

# 纳米多晶硅薄膜压力传感器制作及特性\*

赵晓锋<sup>†</sup> 温殿忠

(黑龙江大学黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室, 集成电路重点实验室, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 给出一种纳米多晶硅薄膜压力传感器, 采用 LPCVD 法在衬底温度 620°C 时制备纳米多晶硅薄膜, 基于 MEMS 技术在方形硅膜不同位置制作由 4 个薄膜厚度为 63.0nm 的掺硼纳米多晶硅薄膜电阻构成惠斯通电桥结构, 实现对外加压力的检测. 实验结果表明, 当硅膜厚度 75 $\mu$ m 时, 纳米多晶硅薄膜压力传感器在恒压源 5.0V 供电时, 满量程(160kPa)输出为 24.235mV, 灵敏度为 0.151mV/kPa, 精度为 0.59% F. S, 零点温度系数和灵敏度温度系数分别为 -0.124%/°C 和 -0.108%/°C.

**关键词:** 纳米多晶硅薄膜; MEMS 技术; 压力传感器; 温度系数

EEACC: 7230

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)10-2038-05

## 1 引言

多晶硅压力传感器与单晶硅压力传感器相比, 因具有制作工艺简单、灵敏度高和一定的高温特性等特点, 使多晶硅薄膜作为压阻材料在压力传感器领域得到广泛应用<sup>[1~7]</sup>. 近年来, 揣荣岩等人给出不同薄膜厚度、不同掺杂浓度、不同衬底温度等工艺条件对多晶硅薄膜压阻特性的影响<sup>[8,9]</sup>. 随着纳米薄膜技术的发展, 当薄膜晶粒尺度小于 100nm、薄膜厚度小于 100nm 时, 薄膜微结构的变化会引起载流子传输特性发生变化. 纳米硅薄膜与单晶硅相比, 具有高室温电导率 ( $10^{-3} \sim 10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )、光与热稳定性好、具有明显量子点特征、高压力灵敏系数 (-130)、宽光学禁带宽度 (1.70~1.85eV) 等特殊性能, 使纳米硅薄膜在器件和传感器<sup>[10]</sup> 领域具有优异特性.

本文采用 LPCVD 法制备纳米多晶硅薄膜, 基于 MEMS 技术在方形硅膜不同位置制作由 4 个掺硼纳米多晶硅薄膜构成的惠斯通电桥结构, 实现对外加压力的测量.

## 2 纳米多晶硅薄膜

采用东北微电子研究所 LPCVD 系统以高纯  $\text{SiH}_4$  为气源, 在 100mm <100> 晶向单晶硅衬底上制备纳米硅薄膜, LPCVD 系统工作气压为 48~53Pa, 沉积温度 620°C. 图 1 给出采用 Veeco 3100 AFM 对薄膜厚度 63.0nm 的纳米硅薄膜的形貌表征.

采用日本岛津公司 XRD6000 纳米薄膜附件, 以高纯  $\text{SiH}_4$  为气源, 对 <100> 晶向单晶硅表面沉积的薄膜进

行 XRD 测试分析, X 线管为 Cu( $0.154060\text{nm}$ ), 功率参数为 40.0kV, 40.0mA, 扫描角度在 20°~60°. 图 2 给出薄膜厚度为 63.0nm 纳米硅薄膜 620°C 沉积态和 700, 800, 900°C 不同退火温度的 XRD 图, 测试结果表明, 在 620°C 沉积态薄膜已经晶化. 在经过 700, 800 和

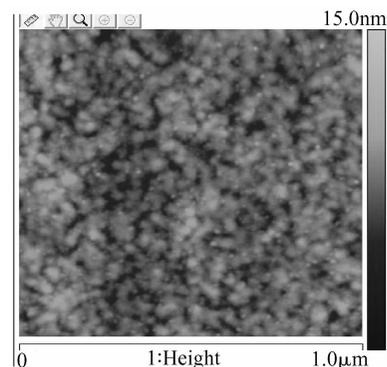


图 1 厚度 63.0nm 纳米多晶硅薄膜的 AFM 照片

Fig. 1 AFM photo of the nano-polysilicon thin films with thickness of 63.0nm

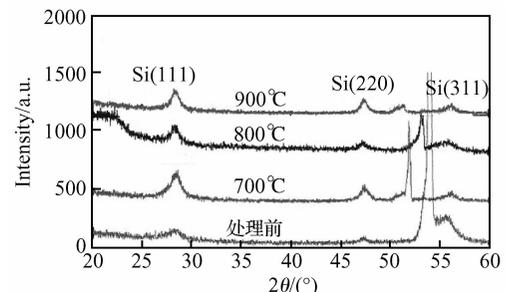


图 2 620°C 沉积薄膜与不同退火温度薄膜的 XRD 谱

Fig. 2 XRD spectra of the thin films deposited at 620°C and annealed at different temperatures

\* 国家自然科学基金(批准号:60676044), 黑龙江省教育厅科技研究计划(批准号:11521215)和黑龙江省电子工程学院重点实验室基金(DZZD2006-12)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: zxf80310@126.com

2008-05-05 收到, 2008-05-26 定稿

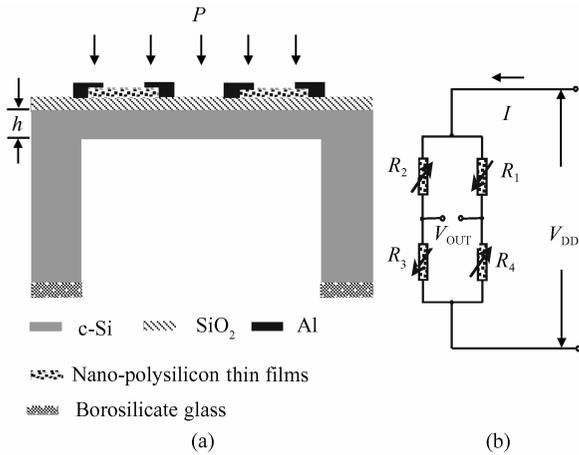


图 3 纳米多晶硅薄膜压力传感器基本结构及等效电路 (a)基本结构; (b)等效电路

Fig.3 Basic structure and equivalent circuit of the nano-polysilicon thin films pressure sensor (a) Basic structure; (b) Equivalent circuit

900℃高温真空退火后,在 $28.4^\circ \pm 0.2^\circ$ 的范围内结晶峰强度增强,同时在 $47.3^\circ \pm 0.2^\circ$ 和 $56.1^\circ \pm 0.2^\circ$ 的范围内结晶峰也相应增强.通过对沉积态、高温真空退火后硅薄膜 XRD 衍射角与标准结晶取向卡相比较得知,结晶峰为硅衍射峰,对应角度为 $\langle 111 \rangle$ 晶向( $2\theta = 28.4^\circ$ ), $\langle 220 \rangle$ 晶向( $2\theta = 47.3^\circ$ )和 $\langle 311 \rangle$ 晶向( $2\theta = 56.1^\circ$ ),在 $\langle 100 \rangle$ 晶向单晶硅衬底上采用 LPCVD 法在 620℃沉积厚度为 63.0nm 硅薄膜形成择优取向为 $\langle 111 \rangle$ 晶向的纳米多晶硅薄膜,经高温真空退火后,衍射峰强度增强.作者采用该纳米多晶硅薄膜制作压力传感器.

### 3 纳米多晶硅薄膜压力传感器基本结构及制作工艺

#### 3.1 纳米多晶硅薄膜压力传感器基本结构

图 3 给出纳米多晶硅薄膜电阻压力传感器基本结构和等效电路.本文采用 n 型 $\langle 100 \rangle$ 晶向双面抛光高阻( $\rho > 100 \Omega \cdot \text{cm}$ )单晶硅片,基于 MEMS 技术和 LPCVD 法,在厚度  $75 \mu\text{m}$  的  $6\text{mm} \times 6\text{mm}$  方形硅膜不同位置上制作由薄膜厚度为 63.0nm 的 4 个掺硼纳米多晶硅薄膜电阻构成的惠斯通电桥结构.当外加压力  $P$  作用时,惠斯通电桥桥路输出  $V_{\text{OUT}}$  随外加压力  $P$  而发生变化,实现对外加压力  $P$  的检测.

#### 3.2 纳米多晶硅薄膜压力传感器制作工艺

图 4 给出纳米多晶硅薄膜压力传感器制作工艺流程图示意图,制作工艺如下:(1)厚度  $480 \mu\text{m}$  的 n 型 $\langle 100 \rangle$ 晶向高阻( $\rho > 100 \Omega \cdot \text{cm}$ )双面抛光单晶硅片;(2)单晶硅片经清洗后,生长厚度为 650nm 的  $\text{SiO}_2$  层;(3)采用 LPCVD 技术生长 63.0nm 厚纳米多晶硅薄膜,采用离子注入机进行 B 注入,注入能量 35keV,注入剂量  $4.0 \times 10^{15}$ ;(4)经一次光刻,光刻出 4 个纳米多晶硅薄膜电

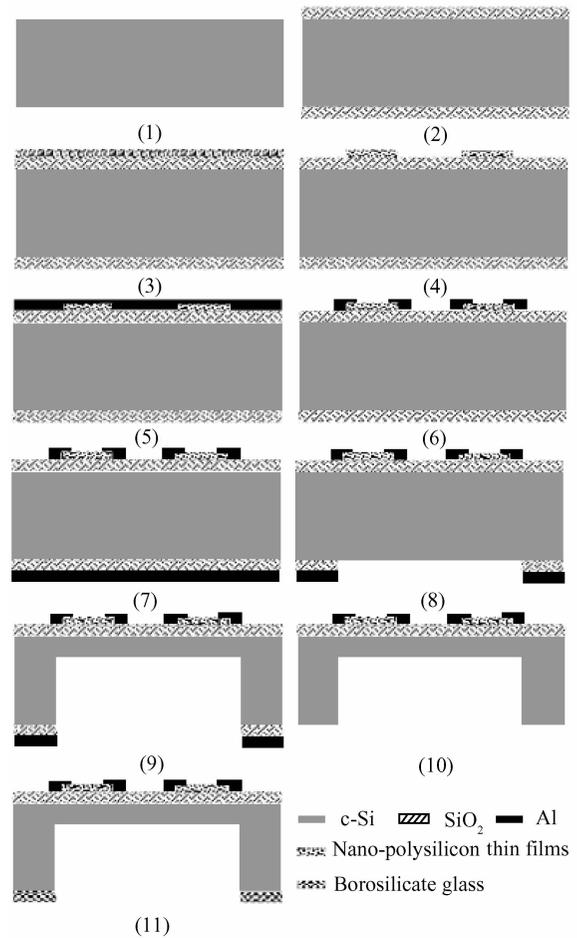


图 4 纳米多晶硅薄膜压力传感器制作工艺流程图

Fig.4 Fabrication technology process of the nano-polysilicon thin films pressure sensor

阻;(5)采用磁控溅射系统溅射铝电极;(6)二次光刻反刻铝电极,形成由 4 个纳米多晶硅薄膜电阻构成的惠斯通电桥结构;(7)采用磁控溅射系统在单晶硅片背面二次溅射铝电极;(8)三次光刻采用干法刻蚀铝电极,形成  $6\text{mm} \times 6\text{mm}$  的 C 型硅杯窗口,在  $450^\circ\text{C}$  下合金化 30min;(9)采用法国 ALCATEL 601E 型 ICP 进行深槽刻蚀,C 型硅杯硅膜厚度为  $75 \mu\text{m}$ ;(10)采用湿法工艺腐蚀单晶硅片背面铝膜;(11)采用静电封接技术将纳米多晶硅薄膜电阻压力传感器芯片与硼硅玻璃进行静电封接.

图 5 是纳米多晶硅薄膜压力传感器芯片版图及照片.图 5(a)为采用 Tanner L-Edit 设计的纳米多晶硅薄膜电阻压力传感器芯片版图,图 5(b)为采用 MEMS 技术和 LPCVD 法制作的  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  纳米多晶硅薄膜电阻压力传感器芯片照片.

### 4 纳米多晶硅薄膜压力传感器特性

#### 4.1 纳米多晶硅薄膜压力传感器压敏电阻 $I-V$ 特性

采用 HP4145B 半导体参数分析仪在室温条件下对掺硼纳米多晶硅薄膜压力传感器 4 个压敏电阻  $I-V$  特

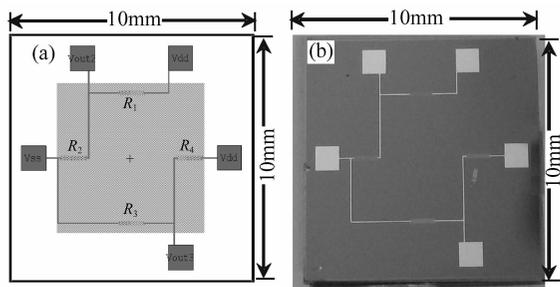


图5 纳米多晶硅薄膜压力传感器芯片版图及照片 (a)传感器芯片版图; (b)传感器芯片照片

Fig.5 Layout and photograph of the nano-polysilicon thin films pressure sensor chip (a) Layout of sensor chip; (b) Photograph of sensor chip

性进行测试. 当外加压力  $P = 0\text{kPa}$  时, 图6给出纳米多晶硅薄膜压力传感器电阻  $R_1, R_2, R_3$  和  $R_4$  的  $I-V$  特性曲线, 4个压敏电阻阻值分别为  $5.897, 5.831, 5.515$  和  $5.600\text{k}\Omega$ .

#### 4.2 纳米多晶硅薄膜压力传感器特性

采用美国 Mensor PCS400 压力校准系统、HP34401A 万用表、BJ1790B 型恒压源对纳米多晶硅薄膜压力传感器进行实验标定, 恒压源供电电压为  $3.0$  和  $5.0\text{V}$ , 外加压力量程  $0 \sim 160\text{kPa}$ , 测试环境温度为  $22^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $15\%\text{RH}$ , 测试循环次数 3 次.

图7给出纳米多晶硅薄膜压力传感器在工作电压为  $3.0$  和  $5.0\text{V}$  恒压工作时输入-输出特性实验曲线. 工作电压为  $3.0\text{V}$  时传感器满量程 ( $160\text{kPa}$ ) 输出  $14.548\text{mV}$ , 工作电压为  $5.0\text{V}$  时传感器满量程 ( $160\text{kPa}$ ) 输出  $24.235\text{mV}$ . 实验结果表明, 随工作电压值增加, 传感器满量程 ( $160\text{kPa}$ ) 输出增加, 工作电压  $3.0\text{V}$  时传感器灵敏度为  $0.090\text{mV/kPa}$ , 工作电压  $5.0\text{V}$ , 传感器灵敏度为  $0.151\text{mV/kPa}$ , 纳米多晶硅薄膜压力传感器灵敏度提高.

根据最小二乘法计算纳米多晶硅薄膜压力传感器线性度, 图8给出纳米多晶硅薄膜压力传感器在工作电压为  $3.0$  和  $5.0\text{V}$  恒压时输入-输出特性拟合直线

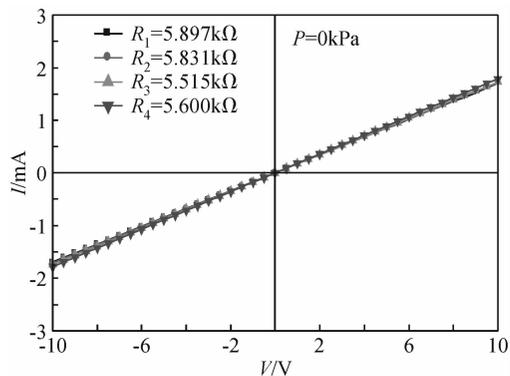


图6 纳米多晶硅薄膜压力传感器电阻  $R_1, R_2, R_3$  和  $R_4$  的  $I-V$  特性曲线

Fig.6  $I-V$  characteristics curves of  $R_1, R_2, R_3$  and  $R_4$  of the nano-polysilicon thin films pressure sensor

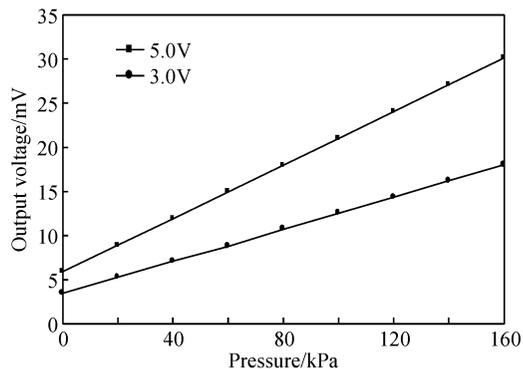


图7 纳米多晶硅薄膜压力传感器输入-输出特性实验曲线

Fig.7 Input-output characteristics experimental curves of the nano-polysilicon thin films pressure sensor

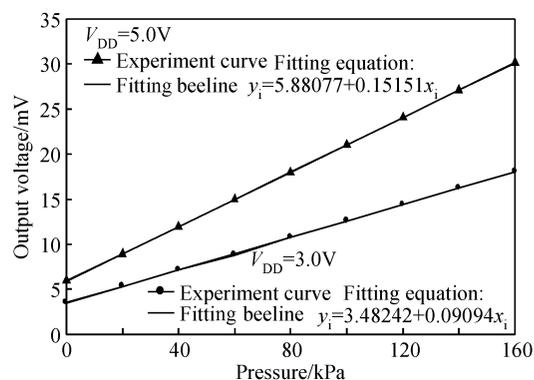


图8 纳米多晶硅薄膜压力传感器恒压工作输入-输出特性拟合直线与实验曲线

Fig.8 Fitting beelines and experiment curves of input-output characteristics of constant voltage of the nano-polysilicon thin films pressure sensor

与实验曲线. 在  $5.0\text{V}$  恒压工作时线性度为  $0.135\%\text{F.S.}$

图9给出纳米多晶硅薄膜压力传感器  $3.0$  和  $5.0\text{V}$  恒压时重复性实验曲线. 在  $5.0\text{V}$  恒压工作时重复性为  $0.572\%\text{F.S.}$

图10给出纳米多晶硅薄膜压力传感器  $3.0$  和  $5.0\text{V}$  恒压时迟滞特性实验曲线. 在  $5.0\text{V}$  恒压工作时迟滞为  $0.206\%\text{F.S.}$

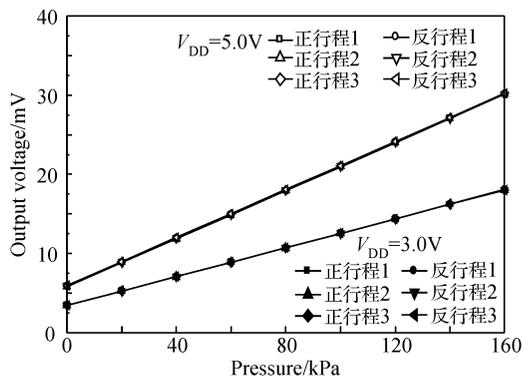


图9 纳米多晶硅薄膜压力传感器重复性实验曲线

Fig.9 Repeatability experimental curves of the nano-polysilicon thin films pressure sensor

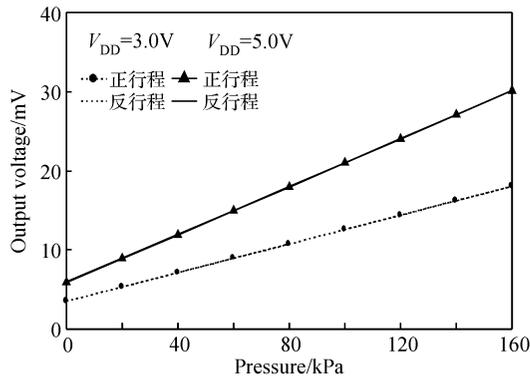


图 10 纳米多晶硅薄膜压力传感器迟滞性实验曲线

Fig. 10 Hysteresis experimental curves of the nano-polysilicon thin films pressure sensor

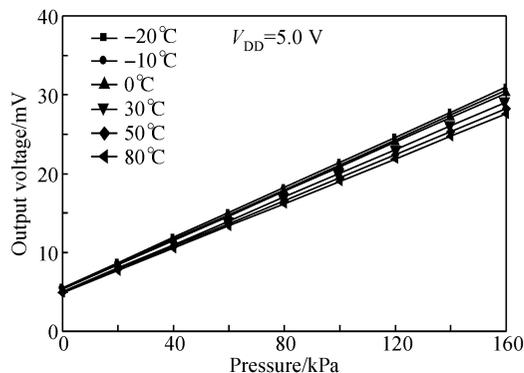


图 11 纳米多晶硅薄膜压力传感器不同温度下的输入-输出特性曲线

Fig. 11 Input-output characteristics curves of the nano-polysilicon thin films pressure sensor at different temperatures

图 11 给出纳米多晶硅薄膜压力传感器在工作电压为 5.0V 时,在不同温度时的输入-输出特性实验曲线.实验结果给出,在  $-20\sim 80^{\circ}\text{C}$  范围内,纳米多晶硅薄膜压力传感器零点温度系数和灵敏度温度系数分别为  $-0.124$  和  $-0.108\%/^{\circ}\text{C}$ .

## 5 结论

采用 MEMS 和 LPCVD 技术在  $6\text{mm}\times 6\text{mm}$  方形

硅膜上制作由薄膜厚度为  $63.0\text{nm}$  的纳米多晶硅薄膜压力传感器,压力传感器硅膜厚度为  $75\mu\text{m}$ ,通过对纳米多晶硅薄膜压力传感器实验标定.实验结果给出,该传感器具有较高灵敏度,在工作电压为 5.0V 时,灵敏度达  $0.151\text{mV/kPa}$ ,精度为  $0.59\% \text{ F. S.}$  工作电压为 5.0V 时传感器零点温度系数和灵敏度温度系数分别为  $-0.124$  和  $-0.108\%/^{\circ}\text{C}$ .该传感器的制作为纳米多晶硅薄膜压阻特性研究和在传感器领域应用奠定了基础.

## 参考文献

- [1] Guo Shuwen, Tan Songshen, Wang Weiyan. Temperature characteristics of microcrystalline and polycrystalline silicon pressure sensors. *Sensors and Actuators A*, 1990, 21: 133
- [2] Mosser V, Suski J, Goss J, et al. Piezoresistive pressure sensors based on polycrystalline silicon. *Sensors and Actuators A*, 1991, 28: 113
- [3] Malhaire C, Barbier D. Design of a polysilicon-on-insulator pressure sensor with original polysilicon layout for harsh environment. *Thin Solid Films*, 2003, 427: 362
- [4] Le Berre M, Lemiti M, Barbier D, et al. Piezoresistance of boron-doped PECVD and LPCVD polycrystalline silicon films. *Sensors and Actuators A*, 1995, 46/47: 166
- [5] Li Xinxin, Zohar Y, Wong M. Fabrication and characterization of nickel-induced laterally crystallized polycrystalline silicon piezoresistive sensors. *Sensors and Actuators A*, 2000, 82: 281
- [6] Semmache B, Kleimann P, le Berre M, et al. Rapid thermal processing of piezoresistive polycrystalline silicon films: An innovative technology for low cost pressure sensor fabrication. *Sensors and Actuators A*, 1995, 46: 76
- [7] Gridchin V A, Lubimsky V M, Sarina M P. Piezoresistive properties of polysilicon films. *Sensors and Actuators A*, 1995, 49: 67
- [8] Chuai Rongyan, Liu Xiaowei, Huo Mingxue, et al. Influence of doping level on the gauge factor of polysilicon nano film. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27: 1230 (in Chinese) [揣荣岩, 刘晓为, 霍明学, 等. 掺杂浓度对多晶硅纳米薄膜应变系数的影响. *半导体学报*, 2006, 27: 1230]
- [9] Liu Xiaowei, Huo Mingxue, Chen Weiping, et al. Theoretical research on piezoresistive coefficients of polysilicon films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25: 292 (in Chinese) [刘晓为, 霍明学, 陈伟平, 等. 多晶硅薄膜压阻系数的理论研究. *半导体学报*, 2004, 25: 292]
- [10] Alpuim P, Filonovich S A, Costa C M, et al. Fabrication of a strain sensor for bone implant failure detection based on piezoresistive doped nanocrystalline silicon. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354: 2585

## Fabrication and Characteristics of a Nano-Polysilicon Thin Film Pressure Sensor\*

Zhao Xiaofeng<sup>†</sup> and Wen Dianzhong

(Key Laboratory of Electronics Engineering, College of Heilongjiang Province, Major Laboratories of Integrated Circuits, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** A nano-polysilicon thin film pressure sensor is presented. Nano-polysilicon thin film is fabricated by LPCVD at a substrate temperature of 620°C, and then MEMS is adopted to fabricate four nano-polysilicon resistors with a film thickness of 63.0nm and mixed boron, so that a Wheatstone bridge can be formed and additional pressure can be measured. The experimental results show that when the thickness of the squared silicon membrane is 75 $\mu$ m and the constant voltage power supply of the nano-polysilicon thin film pressure sensor is 5.0V, the full range (160kPa) output is 24.235mV, the sensitivity is 0.151mV/kPa, the precision is 0.59% F.S., and the coefficient of zero temperature and sensitivity temperature are -0.124 and -0.108%/°C, respectively.

**Key words:** nano-polysilicon thin films; MEMS technology; pressure sensor; temperature coefficient

**PACC:** 7230

**Article ID:** 0253-4177(2008)10-2038-05

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60676044), the Science and Technology Research Program of Heilongjiang Provincial Department of Education (No. 11521215), and the Key Laboratory of Electronics Engineering of College of Heilongjiang Province (No. DZZD2006-12)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: zxf80310@126.com

Received 5 May 2008, revised manuscript received 26 May 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics