

基于双岛结构的多晶硅纳米薄膜压力传感器

陈雪娇¹, 黄元庆², 郑志霞¹, 林振衡¹

(1. 莆田学院 机电工程学院, 福建 莆田 351100; 2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要:为解决传统半导体压力传感器温度特性差、非线性度高等问题,设计一种基于双岛结构的多晶硅纳米薄膜压力传感器。利用有限元分析软件分析硅膜结构的应力分布规律,确定力敏电阻的最佳布局,进一步提高了传感器的灵敏度。这种压力传感器兼具温度特性好、灵敏度高、线性度好等综合性能。

关键词:压力传感器;多晶硅纳米薄膜;双岛结构;有限元分析

Polysilicon Nanofilm Pressure Sensor Based on Twin-isles Structure

CHEN Xuejiao¹, HUANG Yuanqing², ZHENG Zhixia¹, LIN Zhenheng¹

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Putian University, Putian Fujian 351100, China;

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: The aim is to solve the problem of bad temperature characteristics and high non-linearity of traditional semiconductor pressure sensors. It presents a polysilicon nanofilm pressure sensor based on twin-isles structure. A piece of software for finite element analysis is used to analyze stress distribution on the film to determine the optimum layout of force sensitive resistor and improve the sensitivity of sensor further. This kind of pressure sensor has comprehensive properties such as good temperature characteristics, high sensitivity and good linearity.

Key words: pressure sensor; polysilicon nanofilm; twin-isles structure; finite element analysis

0 引言

半导体压力传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、温度特性好等特点,已被广泛应用于航空航天、工业控制、汽车电子、生物医学工程各个领域,成为当今发展高新技术装备不可缺少的电子产品。目前,越来越多的领域,如航空航天、石油化工、能源电力等,都要求压力传感器的工作温度可达 200℃以上^[1]。而已实现商品化的扩散硅压力传感器因采用反向偏置的 PN 结作为电隔离,反向漏电流会随着温度升高而迅速增加,因此存在温漂大、工作温度低等不足,无法实现在较高温度环境

下的压力测试^[2-3]。

多晶硅压力传感器是采用多晶硅制作的力敏电阻,采用 SiO₂ 介质膜与衬底实现电隔离,其使用温度范围可以高达 200℃以上,具备良好的高温特性,且可以制备在不同材料的膜片上,但普通多晶硅薄膜的压阻灵敏度通常只为单晶硅的 60%左右,导致传感器的灵敏度降低^[4-6]。近年来研究发现,当多晶硅薄膜厚度在 100 nm 以下时,薄膜呈现出隧道压阻效应,这比普通多晶硅薄膜压阻特性更好、灵敏度更高、温度特性更稳定可靠^[7-9]。特别是在重掺杂条件下,即掺杂浓度在 $(2.0 \sim 4.1) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,其纵向应变系数可高达 33.5 左右,且基本不

收稿日期:2018-03-19

基金项目:福建省科技厅引导性(重点)项目(2017H032);莆田学院激光精密加工工程技术研究中心开放基金项目(2016JZA014)

作者简介:陈雪娇(1987-),女,福建莆田人,助教,硕士。

随掺杂浓度而变化,这就降低了工艺要求和生产成本,因此具有广阔的应用前景^[10-11]。

1 多晶硅纳米薄膜的压阻效应

多晶硅材料在外力作用下,其电阻率随应力的变化而发生变化的现象称作压阻效应。其电阻相对变化为:

$$\frac{dR}{R} = (1+2\mu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1)$$

式中 R 为多晶硅材料的电阻值 μ 为泊松系数 ε 为应变 ρ 为多晶硅材料的电阻率。

在轴向应力作用下,电阻率相对变化量与应力的关系为:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi E\varepsilon \quad (2)$$

其中 π 为多晶硅材料的压阻系数 σ 为材料所受的应力 E 为杨氏模量。

将式(2)代入式(1)得:

$$\frac{dR}{R} = (1+2\mu+\pi E)\varepsilon = G\varepsilon \quad (3)$$

式中 G 为应变系数 $G=1+2\mu+\pi E$ ^[12]。

对于半导体材料,受到应力作用后, πE 比 $1+2\mu$ 大上百倍,所以 $1+2\mu$ 可以忽略,式(3)可以

近似写成:

$$\frac{dR}{R} = \pi\sigma = \pi E\varepsilon \quad (4)$$

为了简化计算,一般把半导体材料所受的应力分解为纵向应力和横向应力两个方向,则多晶硅纳米薄膜电阻的相对变化可表示为:

$$\frac{dR}{R} = \pi_l\sigma_l + \pi_t\sigma_t = G\varepsilon_l + G\varepsilon_t \quad (5)$$

式中 π_l 、 π_t 分别表示纵向压阻系数和横向压阻系数 σ_l 、 σ_t 分别表示纵向应力和横向应力 ε_l 、 ε_t 分别表示纵向应变和横向应变^[13]。

通过以上分析可知,电阻的相对变化量取决于材料本身的压阻系数和所受的应力大小。在厚度为 100 nm 以下和重掺杂的条件下,多晶硅纳米薄膜具有很高的压阻系数,是作为力敏电阻材料的最佳选择。力敏电阻一般淀积在硅杯上,选择合适的硅杯结构,优化力敏电阻的布局,是提高所应力度的有效途径。

2 选择压力传感器的硅杯结构

微机电系统(MEMS)压阻式压力传感器通常按硅杯的形状分为 C 型、E 型和双岛型,如图 1 所示。

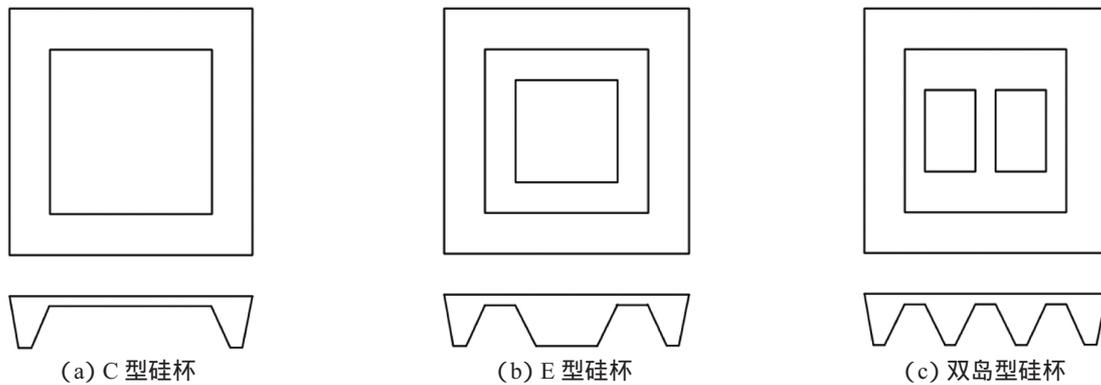


图 1 C 型、E 型和双岛型硅杯示意图

采用传统的 C 型硅杯结构制作的压力传感器,其工艺简单,性能稳定,但灵敏度较低。当用于低压测量时,其输出的电压值很小。为了获得较高的灵敏度,应变膜就要做得很薄,才能使硅膜在有限载荷的作用下产生足够大的弯曲应力,但这会带来加工工艺上的困难。与此同时,硅膜的变形量增大,会引起大挠度效应,即所谓的气泡效应,会使传感器的稳定性变差,非线性度急剧增加^[2, 14-16]。

因此采用这种结构的压力传感器,其性能难以得到提高。

E 型硅杯结构是在硅膜的中央增加凸台(质量块),应力高度集中在边缘处较薄的硅膜(沟槽)表面。将力敏电阻排布在沟槽表面的边缘处并组成惠斯通电桥,可以使线性度明显改善。但由于沟槽中央应力为零,这种结构存在一个相当大的无效区^[16]。

因此选择双岛型结构,如图1(c)所示。与E型硅杯类似,在压力作用下应力会高度集中于中央沟槽和边缘沟槽的表面,同时避免了E型硅杯的无效区。将4个力敏电阻对称放置在这些应力集中区域,可以获得很高的灵敏度和良好的线性特性。另外,在双岛端面预先腐蚀去一薄层硅,使得硅膜在施加载荷时有一定的变形量,且在封装后岛与衬底间有一条间隙,用来限制过载时的硅膜位移。当所受压力远大于工作量程时,岛与衬底接触,硅膜不再移动,为传感器提供过载保护^[16-18]。因此,这种结构具有很高的灵敏度和优良的线性度,为制作高性能的压力传感器奠定了基础。

3 优化力敏电阻的布局

设计一种高性能高温的压力传感器,除了采用有良好高温性能的多晶硅纳米薄膜和灵敏度高、非线性度小的矩形双岛结构外,还需要研究应变膜上应力和变形的分布情况,精确确认力敏电阻放置的位置,从而进一步提高传感器的性能。本设计利用有限元分析法对双岛型结构的应力分布进行了计算机模拟计算,根据得出的应力分布规律确定力敏电阻的最佳布局。

使用有限元分析软件创建硅杯结构的三维立体模型。模型中衬底硅片的厚度为 $320\mu\text{m}$,芯片面积为 $3000\mu\text{m}\times 3000\mu\text{m}$ 。边缘沟槽和中央沟槽的宽度分别为 $163.75\mu\text{m}$ 和 $327.50\mu\text{m}$,沟槽厚度均为 $50\mu\text{m}$ 。岛的宽度为 $300\mu\text{m}$,长度为 $1308.95\mu\text{m}$ 。侧壁与底面夹角均为 54.74° 。以芯片后侧左下角为坐标原点,沟槽宽度方向为 X 轴,沟槽长度方向为 Z 轴,垂直于硅膜表面方向为 Y 轴。边缘沟槽的坐标区域分别为 $X_1=490.89\sim 654.64\mu\text{m}$, $X_2=2345.36\sim 2509.11\mu\text{m}$, $Y_{1,2}=0\sim 320\mu\text{m}$, $Z_{1,2}=490.89\sim 2509.11\mu\text{m}$;中央沟槽的坐标区域为 $X_3=1336.87\sim 1664.37\mu\text{m}$, $Y_3=0\sim 320\mu\text{m}$, $Z=490.89\sim 2509.11\mu\text{m}$ 。由于整个硅杯结构是对称的,为了便于看清楚结构和分析,取整个传感器的1/2模型进行分析,如图2所示。

设定模型材料(即硅)的杨氏弹性模量和泊松比分别为 $E=1.7\times 10^{11}\text{N/m}^2$, $\mu=0.24$ 。采用自由网格划分,且划分精度足够小以满足计算精度。对

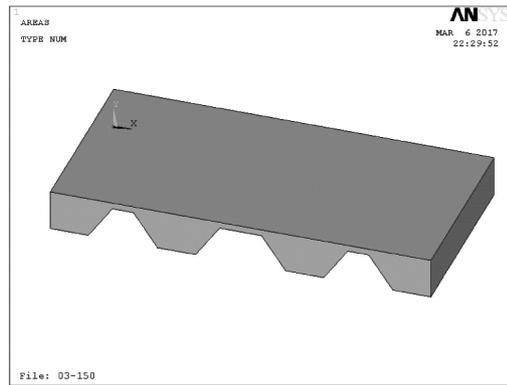


图2 传感器模型的1/2剖视图

模型施加载荷和边界约束条件,其中自由约束条件为硅杯底边四周固定,即DOF约束位移为0。对应变膜上表面施加 $P=100\text{kPa}$ 的压力,接着进行求解。

图3为双岛型硅杯的应力分布图。图4(a)和图4(b)分别显示了矩形双岛硅杯中点线横断面的横向应力和纵向应力。从图3、图4可知,当传感器正面受压时,应力会高度集中在双岛之间的中央沟槽和岛与边缘之间的边缘沟槽内,且主要是横向应力。

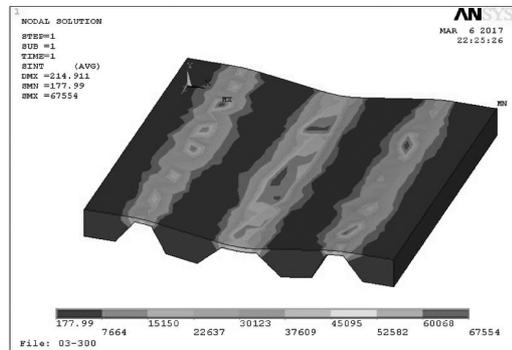
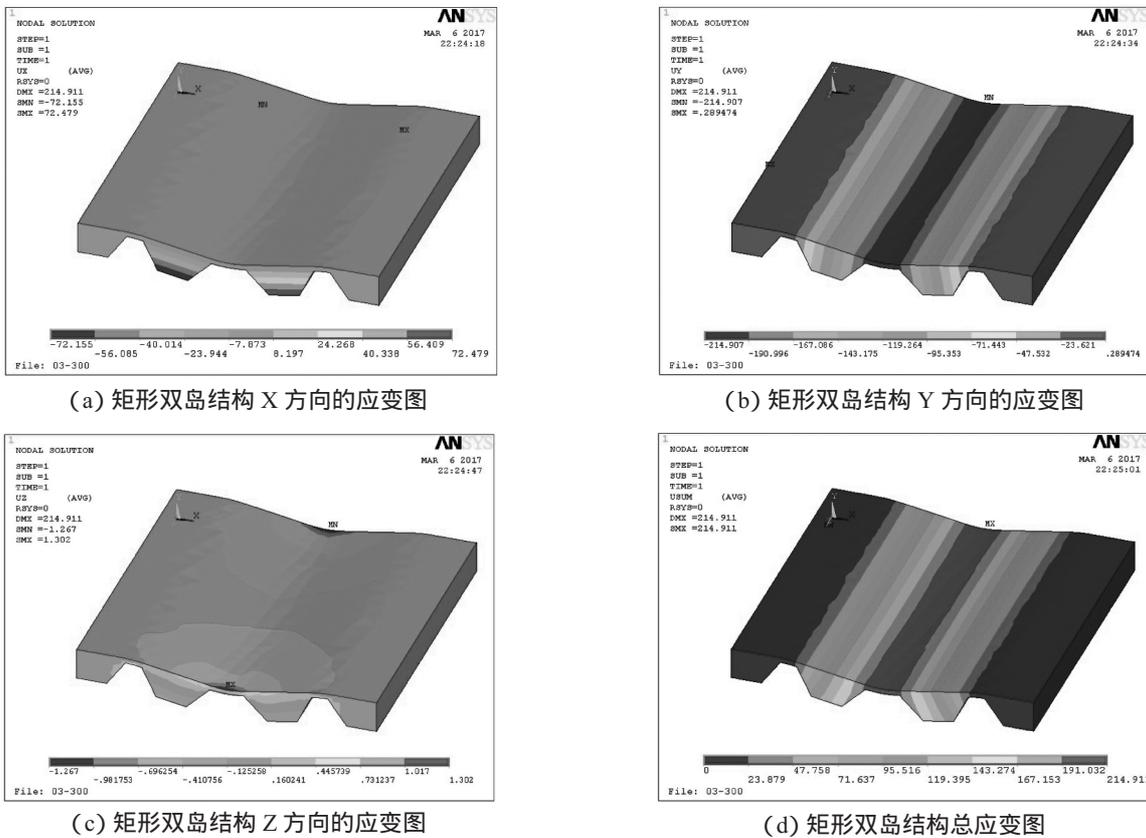
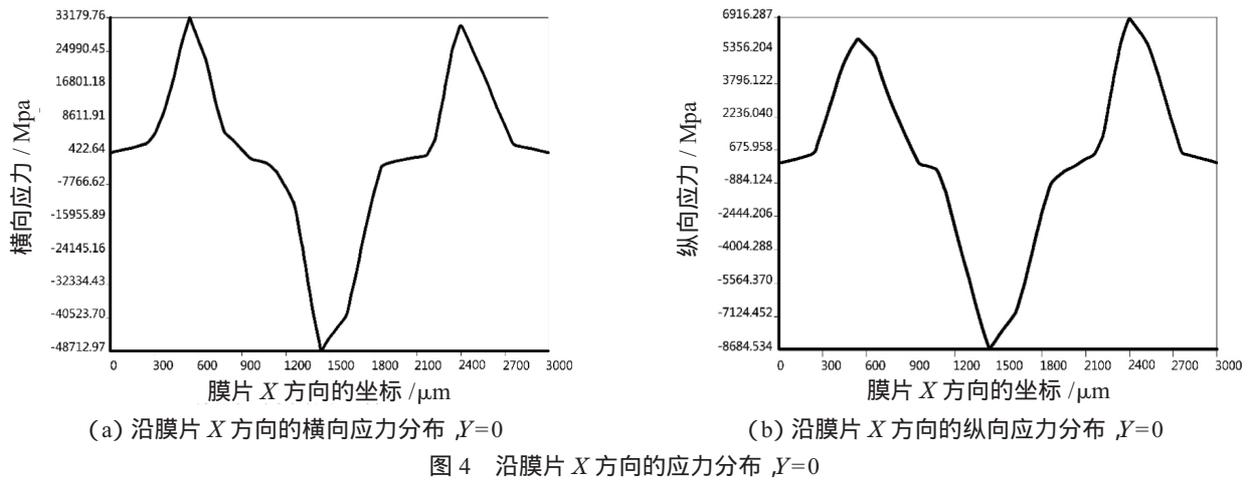


图3 膜片表面的应力分布图

图5表示出传感器正面受压时所发生的应变。图5(a)、(b)、(c)分别是传感器在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向上的应变,而图5(d)是传感器总的应变图。分析应变分布图,纵向最大应变出现在边缘沟槽长边的中心处,最小应变出现在中央沟槽长边的中心处。根据前面的分析,力敏电阻的相对变化量与应变成正比。若将力敏电阻连接成惠斯通电桥,则传感器的输出与力敏电阻所在区域的应变差成正比。因此多晶硅纳米薄膜电阻应分别放置在硅膜片的边缘沟槽和中央沟槽长边的中心处。边缘沟槽的应力为正,属于拉伸应力,其力敏



电阻阻值随压力的增加而增大。中央沟槽的应力为负,属于压缩应力,其力敏电阻阻值随压力的增大而减小。由于多晶硅材料的纵向压阻效应比横向压阻效应大得多,为了提高传感器的输出和灵敏度,应将力敏电阻沿 X 轴方向(即垂直于沟槽方向)排列。

综上所述,将 2 个多晶硅力敏电阻垂直于沟槽方向布置在中央沟槽的长边中心处,另外 2 个多晶硅力敏电阻也垂直于沟槽方向分别放置在两

侧边缘沟槽的长边中心处,其布局示意图如图 6(b)所示。然后将这四个电阻连接成惠斯通电桥,当传感器承受外部压力时,多晶硅纳米薄膜发生弹性形变。基于压阻效应,薄膜的电阻值发生变化,电桥的输出电压就会发生改变,从而检测出所受压力的大小。另外,为了提高传感器的性能,应尽量使 4 个电阻的尺寸一致,掺杂浓度相等,以减小传感器的零点温度漂移。整个压力传感器的结构剖面图和俯视图如图 6 所示。

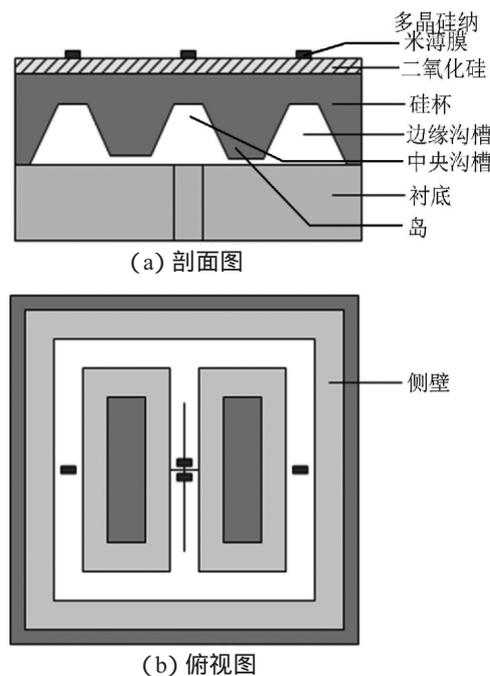


图6 传感器的结构剖面图及俯视图

4 结论

本文设计了一种基于 MEMS 技术的高性能高温压力传感器,以单晶硅为衬底,多晶硅纳米薄膜作力敏电阻,二氧化硅膜作介质实现电隔离,具备良好的高温特性;采用双岛型硅膜结构,有效提高了压力传感器的灵敏度和线性度。利用有限元分析软件对双岛结构的应力分布进行了仿真计算,根据得出的应力分布规律合理布置力敏电阻,进一步提高了传感器的灵敏度。因此,这种压力传感器具有温度特性好、灵敏度高和线性度好等综合性能,有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 郑志霞,冯勇建. MEMS 接触电容式高温压力传感器的温度效应[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12): 1141-1147.
- [2] 毛翰如,姚素英. 新型多晶硅压力传感器[J]. 天津大学学报, 1997, 30(6): 767-770.
- [3] 刘晓为,潘慧艳,揣荣岩,等. 膜厚对多晶硅纳米薄膜压阻温度特性的影响[J]. 传感技术学报, 2007, 20(11): 2421-2425.
- [4] 曲宏伟,张为,姚素英,等. 双岛结构多晶硅压力传感器削角补偿技术的研究[J]. 天津大学学报, 2000, 33(2): 244-246.
- [5] GRIDCHIN V A, LUBIMSKY V M, SARINA M P. Polysilicon strain-gauge transducers[J]. Sensors and Actuators, 1992, A30: 219-223.
- [6] SUSKI J, MOSSER V, GOSS J. Polysilicon SOI pressure sensor[J]. Sensors and Actuators, 1989, 17: 405-414.
- [7] MAIOLO L, PECORA A, MAITA F, et al. Flexible sensing systems based on polysilicon thin film transistors technology[J]. Sensors and Actuators, 2013, 179: 114-124.
- [8] HERTH E, ALGRE E, LEGRAND B, et al. Optimization of ohmic contact and adhesion on polysilicon in MEMS-NEMS wet etching process[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(5): 724-728.
- [9] MARIANI S, MARTINI R, CORIGLIANO A, et al. Overall elastic domain of thin polysilicon films [J]. Computational Materials Science, 2011, 50(10): 2993-3004.
- [10] 陆学斌,刘晓为,揣荣岩,等. 掺杂浓度对多晶硅纳米薄膜应变系数及其线性度的影响[J]. 纳米技术与精密工程, 2009, 7(1): 5-9.
- [11] 揣荣岩,刘晓为,潘慧艳,等. 不同淀积温度多晶硅纳米薄膜的压阻特性[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1810-1814.
- [12] 郁有文,常健,程继红. 传感器原理及工程应用[M]. 4版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2014: 40-41.
- [13] 潘东阳. 基于 MEMS 技术纳米多晶硅薄膜压力传感器制作及特性研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学电子科学与技术系, 2014.
- [14] 聂萌,杨恒山. 一种大量程压力传感器的结构优化设计与仿真分析[J]. 传感技术学报, 2017, 30(12): 1834-1838.
- [15] 李新,刘野,刘沁,等. 基于 SOI 晶圆材料的硅微压传感器[J]. 仪器技术与传感器, 2012(5): 15-16.
- [16] 吴宪平,胡美凤. 扩散硅压力传感器性能优化研究[J]. 传感技术学报, 1992(3): 1-6.
- [17] 张书玉. SOI 高温压力传感器的研究[D]. 天津:河北工业大学材料物理系, 2006.
- [18] 陈雨. 微型压力传感器芯片的力学性能分析与研究[D]. 镇江:江苏大学机械电子工程系, 2008.

[责任编辑 林 锋]