

择优生长的多晶硅压阻统计理论*

赵甘鸣 鲍敏杭

(复旦大学电子工程系)

1988年5月27日收到, 12月2日修改定稿

本文报道了计算择优生长的多晶硅压阻灵敏度的统计平均理论, 由此得到了 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 211 \rangle$ 、 $\langle 311 \rangle$ 、 $\langle 331 \rangle$ 等低指数晶向择优生长的P型和N型多晶硅的平均晶粒压阻系数。将这些结果应用到具有多重择优晶向的多晶硅材料, 经过计算可进一步得到多晶硅力敏电阻的灵敏度。对于制作在矩形膜中心区域的一系列多晶硅电阻, 实验得到的结果与理论分析的结果符合得很好。这些结果为多晶硅压阻型压力传感器的设计提供了有效的手段。

主题词: 硅, 传感器, 力敏电阻器, 灵敏度, 压强, 统计分析

一、引 言

自从 S. C. Smith^[1] 在 1954 年提出了半导体硅和锗的压阻效应以来, 利用单晶硅的优良特性及硅平面工艺制成的压阻式压力传感器以其优良的特性在压力测量领域中占据着重要的地位, 然而, 随着科学技术的不断发展, 人们对压力传感器的温度使用范围提出了更高的要求。因为在单晶硅上制得的压阻式压力传感器采用 p-n 结隔离, 因而高温时器件的漏电流变大, 所以传感器一般只能在 100℃ 以下才能正常工作。为了克服由此带来的不足, 并保持硅压力传感器的优良特性, 近来人们研制了许多适用于高温工作的压力传感器。其中, 主要有 SOS 结构的压力传感器^[2], 它已可在较高的温度下使用, 但是由于蓝宝石衬底材料加工困难, 蓝宝石与硅热膨胀系数不匹配, 以及高昂的成本, 使这类传感器的使用受到了较大的限制。随着集成电路工艺的发展, 采用低温 CVD 方法, 如 LPCVD, PECVD 等, 人们很容易在绝缘介质上制得性能可控的多晶硅层, 由此诞生了多晶硅-介质层-硅结构的压力传感器^{[3][4]}, 它与 SOS 结构的压力传感器相比较, 具有成本低、制作方便、性能适中的特点, 有更好的应用前景。

从七十年代开始, 国外就有人开始了多晶硅压阻特性的研究, 并且通过实验证实了多晶硅具有显著的压阻特性, 然而对于多晶硅压阻效应的理论研究甚少。P. J. French^[5] 提出了一种计算 G 因子的理论分析模型, 但没有给出沿各种择优晶向生长的多晶硅平均晶粒压阻系数, 因而难以实际应用, 此外他的理论结果与实验结果也有较大的偏差。我们从多晶硅的晶粒特性出发, 采用择优生长方向统计平均的方法, 提出一种便于应用的多晶硅压阻特性的理论模型, 得到了常见择优晶向的多晶硅平均晶粒压阻系数。利用这些结

* 本项目是传感技术联合开放研究实验室支持的课题。

果, 经过计算进一步得到了多晶硅力敏电阻的灵敏度。采用这一模型得到的结论与实验结果符合得相当好。

二、压阻灵敏度的一般分析方法

在对一个硅膜上的平面电阻作压阻灵敏度的分析过程中, 一般涉及三个坐标系。一个是晶轴主坐标系 XYZ , 如图 1 所示。另一个是器件坐标系 $x'y'z'$, 器件位于 $x'y'$ 平面内, 电阻的纵向为 x' 。再一个是硅膜上应力主轴坐标系 xyz 。一般讲, 硅膜上应力的主轴位于硅膜的某些特殊方向上, 如方膜、长方膜的边界, 圆膜的径向和切向等。图 2 所示为矩形硅膜时的情形。

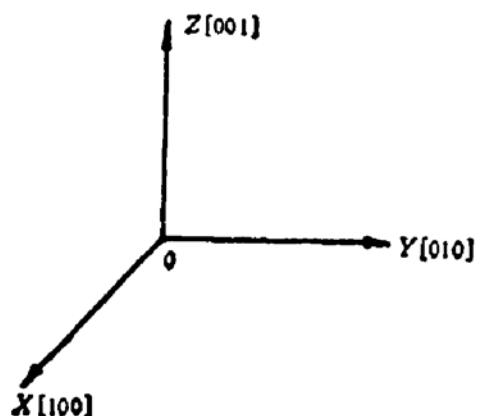


图 1 晶轴主坐标系

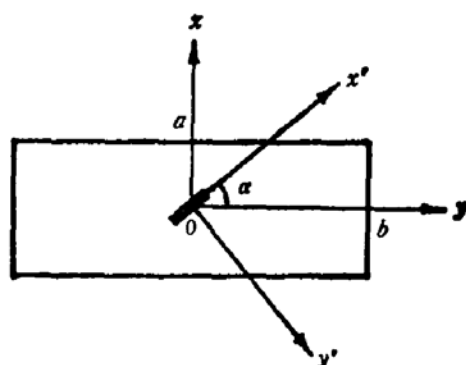


图 2 应力主轴和器件坐标系

根据固体压阻效应的理论, 位于 xy 硅膜平面上的条形单晶硅电阻的阻值随应力的变化有如下的关系^[6]:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \pi'_{11}T'_1 + \pi'_{12}T'_2 + \pi'_{16}T'_6 \quad (1)$$

其中 R_0 为未受应力时电阻的阻值, ΔR 为应变后电阻值的变化, π'_{ij} 是器件坐标系 $x'y'z'$ 中压阻系数张量分量, T'_i 是器件坐标系 $x'y'z'$ 中应力张量分量。如用 (l_1, m_1, n_1) 、 (l_2, m_2, n_2) 、 (l_3, m_3, n_3) 分别表示 x', y', z' 在晶轴主坐标系 XYZ 中的方向余弦, 则 $x'y'z'$ 器件坐标系中的压阻系数 π'_{ij} 可由晶轴主坐标系中的压阻系数来表示^[7]:

$$\begin{cases} \pi'_{11} = \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \\ \pi'_{12} = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \\ \pi'_{16} = 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^3 l_2 + m_1^3 m_2 + n_1^3 n_2) \end{cases} \quad (2)$$

表 1 单晶硅压阻系数数据(单位 $10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyne}$)

导电类型	π_{11}	π_{12}	π_{44}
p 型	6.6	-1.1	138.1
n 型	-102.2	53.4	-13.6

晶轴主坐标系中的压阻系数根据不同的导电类型有不同的数值, 表 1 列出了高阻单晶硅晶轴主坐标系中的压阻系数^[1]。在掺杂浓度较高时, 压阻系数将有所下降^[9]。

类似地, 器件坐标系 $x'y'z'$ 中的应力张量分量 T'_i 也可以利用在硅膜坐标系 xyz 中的应力张量分量 T_i 表示^[8]:

$$\begin{cases} T'_1 = l_1^2 T_1 + m_1^2 T_2 + 2l_1 m_1 T_6 \\ T'_2 = l_2^2 T_1 + m_2^2 T_2 + 2l_2 m_2 T_6 \\ T'_6 = l_1 l_2 T_1 + m_1 m_2 T_2 + (l_1 m_2 + m_1 l_2) T_6 \end{cases} \quad (3)$$

上式中 l_i, m_i, l'_i, m'_i 是 x', y' 在硅膜坐标系中的方向余弦, 根据式(3), 可以利用已知的硅膜特殊方向的应力换算到器件方向上的应力。对于图 2 所示的情形, 若 $T_1 = T_x$, $T_2 = T_y$, 已知 $T_6 = 0$, 则由式(3)即可得到器件坐标系中的应力表示式:

$$\begin{cases} T'_1 = T_1 \sin^2 \alpha + T_2 \cos^2 \alpha \\ T'_2 = T_1 \cos^2 \alpha + T_2 \sin^2 \alpha \\ T'_6 = -\cos \alpha \sin \alpha T_1 + \sin \alpha \cos \alpha T_2 \end{cases} \quad (4)$$

三、具有多种择优晶向的多晶硅压阻灵敏度

(1) 择优晶向的多晶硅平均晶粒压阻系数

首先在衬底硅材料上生长一层数千埃的二氧化硅, 然后再用化学汽相淀积方法生长多晶硅, 这样就形成了多晶硅-二氧化硅-硅的结构^[4], 如图 3 所示。就整个多晶硅材料来说, 可以认为是由许多晶粒和晶粒间界所组成, 每一个晶粒内部, 具有单晶的特征, 不同的晶粒有不同的单晶取向。虽然多晶硅是由大量晶向各异的晶粒单元组合而成的, 但是实验已发现对于不同的多晶硅生长工艺和条件, 其晶粒单元在膜的生长方向上有一定的择优晶向, 只是在垂直于生长方向的平面上是完全杂乱的。因此, 我们可以通过计算得到各种择优晶向的平均晶粒压阻系数, 再结合实验测得的各种择优晶向的比例成份来获得具有多重择优晶向的多晶硅平均晶粒压阻系数。

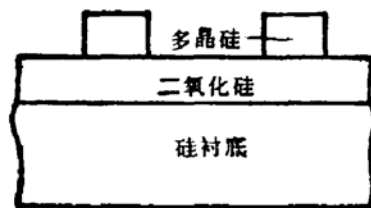


图3 多晶硅-二氧化硅-硅结构

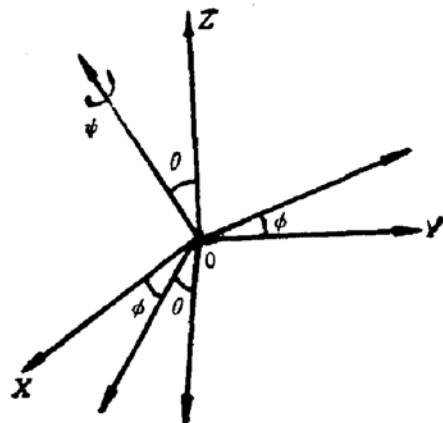


图4 晶轴坐标系转动

如图4所示,任意的器件坐标系 $x'y'z'$ 可以经过晶轴坐标系 XYZ 转动欧拉角 ϕ 、 θ 、 ψ 而得到。图中标出了 ϕ 、 θ 和 ψ 的转动轴。器件坐标系 $x'y'z'$ 与晶轴坐标系的坐标变换如下:

$$\begin{bmatrix} i' \\ j' \\ k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (5)$$

各方向余弦与坐标变换角遵循如下关系^[9]:

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta c\psi - s\phi s\psi & s\phi c\theta c\psi + c\phi s\psi & -s\theta c\psi \\ -c\phi c\theta s\psi - s\phi c\psi & -s\phi c\theta s\psi + c\phi c\psi & s\theta s\psi \\ c\phi s\theta & s\phi s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $c\phi \equiv \cos \phi$, $s\phi \equiv \sin \phi$, 余类推。

如果已知某一多晶硅的择优晶向,那么就可以得其欧拉变换角 ϕ 和 θ 。因此,在这一择优晶向下多晶硅的平均晶粒压阻系数可以通过对变换角 ϕ 作统计平均得到:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\pi}_{11}' &= \frac{\int_0^\pi [\pi_{11} + 2(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2)] d\phi}{\int_0^\pi d\phi} \\ \bar{\pi}_{12}' &= \frac{\int_0^\pi [\pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)] d\phi}{\int_0^\pi d\phi} \\ \bar{\pi}_{13}' &= \frac{\int_0^\pi 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 l_3^2 + m_1^2 m_3^2 + n_1^2 n_3^2) d\phi}{\int_0^\pi d\phi} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

例如择优晶向为 $\langle 100 \rangle$ 时, $\phi = \theta = 0$, 坐标变换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

经式(7)运算后得到 $\langle 100 \rangle$ 择优晶向的平均晶粒压阻系数为:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\pi}_{11}' &= \pi_{11} + \frac{1}{4} (\pi_{11} + \pi_{11} - \pi_{11}) \\ \bar{\pi}_{12}' &= \pi_{12} - \frac{1}{4} (\pi_{12} + \pi_{11} - \pi_{11}) \\ \bar{\pi}_{13}' &= 0 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

对于绝大部分多晶硅材料来说,其主要择优晶向有 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 211 \rangle$ 、 $\langle 311 \rangle$ 、 $\langle 331 \rangle$ 等,我们通过计算得到了各种常用的择优晶向的坐标变换矩阵,列于附录。再根据式(7)和表1就可以求得各种择优晶向时的多晶硅平均晶粒压阻系数,其计算结果列于表2中。从表2中可见各种择优晶向的压阻系数值差别最大的可达一倍以上,而无论对P型还是N型多晶硅,其剪切压阻系数 $\bar{\pi}_{16}' = 0$ 。

表 2 各种择优晶向多晶硅平均晶粒压阻系数(单位 $10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyne}$)

择优晶向	$\pi'_{11}(hkl)$		$\pi'_{12}(hkl)$		$\pi'_{16}(hkl)$
	p 型	n 型	p 型	n 型	p 型 n 型
$\langle 100 \rangle$	39.20	-66.70	-33.70	17.90	0
$\langle 110 \rangle$	63.65	-40.08	-25.55	26.78	0
$\langle 111 \rangle$	71.80	-31.20	-22.83	29.73	0
$\langle 211 \rangle$	63.65	-40.08	-25.55	26.78	0
$\langle 311 \rangle$	54.56	-49.97	-28.58	23.47	0
$\langle 331 \rangle$	66.02	-37.49	-24.76	27.64	0

(2) 具有多种择优晶向的多晶硅平均晶粒压阻系数

由于多晶硅材料中包含了多种择优晶向, 对这样的多晶硅材料在计算其压阻系数时要计入各组成晶向的成份比例因子 R_{hkl} , 根据表 2 得到的各种择优晶向的平均晶粒压阻系数, 再考虑到成份比例因子, 则由式(10)可计算得到多晶硅材料的平均晶粒压阻系数。

$$\begin{cases} \langle \pi'_{11} \rangle = \sum R_{hkl} \pi'_{11}(hkl) \\ \langle \pi'_{12} \rangle = \sum R_{hkl} \pi'_{12}(hkl) \\ \langle \pi'_{16} \rangle = \sum R_{hkl} \pi'_{16}(hkl) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

(3) 具有多种择优晶向的多晶硅压阻灵敏度

因为多晶硅材料是由大量的晶粒单元和晶粒间界所组成, 所以我们假定多晶硅的电阻 R 是由晶粒单元电阻 R_g 和晶粒间界电阻 R_b 串联而成^[4], 即:

$$R = R_g + R_b \quad (11)$$

那么压阻灵敏度, 即多晶硅材料受应力后电阻的变化率可以计算如下:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_g}{R} \times \frac{\Delta R_g}{R_g} + \frac{R_b}{R} \times \frac{\Delta R_b}{R_b} \quad (12)$$

在多晶硅的掺杂浓度较高, 一般认为在 10^{18}cm^{-3} 以上时, 晶粒间界的电阻随应力的变化很小, $\frac{\Delta R_b}{R_b} = 0$, 所以为了简化计算, 可忽略此项作用, 即式(12)简化为式(13)。

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_g}{R} \cdot \frac{\Delta R_g}{R_g} \quad (13)$$

其中 $\Delta R_g/R_g$ 是多晶硅中晶粒单元的压阻灵敏度, 将式(10)代入式(1), 可得到 $\Delta R_g/R_g$ 的表式:

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = \langle \pi'_{11} \rangle T'_1 + \langle \pi'_{12} \rangle T'_2 + \langle \pi'_{16} \rangle T'_6 \quad (14)$$

对于一定掺杂浓度的多晶硅, 其 R_g/R 即为 ρ_g/ρ , 它可以从单晶硅和多晶硅的电阻率随掺杂浓度的变化关系曲线中查到。另外, 考虑到多晶硅的剪切压阻系数为零的结论后, 再将式(14)代入式(13)就得到多晶硅压阻灵敏度的最后表式:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_g}{R} (\langle \pi'_{11} \rangle T'_1 + \langle \pi'_{12} \rangle T'_2) \quad (15)$$

四、实验结果与分析

为了验证上节所述的理论,我们设计了一组实验。首先选用(100)硅衬底片(n型或p型),在衬底硅片上热氧化生长一层 5000 Å 厚的二氧化硅作为介质层,然后用 LPCVD 法生长一层 5000 Å 厚的多晶硅,再经过一系列光刻、氧化、扩散、硼离子注入 ($N = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$, 100keV)、硅各向异性腐蚀等工艺,最后在矩形硅膜 ($2a = 0.64 \text{mm}$, $2b = 2.72 \text{mm}$) 上形成如图 5 所示的五个倾角 α 分别为 15° 、 22.5° 、 30° 、 45° 、 90° 的 p 型电阻,它们均位于 y 轴上。

利用格拉索夫公式,可以导出矩形硅膜上的应力分布^[6]:

$$\begin{cases} T_x - T_1 = \frac{P}{h^2(a^4 + b^4)} [(b^2 - y^2)(3x^2 - a^2) + \nu(a^2 - x^2)(3y^2 - b^2)] \\ T_y - T_2 = \frac{P}{h^2(a^4 + b^4)} [(a^2 - x^2)(3y^2 - b^2) + \nu(b^2 - y^2)(3x^2 - a^2)] \end{cases} \quad (16)$$

其中 P 为硅膜所受的压强, ν 为泊松比,对于硅取 0.3。

从式(4)(10)和(16)可以看到,器件的压阻灵敏度不仅与多晶硅的择优晶向和组份有关,而且还与器件的倾角 α 和位置有关。实际位于 $(0, y)$ 处电阻的压阻灵敏度为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_x}{R} [\langle \bar{\pi}_{11}' \rangle \sin^2 \alpha + \langle \bar{\pi}_{12}' \rangle \cos^2 \alpha + \nu (\langle \bar{\pi}_{11}' \rangle \cos^2 \alpha + \langle \bar{\pi}_{12}' \rangle \sin^2 \alpha)] \\ \cdot \frac{Pb^4}{a^4 + b^4} \cdot \frac{a^2}{h^2} \left[\left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)^2 - \frac{a^2}{b^2} \left(1 - 3 \cdot \frac{y^2}{b^2}\right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

我们对退火后的多晶硅样品进行了 X 射线织构分析,通过对标样测试强度(积分)的测定决定样品在各衍射晶面处测试强度的积分区域,从而测出样品十二个衍射峰的积分强度,在考虑了多重性因子以后,我们就可得到样品的织构。用此方法测得本样品主要包含五个择优晶向: $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 220 \rangle$ 、 $\langle 311 \rangle$ 、 $\langle 400 \rangle$ 、 $\langle 331 \rangle$, 其成份比例因子分别为 0.512, 0.038, 0.038, 0.373, 0.039。再根据表 2 的数据和式(10),就可以求得高阻多晶硅的平均晶粒压阻系数, $\langle \bar{\pi}_{11}' \rangle = 58.45 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyne}$, $\langle \bar{\pi}_{12}' \rangle = -27.28 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyne}$ 。器件硼离子注入的薄层电阻约为 $1 \text{k}\Omega/\square$, 晶粒中杂质浓度约为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 考虑到掺杂浓度的影响,压阻系数将下降 15%, 这样本实验用的多晶硅平均晶粒压阻系数实为 $\langle \bar{\pi}_{11}' \rangle = 49.68 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyne}$ 、 $\langle \bar{\pi}_{12}' \rangle = -23.19 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyne}$ 。

对于 R_x/R 的取值,我们采用 Lu 的数据^[10],在 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 掺杂情况下, R_x/R 约为 0.6, 那么将各数据代入式(17)后,就获得了硅膜中心处 ($y = 0$) 的多晶硅压阻灵敏度:

$$\frac{\Delta R}{R} = 3.29 (\sin^2 \alpha - 0.194 \cos^2 \alpha) \frac{P(\text{mmHg})}{h^2(\text{mm})} \times 10^{-9} \quad (18)$$

由于五个实验器件并非都位于硅膜中心,为了将实验值与理论值相比较,我们把位于 $(0, y)$ 处的器件灵敏度除以 $k(y)$, 从而换算到硅膜中心处的灵敏度,其中:

$$k(y) = \frac{(b^2 - y^2)^2 - a^2(b^2 - 3y^2)}{b^4 - a^2b^2} \quad (19)$$

在实验数据处理时,为了消除工艺的离散性所造成的误差,我们采用如下的方法^{[6][8]}:先将每一芯片上得到的五个与倾角有关的灵敏度值除以 $k(y)$ 以换算成膜中心处的灵敏度。然后将灵敏度值归一化,使倾角为 90° 的压阻灵敏度归一到 1,再将五个灵敏度值都乘以一个权重因子 T_i ,将不同芯片上得到的数据取平均以得到五个压阻灵敏度平均值。采用计算机处理,调节权重因子的取值,使每一芯片上得到的五个数据与平均值之差的和小于设定的小数,依此方法处理后的实验结果列于表 3。

表 3 不同倾角对应的灵敏度值(归一化)

倾角 α	15°	22.5°	30°	45°	90°
灵敏度值	-0.0271	0.0869	0.219	0.555	1.00
均方误差	0.0182	0.0147	-0.0139	0.0199	0.0225

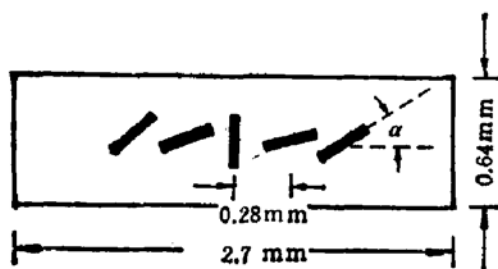


图 5 压阻的分布

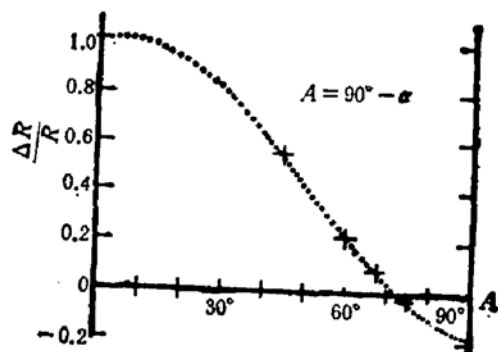


图 6 实验结果与理论曲线比较

然后,将上述结果与归一化的理论曲线作最小二乘法的线性拟合来判断二者的符合程度,求得的拟合方程为

$$\frac{\Delta R}{R} = 1.01[\sin^2(\alpha + 6.1^\circ) - 0.194\cos^2(\alpha + 6.1^\circ)] + 0.01 \quad (20)$$

式中 6.1° 可解释为光刻引进的角度偏差。线性拟合的相关系数 $R = 0.9998$ 。图 6 所示为实验得到的灵敏度值与拟合曲线的比较,可以看到实验结果与理论曲线接近重合。

另外,测量得到在硅膜厚度约为 $10\mu\text{m}$ 时, 90° 取向器件的灵敏度一般在 $3.0 \sim 4.0 \times 10^{-3}\text{mmHg}^{-1}$,与理论值 $3.29 \times 10^{-3}\text{mmHg}^{-1}$ 也很符合,这就从实验上证实了理论分析方法及其结果的正确性。

本项目工作过程中得到了吴宪平老师、王言老师、晋琦老师、沈加英同志和微电子所许多同志的支持和帮助,中科院上海冶金所的王兆祥同志为样品进行了 X 射线织构分析,作者谨在此表示深深的谢意。

附录: 坐标变换矩阵和择优晶向平均晶粒压阻系数

(1) $\langle 100 \rangle$ 方向

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{\pi}_{11} = \pi_{11} + \frac{1}{4}(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \\ \bar{\pi}_{12} = \pi_{12} - \frac{1}{4}(\pi_{12} + \pi_{44} - \pi_{11}) \end{cases}$$

(2) $\langle 110 \rangle$ 方向

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sqrt{2} \sin \phi & -\cos \phi \\ -\sin \phi & \sqrt{2} \cos \phi & \sin \phi \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{\pi}_{11} = \pi_{11} + \frac{7}{16}(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \\ \bar{\pi}_{12} = \pi_{12} + \frac{3}{16}(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \end{cases}$$

(3) $\langle 111 \rangle$ 方向

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \cos \phi - \sqrt{3} \sin \phi & \cos \phi + \sqrt{3} \sin \phi & 2 \cos \phi \\ -\sin \phi - \sqrt{3} \cos \phi & -\sin \phi + \sqrt{3} \cos \phi & 2 \sin \phi \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{\pi}_{11} = \pi_{11} + \frac{1}{2}(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \\ \bar{\pi}_{12} = \pi_{12} + \frac{1}{6}(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \end{cases}$$

(4) $\langle 112 \rangle$ 方向

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} \cos \phi - \sqrt{3} \sin \phi & \sqrt{2} \cos \phi + \sqrt{3} \sin \phi & -\sqrt{2} \cos \phi \\ -\sqrt{2} \sin \phi - \sqrt{3} \cos \phi & -\sqrt{2} \sin \phi + \sqrt{3} \cos \phi & \sqrt{2} \sin \phi \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{\pi}_{11} = \pi_{11} + \frac{7}{16}(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \\ \bar{\pi}_{12} = \pi_{12} + 0.1875(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \end{cases}$$

(5) $\langle 311 \rangle$ 方向

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{110}} \begin{bmatrix} 3 \cos \phi - \sqrt{11} \sin \phi & \cos \phi + 3\sqrt{11} \sin \phi & -10 \cos \phi \\ -3 \sin \phi - \sqrt{11} \cos \phi & -\sin \phi + 3\sqrt{11} \cos \phi & 10 \sin \phi \\ 3\sqrt{10} & \sqrt{10} & \sqrt{10} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{\pi}_{11} = \pi_{11} + 0.3678(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \\ \bar{\pi}_{12} = \pi_{12} + 0.2107(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \end{cases}$$

(6) $\langle 331 \rangle$ 方向

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{38}} \begin{bmatrix} \cos \phi - \sqrt{19} \sin \phi & \cos \phi + \sqrt{19} \sin \phi & -6 \cos \phi \\ -\sin \phi - \sqrt{19} \cos \phi & -\sin \phi + \sqrt{19} \cos \phi & 6 \sin \phi \\ \sqrt{18} & \sqrt{18} & \sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{\pi}_{11} = \pi_{11} + 0.4557(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11}) \\ \bar{\pi}_{12} = \pi_{12} + 0.1814(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \end{cases}$$

参 考 文 献

- [2] R. Allan, *Electronics*, 52, 44(1979).
- [3] W. Germer and W. Tödt, *Sensors and Actuators*, 4, 183(1983).
- [4] D. Schubert, et al., *Sensors and Actuators*, 11, 145(1987).
- [5] P. J. French and A. G. R. Evans, *Digest of Technical Papers. 1985 Intl. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, 281(1985).
- [6] 王言、鲍敏杭、半导体学报, 7 522(1986).
- [7] 牛德芳编著, 力学量敏感器件及其应用, 科学出版社(1987).
- [8] 鲍敏杭、王言, 复旦学报(自然科学版), 25 268(1986).
- [9] Y. Kandä, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-29, 64(1982).
- [10] N. C.-C. Lu, et al., *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-28, 818(1981).
- [11] O. N. Tufte and E. L. Stalzer, *J. Appl. Phys.*, 34, 313(1963).

Statistical Analysis for the Sensitivity of Polysilicon Piezoresistance

Zhao Ganming and Bao Minhang

(Departments of Electronic Engineering, Fudan University)

Abstract

The statistical analysis for the piezoresistive sensitivity of polysilicon thin film with special preferential orientations is presented. Both n-type and p-type average grain piezoresistive coefficients of polysilicon with the preferential orientations of $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, $\langle 211 \rangle$, $\langle 311 \rangle$ and $\langle 331 \rangle$ have been calculated. By using these results and x-ray texture of polysilicon, the sensitivity of polysilicon piezoresistance has been obtained. To verify the theoretical results, the experimental devices are made at the center of a rectangular diaphragm. The experimental results agree with the expected theoretical analysis. Therefore, these results are very useful for the design of polysilicon piezoresistive pressure sensors.

KEY WORDS: Silicon, Sensors, Piezoresistor, Sensitivity, pressure, Statistical analysis