

半导体应变片

华东电子仪器厂

上海人民出版社

半导体应变片

华东电子仪器厂

(凭证发行)

895802E

上海人民教育出版社

半 导 体 应 变 片

华东电子仪器厂 编

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 文化革命印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 1.5 字数 29,000

1971年4月第1版 1971年4月第1次印刷

书号: 15·4·123 定价: 0.11 元

发行范围: 凭证发行

毛主席语录

中国人民有志气,有能力,
一定要在不远的将来,赶上和
超过世界先进水平。

打破洋框框,走自己工业
发展道路。

前 言

应变片在非电量电测量技术中是作为应力的变换元件，种类较多。以前应变片主要由金属应变电阻丝和应变箔做成各种所需的形状，这些不同形状的应变片，可以对各种机械、土木、建筑、航空、船舶、机车、桥梁、铁路、隧道、矿井等工程结构作静态和动态测量，进行比较复杂的应力分析。对于验证设计理论，检查工程质量，决定正确的设计方案，合理地选用原材料和进行科学研究具有重要的意义。丝式和箔式应变片的灵敏系数低(其 K 值只有 $2\sim 2.7$)，输出电平小，并且需要设置昂贵复杂的电子仪器(如应变仪、放大器等)，才能进行测量，这给使用上带来了一定的困难。

随着科学技术的发展，在 1954 年发现了半导体硅和锗的张力灵敏系数比金属应变片的灵敏系数大 50 倍以上，在 1958 年试制成功了半导体应变片(粘贴式和非贴式)，近几年来发展速度很快，制造技术也在不断改进，出现了各种不同形式的半导体应变片。半导体应变片的出现，使应力测试技术得到新的更进一步的发展。高的灵敏系数使输出讯号电平增大了几十倍，从而排除了处理微小信号的困难。此外，由于它的机械滞后极小，可以测量静态应变、低频应变，甚至高频应变。在很多新技术中，如火箭、导弹、飞机制造工业及其他遥测系统中，半导体应变片是有很大的应用价值的。

由于叛徒、内奸、工贼刘少奇及其代理人，在工业战线和科学技术领域内推行了一条反革命修正主义路线，大搞“洋奴哲学”、“爬行主义”，大搞神秘化，扼杀广大革命工人的技术革

09504

· 1 ·

新和技术革命运动，致使我国半导体应变片的制造和应用技术得不到应有的发展。

伟大的无产阶级文化大革命，把刘少奇及其代理人扫进了历史的垃圾堆。工人阶级不仅在政治上，而且在技术上真正掌握了领导权，我们伟大祖国的社会主义革命和社会主义建设事业欣欣向荣。遵循伟大领袖毛主席关于“抓革命、促生产、促工作、促战备”的教导，我们在有关领导的关怀下，根据“自力更生”、“艰苦奋斗”的精神，坚持土洋结合，土法上马，在工人同志和技术人员的努力下，经过反复实践，终于试制成功了半导体应变片。

我们编写半导体应变片一书，主要是为了使这门新技术能在社会主义革命和社会主义建设中发挥应有的作用，更有力地加强工业建设和国防建设，狠狠打击帝、修、反。

目 录

前言

第一章 半导体应变片	1
一、半导体应变片的作用原理	1
二、设计半导体应变片应考虑的几个因素	3
1. 杂质浓度与应变灵敏系数的关系及其对温度稳定性的影响	3
2. 材料电阻率及晶面选择对应变片特性的影响	4
3. 半导体应变片的视应变	7
三、 p 型硅半导体应变片的基本特性	8
1. 灵敏系数	8
2. 灵敏度温度系数	8
3. 视应变	9
4. 蠕变	9
5. 机械滞后	9
6. 疲劳寿命	9
7. 电阻变化与应变的关系	10
第二章 半导体应变片的制造工艺	11
一、硅片的制造	11
1. 切片、磨片	11
2. 腐蚀	12
二、电极的制作——蒸发金复合层	13
三、焊接电极及其设备	15
四、电阻值一致性的控制	16
五、片子的老化处理	17
六、粘贴	17
1. 衬底的制造	17
2. 粘片	17
3. 与衬底电极的焊接	18

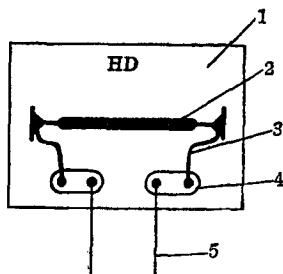
七、加温加压处理	18
1. 加温加压夹具	18
2. 加温加压处理	19
第三章 半导体应变片的应用	20
一、应用中的几个问题	20
1. 半导体应变片的非线性及其补偿方法	20
2. 半导体应变片的温度影响及其补偿方法	23
二、半导体应变片用于应力分析	24
三、各种半导体应变片变送器	25
1. 加速度传感器	25
2. 压力传感器	28
3. 测力、拉压力传感器	31
第四章 其他类型的半导体应变片	33
一、温度自补偿型	33
二、 <i>p-n</i> 组合型	33
三、扩散型	34
四、隧道二极管型	35
附录	37
一、常用半导体应变片参数	37
二、半导体应变片衬底的制作	37

第一章 半导体应变片

半导体应变片的种类很多。目前常用的是单导电型半导体应变片。如 PBD7-1K、PBD6-350、PBD7-120、PBD7-60 型等。半导体应变片的外形如图 1-1。

一、半导体应变片的作用原理

对一块半导体的某一轴向，施于一定的应力时，其电阻率就会产生一定的变化。由于晶体在承受应力时，必然会产生应变，因而就有可能用晶体承受应力后产生的电阻变化来反映应变的大小。半导体应变片就是根据这种压阻效应的原理制成的。



- 1. 胶膜衬底
- 2. p-Si 片
- 3. 内引线
- 4. 焊接电极
- 5. 外引线

图 1-1

不同类型的半导体所施加的应力作用方向是不同的，为要得到大的压阻效应，对 p 型硅半导体是沿 $[111]$ 晶轴方向， n 型硅半导体则是沿 $[100]$ 晶轴方向，而在其他晶轴方向对其施加应力，就不会得到大的压阻效应。

半导体应变片和电阻丝应变片一样，都以灵敏系数 K 这一参数来表征其特性的。由于电阻率的变化是由压阻效应引起的，若以 T 表示应力，则有：

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_i T \quad (1)$$

式中 π_i ——压阻效率。

我们知道应力 T , 应变 ε 和杨氏模量 Y 有如下的关系:

$$Y = \frac{T}{\varepsilon}$$

即 $T = Y\varepsilon$ (2)

代入(1)式则得:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_l Y \varepsilon$$
 (3)

半导体应变片是具有一定几何尺寸的电阻率为 ρ 的棒状物, 如其初始电阻 R 随着应变变化了 ΔR , 则我们可以从

$$R = \rho \frac{l}{A}$$
 (4)

得出电阻的变化率为:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$
 (5)

式中 μ ——泊桑比。

以(3)式代入得

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \pi_l Y) \varepsilon$$
 (6)

(6)式右边括弧中的第一、二项是随几何尺寸变化的, 即为一般的电阻丝应变片的灵敏系数(约为 $1 \sim 2$), 第三项 $\pi_l Y$ 为压阻效应, 它是随着电阻率变化的, 其数值远远大于第一、二项之和, 故半导体应变片的灵敏系数可表示为:

$$K = \pi_l Y$$

即

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon = \pi_l Y$$
 (7)

制造半导体应变片的材料有锗、硅、锑化铟、磷化镓、磷化铟与砷化镓等。一般常用锗、硅, 因为它们能获得比较大的压阻效应。

几种常用半导体材料的灵敏系数如下表:

材 料	电 阻 率 (欧姆-厘米)	杨氏模量 (10^{12} 达因厘米 $^{-2}$)	灵敏系数	晶 向
<i>p</i> 型 硅	7.8	1.87	175	[111]
<i>n</i> 型 硅	11.7	1.23	-133	[100]
<i>p</i> 型 锗	15.0	1.55	102	[111]
<i>n</i> 型 锗	16.6	1.55	-157	[111]
<i>n</i> 型 锗	1.5	1.55	-147	[111]
<i>p</i> 型砷化镓	0.54		-45	[100]
<i>p</i> 型砷化镓	0.01	0.745	30	[111]
<i>n</i> 型砷化镓	0.013		-74.5	[100]

二、设计半导体应变片应考虑的几个因素

1. 杂质浓度与应变灵敏系数的关系及其对温度稳定性的影响

杂质浓度不仅对半导体的温度特性、灵敏度温度特性有影响,而且对灵敏系数也有影响。

高掺杂的压阻系数和低掺杂的压阻系数是不相同的,所以半导体应变片也就随着掺杂程度的不同而有差异。低掺杂的应变片灵敏系数高,但其电阻温度系数大,而且灵敏度温度系数相对下降也大;高掺杂的应变片灵敏系数小,但其电阻温度系数小而平滑,而且灵敏度温度系数相对下降也小。这是相互矛盾着的,应该根据应变测量的用途来选择材料。电阻率为0.01欧姆-厘米(即杂质浓度约为 10^{19} /厘米 3)时,电阻温度系数几乎为零。电阻率为0.001欧姆-厘米(即杂质浓度在 10^{20} /厘米 3)时,则灵敏度温度系数接近于零。但是电阻率太低,绘制加工带来困难,故一般在0.01~1欧姆-厘米内选择材料。

图1-2是掺硼的*p*型硅灵敏系数与温度的关系曲线(曲

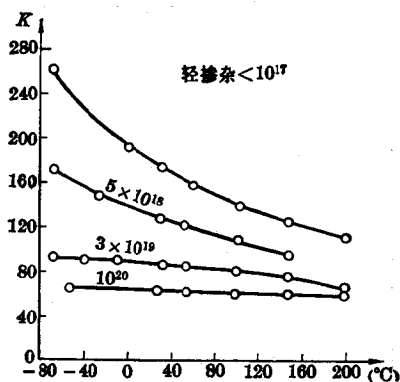


图 1-2

线上标注的是杂质浓度)。

从图 1-2 可以看出,灵敏系数随掺杂程度的增加而减少,与此同时,温度稳定性却非常显著地增长。当掺杂程度在 $10^{20}/\text{厘米}^3$ 以下时,灵敏系数下降了三分之一左右。应该指出:灵敏系数在实际测量过程中还和半导体应变片的衬底材料及所使用的胶水、贴片技术、硅片的厚薄等因素有关。这在制造半导体应变片时是必须全面加以考虑的。

2. 材料电阻率及晶面选择对应变片特性的影响

掺杂程度的轻重表明了材料电阻率的大小,所以材料电阻率对半导体应变片特性的影响是和杂质浓度对半导体应变片特性的影响是一致的,这里也就不再重复了。晶面的选择对半导体应变片灵敏系数的影响是相当大的。对于同一电阻率的材料承受应力的晶面不同则其灵敏系数的变化可达数倍之多。

图 1-3 是不同导电类型的晶体和晶面选择对灵敏系数与电阻率的关系曲线。从图中曲线可以看出:灵敏系数是随电

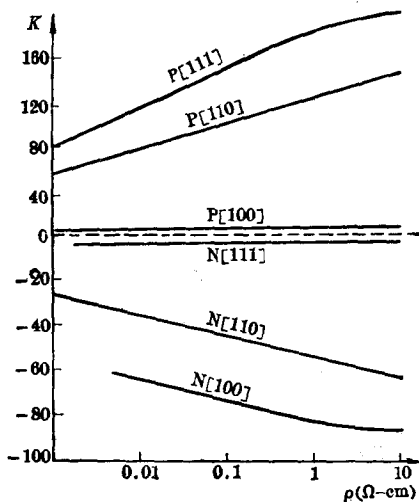


图 1-3

阻率的增大而增大的。对于 p 型硅来说, 承受应力在 $[111]$ 晶面时灵敏系数最大, 而 n 型硅则在 $[100]$ 晶面时灵敏系数最大。因此在加工时必须严格控制切割的晶向一致性和材料电阻率的接近性, 否则将使灵敏系数的分散性增加。

材料电阻率还对半导体应变片的非线性有影响, 硅的电阻变化可由下式表示:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{H_1}{T} S + \frac{H_2}{T_2} S^2 + \frac{H_3}{T_3} S^3 \quad (8)$$

式中 T 为绝对温度, H_1 、 H_2 等为常数。略去高次项则

$$\frac{\Delta R}{R} = AS + BS^2 \quad (9)$$

对于一定的电阻率, A 、 B 为一定的常数。对 p 型材料 A 为正的, 而 n 型材料则为负的。但平方项系数 B 则始终为正的并随着电阻率的增加而增加。从式(9)中可以看出: 半导体

应变片随相对形变的(即应变)变化而发生的电阻变化具有非线性的性质。图 1-4 是硅应变片电阻变化与应变关系的曲线。

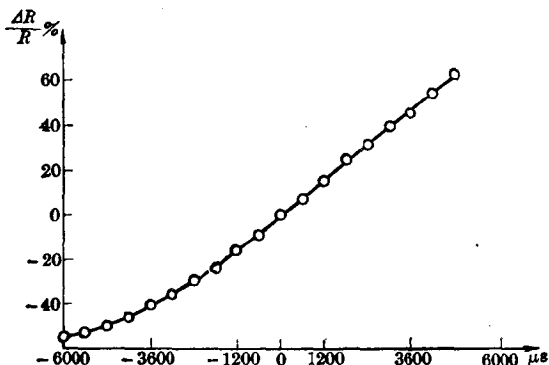


图 1-4

对轻掺杂的硅($\rho > 1$ 欧姆-厘米)则(9)式为:

$$\frac{\Delta R}{R} = 175S + 72625S^2 \quad (p \text{ 型 } [111]) \quad (10)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = -125S + 26000S^2 \quad (n \text{ 型 } [100]) \quad (11)$$

实践发现,多数应变片材料($\rho \sim 0.1$ 欧姆-厘米)的对应公式为:

$$\frac{\Delta R}{R} = 120S + 400S^2 \quad (p \text{ 型}) \quad (12)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = -110S + 10000S^2 \quad (n \text{ 型}) \quad (13)$$

这就更明显地看出半导体应变片的非线性性质:非线性主要由平方项决定,而平方项又是跟电阻率的改变有很大的关系。所以我们制造半导体应变片要获得较良好的线性,亦宜选择低电阻率的材料。

3. 半导体应变片的视应变

半导体应变片的视应变和金属丝式应变片完全一样。它是由两个方面的原因引起的：

(1) 由半导体本身的电阻温度系数 α_1 所引起的电阻变化，以 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1$ 表示：

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 = \alpha_1 \Delta t$$

式中 α_1 ——半导体材料的电阻温度系数。

(2) 由结构材料(包括试件、粘结剂、衬底)的热变形所引起的电阻变化，以 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2$ 表示。

我们假定半导体应变片的热膨胀系数为 β_n ，结构材料的热膨胀系数为 β_m 则有：

$$\varepsilon_n = \beta_n \Delta t$$

$$\varepsilon_m = \beta_m \Delta t$$

当温度变化 Δt 后由膨胀特性所产生的变形为：

$$\varepsilon_m - \varepsilon_n = (\beta_m - \beta_n) \Delta t$$

故电阻变化为：

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 = K(\beta_m - \beta_n) \Delta t$$

总电阻变化为：

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 = \alpha_1 \Delta t + K(\beta_m - \beta_n) \Delta t$$

即

$$\frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \alpha_1 + (\beta_m - \beta_n) K \quad (14)$$

硅的热膨胀系数为 $3.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，比大多数结构材料低得多，故 $(\beta_m - \beta_n)$ 总是正的。

因此总视应变可写为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta R}{RK} / \Delta t \quad (15)$$

硅的电阻温度系数 α 是正的, 故其视应变大, 而 n 型硅的灵敏系数是负值, 故其视应变很小。

三、 p 型硅半导体应变片的基本特性

1. 灵敏系数

半导体应变片在受拉应力时的灵敏系数一般较受压应力时的灵敏系数为高。将四种规格的半导体应变片各四片, 用 BJ-4 胶水贴于钢梁上, 二片受拉, 二片受压。对梁施于 $600\mu\varepsilon$ 的应力, 测出各片的电阻变化。由 (7) 式算出其灵敏系数之平均值, PBD7-1K 型在拉应力时为 145, 压应力时为 140。PBD6-350 型在拉应力时为 133, 压应力时为 127。PBD7-120 型在拉应力时为 120, 压应力时为 115。PBD7-60 型在拉应力时为 110, 压应力时为 105。

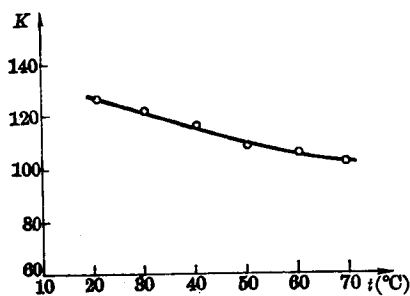


图 1-5

以 PBD7-120 型为例, 将半导体应变片贴于等强度梁上 (30XTCA 钢梁, 其它型号的情况见附录一), 施于 $600\mu\varepsilon$ 的应力, 测出各种温度的电阻变化, 求出灵敏度温度系数, 其灵敏度温度系数为 $-0.175\%/^{\circ}\text{C}$ (拉应变时)。图 1-5 为灵敏度温度系数的相对下降曲线。

2. 灵敏度温度系数

以 PBD7-120 型为例, 将半导体应变片贴于等强度梁上 (30XTCA 钢梁, 其它型号的情况见附录一), 施于 $600\mu\varepsilon$ 的应力, 测出各种温度的

3. 视应变

将贴好(贴于 30XTCA 钢)的半导体应变片放于调温调湿箱中。测量出其随温度变化而产生的电阻变化。PBD7-120 型应变片的变化曲线如图 R(Ω) 1-6 所示, 在 20~70°C 范围内其电阻温度系数的平均值约 0.165%/°C。

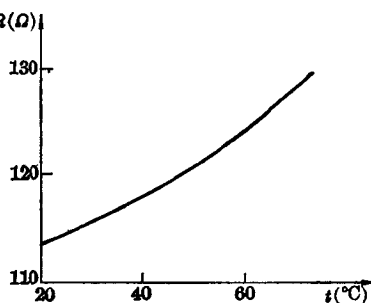


图 1-6

4. 蠕变

将各种不同类型的片子用 BJI-4 胶贴于等强梁上, 经过较长时间的疲劳处理后, 对梁施于 1000 $\mu\epsilon$

的应力, 测出其不同时间的蠕变为(室温为 23°C): 6 $\mu\epsilon$ /小时, 8 $\mu\epsilon$ /4 小时, 14 $\mu\epsilon$ /8 小时, 30 $\mu\epsilon$ /24 小时。疲劳处理前, 在同样时间内蠕变均比疲劳处理后大一倍左右。这就充分说明, 测量前对片子进行较长时间的疲劳处理对提高测量精度是极为有利的。

5. 机械滞后

在输出为 1000 $\mu\epsilon$ 的等强梁上连续循环加载并卸载三次, 测出其滞后值是很小的。四片半导体应变片有二片没滞后, 一片为 0.3 $\mu\epsilon$, 另一片为 0.5 $\mu\epsilon$ 。象这样小的数值不能说明是由于滞后所引起的, 而可能是其他情况所引起的变化。从理论上说, 没有滞后也是符合半导体应变片的独特优点的。

6. 疲劳寿命

在输出 1000 $\mu\epsilon$ 、变化周期为每秒 30 周的疲劳计上作 1.8×10^5 次循环后, 灵敏系数相对下降 1.02%。

• • •