

一种简单的表面加工多晶硅薄膜热扩散率在线测试结构

戚丽娜, 黄庆安, 李伟华

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 本文提出了一种表面加工多晶硅薄膜的在线测试结构. 模型综合考虑了辐射、对流以及向衬底的传热等因素的影响, 通过分析两个长度不同但宽度与厚度相同的梁在相同加热电流下的瞬态电阻变化特性, 来提取多晶硅薄膜的热扩散系数. 用 ANSYS 软件验证了该模型的正确性, 通过实验测得表面加工多晶硅薄膜的热扩散率为 $1.059 \times 10^{-5} \pm 3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

关键词: 多晶硅薄膜; 热扩散率; 瞬态特性

中图分类号: TN304.055 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 08-1549-04

On-Line Extraction for Thermal Diffusivity of Surface Micromachined Polysilicon Thin Films

QILINA HUANG Qing-an LI WEI-hua

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

Abstract A test structure to measure the diffusivity of polysilicon thin films is proposed. The radiant heat loss and the convective heat loss from the structure have been considered. The same heating constant current is applied in the two beams with the same width and thickness but variant length. The change of resistance with time up to thermal steady state is measured using a separation circuit, and then thermal diffusivity can be obtained. The model has been verified by ANSYS. The experiments show a thermal diffusivity of $1.059 \times 10^{-5} \pm 3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Key words polysilicon thin films; thermal diffusivity; transient characteristic

1 引言

多晶硅薄膜作为微执行器、微传感器等 MEMS 器件的重要构件, 其热学性能直接影响着器件的热电性能^[1]. 而多晶硅薄膜的热扩散率则是器件动态相应的关键参数. 所以有必要测量多晶硅薄膜的热扩散系数, 更好地实现对微执行器和微传感器的优化.

一些传统的测试结构有 Arx Paul 和 Baltes 提出的 CMOS 工艺下实现的悬臂梁和桥式结构^[2-4], 利用傅立叶变换分析测得薄膜的热扩散系数^[5,6], 相位敏感技术、周期性加热法, 等等. 但这些测试结构和方法, 需要把测试结构放置在真空环境下, 而且测试过程比较复杂, 有很多需要借助特定的测试仪器, 象红外热源、激光器等. 因此不可能实现薄膜热扩散系数的在线提取. 本文旨在提出一种在线提取多晶硅薄膜热扩散系数的简单测量模型和方法. 通过建立的提取模型, 并用 ANSYS 模拟结果进行了验证, 最后用表面加工工艺制作的多晶硅薄膜进行了测试. 可作为工

艺线的在线测量.

2 测试理论模型

首先电阻率和温度的关系一般表示为^[7]:

$$\rho = \rho_{\infty} [1 + \xi(T - T_{\infty})] \quad (1)$$

式中 ξ 为电阻率的线性温度系数, ρ 和 ρ_{∞} 分别为梁在温度 T 和 T_{∞} 下的电阻率.

对表面加工的两端固支梁, 当在梁上施加一恒定电流时, 梁受热最终达到热稳态, 其加热过程中的瞬态传热方程为^[1]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a_p} \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon [T - T_{\infty} - \frac{J^2 \rho_0}{K \varepsilon}] \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{G}{kwh} - \frac{J^2 \rho_0 \xi}{k} \quad (3)$$

$$G = \beta(2h + w) + 4\varepsilon^* \sigma(2h + w)T_{\infty}^3 + \frac{S}{R_r} w \quad (4)$$

式中, a_p 是多晶硅的热扩散系数, J 是加热电流的电流密

度, ρ_0 是多晶硅电阻的初始电阻率, T_∞ 为衬底温度 (也就是室温), k 是多晶硅的热导率, ξ 为多晶硅电阻的温度系数, β 是自然对流系数, ε 是梁的辐射发射率, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 是斯忒藩-波耳兹曼常数, $S = \frac{h}{w} \left[\frac{2t_k}{h} + 1 \right] + 1$

是热传导形状系数, $R_T = \frac{t_a}{k_a} + \frac{t_n}{k_n} + \frac{t_o}{k_o}$ 是空气层、氮化硅层和二氧化硅层的等效热阻, t_a, t_n, t_o 和 k_a, k_n, k_o 分别是空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率。

瞬态传热的初始条件和边界条件为

$$\begin{cases} T(x, 0) = T_\infty \\ T(0, t) = T_\infty \\ T(l, t) = T_\infty \end{cases} \quad (5)$$

式中: l 为梁的长度。

解偏微分方程 (2) 得到梁的瞬态温度分布为:

$$T(x, t) = \Phi(x) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi}{l} x \exp \left[- \frac{t}{l^2 a_p (\varepsilon^2 + n^2 p^2)} \right] \quad (6)$$

$$\Phi(x) = T_\infty + \frac{J^2 \rho_0}{k \varepsilon} \left[1 - \frac{\cosh[\sqrt{\varepsilon}(x - l/2)]}{\cosh(\sqrt{\varepsilon}l/2)} \right] \quad (7)$$

$$C_n = \frac{2}{l} \int_0^l [T_\infty - \Phi(x)] \sin \left(\frac{n\pi}{l} x \right) dx \quad (8)$$

式中: $\Phi(x)$ 实际上是热稳态时梁的温度分布。由常用数据

代入 (8), 分析发现 $\sum_n \frac{C_n}{C_1} \geq 95\%$, 所以在模型中只保留第一项 C_1 。再根据式 (1), 得到梁两端的电压随时间的变化为

$$V(t) = IR_0 [1 + \xi(T(t) - T_\infty)] = A + B \exp(-t/\tau) \quad (9)$$

$$\tau = \frac{l^2}{a_p (\varepsilon^2 + p^2)} \quad (10)$$

式中 $A = V_\infty, B = V_0 - V_\infty, I$ 为加载的电流大小, V_0 为初始电压, V_∞ 为结构达到热稳态之后的电压。则变换式 (9) 得到

$$\ln \left[\frac{V(t) - V_\infty}{V_0 - V_\infty} \right] = - \frac{t}{\tau} \quad (11)$$

只要测得梁两端的电压变化曲线和最终达到热稳态的电压值, 就可以通过 (11) 线性拟合提取出 τ 根据式 (10) 同时注意到式 (3) 中 ε 的大小只与梁的宽度厚度有关, 因此通过分析两个不同长度梁其电阻的瞬态加热特性, 便可以提取出多晶硅薄膜的热扩散系数:

$$a_p = \frac{\left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right)}{P^2 \left(\frac{1}{l_1^2} - \frac{1}{l_2^2} \right)} \quad (12)$$

利用 ANSYS 软件对该模型进行验证, 对两根不同长度的梁, 分别得到它们的时间常数, 将数据代入式 (12), 计算得到 $a_p = 1.115 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ 与模拟初始设置的 $1.15 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ 相比, 误差为 3.04%。误差在允许范围内, 所以模型

的建立和理论的推导都是成立的。并且通过模拟可以发现电阻温度系数的大小对于该模型热扩散率的提取并没有影响。

3 结构制作

测试结构在北大微电子所的表面加工工艺线上进行加工制作的, 按照工艺流程制作的测试结构的 SEM 照片如图 1 所示。该测试结构利用的是一对长度不同, 宽度和厚度相同的梁, 加载相同的电流, 分析瞬态特性, 提取出热扩散率。图中所示的多晶硅薄膜梁的长度分别为 $303\mu\text{m}$ 和 $250\mu\text{m}$ 。本文测试了两对结构: 一组宽度为 $15\mu\text{m}$ 、厚度为 $2\mu\text{m}$, 一组为宽度为 $5\mu\text{m}$ 、厚度为 $2\mu\text{m}$ 。

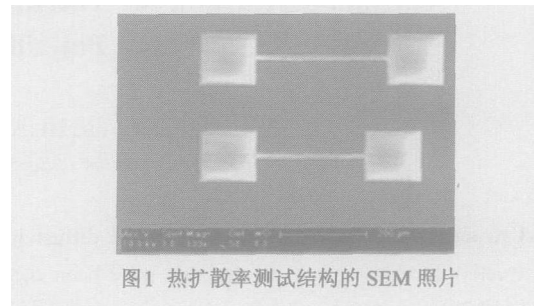


图1 热扩散率测试结构的 SEM 照片

4 实验测试

图 2 为多晶硅薄膜热扩散率的测试电路连接示意图。恒流源利用 $\mu\text{W}-2\text{C}$ 型直流稳压源连一个阻值为 $100\text{k}\Omega$ 的恒定电阻 R 构成, 因为该电阻远大于多晶硅薄膜电阻 $R(t)$, 所以可以近似认为得到的电流为恒定电流 $I = \frac{V}{R + R(t)} \approx \frac{V}{R} (R \gg R(t))$ 。而数字示波器则使用的是 Tektronix TDS 5054

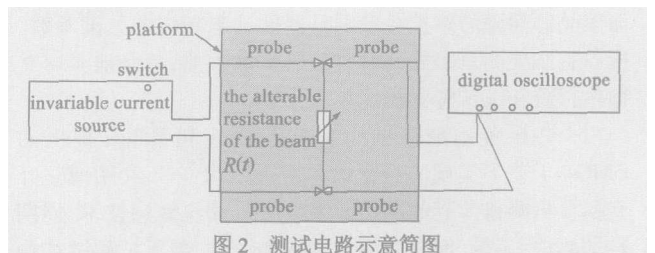
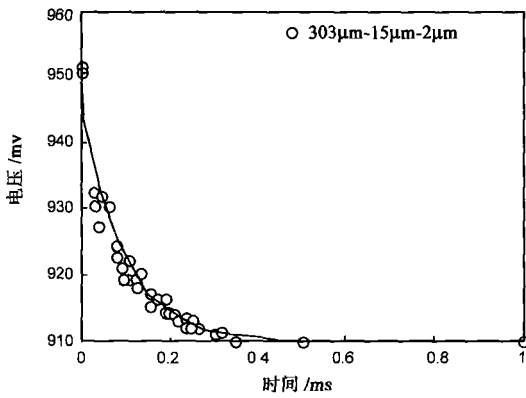
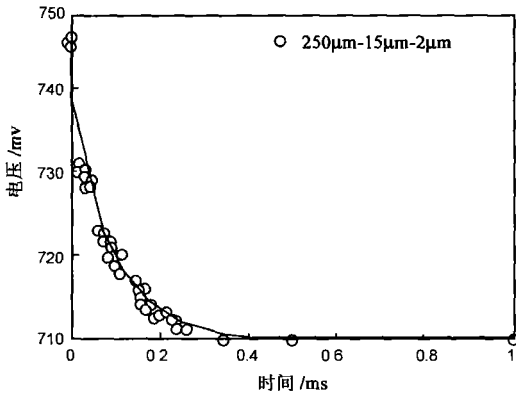


图2 测试电路示意简图

实验测试时, 直接把待测芯片放置在探针台上, 按图 2 电路连接好, 然接通开关, 加热多晶硅梁直至稳态, 示波器记录下这个过程的电压随时间变化曲线如图 3 所示。可以看出多晶硅薄膜呈现负电阻温度效应。根据 (11), 将曲线进行线性化处理, 得到图 4 所示的曲线。经线性拟合得到直线的斜率即为 $-\frac{1}{\tau}$ 的值。对长度分别为 $303\mu\text{m}$ 和 $250\mu\text{m}$ 的梁, 得到的斜率为 1.066×10^4 和 1.1207×10^4 , 将数据带入式 (12), 计算得到的热扩散率为 $1.0862 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$



(a) 长度为 303µm 的梁两端电压随时间的变化曲线



(b) 长度为 250µm 的梁两端电压随时间的变化曲线

图 3 宽度为 15µm 的一对梁测得的电压随时间变化曲线

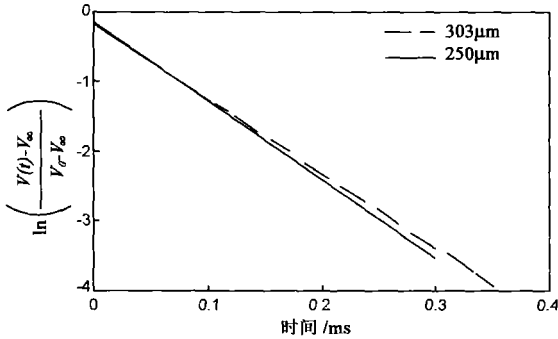
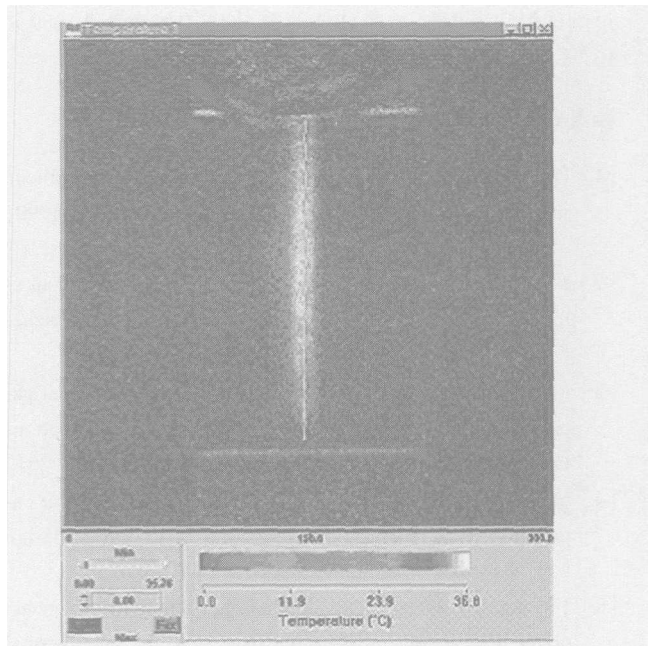
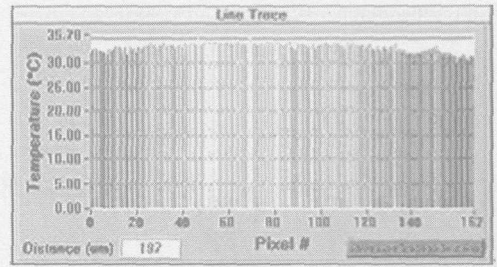


图 4 宽度为 15µm 的一对梁线性化后得到的曲线

对宽度为 5µm 的一对梁 (长度分别为 303µm 和 250µm) 进行上述同样的测量和数据处理, 得到的斜率为 8.5945×10^3 和 9.1145×10^3 , 将数据带入式 (12), 计算得到的热扩散率为 $1.0325 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 取两个测量结果的平均值为 $1.059 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 均方误差为 2.69%。利用 QFI InfraScope II 型热成像仪测量 200µm 长的梁加热达到稳态后的温度分布如图 5 所示。将测量结果代入理论计算公式得到的温度分布和红外热像仪直接测量的温度分布比较情况如图 6 所示。可见, 两者温度分布很接近, 可以证明该理论和测试结果的准确性。



(a) 200µm 的梁加热至稳态的温度分布云图



(b) 200µm 的梁加热至稳态的温度分布数值

图 5 利用红外热像仪测得的温度分布

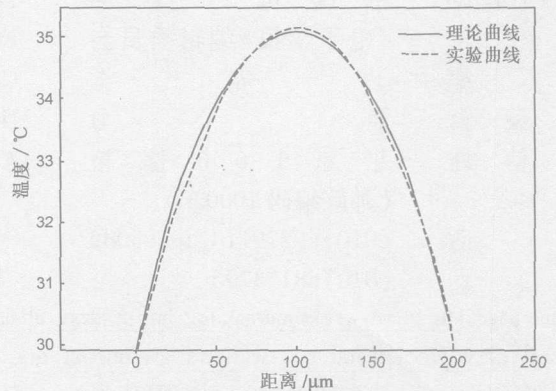


图 6 理论计算曲线和红外热像仪测试曲线的比较

5 结论

本文提出了一种测试表面加工多晶硅热扩散率的测试结构。这个测试结构和方法将热辐射、对流、向衬底的热都考虑进多晶硅薄膜热扩散系数的桥式测试结构中, 测试中, 不需要真空环境, 使得测试结构更具有实用意义。通

过测试得到表面加工多晶硅薄膜的热扩散率为 $1.059 \times 10^5 \pm 3 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ 该测试结构有望在实际中使用。

参考文献:

- [1] Q A Huang, N K S Lee. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator [J]. *J Micromech Microeng*, 1999, 9(1): 64-70
- [2] M von Arn, O Paul, H Baltes. Thermoelectric test structures to measure the heat capacity of CMOS layer sandwiches [A]. *Transducers97* [C]. Chicago, 1997: 619-622
- [3] M von Arn, O Paul. Test structures to measure the heat capacity of CMOS layer sandwiches [J]. *IEEE Transactions On Semiconductor Manufacturing*, 1998, 11(2): 217-224
- [4] M von Arn, O Paul, H Baltes. Determination of the heat capacity of CMOS layers for optimal CMOS sensor design [J]. *Sensors and Actuators*, 1995, 47(1-3): 428-431
- [5] JMorkawa, T Hashimoto, A Maesono. Simultaneous measurement of thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity by Fourier transform thermal analysis [J]. *High Temperatures High Pressures*, 2001, 33: 387-395

- [6] A Maesono, Y Takasaki, Y Mada. A new apparatus for thermal diffusivity and specific heat measurements of films and liquids by means of fourier transform thermal analysis [J]. *High Temperatures High Pressures*, 2002, 34: 127-134
- [7] G K Fedder, R T Howe. Thermal assembly of polysilicon microstructures [A]. *Proceeding of 1991 IEEE MEMS* [C]. Nara, Japan, 1991: 63-68

作者简介:



戚丽娜 女, 1980年生, 东南大学电子工程系 MEMS 教育部重点实验室硕士研究生, 研究方向为 CMOS MEMS, 从事热参数测量的研究. E-mail: qilina1225@yahoo.com.cn

黄庆安 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 长江学者, 863 MEMS 专项专家组专家, 东南大学 MEMS 教育部重点实验室主任、电子工程系副主任, 长期从事微电子和 MEMS 技术教学与研究。

2006年第 8 期 Acta Electronica Sinica No 8 2006

电子学报

(总期 275 期) (Monthly) (Series No 275)

主管单位	中国科学技术协会	China Association for Science and Technology
主办单位	中国电子学会	Published by the Chinese Institute of Electronics Beijing
编辑	《电子学报》编辑委员会	Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica
主编	王守觉	Chief Editor WANG Shou-jue
总编辑	刘力	Director LIU Li
通信处	北京 165 信箱 (邮政编码 100036)	Add Editorial Office of Acta Electronica Sinica (PO Box 165, Beijing 100036, China)
电话	(010) 68279116, 68285082	Tel 86-10-68279116 68285082
传真	(010) 68173796	Fax 86-10-68173796

Home page <http://www.elecpjmal.org> <http://dzxu.chinajournal.net.cn>

E-mail cje@elecpjmal.org wanghu@ejournal.org.cn

排版印刷	北京新瑞铭印刷有限公司	Printed by Xinruiming Co. Ltd., Beijing, China
国内总发行	北京市报刊发行局	Distributed by Domestic Beijing Baokan Faxingju, China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司	Foreign China International Book Trading Corporation
国内订购处	全国各邮电局	Subscription Office—All Local Post Offices in China

国内统一刊号: CN 11-2087/TN

邮发代号 (国内/国外): 2-891/M436

国内定价 ¥32.00