文章编号:1674-7070(2013)06-0522-05

MEMS 表面加工中材料层厚度电学测试结构

钱晓霞[1]　李伟华[2]

摘要

微机电系统(MEMS)表面加工工艺中的材料层厚度是决定 MEMS 器件性能的重要参数之一,如多晶硅结构层厚度和牺牲层厚度,直接决定了 MEMS 器件的机构性能和结构的纵向移动范围,因此对材料层厚度进行测试和工艺控制监视是极具意义的. 当前的材料层厚度测试大多采用光机械的方法,因其测试方法复杂、设备昂贵、测试时间长且很难集成到一个工艺控制监视(PCM)系统中,提出一种新颖的材料层厚度电学测试结构,该测试结构具有结构简单、测量方便并且便于 MEMS 测试系统集成的特点. 通过软件对测试结构和测试模型进行闭环验证,结果表明,模拟值与理论值有较好的一致性.

关键词

微电机系统;表面加工;材料层;电测量

中图分类号 TN407

文献标志码 A

0　引言

微机械、微传感器以及微执行器等,有许多属于薄膜类构件,材料层薄膜厚度是影响其机构性能的重要参数之一,如用来形成多晶硅机械结构的第二层多晶硅的厚度以及决定结构纵向运动范围的牺牲层厚度,都会对器件性能产生直接的影响[1]. 因此在微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System,MEMS)微加工过程中,必须对材料层薄膜厚度进行精确的检测,控制生产工艺,从而提高产品质量和生产效率. 另一方面,在考虑对 MEMS 器件自动进行模型与参数提取时,几何尺寸的自动馈给能提高模型的精度,并且可以获得 MEMS 构件的形貌尺寸和制作误差,因此在 MEMS 研究中具有重要意义[2-3].

传统的材料层厚度测量都是采用光学或机械学的方法,如投影光栅法、显微干涉法等. 这些非在线监测的测试手段获得的微机械材料的参数存在很多问题:数据是在各自不同的工艺条件、试样尺寸和测试仪器下获得的,缺乏通用性和权威性;已获得的数据从品种和项目上都很不完全,远远不能满足应用需要[4];而最主要的就是随着 MEMS 技术的发展,新材料、新工艺层出不穷,非在线监测的测试方法缺乏一种快速响应机制来收集和确认新数据. 本文提出一种新颖的 MEMS 表面工艺材料层厚度在线测试结构,其在测试环境下简单可行、重复性好且测试结构设计简单,便于数据获得和整理,从而可以实现对工艺线的在线监测.

1　测试原理与分析

本文的材料层包括多晶硅结构层与牺牲层. 在 MEMS 表面加工工艺中,当多晶硅结构层跨越牺牲层时,必然存在台阶,那么多晶硅条的电阻与没有台阶的情况相比就会发生变化,而不同的淀积方向发生的电阻变化也不相同. 很显然,这些电阻变化与牺牲层台阶高度和多晶硅结构层厚度存在着某种关系[5].

多晶硅一般是通过硅烷热分解用 LPCVD(低压化学气相沉积法)来制备,其反应物粘滞系数小于 0.01,因此可以认为多晶硅薄膜在台阶处是厚度均匀的共形台阶覆盖(图 1)[6-7]. 但由于刻蚀工艺的非理想化,台阶侧壁并不是垂直于表面的,而是形成一个倾斜面,如图 2 所示.

首先给出一个基本的多晶硅结构层跨越牺牲层台阶的电阻结构

收稿日期 2012-05-18

资助项目 国家科技重大专项(2011ZX02507)

作者简介

钱晓霞,女,硕士,研究方向为 MEMS 工艺控制监视. qianxiaoxia1101@sohu.com

李伟华(通信作者),男,教授,现从事 MEMS CAD 方面的研究. liwh@seu.edu.cn

1　南京工程学院　工业中心,211167

2　东南大学　MEMS 教育部重点实验室,南京,210096

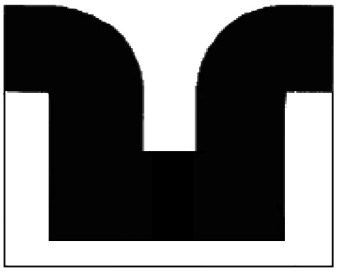


图 1　共形台阶覆盖形貌

Fig. 1　Conformal step coverage morphology

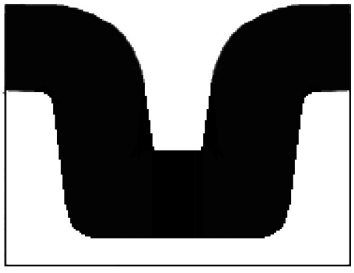


图 2　倾斜的台阶覆盖形貌

Fig. 2　Gradient step coverage morphology

剖面图及俯视图,多晶硅的淀积方向为水平方向,分别如图 3 和 4 所示,并标出各项参数,已知的几何参数为:W、S_1、S_2,所需求得的几何参数为多晶硅结构层的厚度 t_1 和牺牲层厚度 t_2,与 t_1 和 t_2 相关的未知几何参数又有 L_1、L_2、x、α,即一共有 6 个未知的几何参数,其中,α 即为由于刻蚀工艺的非理想性而导致的刻蚀倾角.

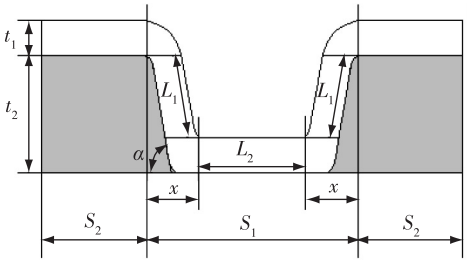


图 3　水平淀积台阶电阻的剖面示意

Fig. 3　Sectional view of horizontally deposited step resistance

由上述分析可知,为了求出 6 个未知参数,需要 6 个非相关的方程,而根据图 3 所示的剖面结构示意中的几何关系及电阻宽长比关系,只能得出以下 4 个方程[8]:

$$L_2 + 2x = S_1, \tag{1}$$

$$\sin\alpha = \frac{t_2 - t_1}{L_1}, \tag{2}$$

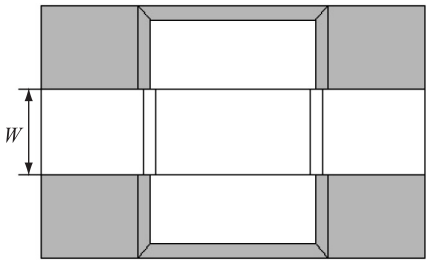


图 4　水平淀积台阶电阻的俯视示意

Fig. 4　Vertical view of horizontally deposited step resistance

$$x = L_1\cos\alpha + \frac{t_1}{\sin\alpha}, \tag{3}$$

$$R_1 = 4\Delta R + \frac{R_S}{W}(2L_1 + L_2) + \frac{R_S}{W}(2S_2), \tag{4}$$

其中,R_1 为所测的水平方向淀积的台阶电阻的阻值. 因此在建立模型的时候必须添加其他的结构从而引进新的相关性来进行求解. 为了得出另外 2 个关系式,在测试结构中添加 2 组新的台阶,第 1 组是以角度 β 倾斜淀积在牺牲层台阶上的多晶电阻以及以角度 β 倾斜淀积在未刻蚀的牺牲层上的多晶电阻,第 2 组是以角度 θ 倾斜淀积在牺牲层台阶上的多晶电阻以及以角度 θ 倾斜淀积在未刻蚀的牺牲层上的多晶电阻,分别如图 5—8 所示.

每个拐角处的等效方数可通过软件模拟得出,在模拟过程中设置不同的 α 角(α 的变化范围为 70° ~ 85°),结果表明不同的刻蚀倾角对等效方数的影响不大,故等效方数可作为已知量,用 λ 来表示,则每个拐角处的等效电阻为 $\Delta R = \lambda R_S \frac{t_1}{W}$.

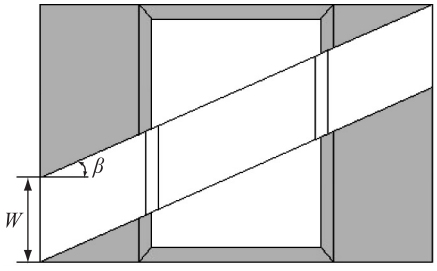


图 5　以角度 β 倾斜淀积在牺牲层台阶上的多晶电阻

Fig. 5　Poly resistance obliquely deposited in sacrificial layer step at angle β

在所建立的模型中,所需测得的电学量有 5 个:R_S(可另外由范德堡图形测出)、ΔR(每个拐角处的等效电阻)、R_1(沿水平方向淀积在牺牲层台阶上的多晶电阻)、R_2(以角度 β 倾斜淀积在牺牲层台阶上

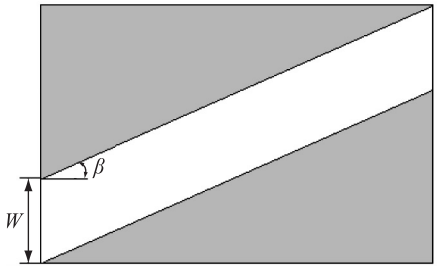


图 6　以角度 β 倾斜淀积在未刻蚀的牺牲层上的多晶电阻

Fig. 6　Poly resistance obliquely deposited in unetched sacrificial layer at angle β

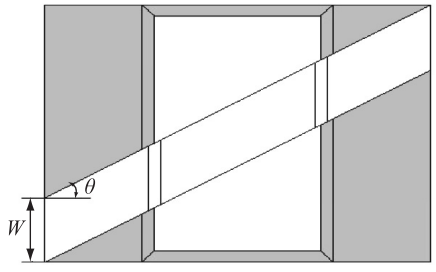


图 7　以角度 θ 倾斜淀积在牺牲层台阶上的多晶电阻

Fig. 7　Poly resistance obliquely deposited in sacrificial layer step at angle θ

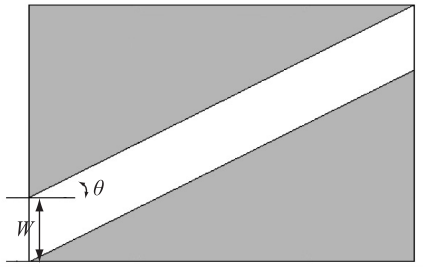


图 8　以角度 θ 倾斜淀积在未刻蚀的牺牲层上的多晶电阻

Fig. 8　Poly resistance obliquely deposited in unetched sacrificial layer at angle θ

的多晶电阻)、R_3(以角度 θ 倾斜淀积在牺牲层台阶上的多晶电阻),又由图 6 和图 8 所示的电阻图形可以测得角度分别为 β 和 θ 的单位长度的平行四边形电阻值,分别设为 R_0 和 R'_0,可知未知几何量有 6 个:t_1、t_2、L_1、L_2、x、α,已知的几何量为:W、S_1、S_2、β、θ. 在设计时可使 $W \gg t_1$,这样对于 R_2 和 R_3 来说,拐角处的等效电阻可视为与 R_1 近似相等.

至此根据图 5 和图 6 所示的电阻关系可以得出另外 2 个不相关的方程式:

$$R_2 = \frac{2S_2}{\cos\beta}R_0 + \frac{2L_1}{\cos\beta}R_0 + \left(\frac{S_1}{\cos\beta} - 2x\right)R_0 + 4\Delta R, \quad (5)$$

$$R_3 = \frac{2S_2}{\cos\theta}R'_0 + \frac{2L_1}{\cos\theta}R_0' + \left(\frac{S_1}{\cos\theta} - 2x\right)R_0' + 4\Delta R. \quad (6)$$

对式(1)—(6)进行整理,得到如下方程组:

$$\begin{cases} L_2 + 2x = S_1, \\ t_2 - t_1 - L_1\sin\alpha = 0, \\ \dfrac{t_1}{\sin\alpha} - x + L_1\cos\alpha = 0, \\ 4\lambda t_1 + 2L_1 + L_2 = \dfrac{R_1 W}{R_S} - 2S_2, \\ \dfrac{2L_1}{\cos\beta}R_0 - 2xR_0 + 4\lambda R_S\dfrac{t_1}{W} = R_2 - \dfrac{S_1}{\cos\beta}R_0 - \dfrac{2S_2}{\cos\beta}R_0, \\ \dfrac{2L_1}{\cos\theta}R'_0 - 2xR'_0 + 4\lambda R_S\dfrac{t_1}{W} = R_3 - \dfrac{S_1}{\cos\theta}R'_0 - \dfrac{2S_2}{\cos\theta}R_0'. \end{cases}$$

对以上方程组进行化简,设常数

$$A = R_2 - \frac{S_1}{\cos\beta}R_0 - \frac{2S_2}{\cos\beta}R_0,$$

$$B = R_3 - \frac{S_1}{\cos\theta}R_0' - \frac{2S_2}{\cos\theta}R_0',$$

可解出 x 为

$$x = \left\{\left[(R_1 - A)\frac{W}{R_S} - (S_1 + 2S_2)\right]\left(\frac{R'_0}{\cos\theta} - \frac{R_0}{\cos\beta}\right) + (B - A)\left(\frac{WR_0}{R_S\cos\beta} - 1\right)\right\} \cdot \left[2\left(\frac{WR_0}{R_S} - 1\right)\left(\frac{R'_0}{\cos\theta} - \frac{R_0}{\cos\beta}\right) + 2(R'_0 - R_0)\left(1 - \frac{WR_0}{R_S\cos\beta}\right)\right]^{-1}. \quad (7)$$

把 x 的值回代到方程组中便可以得出另外 5 个未知参数,从而最终可求出多晶结构层厚度 t_1 和牺牲层厚度 t_2 的值.

2　测试结构参数选择和模型验证

测试结构给出了单个台阶的情况,若为了减小工艺的离散性造成的误差也可设计多个台阶,这样的代价是会使版图面积比较大. 设模型中的已知的几何学参数分别为 $S_1 = 150\ \mu m$, $S_2 = 50\ \mu m$, $W = 20\ \mu m$, $\beta = 45°$, $\theta = 60°$,电学参数设为 $R_S = 20\ \Omega$, $\Delta R = 0.5\ \Omega$(λ 取 0.5),R_1、R_2 和 R_3 的值可通过软件模拟得到. 把模拟值代入模型中求解可以求得多晶硅结构层厚度 t_1 以及牺牲层厚度 t_2,并与理想值进行比较,从而实现对模型的闭环验证.

模拟所使用的软件为 Medici,不失工艺的一般性,角度 α 分别设为 70°、75°、80°、85°,t_1 和 t_2 设为等高 1 μm(这里设为等高的情况是考虑到模拟时网格划分对精度的影响). 图 9 所示为角度 α 为 70°,

长度为 10 μm 的台阶电阻在 Medici 中的模型.

不同角度下的电阻模拟值如表 1 所示. 将 R_1、R_2、R_3 的模拟值代入模型中求解,对应的理论值和实际值如表 2 所示,x 作为求解的关键量也在表 2 中列出.

由表 2 中的数据对比可以看出,从模型中得出的 t_1 和 t_2 的理论值与实际模拟时所设的值相比误差很小,从而实现了闭环验证.

表 1　台阶电阻模拟值

Table 1　Simulation results of step resistance

角度 α/(°)	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω
70	249.933 8	499.077 9	997.867 6
75	250.020 7	499.200 8	998.041 4
80	250.088 4	499.296 5	998.176 8
85	250.161 4	499.399 8	998.322 8

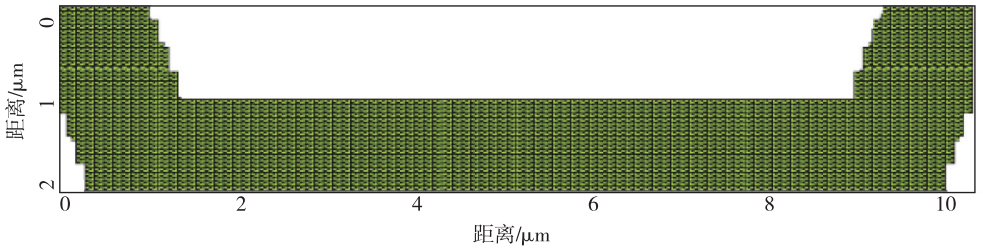


图 9　Medici 台阶电阻模型

Fig. 9　Medici step resistance model

表 2　材料层厚度的理论值和模拟值对比

Table 2　Contrast of the theoretical and simulated results of material layer thickness

角度 α/(°)	x 的理论值/μm	x 的实际值/μm	t_1 的理论值/μm	t_1 的实际值/μm	t_2 的理论值/μm	t_2 的实际值/μm
70	1.033 4	1.064 2	1.000 2	1.000 0	1.000 3	1.000 0
75	0.989 9	1.035 3	1.000 2	1.000 0	1.000 3	1.000 0
80	0.956 4	1.015 4	1.000 4	1.000 0	1.000 6	1.000 0
85	0.919 5	1.003 8	1.000 1	1.000 0	1.000 2	1.000 0

3　结论

本文提出了一种新颖的 MEMS 表面工艺中材料层厚度电学测试结构,在考虑了 MEMS 表面工艺刻蚀倾角的情况下,文中的材料层厚度测试结构由 3 组简单的台阶电阻组成,通过在线测量这 3 组电阻的值可以同时方便地得到 MEMS 表面加工中多晶硅结构层和牺牲层厚度的值,测试方法简单、计算方便. 鉴于 IC 工业已经建立了 PCM(Process-Control-Monitor),而 MEMS 正在发展,本文提出的测试结构便于 MEMS PCM 系统集成且对于开发包括几何参数、电学参数、力学参数和热学参数在内的 MEMS PCM 系统具有重要意义.

参考文献

References

[1] 李智,王向军. MEMS 中几何量的测试方法[J]. 微细加工技术,2003,3(1):52-54
LI Zhi, WANG Xiangjun. Measurement methods of geometric characteristics in MEMS [J]. Microfabrication Technology,2003,3(1):52-54

[2] 黄庆安,刘祖韬,李伟华,等. MEMS 薄膜材料参数在线测试方法与技术[J]. 半导体学报,2006,27(9):1650-1651
HUANG Qing'an, LIU Zutao, LI Weihua, et al. A test system for the in situ extraction of the material parameters of MEMS thin films[J]. Chinese Journal of Semiconductors,2006,27(9):1650-1651

[3] 李晓鹏. MEMS 几何学及电学 PCM 参数电提取研究[D]. 南京:东南大学电子科学与工程学院,2006
LI Xiaopeng. Electronical extraction of MEMS geometric and electronic PCM parameters[D]. Nanjing: College of Electronic Science & Engineering, Southeast University, 2006

[4] 王冬生,王春明,胡桂珍. MEMS 技术概述[J]. 机械设计与制造,2006(4):106-108
WANG Dongsheng, WANG Chunming, HU Guizhen. Introduction on MEMS[J]. Machinery Design & Manufacture,2006(4):106-108

[5] Brown G C, Pryputniewicz R J. New rest methodology for static and dynamic shape measurement of microelectromechanical system [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1):127-136

[6] Bosch-Charpenay S, Xu J Z, Haigis J, et al. Real-time etch-depth measurements of MEMS devices[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11 (2):

111-117
[7] Wille H, Burte E, Ryssel H. Simulation of the step coverage for chemical vapor deposited silicon dioxide[J]. J Appl Phys, 1992, 71(7): 3532-3537
[8] Ladage L, Leupers R. Resistance extraction along the current flow[C]//Proceedings of the IEEE 1993 Custom Integrated Circuits Conference, 1993: 1-4

Electrical testing structure for measuring material layer thickness of MEMS surface processing

QIAN Xiaoxia[1] LI Weihua[2]
1 Nanjing Institute of Technology Industrial Center, Nanjing 211167
2 Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract Material layer thickness of Micro-Electro-Mechanical System(MEMS) surface manufacturing process is one of the significant parameters which determine the performance of MEMS devices, for example, the thickness of polysilicon layer and sacrificial layer directly determines the performance and longitudinal mobile range of MEMS devices, so the measurement and process control and monitoring of material layer thickness are very meaningful. The current material layer thickness test, which is mostly through optomechanical method, is too complex and expensive, and needs too much measuring time. Besides, it is difficult for the current method to integrate with the Process-control-monitor(PCM) system. In the paper, a novel electrical testing structure is developed to measure the material layer thickness, which is simple and convenient, and can be integrated with the MEMS measurement system easily. To validate the testing structures and testing models, the software Medici is used to carry out the closed-loop verification. The results show a good agreement between simulation results and theoretical results.

Key words micro-electro-mechanical system(MEMS); surface processing; material layer; electrical testing