

表面应力测量 SOI 压阻悬臂梁传感器设计与优化*

庄志伟 王喆堃[†] 刘理天

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 研究了基于 SOI(silicon on insulator)工艺的压阻悬臂梁传感器的静态和动态特性,推导了其用于表面应力测量时灵敏度和分辨率的表达式.分析了各种参数对性能的影响,提出了参数设计与优化的流程.得到了一套灵敏度为 $-1.8 \times 10^{-3} \text{ m/N}$,分辨率为 $8.5 \times 10^{-5} \text{ N/m}$,弹性系数为 0.023 N/m ,谐振频率为 $1.3 \times 10^4 \text{ Hz}$ 的设计参数.

关键词: MEMS; 压阻; SOI; 表面应力测量; 悬臂梁; 传感器

PACC: 0710C; 7220F

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)10-1844-07

1 引言

悬臂梁传感器始于 Binnig 等人于 1986 年发明的 AFM(atomic force microscope)^[1],经过 20 多年的发展,悬臂梁传感器的应用已经扩展到物理、化学和生物等多个领域^[2~4].其中压阻悬臂梁传感器以低成本、小体积、可集成、易操作和应用广等特点,得到了深入研究和广泛应用.除实现常规的表面形貌、加速度、磁场和生化分子的检测外^[2,5~7].据报道,制备超薄的梁,可显著提升传感器的性能^[8];采用特殊的结构,压阻 AFM 可检测探针垂直和侧向的位移^[9];采用金刚石作为压阻材料,可以使传感器应用于高温等恶劣的环境^[10];通过将执行器和信号处理电路同传感器集成在一起,可以得到低成本、高性能的检测系统^[5,7].

压阻悬臂梁传感器通常可检测两种形式的外力:(1)末端外力,通过悬臂梁将施加在其自由端的外力转换为形变和阻值变化以检测,Harley 等人^[11]报道了此类传感器的理论分析和优化方法,国内的于晓梅等人^[12]对此类传感器进行了系统的理论分析、仿真和实验;(2)表面应力,通过悬臂梁将施加在其表面的应力转换为形变和阻值变化以检测,Hansen 等人^[13,14]报道了此类传感器的理论分析和实验结果,但并未讨论优化的方法和流程.

普通的硅工艺难以在悬臂梁上制备出性能优良的单晶硅压阻器件,一般只能采用性能较差的多晶硅压阻器件.而采用 SOI 工艺则可以很方便地克服

这个困难,同时还可以简化工艺流程.本文将针对基于 SOI 工艺的表面应力测量压阻悬臂梁传感器进行分析与优化.

2 基本结构

压阻悬臂梁传感器通常是多层薄板结构,可分为支撑层、压阻层和保护层.支撑层构成悬臂梁的主体,压阻层制备压阻器件,保护层使压阻器件与外界绝缘.基于 SOI 工艺的压阻悬臂梁传感器的基本结构如图 1 所示.支撑层由顶层单晶硅组成,呈矩形;压阻层由 p 掺杂的部分顶层单晶硅组成,呈 π 形;保护层由二氧化硅组成,覆盖悬臂梁的整个顶部.实际的器件在顶层硅中还包含使压阻器件绝缘的反偏掺杂层.因为压阻层由顶层硅掺杂而来,所以将压阻层同支撑层合并为顶层硅进行力学分析.此外,压阻器件仅包括与梁平行的两条臂,接头区为重掺杂,忽略其压阻效应.忽略压阻在 y 方向的间隙,有 $w_c = 2w_p$ ^[11,15].

为了便于计算,我们先定义出悬臂梁的中性平面 z_N ,并以此作为相对坐标系的参考平面:

$$z_N = \frac{E_c t_c^2 + 2E_t t_c t_t + E_t t_t^2}{2(E_c t_c + E_t t_t)} \quad (1)$$

式中 E_c 和 E_t 分别是顶层硅和保护层二氧化硅的杨氏模量.

弹性系数表征了悬臂梁的硬度,为悬臂梁发生单位形变所需要的外力,可表示为^[13]:

$$k = \frac{3w_c \left\{ E_c \left[\frac{t_c^3}{12} + t_c \left(\frac{t_c}{2} - z_N \right)^2 \right] + E_t \left[\frac{t_t^3}{12} + t_t \left(t_c + \frac{t_t}{2} - z_N \right)^2 \right] \right\}}{l_c^3} \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号:60401009),清华大学基础研究基金(批准号:JC2003061)资助项目

[†] 通信作者,Email:z.wang@mail.tsinghua.edu.cn

2006-03-27 收到,2006-04-20 定稿

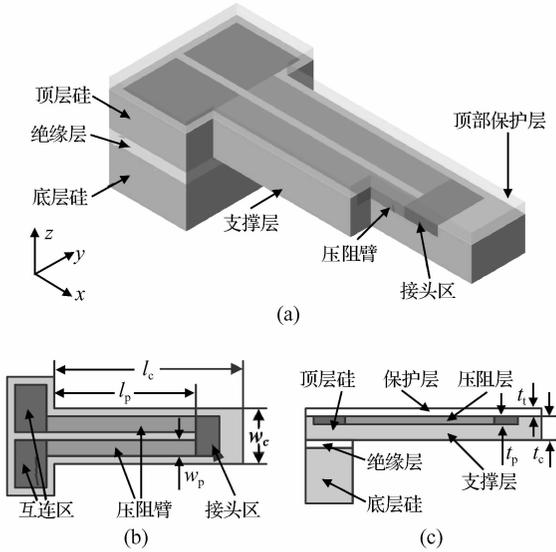


图 1 (a) 基于 SOI 工艺的压阻悬臂梁传感器的基本结构; (b) 顶视图; (c) 剖面图

Fig.1 (a) Schematic illustration of SOI piezoresistive microcantilever sensors; (b) Top view; (c) Cut-away view

在进行表面应力测量时,弹性系数过高的梁不易弯曲,会导致较差的灵敏度和分辨率;而弹性系数过低的梁带宽太窄,且释放时易发生塌陷现象,所以一般要求弹性系数在 1mN/m 到 1N/m 之间。

谐振频率可表示为^[16]:

$$f = 0.32\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

式中 k 是悬臂梁的弹性系数; m 是悬臂梁的质量. 谐振频率限制了传感器的测量带宽,一般要求测量带宽小于谐振频率的 1/2. 此外,谐振频率较低的梁易受到周围环境中低频震动噪声的影响,所以,通常要求谐振频率在 5kHz 以上^[13].

3 关键性能指标

3.1 灵敏度

灵敏度定义为表面单位应力所引起的压阻器件阻值的相对变化量:

$$S = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\sigma_s} \quad (4)$$

$$S = \pi_1 E_p \left\{ -\frac{1}{E_c t_c + E_t t_t} - \frac{(t_c + t_t - z_N) \left(t_c - \frac{1}{2} t_p - z_N \right)}{E_c \left[\frac{t_c^3}{12} + t_c \left(\frac{t_c}{2} - z_N \right)^2 \right] + E_t \left[\frac{t_t^3}{12} + t_t \left(t_c + \frac{t_t}{2} - z_N \right)^2 \right]} \right\} \quad (10)$$

式中 R 是压阻器件的阻值; ΔR 是压阻器件在表面应力作用下产生的阻值变化; σ_s 是作用于梁表面的应力。

基于 SOI 工艺的掺杂单晶硅压阻器件一般由离子注入或扩散掺杂形成,其掺杂浓度为高斯分布或指数分布. 但鉴于高斯分布和指数分布情况的计算较为繁琐, 本文将其近似为均匀分布的情况进行讨论, 也能获得较为精确的结果. 在均匀分布的情况下, 压阻器件阻值的相对变化量为^[17]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_1 E_p \epsilon_p \quad (5)$$

式中 π_1 是沿 x 方向的压阻系数; E_p 是压阻层的杨氏模量; ϵ_p 是压阻层中心面的相对形变. 如图 2 所示, ϵ_p 可表示为^[13,14]:

$$\epsilon_p = \frac{\Delta l_N}{l} + \frac{\Delta l_z}{l} = \epsilon_N + \beta z_{pN} \quad (6)$$

式中 ϵ_N 是中性平面的相对形变; $\beta = 1/r$ 是曲率; z_{pN} 是压阻层中心面到中性平面的间距, 可分别表示为:

$$\epsilon_N = -\frac{\sigma_s}{E_c t_c + E_t t_t} \quad (7)$$

$$\beta = -\frac{\sigma_s (t_c + t_t - z_N)}{E_c \left[\frac{t_c^3}{12} + t_c \left(\frac{t_c}{2} - z_N \right)^2 \right] + E_t \left[\frac{t_t^3}{12} + t_t \left(t_c + \frac{t_t}{2} - z_N \right)^2 \right]} \quad (8)$$

$$z_{pN} = \left(t_c - \frac{1}{2} t_p - z_N \right) \quad (9)$$

其中 $t_c + t_t - z_N$ 表示表面到中性平面的间距。

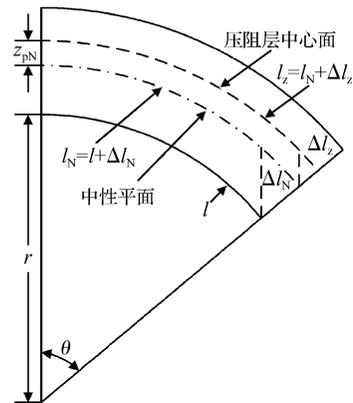


图 2 悬臂梁在表面应力的作用下弯曲

Fig.2 Deformation of the cantilever under the action of surface stress

综合(4)~(9)式可得:

可见灵敏度与压阻系数、每层的厚度和杨氏模量有关,而与悬臂梁和压阻器件的长度和宽度无关.

3.2 分辨率

分辨率定义为传感器能检测的最小表面应力,即输出电压等于噪声电压时的表面应力.对于单臂惠斯通电桥输出系统,分辨率可表示为:

$$\delta_{s,\min} = \frac{4V_{\text{noise,out}}}{SV_B} \quad (11)$$

式中 $V_{\text{noise,out}}$ 是传感器输出的总噪声; V_B 是电桥驱动电压.可见噪声电压越低,灵敏度越高,得到的分辨率越好.

对压阻器件性能起决定作用的噪声是热噪声

$$\delta_{s,\min} = \frac{4\sqrt{\frac{16k_B T l_p (f_{\max} - f_{\min})}{n_p q \mu_p w_c t_p} + \frac{\alpha \left(\frac{V_B}{2}\right)^2 \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}}}{n_p l_p w_c t_p}}}{V_B \pi l E_p \left\{ \frac{1}{E_c t_c + E_t t_t} - \frac{(t_c + t_t - z_N) \left(t_c - \frac{1}{2} t_p - z_N\right)}{E_c \left[\frac{t_c^3}{12} + t_c \left(\frac{t_c}{2} - z_N\right)^2\right] + E_t \left[\frac{t_t^3}{12} + t_t \left(t_c + \frac{t_t}{2} - z_N\right)^2\right]} \right\}} \quad (13)$$

可见分辨率与压阻系数、温度、带宽、电压、每层的厚度和杨氏模量、压阻长度、宽度、掺杂浓度和材料特性有关.

采用其他材料和工艺制备的多层薄板结构压阻悬臂梁传感器的灵敏度和分辨率的表达式与(10)和(13)式类似^[13,14].

4 参数优化

压阻悬臂梁传感器优化的目标是获得最好的灵敏度和分辨率,并兼顾弹性系数和谐振频率等要求.以下将对图 1 所示的结构进行参数优化,并假设压阻层的中心平面在中性平面之上.

4.1 几何参数

悬臂梁的长度和各层的厚度直接影响器件的弹性系数和谐振频率,短而厚的梁具有较高的弹性系数和谐振频率.考虑器件对弹性系数和谐振频率的要求,可得到梁长度和各层厚度的选择范围.因为一般保护层较薄,顶层硅往往起到决定性的作用,弹性系数和谐振频率同顶层硅厚度和梁长度的关系如图 3 所示.可见梁长几百微米,顶层硅厚 $1\mu\text{m}$ 左右时基本能满足要求.

顶层硅厚度对灵敏度有较大影响,增大顶层硅厚度可以增大表面到中性平面的间距,以及压阻层到中性平面的间距,提高灵敏度;但同时也会增大梁的硬度,使梁难以弯曲,降低灵敏度.因而顶层硅厚

(Johnson 噪声)和 $1/f$ 噪声(Hooge 噪声),考虑这两种噪声得到输出总噪声电压为^[18-20]:

$$V_{\text{noise,out}} = \sqrt{V_{\text{Johnson}}^2 + V_{\text{Hooge}}^2} = \sqrt{\frac{16k_B T l_p (f_{\max} - f_{\min})}{n_p q \mu_p w_c t_p} + \frac{\alpha V^2 \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}}}{n_p l_p w_c t_p}} \quad (12)$$

式中 k_B 是波尔兹曼常数; T 是绝对温度; f_{\max} 和 f_{\min} 分别是带宽的上限和下限; n_p 是掺杂浓度; q 是载流子电荷; μ_p 是载流子迁移率; α 是与器件有关的经验常数; V 是加在电阻上的电压.

结合(10)~(12)式得传感器的分辨率为:

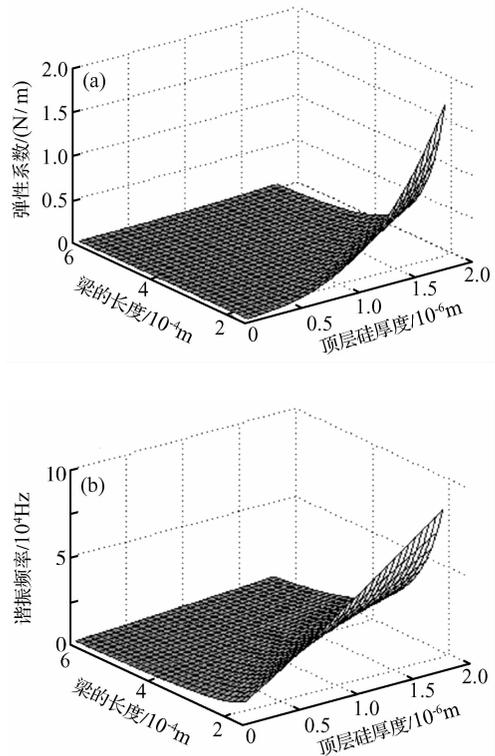


图 3 (a)弹性系数同顶层硅厚度和梁长度的关系;(b)谐振频率同顶层硅厚度和梁长度的关系 $w_c = 30\mu\text{m}$, $t_t = 0.2\mu\text{m}$
Fig.3 (a) Spring constant versus the thickness of top silicon and the length of cantilever; (b) Resonant frequency versus the thickness of top silicon and the length of cantilever $w_c = 30\mu\text{m}$, $t_t = 0.2\mu\text{m}$

度可能存在一个使灵敏度最高的值. 压阻层厚度对灵敏度和噪声都有影响, 在保持顶层硅厚度不变的情况下, 减薄压阻层可增大压阻层到中性平面的间距, 提高灵敏度; 但同时还会减小压阻层中载流子数目, 增大压阻阻值, 使噪声性能变坏, 降低分辨率. 因而压阻层厚度可能存在一个使分辨率最好的值. 在不考虑保护层影响的时候, 忽略(13)式中保护层的相关参量并微分可得: 当 $t_p/t_c = 4/9$ 时, 传感器有最好的分辨率.

灵敏度和分辨率同顶层硅和压阻层厚度的关系如图 4 所示. 在保护层二氧化硅厚 $0.2\mu\text{m}$ 时, 灵敏度在顶层硅厚 $0.31\mu\text{m}$ 时有最优值, 并随压阻层厚度的减小而增大; 分辨率在顶层硅厚 $0.55\mu\text{m}$, 压阻层厚 $0.21\mu\text{m}$ 时有最优值. 在最优值附近较大范围内, 分辨率变化平缓.

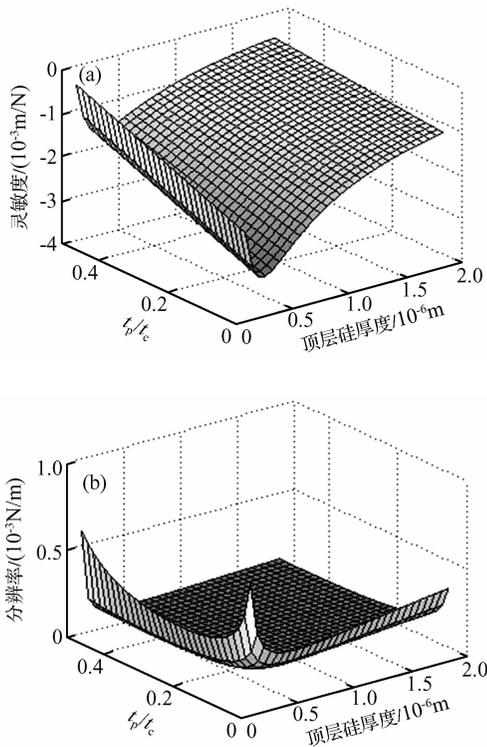


图 4 (a) 灵敏度同顶层硅和压阻层厚度的关系; (b) 分辨率同顶层硅和压阻层厚度的关系 $w_c = 30\mu\text{m}, l_c = 250\mu\text{m}, l_p = 218\mu\text{m}, t_i = 0.2\mu\text{m}, n_p = 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}, V_B = 5\text{V}$
 Fig.4 (a) Sensitivity versus the thickness of top silicon and piezoresistor; (b) Resolution versus the thickness of top silicon and piezoresistor $w_c = 30\mu\text{m}, l_c = 250\mu\text{m}, l_p = 218\mu\text{m}, t_i = 0.2\mu\text{m}, n_p = 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}, V_B = 5\text{V}$

保护层厚度对灵敏度有一定影响, 减薄保护层, 可以增大压阻层和中性平面的间距, 并减小梁的硬度, 提高灵敏度; 但同时会减小表面到中性平面的间距, 降低灵敏度, 因而保护层厚度可能存在一个最优

值. 保护层厚度与噪声性能无关, 故保护层厚度同灵敏度和分辨率有相同的变化关系. 分辨率同保护层厚度和支撑层厚度的关系如图 5 所示. 基本趋势是保护层越薄, 分辨率越高, 而顶层硅厚度存在最优值. 保护层厚度同时还受到保护性能和工艺条件的约束, 太薄的保护层不能很好地阻断外界对压阻器件的影响, 容易使器件失效.

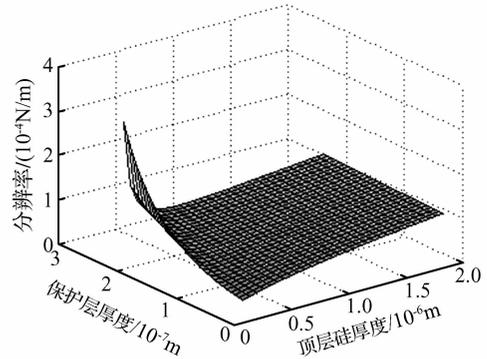


图 5 分辨率同顶层硅和保护层厚度的关系 $w_c = 30\mu\text{m}, l_c = 250\mu\text{m}, l_p = 218\mu\text{m}, t_p/t_c = 4/9, n_p = 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}, V_B = 5\text{V}$
 Fig.5 Resolution versus the the thickness of top silicon and top passivation layer $w_c = 30\mu\text{m}, l_c = 250\mu\text{m}, l_p = 218\mu\text{m}, t_p/t_c = 4/9, n_p = 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}, V_B = 5\text{V}$

假设压阻层厚度取顶层硅厚度的 $4/9$, 不考虑保护层时, 顶层硅越薄, 灵敏度越高, 相应的分辨率也越好; 考虑保护层时, 如图 5 所示, 顶层硅厚度针对分辨率存在一个最优值, 这个最优值同保护层厚度的关系如图 6 所示, 保护层越厚, 顶层硅厚度的最优值也越大, 两者基本成正比例关系. 其比例系数和保护层的杨氏模量有关, 保护层的杨氏模量越大, 相应的顶层硅厚度的最优值也越大.

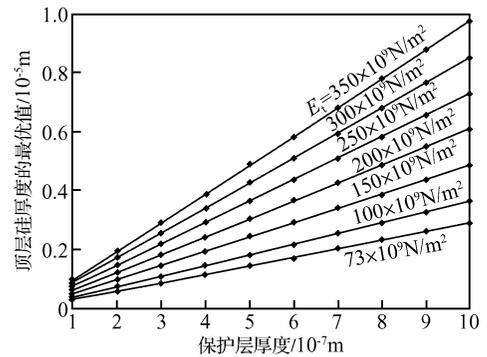


图 6 顶层硅厚度的最优值同保护层厚度和杨氏模量的关系 $w_c = 30\mu\text{m}, l_c = 250\mu\text{m}, l_p = 218\mu\text{m}, t_p/t_c = 4/9, n_p = 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}, V_B = 5\text{V}$
 Fig.6 Optimal thickness of the top silicon versus the thickness and Youngs modulus of top passivation layer $w_c = 30\mu\text{m}, l_c = 250\mu\text{m}, l_p = 218\mu\text{m}, t_p/t_c = 4/9, n_p = 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}, V_B = 5\text{V}$

压阻长度对噪声有影响,增加压阻长度可增加载流子个数,降低 Hooge 噪声,但同时会增大电阻,增大 Johnson 噪声,因而压阻长度存在一个最优值.对(13)式微分可得最优的压阻长度 $l_{p,opt}$ 为:

$$l_{p,opt} = \sqrt{\frac{q\mu_p\alpha\left(\frac{V_B}{2}\right)^2 \ln \frac{f_{max}}{f_{min}}}{16k_B T(f_{max} - f_{min})}} \quad (14)$$

带入相关参数计算得 $l_{p,opt} = 218\mu\text{m}$,这个最优值仅与载流子迁移率、压阻材料的特性、电压、温度和带宽有关,而与悬臂梁各层的几何与力学参数无关.因为压阻长度要小于梁的长度,所以压阻层长度还受到弹性系数和谐振频率的约束,过长的压阻会导致较低的弹性系数和谐振频率.

悬臂梁的宽度对分辨率有影响,增大梁的宽度可以增加载流子个数,减小电阻,改善噪声性能,由(13)式可知分辨率同 $w_c^{-0.5}$ 成正比.宽度的选取同时要受到弹性系数和工艺条件的约束,由(2)式可知弹性系数同 w_c 成正比,太宽的梁会导致过大的弹性系数.此外,如果梁采用表面释放工艺的话,太宽的梁将无法释放.

4.2 工艺参数

掺杂浓度对灵敏度和噪声都有影响.增大掺杂浓度可以增加载流子总数,并降低压阻器件的电阻,改善噪声性能,提高分辨率.当掺杂浓度超过 10^{17}cm^{-3} 时,增大掺杂浓度会使压阻系数减小,降低灵敏度.对于 p 型掺杂的单晶硅,[110]方向的压阻系数随掺杂浓度变化的经验公式为^[11,21]:

$$\pi_1 = \pi_0 \lg\left(\frac{b}{n}\right)^a \quad (15)$$

式中 $\pi_0 = 7.2 \times 10^{-10}\text{m}^2/\text{N}$; $a = 0.2014$; $b = 1.53 \times 10^{22}\text{cm}^{-3}$.

此外,掺杂浓度对电阻率的影响还体现在迁移率上.载流子迁移率随掺杂浓度变化的经验公式为^[22]:

$$\mu = \mu_{min} + \frac{\mu_0}{1 + \left(\frac{n}{n_{ref}}\right)^\gamma} \quad (16)$$

式中 $\mu_{min} = 54.3\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; $\mu_0 = 406.9\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; $n_{ref} = 2.35 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$; $\gamma = 0.88$.

分辨率同掺杂浓度的关系如图 7 所示,可见掺杂浓度在 $1.5 \times 10^{21}\text{cm}^{-3}$ 附近可以获得最好的分辨率.但过高的掺杂浓度会导致高功耗,烧毁器件,一般要求功耗限制在 2.5mW 以下.经计算得,工作电压 $V_B = 5\text{V}$, $l_c/(w_c t_c) = 10^7\text{m}^{-1}$ 左右时,掺杂浓度在 10^{19}cm^{-3} 以下可满足功耗要求.

退火条件对分辨率有很重要的影响,适当退火可以改善掺杂后单晶硅中的晶格质量,减小载流子

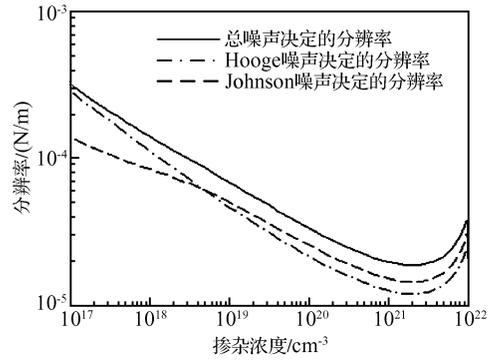


图 7 分辨率同掺杂浓度的关系 $w_c = 30\mu\text{m}$, $l_c = 250\mu\text{m}$, $l_p = 218\mu\text{m}$, $t_1 = 0.2\mu\text{m}$, $t_c = 0.55\mu\text{m}$, $t_p = 0.21\mu\text{m}$, $V_B = 5\text{V}$
Fig. 7 Resolution versus dopant concentration $w_c = 30\mu\text{m}$, $l_c = 250\mu\text{m}$, $l_p = 218\mu\text{m}$, $t_1 = 0.2\mu\text{m}$, $t_c = 0.55\mu\text{m}$, $t_p = 0.21\mu\text{m}$, $V_B = 5\text{V}$

迁移的波动,即减小(12)式中的 α ,降低 Hooge 噪声^[23].但长时间的退火会使压阻层杂质扩散,增加压阻层的实际厚度.

4.3 操作参数

工作电压对分辨率有影响,由(13)式可知在 Johnson 噪声起决定作用的时候,增大电压可以提高分辨率;但在 Hooge 噪声起决定作用的时候,电压对分辨率没有显著影响.工作电压同时还受到功耗和绝缘性能的限制,过高的工作电压会导致高功耗,烧毁器件,并容易发生击穿,产生漏电.因而工作电压一般设为 $5 \sim 10\text{V}$.此外,温度对性能也有一定影响,压阻阻值和压阻系数都会随着温度变化^[24],因而,在测量时,须保持恒温,或在信号处理电路中对温度进行补偿,以获得精确的结果.

5 优化流程与结果

对于表面应力测量压阻悬臂梁传感器而言,设计的目标一般是在满足悬臂梁的弹性系数、谐振频率、保护层厚度和功耗等要求的前提下,优化设计适当可行的几何和工艺参数,获得最好的灵敏度和分辨率.通过本文的分析,我们可以得到如下的优化流程:

(1) 确定由限制条件决定的参数:梁的宽度通常取 $10 \sim 40\mu\text{m}$ 左右;掺杂浓度通常取 $10^{18} \sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 左右;顶部保护层厚度取能满足保护性能要求的最小值.

(2) 由保护层的厚度和杨氏模量计算出顶层硅厚度的最优值,再计算出压阻层厚度的最优值,压阻长度取其最优值附近的值,悬臂梁的长度取略长于压阻长度的值.

(3) 计算出悬臂梁的弹性系数和谐振频率, 看是否满足要求, 如不满足, 则根据文中分析, 适当改变步骤(1)和(2)中确定的参数, 直到符合要求为止。

根据以上的优化流程, 我们可以得到一组针对图 1 结构的优化参数, $w_c = 30\mu\text{m}$, $l_c = 250\mu\text{m}$, $l_p = 218\mu\text{m}$, $t_t = 0.2\mu\text{m}$, $t_c = 0.55\mu\text{m}$, $t_p = 0.21\mu\text{m}$, $n_p = 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. 在 $f_{\max} = 51\text{Hz}$, $f_{\min} = 1\text{Hz}$, $V_B = 5\text{V}$ 时, 得到的性能为: 灵敏度 $S = -1.8 \times 10^{-3} \text{m/N}$, 分辨率 $\delta_{s,\min} = 8.5 \times 10^{-5} \text{N/m}$, 弹性系数 $k = 0.023\text{N/m}$, 谐振频率 $f = 13340\text{Hz}$.

6 结论

通过以上对 SOI 压阻悬臂梁传感器的分析, 我们推导了其性能同参数的关系, 提出了参数设计和优化流程, 得到了以下用于参数优化的结论。

悬臂梁长度和各层厚度的范围由弹性系数和谐振频率限定. 各层厚度和压阻长度都存在着使性能最优的值, 实际的取值还要考虑各参数对其他性能指标的影响以及工艺实现的可行性. 梁的宽度由弹性系数和工艺条件决定, 较宽的梁会有较好的分辨率和较高的弹性系数. 掺杂浓度存在着使分辨率最高的值, 但这个最优值会带来功耗等问题, 实际的取值会小于这个最优值. 适当的退火可以降低噪声以提高分辨率. 工作电压的适当提高可以改善分辨率, 但工作电压同时要受到功耗、绝缘性能等的约束. 压阻器件的性能易受到温度的影响, 因而工作时应保持恒温或在信号处理时对温度进行补偿。

通过对比表面应力测量和末端外力测量 SOI 压阻悬臂梁传感器的优化结果, 发现两者有很大不同. 对于末端外力测量传感器而言, 压阻层沿 x 方向受到的应力是不均匀的, 越靠近根部应力越大. 灵敏度同梁和压阻的长度都有关系, 因而在压阻长度取梁长度的 $1/3 \sim 2/3$ 时有最好的性能; 对于如图 1 所示的结构, 不考虑保护层时, 在 $t_p/t_c = 1/3$ 时有最好的性能^[11]. 对于表面应力测量传感器而言, 压阻层沿 x 方向受到的应力是均匀的, 灵敏度同梁和压阻的长度无关, 压阻层长度的最优值与梁长度无关, 并且梁只在有表面应力的地方弯曲. 对于如图 1 所示的结构, 不考虑保护层时, 在 $t_p/t_c = 4/9$ 时有最好的性能。

参考文献

[1] Binnig G, Quate C F, Gerber C. Atomic force microscope. *Phys Rev Lett*, 1986, 56(9): 930
 [2] Kim K H, Ko J S, Cho Y H, et al. A skew-symmetric cantilever accelerometer for automotive airbag applications. *Sensors and Actuators A*, 1995, 50(1/2): 121

[3] Lang H P, Baller M K, Berger R, et al. An artificial nose based on a micromechanical cantilever array. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 393(1~3): 59
 [4] Fritz J, Baller M K, Lang H P, et al. Translating biomolecular recognition into nanomechanics. *Science*, 2000, 288(5464): 316
 [5] Hafizovic S, Barretto D, Volden T, et al. Single-chip mechatronic microsystem for surface imaging and force response studies. *PNAS*, 2004, 101(49): 17011
 [6] Beroulle V, Bertrand Y, Latorre L, et al. Monolithic piezoresistive CMOS magnetic field sensors. *Sensors and Actuators A*, 2003, 103(1/2): 23
 [7] Vancura C, Yue Li, Kirstem K U, et al. Fully integrated CMOS resonant cantilever sensor for biochemical detection in liquid environments. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers'05*, 2005: 640
 [8] Harleya J A, Kenny T W. High-sensitivity piezoresistive cantilevers under 100nm thick. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(2): 289
 [9] Gotszalk T, Grabiec P B, Rangelow I W. A novel piezoresistive microprobe for atomic and lateral force microscopy. *Sensors and Actuators A*, 2005, 123/124(23): 370
 [10] Tang Yuxing, Aslam D M, Wang Jianbai, et al. Study of polycrystalline diamond piezoresistive position sensors for application in cochlear implant probe. *Diamond and Related Materials*, 2006, 15(2/3): 199
 [11] Harley J A, Kenny T W. $1/f$ noise considerations for the design and process optimization of piezoresistive cantilevers. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(2): 226
 [12] Yu Xiaomei, Zhang Dacheng, Li Ting, et al. Fabrication and analysis of micromachined cantilever array. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(8): 861 (in Chinese) [于晓梅, 张大成, 李婷, 等. 阵列式微机械悬臂梁的研制及其特性分析. *半导体学报*, 2003, 24(8): 861]
 [13] Thaysen J. Cantilever for bio-chemical sensing integrated in a microliquid handling system. PhD's Thesis, Mikroelektronik Centret, Technical University of Denmark, 2001
 [14] Rasmussen P A, Thaysen J, Hansen O, et al. Optimized cantilever biosensor with piezoresistive read-out. *Ultramicroscopy*, 2003, 97(1~4): 371
 [15] Wang Zheyao, Yue Ruifeng, Zhang Ruoxin, et al. Design and optimization of laminated piezoresistive microcantilever sensors. *Sensors and Actuators A*, 2005, 120(2): 325
 [16] Sarid D. *Scanning force microscopy: with applications to electric, magnetic, and atomic forces*. New York: Oxford University Press, 1991
 [17] Senturia S D. *Microsystem design*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001
 [18] Johnson J B. Thermal agitation of electricity in conductors. *Phys Rev*, 1928, 32(1): 97
 [19] Nyquist H. Thermal agitation of electric charge in conductors. *Phys Rev*, 1928, 32(1): 110
 [20] Hooge F N, Kleinpenning T G M, Vandamme L K J. Experimental studies on $1/f$ noise. *Progress in Physics*, 1981, 44(5): 479
 [21] Kanda Y. A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon. *IEEE Trans Electron Devices*, 1982, 29(1): 64
 [22] Arora N D, Hauser J R, Roulston D J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature. *IEEE Trans Electron Devices*, 1982, 29(2): 292

[23] Vandamme L K J, Oosterhoff S. Annealing of ion-implanted resistors reduces the $1/f$ noise. *J Appl Phys*, 1986, 59(9):3169

[24] Tufte O N, Stelzer E L. Piezoresistive properties of silicon diffused layers. *J Appl Phys*, 1963, 34(2):313

Design and Optimization of SOI Piezoresistive Microcantilever Sensors for Use in Surface Stress Measurement*

Zhuang Zhiwei, Wang Zheyao[†], and Liu Litian

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The dynamic and static characteristics of SOI piezoresistive microcantilever sensors are studied. Expressions for predicting the sensitivity and resolution of sensors used in surface stress measurement are derived. According to analysis of the influence of the parameters on the performance of the sensors, a parameter design and optimization process is presented. A suit of design parameters is deduced, with a sensitivity of $-1.8 \times 10^{-3} \text{ m/N}$, a resolution of $8.5 \times 10^{-5} \text{ N/m}$, an elasticity coefficient of 0.023 N/m , and a resonance frequency of $1.3 \times 10^4 \text{ Hz}$.

Key words: MEMS; piezoresistive; SOI; surface stress measurement; cantilever; sensor

PACC: 0710C; 7220F

Article ID: 0253-4177(2006)10-1844-07

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60401009) and the Research Foundation of Tsinghua University (No. JC2003061)

[†] Corresponding author. Email: z. wang@mail. tsinghua. edu. cn

Received 27 March 2006, revised manuscript received 20 April 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics