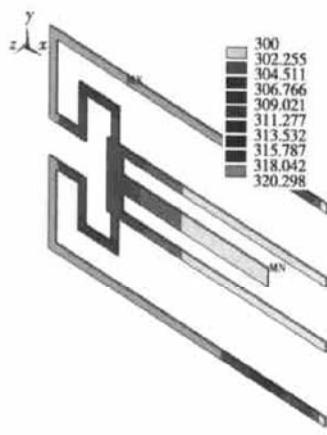


图 6 测试结构的 ANASYS 三维有限元热分析温度分布云图

Fig. 6 Temperature distribution graph of test structure generated by thermal analysis of ANASYSTM

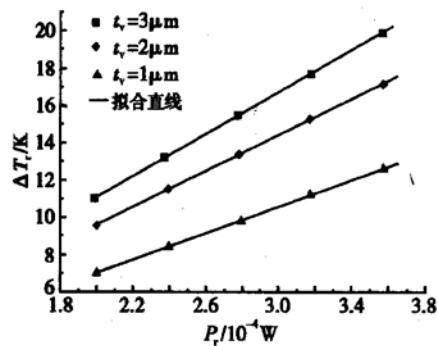


图 7 参考结构中温度梯度 ΔT_r 与加热功率 P_r 及空气层厚度 t_v 的相互关系

Fig. 7 Temperature gradient versus heating power and thickness of air layer in reference structure

为了进一步验证, 我们还在不同的环境温度下进行了模拟。模拟时用不同的实验数据来定义薄膜材料参数及施加相应的约束边界条件, 每次模拟可以得到不同的加热功率及温度梯度等数据, 把这些数据进一步进行处理分析后代入(6)式, 便能得到一

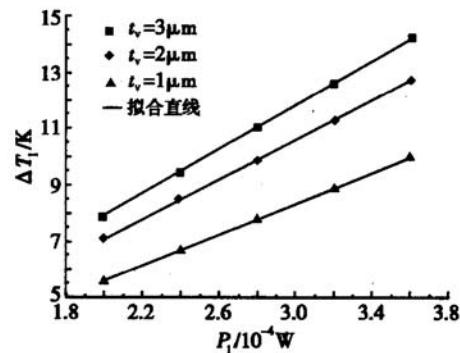


图 8 测试结构 1 中温度梯度与加热 ΔT_1 功率 P_1 及空气层厚度 t_v 的相互关系

Fig. 8 Temperature gradient versus heating power and thickness of air layer in test structure 1

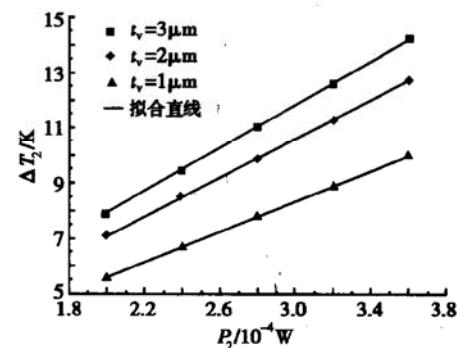


图 9 测试结构 2 中温度梯度 ΔT_2 与加热功率 P_2 及空气层厚度 t_v 的相互关系加热功率

Fig. 9 Temperature gradient versus heating power and thickness of air layer in test structure 2

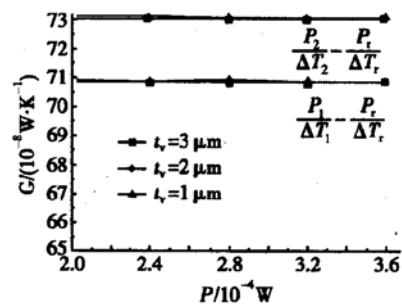


图 10 加热功率、空气层厚度与传热系数之差的相互关系

Fig. 10 D-value of the heat transfer coefficient versus heating power and thickness of air layer

个热导率值, 再反过来与定义的实验数据进行比较, 其对应关系如图 12 所示。

表 1 为模拟使用的测试结构的几何尺寸。对于本文给定的几何尺寸和参数, 模拟分析表明, 在不同

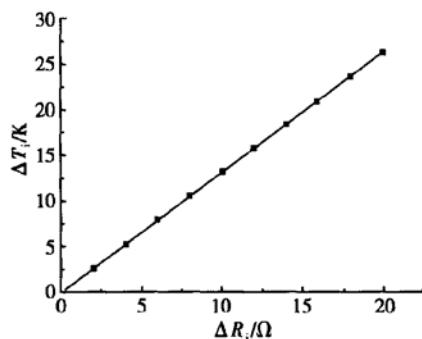


图 11 加热条上的温度梯度 ΔT_i 与其电阻变化 ΔR_i 的对应关系

Fig. 11 Temperature gradient as a function of D-value of Resistance of the heating stripe

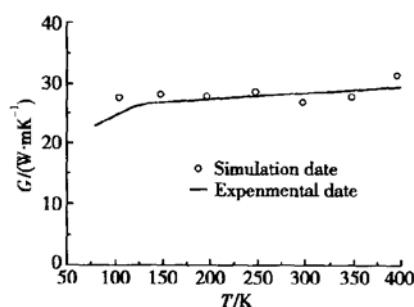


图 12 模拟热导率与其实验值的比较

Fig. 12 Comparision of thermal conductivity of simulation result and experimental one

表 1 模拟使用的测试结构的几何尺寸

Table 1 Dimension of the test structure used in this simulation

结构	长度/μm	宽度/μm	厚度/μm
加热条	40	10	1
测量条	100	5	1
多晶硅悬臂梁 1	80	10	1
多晶硅悬臂梁 2	100	10	1

空气层厚度下, $\frac{P_1}{\Delta T_1} - \frac{P_r}{\Delta T_r}$ 在 $7.089 \times 10^{-6} \sim 7.092 \times 10^{-6} \text{ W/K}$ 范围内, 误差是 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 量级; 在不同空气层厚度下, $\frac{P_2}{\Delta T_2} - \frac{P_r}{\Delta T_r}$ 在 $7.303 \times 10^{-6} \sim 7.309 \times 10^{-6} \text{ W/K}$, 误差也在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 量级; 这么小的误差量级基本是可以忽略的。从图 10 也可以看出, 不同空气层厚度时, 测试结构 1, 2 与参考结构之间的传热系数差值基本上是一条平行线即基本是重合的, 也就是说加热功率与温度梯度比的差是不随空气层厚度的变化而变化的。在模拟时即便是有误

差的存在, 两个差值的变化规律也是一样的即同时增加或减小, 且(6)式中的第一项是两个传热系数差值分别与悬臂梁长度比的差值, 从而增加了减小误差的途径。

5 讨论与结论

根据模拟分析, 三个结构中传热系数的线性度是非常好的, 测试结构 1, 2 与参考结构之间的传热系数差是不随空气层厚度的变化而变化的; 在设定实验值为 28.3 W/(m · K) 时, 模拟得到 300 K 时多晶硅薄膜的热导率在 $27.5956 \sim 27.7689 \text{ W/(m · K)}$ 之间, 模拟值与实验值的误差在 $1.877\% \sim 2.589\%$ 之间。根据图 12 在不同测试环境温度下模拟值与实验值的误差也在小于 5% 的范围内, 从而验证了模型建立和测试结构的设计是正确的。

误差的产生可能是因为加热条上的温度是不均匀的, 存在微小的差别, 而我们在模拟分析时使用了加热条的平均温度。从加热功率与温度梯度的关系曲线可以看出, 尽管线性度很好但不经过坐标原点, 但是这么小的误差是能满足在线检测的要求。

本文中我们提出了一种使用表面加工工艺设计测量多晶硅薄膜热导率的新结构, 由于结构设计的巧妙性, 克服了其他测试方法中存在的测试结构复杂、边缘效应及需要真空测量环境的缺点。由于工艺简单、测试方便, 使得这种测试方法也适合于其他工艺如体硅工艺或 CMOS 工艺对多晶硅薄膜或其他导体薄膜热导率的在线检测。

参考文献

- [1] McConnell D, Uma S. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. *Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(3): 360
- [2] Jansen E, Obermeier E. Thermal conductivity measurements on thin films based on micromechanical devices. *J Microeng Microeng*, 1996, 6(3): 118
- [3] Arx M, Paul O, Baltes H. Process dependent thin film thermal conductivities for thermal CMOS MEMS. *J Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(1): 136
- [4] Kuang Y, Huang Q A, Lee N K S. Numerical simulation of a polysilicon thermal flexure actuator. *Microsystem Technology*, 2002, 8: 17
- [5] Yang Shiming, Tao Wenquan. *Heat transfer*. Beijing: Higher Education Press, 1998[杨世铭, 陶文铨, 编著. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1998]

Design and Simulation of On-Line Test Structure for Thermal Conductivity of Polysilicon Thin Films

Xu Gaobin and Huang Qing'an

(Key Laboratory of MEMS of Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An on-line test structure for measuring the thermal conductivity of polysilicon thin films is proposed. The measurement method and thermal modeling are given. The results are confirmed by ANSYSTM. The method would find applications in the processing line because the vacuum testing circumstances are not required.

Key words: thermal conductivity; surface micromachining technique; test structure; polysilicon thin films

EEACC: 2575F; 8460

Article ID: 0253-4177(2004)04-0430-06

Xu Gaobin male, was born in 1970, PhD. He is engaged in research on MEMS test structure.

Huang Qing'an male, was born in 1963, professor. He is engaged in teaching and research on microelectronics and MEMS.

Received 31 March 2003, revised manuscript received 24 June 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics