

多晶硅薄膜的高温压阻效应*

霍明学¹ 刘晓为¹ 张 丹^{1,2} 王喜莲¹ 宋明浩¹

(1 哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 哈尔滨 150001)

(2 黑龙江大学电子工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 利用 LPCVD 制备重掺杂多晶硅薄膜, 在 0~560 温度范围内对薄膜的压阻效应进行研究, 同时对多晶硅薄膜应变系数随温度的变化, 以及薄膜的淀积温度与薄膜厚度对应变系数的影响进行了相关的实验研究. 结果表明, 利用多晶硅材料制作的压敏电阻, 其最高工作温度可以达到 560 以上.

关键词: 压阻效应; 多晶硅; 应变系数

EEACC: 2520C **PACC:** 7280C

中图分类号: O738 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)11-2115-05

1 引言

作为压阻材料, 单晶硅与多晶硅薄膜在压力传感器与加速度传感器等许多 MEMS 器件中有极其广泛的应用. 由于利用单晶硅材料制备压敏电阻时采用 p-n 结隔离, 当工作温度超过硅的本征温度后, p-n 结隔离失效. 因此由单晶硅材料制备的上述传感器无法在高温下工作. 与此相反, 多晶硅材料在高温条件下却表现出良好的压阻特性. 同时多晶硅材料简单的工艺制备过程及低廉的价格使其颇受青睐^[1,2].

在过去的三十年里, 有关多晶硅结构及掺杂浓度对其应变系数的影响得到深入研究. 另外, 对多晶硅压阻效应最高工作温度的研究也倍受关注. 但目前多晶硅压阻效应的最高温度仅为 300^[3]. 本文将对多晶硅薄膜压阻效应的高温特性进行研究, 制作出工作温度高于 560 的多晶硅压敏电阻. 可用于高温压力传感器的制作, 实现石油、化工、冶金、锅炉等较高温度环境下的压力测试, 同时也可应用于汽车工业, 对内燃机油路压力、汽缸压力等进行检测和控制.

2 样品制备

2.1 淀积多晶硅薄膜

利用 LPCVD, 在表面长有 500 μm SiO₂ 层的 75mm(100) 硅片上淀积多晶硅薄膜. 为了研究淀积温度对薄膜结构的影响, 分别在 625, 650, 700, 750, 800 和 900 下, 制备厚度为 1 μm 的多晶硅薄膜. 另外, 在 700 下淀积一组膜厚分别为 0.2, 0.6, 1.0 和 1.4 μm 的样片.

其他淀积条件为: 硅烷 (13.3% 稀释于 He 气体中), 流量约 1.5 mL/min, 反应室压力为 53~107 Pa.

实验所用 LPCVD 淀积系统如图 1 所示. LPCVD 反应腔为标准石英管. 石英管放置于自动控温加热炉中. 旋片式机械真空泵, 抽速为 8L/s, 真空度达 0.133 Pa, 浮子式流量计和针阀角阀组成流量控制系统.

薄膜厚度通过磨角法在金相显微镜下测出.

2.2 多晶硅薄膜掺杂

多晶硅薄膜的掺杂方法主要有: 气相掺杂法、离子注入法和扩散掺杂法. 因为高温扩散法容易使杂

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2002AA404200)

霍明学 男, 1968 年出生, 讲师, 博士研究生, 目前从事 MEMS 技术及传感器技术研究.

刘晓为 男, 1955 年出生, 教授, 目前从事 MEMS 技术及传感器技术研究.

2004-12-14 收到, 2005-08-10 定稿

图 1 多晶硅薄膜淀积系统示意图

Fig. 1 Schematic of deposition system

质在晶界析出,而且高温下多晶硅的结构发生变化,高温扩散掺杂得到的应变系数较低.本实验中,对 700 °C 淀积的 0.5 μm 的多晶硅薄膜进行高温硼扩后,测得其应变系数为 14~15.因此高温扩散法不适于作为高应变灵敏薄膜掺杂.气相掺杂法虽然具有掺杂均匀、无需处理、工艺简便的特点,但其重复性不如离子注入法,掺杂气体有毒,操作具有一定危险性.因此实验采用离子注入法掺杂,掺杂元素为硼.硼作为杂质的优点在于,高温下不易产生杂质析出,应变系数高且无毒.

2.3 薄膜热处理温度与时间

如果仅从恢复晶格激活杂质考虑,多晶硅薄膜的热处理温度只需 800 °C.但为使杂质在薄膜中尽快达到均匀分布,同时消除 SiO₂ 介质层在薄膜中产生的热应力,所需的热处理温度要尽可能高些.而本文的实验结果显示,当热处理温度高于 1000 °C 时,薄膜结构发生显著变化.综合考虑之后,将热处理温度设定为 950 °C.

杂质在多晶硅中的扩散不同于单晶硅,同时存在两种扩散途径:杂质沿晶界的扩散和在晶粒中的扩散.由于热处理过程中杂质在多晶硅中的扩散极其复杂,须通过实验确定杂质达到均匀分布的时间.

实验方法:将已完成离子注入的样品分割成试验用陪片;在高温扩散炉中进行退火,以一定时间间隔取出陪片,用四探针测试仪监测陪片方块电阻 R 的变化, R 趋于稳定值时即达到均匀分布的热处理时间.

具体实验条件:薄膜厚度 d 为 1.47 μm.第一次离子注入,注入能量为 80 keV,注入剂量为 7×10^{14} cm⁻²;第二次离子注入,注入能量为 180 keV,注入剂量为 7×10^{14} cm⁻².炉温 950 °C,氮气流量为 1 L/min.多晶硅薄膜方块电阻随热处理时间变化的实验曲线

如图 2 所示.

图 2 方块电阻随热处理时间的变化

Fig. 2 Values of sheet resistances versus annealing time

退火前方块电阻太大无法测出,退火开始阶段 R 迅速减小至最小值 410 Ω/□,此后随退火时间的增加, R 增大,在 13 h 左右达到稳定值 750 Ω/□左右.方块电阻在初始阶段的下降是因为杂质从注入后形成的最大浓度处快速扩散到表面处,同时晶格在高温下迅速消除注入损伤所致.此后随着杂质向薄膜内部的扩散,由于薄膜越靠近衬底晶粒度越小,载流子迁移率越低,所以方块电阻缓慢增加,直到杂质均匀分布为止.因实验所用薄膜膜厚最大,因此其他小于此厚度的样品在 950 °C 下退火 13 h 后即可达到均匀分布.

2.4 多晶硅薄膜电阻的制备

(1) 图形设计

为同时测量横向和纵向压阻效应,每个单元有两个相互垂直的电阻.为了保证每个单元都能应用,实际单元布置了两对相互垂直的电阻,电阻 R 的长 l 和宽 b 的选取借鉴了压阻式传感器的设计方法. l 和 b 的值分别为 5 mm 和 1 mm.

(2) 电阻条刻蚀

利用反应离子刻蚀系统制备多晶硅电阻条.

(3) 金属化系统

通过 Al 金属化工艺制备电阻的接触电极系统.过程为:蒸 Al 反刻 Al 合金化.工艺条件为:炉温 480 °C,氮气保护,流量为 1 L/min,时间 20 s.合金化后用丙酮棉球擦去光刻胶.

(4) 测量用悬臂梁的形成

将合金化后的圆片按 110 晶向分割成条状硅梁.梁长度为 25 至 30 mm,宽度为 4 mm.

3 实验原理

3.1 压阻系数与应变系数

通常用压阻系数 π 和应变系数 GF 描述半导体压阻效应,它们分别反映了电阻在应力和应变作用下发生的变化.对薄膜电阻,在沿薄膜平面任意方向的应力或应变作用下,电阻的相对变化可表示为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \tag{1}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = GF_l \epsilon_l + GF_t \epsilon_t \tag{2}$$

其中 R_0 为无应力作用时的电阻值; R 为应力(应变)所引起的电阻变化量; σ_l 和 σ_t 分别为电阻受到的纵向和横向应力; ϵ_l 和 ϵ_t 分别为电阻受到的纵向和横向应变; π_l 和 π_t 分别为纵向和横向压阻系数; GF_l 和 GF_t 分别为纵向和横向应变系数^[4].

3.2 实验方法

根据弹性力学理论,对于图 3 所示的长度为 l ,宽度为 b ,厚度为 h 的矩形等截面悬梁,一端固定,另一端受到集中力 F 作用时,悬梁将产生如图 4 所示的相应的弹性弯曲.端点位移为 $-y_m$,悬梁表面处只存在悬梁纵向(切线方向)正应力 $\sigma(x)$ 作用,相应的应变为:

$$\epsilon(x) = -\frac{3}{2} \times \frac{h(l-x)}{l^3} y_m \tag{3}$$

图 3 矩形等截面悬梁示意图

Fig. 3 Sketch of cantilever with rectangle section

图 4 悬梁表面电阻受力情况

Fig. 4 Resistor on the cantilever with force

当悬梁表面存在着厚度远小于悬梁厚度的薄膜电阻时,由于电阻与悬梁紧密接触,所以薄膜电阻受到与悬梁表面相等的应变作用.因为薄膜的弹性模量是未知量,故无法算出薄膜受到的应力的.

据上述分析,只要测出悬梁的几何参数 l, x, h 和 y_m ,就可以根据公式(3)计算出对应 y_m 在 x 点产生的薄膜 x 方向的应变的大小.若 $\sigma(x)$ 为薄膜电阻受到的平均应变,则测出电阻的相对变化后就可以根据(2)式算出电阻的应变系数.因为(3)式与弹性模量 Y 无关,所以无需了解悬梁的 Y 值随温度的缓慢变化,即可研究 GF 的温度特性.

实际上,高温测量时无法精确地调整和测量 y_m ,所以只能以改变作用力 F 的方法控制 $\sigma(x)$ 的大小.同样由弹性力学分析可得:

$$\sigma(x) = \frac{6(l-x)}{bh^2 Y} F \tag{4}$$

可见在一定温度下, Y 是常数, $\sigma(x)$ 正比于 F ,改变 F 就得到相应的 $\sigma(x)$ 变化.

3.3 薄膜电阻应变系数的测量

悬梁表面多晶硅薄膜电阻布置如图 4 所示, R_l, R_t 分别为薄膜纵向电阻与横向电阻.因为悬梁表面只存在纵向应力 $\sigma(x)$,所以 R_l 只受到纵向应力作用, R_t 只受横向应力作用.公式(2)可简化为:

$$GF_l = \frac{R_l}{R_l}, \quad GF_t = \frac{R_t}{R_t} \tag{5}$$

利用应力实验装置在限定位移 y_m 加载方式下,施加已知应变,同时测出电阻在加载和未加载状态的数值,就可由(5)式算出 GF_l 和 GF_t .

4 实验结果

4.1 温度测量实验系统

要实现薄膜应变系数温度特性的测量,需要一套对样品加热和温度控制指示系统,如图 5 所示.主要包括可移动的电炉加热炉;恒温范围为 $20 \sim 1300$,控温精度为 ± 0.5 的 TI3509 型温度指示控制仪;安置于薄膜电阻上方的精度为 ± 0.5 的测温热电偶;用于指示热电偶温度,量程为 $20 \sim 1300$ 的数字温度计.

将悬梁实验装置放入炉内,达到恒温后进行多晶硅薄膜应变系数温度特性实验测量.

图 5 应变系数温度特性实验系统

Fig. 5 Testing system of temperature dependence of GF

4.2 应变系数的温度特性

(1) 相同薄膜厚度,不同淀积温度

多晶硅薄膜厚度为 $1\mu\text{m}$. 不同淀积温度下制备的薄膜,其纵向与横向压阻系数随温度的变化曲线如图 6 所示.

由图 6 可知,多晶硅薄膜的纵向压阻系数比横向压阻系数大 2~3 倍. 纵向压阻系数与横向压阻系数均随温度的升高而下降. 另外,多晶硅薄膜的淀积温度越高,纵向压阻系数越大.

图 6 不同淀积温度下样品应变系数的温度特性

Fig. 6 Temperature dependence of GF_L and $|GF_T|$

(2) 不同薄膜厚度,相同淀积温度

多晶硅薄膜淀积温度为 700°C . 不同厚度薄膜的纵向压阻系数与横向压阻系数随温度变化结果如图 7 所示.

结果显示,多晶硅薄膜的应变系数随温度升高而减小.

(3) 多晶硅薄膜压阻效应的极限温度实验

虽然本文采用的应变-电阻实验系统的测试温度高达 600°C 以上,但由于金属化系统选用的为铝

图 7 不同膜厚样品应变系数的温度特性

Fig. 7 Temperature dependence of GF_L and $|GF_T|$

材料,使测量温度受到限制,对大多数样品的最高测量温度在 450°C 左右. 在 450°C 以上测量时,由于 Al 在欧姆接触区的多晶硅中进行扩散,使电阻值发生变化. 这种电阻变化与应变电阻测量时间相比缓慢得多,因此可以忽略电阻缓慢变化的影响,测量 450°C 以上的应变系数. 700°C 下淀积厚度为 $1.46\mu\text{m}$ 的样品的测试结果如图 8 所示. 可见在 485°C 以下 GF_L 的下降规律与其他样品的结果相似,高于 485°C 时因电阻与 Al 电极的作用使阻值增加,从而使曲线与正常下降规律发生偏离,如图 8 中虚线部分所示. 温度在 560°C 以上时电阻值变化过快,已无法测量,虽然 560°C 下因电阻值发生变化,而引起了较大误差,但 GF_L 值仍然达到 17,说明多晶硅压阻效应的极限温度至少高于 600°C .

图 8 样品温度极限测试结果 膜厚为 $1.46\mu\text{m}$,淀积温度为 700°C

Fig. 8 Experiment of temperature limit Thickness of film is $1.46\mu\text{m}$, and the deposited temperature is in 700°C

5 结论

多晶硅薄膜压阻效应的高温实验结果表明,多晶硅的纵向压阻效应远大于横向压阻效应,多晶硅薄膜的淀积温度越高,其纵向压阻系数越大.另外极限温度实验显示,多晶硅薄膜的应变系数在 560 温度下仍达到 17.利用多晶材料制备的压敏电阻具有极大的高温应用价值.

参考文献

[1] Malhaire C, Barbier D. Design of a polysilicon-on-insulator

pressure sensor with original polysilicon layout for harsh environment. *Thin Solid Film*, 2003, 427:362

[2] Taher I, Aslam M, Tamor M A, et al. Piezoresistive microsensors using p-type CVD diamond films. *Sensors and Actuators*, 1994, A45:35

[3] Gridchin V A, Lubimsky V M, Sarina M P. Piezoresistive properties of polysilicon films. *Sensors and Actuators*, 1995, A49:67

[4] Liu X W, Huo M X, Chen W P, et al. Theoretical research on piezoresistive coefficients of polysilicon films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(3):292 (in Chinese) [刘大为, 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(3):292]

Piezoresistive Effect of Polysilicon Films at High Temperature *

Huo Mingxue¹, Liu Xiaowei¹, Zhang Dan^{1,2}, Wang Xilian¹, and Song Minghao¹

(1 MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2 College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The high-temperature piezoresistive effect of polysilicon films is investigated. The relation between gauge factors of heavy doped polysilicon films deposited by LPCVD and temperatures is researched and attained, considering experimental influences of deposition temperature and film thickness on gauge factors. Polysilicon films with a Boron-doped concentration of about 10^{19}cm^{-3} are experimentally studied from room temperature to 560 . Experimental results show that the polysilicon piezoresistors can work over 560 .

Key words: piezoresistive effect; polysilicon; gauge factor

EEACC: 2520C **PACC:** 7280C

Article ID: 0253-4177(2005)11-2115-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA404200)

Huo Mingxue male, was born in 1968, PhD candidate. He is engaged in research on MEMS technology and semiconductor sensors.

Liu Xiaowei male, was born in 1955, professor. He is engaged in research on MEMS technology and semiconductor sensors.

Received 14 December 2004, revised manuscript received 10 August 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics