文章编号:1004-2474(2024)03-0386-06

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2024.03.020

MEMS 高温压力传感器耐高温引线结构优化

刘润鹏,雷 程,梁 庭,杜康乐

(中北大学 微纳器件与系统教育部重点实验室,山西 太原 030051)

摘 要:绝缘体上硅(SOI)高温压力传感器可在高温(高于 125 ℃)下工作。通常情况下构成惠斯通电桥的电 阻单独处于压力敏感区,以提高其灵敏度,但在其工作期间压力传感器器件区电阻重掺区与金属引线连接处存在 一定高度差,在加压加电高温环境下此处热应力变大,金属引线因过热而出现金属引线断裂或失效,无法满足高温 需求。在此基础上研究了一种硅引线技术,使其与压敏电阻处于同一高度层,金属引线平铺在硅引线上端,经退火 后形成良好的欧姆接触。实验测试表明,该方案能使压力传感器在 300 ℃高温环境下正常工作,金属引线与电阻 区连接完好,传感器敏感区应力降低接近 50%,且优化后传感器灵敏度符合设计要求。

关键词:绝缘体上硅(SOI);高温压力传感器;器件区电阻;高度差;硅引线

中图分类号:TN304.1;TN43 文献标识码:A

Optimization of High-Temperature-Resistant Lead Structure for MEMS High-Temperature Pressure Sensors

LIU Runpeng, LEI Cheng, LIANG Ting, DU Kangle

(Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract:Silicon-on-insulator high-temperature pressure sensors can operate at temperatures above 125 °C due to their unique properties. Generally, the resistance forming the Wheatstone bridge is located solely in the pressure sensitive region to enhance its sensitivity. However, during its operation, a certain height difference exists between the resistance of the heavily doped region of the pressure sensor device and its connection with the metal lead. The thermal stress in this area increases under high-temperature conditions during pressurization and electrification. Metal leads cannot meet the high-temperature requirements and may break or fail due to overheating. Therefore, this study investigated a silicon lead technology that had the same layer height as a varistor. A metal lead was laid flat on this silicon lead, and the end was annealed to form a robust ohmic contact. Experimental testing demonstrated that this method could ensure the normal operation of the pressure sensor in a high-temperature environment of 300 °C. The metal lead was well connected to the resistance zone. The stress in the sensitive area of the sensor was reduced by nearly 50%, and the optimized sensor sensitivity met the design requirements.

Key words:silicon-on-insulator(SOI); high-temperature pressure sensors; device area resistance; height difference; silicon lead

0 引言

压力传感器用途广泛。与传统的传感器相比, 使用微机电系统(MEMS)加工制备的压力传感器 具有体积小,质量小,可靠性高,适于批量化生产的 特点^[1-2]。市面上主流的压力传感器材料是硅及以 硅基底为衬底的复合性材料(如绝缘体上硅(SOI)、 复合蓝宝石材料(SOS)和复合陶瓷材料),其中绝缘 体上硅(SOI)材料^[3-4]应用最广泛。SOI 材料是指 在器件硅层与硅基底注入一层 SiO₂ 层作为截止层, 避免了传统硅传感器因在高温下(高于 125 ℃)发生 PN 结漏电而导致传感器失效^[5],同时可增强器件 层各向异性刻蚀效果,可应用于-55~350 ℃环境

收稿日期:2024-02-23

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3209100);山西省重点研发计划项目(202102030201001、202102030201009)

作者简介:刘润鹏(1995-),男,山西省忻州市人,硕士生。通信作者:雷程(1987-),男,山西省长治市人,高级实验师,博士。梁庭(1979-), 山西省长治市人,教授,博士。

下的测量,如汽车、石油、航天发动机等领域的测量^[6]。

压阻式压力传感器是通过压阻效应促使电阻 变化,进而输出电压,其关键结构为位于敏感膜上 构成惠斯通电桥的压敏电阻^[7-9]。常见的压力传感 器器件区敏感膜上只有电阻分布,金属焊盘与电阻 通过金属引线相连,由于电阻条与金属引线存在一 定的高度差,故在高温加压通电环境下金属引线易 发生热应力效应断裂。本文基于压力传感器电阻 条制备过程,在金属焊盘与电阻条间的金属引线下 方平铺一条硅引线,有效减少金属引线发生热应力 断裂现象,使传感器能在 300 ℃下稳定工作,提高了 其高温可靠性。

1 压力传感器敏感芯片结构设计

1.1 压力传感器工作原理

压阻式压力传感器的工作原理是基于硅的压 阻效应,将被测压力的变化转化为在敏感膜上压敏 电阻阻值的变化,惠斯通电桥上的电阻电桥平衡状 态发生变化,在通电时产生电信号,该电信号为压 力传感器的输出信号,实现了压力传感器由压力信 号输入到电信号输出的转换。图 1 为惠斯通电桥原 理示意图。图中, U_{in} 为惠斯通电桥供电电压, U_{out} 为输出电压, R_1 - R_4 为压敏电阻, ΔR_1 - ΔR_4 为电阻 变化值^[10-12]。



1.2 压敏区结构优化

基于惠斯通电桥原理的压阻式压力传感器,在高 温条件下,电阻及其金属引线的可靠性决定了传感器 能否在长时间的高温下可靠地输出电压信号^[13]。以 SOI 4 英寸(1 in=2.54 cm)晶圆、芯片尺寸结构为 3 000 μ m×3 000 μ m,敏感膜区域为 1 000 μ m× 1 000 μ m 的结构进行传感器设计,设计结构如图 2 所示。SOI 晶圆从上自下结构为器件层-氧化层-基 底层。器件层厚度为 1.5 μm,主要设计为电阻、金 属引线及金属焊盘;氧化层厚度为 1.5 μm,将其作 为刻蚀截止层,同时避免因高温导致 PN 结发生漏 电,进而击穿传感器,发生失效;最下层为硅基底, 用以刻蚀背腔作为最上层的压力敏感区。



图 3 为传感器电阻位置图。由图可见,压力敏 感区位置仅有 4 条电阻,其余部分均刻蚀到氧化硅 截止层,单个电阻条两侧长条形突起为连接金属引 线的欧姆接触区。对传感器加温加压,通电工作 中,由于金属引线与电阻条存在 1.5 μm 高度差,电 阻条欧姆接触区与金属引线因过热应力产生引线 断裂,如图 4 所示。





图 4 金属引线断裂

为解决金属引线在高温下断裂,保证传感器在高温下可靠工作,在电阻条欧姆接触区两侧连接硅引线,将其布置在金属引线下方且略宽于金属引线,对硅引线折弯处做倒角设计,如图 5 所示。



图 5 增加硅引线后的版图设计

2 仿真与分析

表 1 为 SOI 材料和金属材料特性。按照芯片 尺寸进行高温 SOI 压力传感器的建模仿真分析。

11 회 팀 네

衣1 材料偶性							
材料	弹性	泊松比	热膨胀系数/	密度/			
	模量/GPa		$(10^{-6} {}^{\circ}\! C^{-1})$	$(g \cdot cm^{-3})$			
Si	170	0.28	3.5	2.33			
SiO_2	70	0.17	0.5	2.20			
Ti	102	0.32	8.6	4.50			
Pt	169	0.38	9.0	21.45			
Au	220	0.42	14.2	6.0			

考虑到该传感器主要应用于高温高压环境工况,工作时受到的应力是高温高压工况环境下产生的压应力和热应力的复合应力。在 COMSOL 仿真软件中建立仿真模型,并对芯片有无硅引线两种结构进行有限元耦合仿真,分析两种结构在高温高压下的应力情况。

图 6 分别为增加硅引线整体应力图和金属引线 整体应力图。图 7 分别为增加硅引线局部应力放大 图和金属引线局部应力放大图。







(b)金属引线局部应力放大图图 7 两种不同引线结构局部放大应力分布图

对比图 6、7 可见,直接溅射金属引线的传感器 模型在高温高压下的最大应力为 2 996.6 MPa,中 心区最小应力为 0.706 59 MPa;相同条件下在硅引 线上溅射金属引线的传感器模型最大应力为 1 573.7 MPa,中心区最小应力为 0.248 00 MPa。 综上可知,增加硅引线后传感器最大应力减少了 49%。对比图 7 可以发现,增加硅引线后电阻区 与引线折弯处应力堆积区的应力明显减少。

分别对两种结构进行定量化分析,图 8 为 1 MPa载荷恒定,以温度梯度为 50 ℃进行最大应 力分析。图 9 为温度维持 300 ℃不变,压力载荷以 0.2 MPa压力梯度进行最大应力分析。由图可见, 在温度和压力变化条件下,增加硅引线结构的应力 值均优于金属引线结构。





- 3 工艺制备及测试
- 3.1 压阻式压力传感器工艺制备

SOI 高温压阻式压力传感器的制备过程如图 10 所示。首先对 SOI 器件层注入硼离子,对金属引 线与硅接触点做重掺杂,利用深硅刻蚀机对其进行 电阻条及硅引线刻蚀,去除器件层的多余硅。因为 深硅刻蚀机的刻蚀原理是基于博世工艺(Bosch 工 艺),即刻蚀一层,钝化一层,刻蚀气体和钝化气体 分别为 SF₆、C₄F₈,以此形成各向异性刻蚀^[14],如图 11 所示。



图 11 Bosch 工艺原理

由图 11 可见,在金属引线折弯处加倒角设计, 可以防止折弯处因刻蚀气体集聚而导致过刻。然 后在硅引线上溅射金属 Ti-Pt-Au,通过剥离形成金 属引线,采用 RTP 退火炉对晶圆进行退火,形成欧 姆接触。最后对硅基背面进行深刻蚀以形成压力 敏感薄膜,再与 BF33 玻璃进行阳极键合形成密闭 的压力气室。

制备完成的压力传感器电阻区如图 12 所示。 由图可见,硅引线略宽于金属引线,且与电阻欧姆 接触区在同一水平高度。



图 12 传感器电阻区结构

3.2 传感器测试

通过对两种不同结构芯片进行常温加压,测试 芯片输出以及进行 5 V 直流恒定电压、温度 300 ℃ 的高温测试,测试设备如图 13 所示。实验分别选取 不同结构的 3 个芯片进行测试。1 ♯-3 ♯ 为无硅引 线结构,4 ♯-6 ♯ 为增加硅引线结构。



图 13 高低温烘箱测试平台

常温加压测试结果如图 14 所示。由图可见,增 加硅引线后的 3 只传感器在输出时较稳定,1 #、3 # 为金属引线结构,其线性度和整体芯片设计值存在 偏差。由图 14 可以计算传感器灵敏度,两种不同结 构传感器的灵敏度如表 2 所示。由表可见,无硅引 线结构 1 #-3 # 传感器灵敏度较大,平均灵敏度为 1.192 mV/kPa;有硅引线结构 4 #-6 # 较小,平均 灵敏度为 1.024 mV/kPa。



米刊	灭琡度/(mV•kPa⁻)				
天堂	1 # / 4 #	2 # / 5 #	3 # / 6 #	均值	
无引线结构	1.066	1.278	1.233	1.192	
有引线结构	1.087	0.940	1.044	1.024	

由图 15 可见,在 5 V 直流恒定电压、温度为 300 ℃测试条件下,增加硅引线的传感器芯片输出 电压较稳定,金属引线结构的芯片 1 ♯ 传感器在 35 h 时发生失效。通过观察发现,失效传感器金属 引线断裂(见图 16),且经过电阻测试未检测到电 阻。2 ♯芯片随温度变化在 15 h 后满量程输出波动 较大,较不稳定。通过显微镜观察发现金属引线变 黑,未见明显断裂。



4 结束语

针对高温压力传感器在高温环境下金属引线 易发生断裂而引起传感器失效的问题,本文提出了 一种在金属引线下方增加硅引线的方法,使金属引 线与电阻之间连接平滑,无高台阶,从而降低了金 属引线热应力。通过对有无硅引线两种不同结构 进行仿真分析,发现增加硅引线的新结构应力比原 结构约低 50%。测试结果表明,增加了硅引线的 新结构耐温效果有明显提升。无硅引线传感器在 300 ℃、40 h时,金属引线发生断裂,而增加了硅 引线的传感器能进行有效输出。在传感器性能方 面,虽然无硅引线传感器的灵敏度高于有硅引线 传感器,但其可靠性及稳定性均不如硅引线结构 传感器,且硅引线结构传感器的灵敏度满足设计 指标,即灵敏度大于 1.0 mV/kPa。该实验表明, 增加硅引线后,传感器能有效解决金属的热应力 问题,改善传感器在高温环境下的使用性能,提高 传感器的使用寿命。

参考文献:

- [1] 刘强,魏贵玲,黄晶,等. 一种 MEMS 压力传感器温度 补偿方法[J]. 压电与声光,2023,45(6):828-832.
 LIU Qiang, WEI Guiling, HUANG Jing, et al. A temperature compensation method for MEMS pressure sensors[J]. Piezoelectricis & Acoustooptics, 2023, 45 (6):828-832.
- [2] 张书玉. SOI 高压力传感器的研究[D]. 天津:河北工业 大学,2006.
- [3] 陈达. SOI、SGOI、GOI 材料制备技术研究[D]. 兰州: 兰州大学,2015.
- [4] 林成鲁.SOI——纳米技术时代的高端硅基材料[J].微 电子学,2008,38(1):44-49.

LIN Chenglu. SOI——high-end silicon-based materials in the era of nanotechnology [J]. Microelectronics, 2008, 38(1):44-49.

- [5] 郭玉刚,饶浩,陶茂军,等. MEMS SOI 高温压力传感器芯片[J]. 传感器与微系统,2018,37(11):92-95.
 GUO Yugang, RAO Hao, TAO Maojun, et al. MEMS SOI high temperature pressure sensor chip[J]. Sensors and Microsystems,2018,37(11):92-95.
- [6] 黄漫国,邹兴,郭占社,等.高温大压力传感器研究现状
 与发展趋势[J].测控技术,2020,39(4):1-5.
 HUANG Manguo, ZOU Xing, GUO Zhanshe, et al.
 Research status and development trend of high temper-

ature and large pressure sensors[J]. Measurement and Control Technology, 2020, 39(4):1-5.

- [7] 王婧,雷程,梁庭,等. 压敏电阻的热应力分析及结构优化[J]. 仪表技术与传感器,2023(2):44-49.
 WANG Jing, LEI Cheng, LIANG Ting, et al. Thermal stress analysis and structure optimisation of varistors
 [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2023 (2):44-49.
- [8] TANG Xin, TIAN Junwang, ZHAO Jiafeng, et al. Structure design and optimization of SOI high-temperature pressure sensor chip[J]. Microelectronics Journal, 2021, 118:105245.
- [9] 李瑜,刘志远,王晓光,等.高频响耐高温 MEMS 压力 传感器封装工艺研究[J].传感器与微系统,2021,40 (5):64-66.

LI Yu, LIU Zhiyuan, WANG Xiaoguang, et al. Research on the packaging process of high-frequencyloudness and high-temperature-resistant MEMS pressure sensor[J]. Sensors and Microsystems, 2021, 40 (5):64-66.

 [10] 江浩,黄晶,袁宇鹏,等. 硅基 MEMS 梁-复合膜-岛压阻 式压力传感器设计研究[J]. 压电与声光,2024,46(1): 118-123.
 JIANG Hao, HUANG Jing, YUAN Yupeng, et al. De-

sign study of silicon-based MEMS beam-composite

(上接第 385 页)

- [9] TROGÉ A, O'LEARY R L, HAYWARD G, et al. Properties of photocured epoxy resin materials for application in piezoelectric ultrasonic transducer matching layers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 128(5): 2704-2714.
- [10] WANG L J, WU C Q, FAN L F, et al. Investigation of wave reflection at the joint with different wave impedances on two sides[J]. Waves in Random and Com-

membrane-island piezoresistive pressure sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2024,46(1):118-123.

[11] 王江新,杨丽,姜建刚,等.基于惠斯通电桥探究热敏电 阻与温度之间的关系[J].大学物理实验,2023,36(6): 45-48.

WANG Jiangxin, YANG Li, JIANG Jiangang, et al. Exploring the relationship between thermistor and temperature based on Wheatstone bridge[J]. University Physics Experiment, 2023, 36(6):45-48.

- [12] DAI Yunyu, JIANG Hongchuan, ZHAO Xiaohui, et al. A temperature-stable Pd nanofilm hydrogen sensor with a Wheatstone bridge structure[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34 (9):833.
- [13] 佟玲,邹文江,刘潇潇. 航空航天 MEMS 传感器应用及 其发展现状[J]. 电子世界,2011(1):20-21.
 TONG Ling, ZOU Wenjiang, LIU Xiaoxiao. Application of aerospace MEMS sensors and its development status[J]. Electronic World,2011(1):20-21.
- [14] 周浩,罗燕飞,高周妙,等. 深槽刻蚀工艺参数及干法清洗工艺的研究[J]. 中国集成电路,2018,27(5):55-59.
 ZHOU Hao, LUO Yanfei, GAO Zhoumiao, et al. Research on deep bath etching process parameters and dry cleaning process [J]. China Integrated Circuit, 2018,27(5):55-59.

plex Media, 2023, 33(2): 237-253.

- [11] CHEN M I, TESNG S P, LO P Y, et al. Characterization of wedge waves propagating along wedge tips with defects[J]. Ultrasonics, 2018, 82: 289-297.
- [12] JENDERKA K V, KOCH C. Investigation of spatial distribution of sound field parameters in ultrasound cleaning baths under the influence of cavitation[J]. Ultrasonics, 2006, 44; e401-e406.