

美国 Honeywell 公司生产的 DADS 高精度压力传感器的精度为 0.02%，它用于美国 DC-10 飞机的大气数据处理系统。

我国从六十年代起有些单位研制了体型半导体应变片和传感器。从 1970 年起一些研究所、院校和工厂研制和生产了多种型号的扩散型半导体压阻传感器，其技术指标达到和接近国外产品水平。

由于半导体压阻传感器特别适合批量生产，价格低廉，所以发展很快。它将成为最有竞

争能力的一种普及型传感器。

参 考 文 献

- [1] C. S. Smith, *Solid State Physics*, Vol. 6. Acad. Press, New York, (1958), 175.
- [2] E. G. S. Paige, *Progress in Semiconductors*, Vol. 8, Temple Press, London, (1964), 155.
- [3] D. E. Fulkerson, *IEEE Trans. Electr. Devices*, ED-16 (1969), 867.
- [4] W. Paul, *J. Phys. Chem. Solids*, 8 (1959), 196.
- [5] C. S. Smith, *Phys. Rev.*, 94-4 (1954), 42.
- [6] 王龙甫编, 弹性理论, 科学出版社, (1979).

硅 霍 耳 元 件 和 特 斯 拉 计

梁晓春 丁丕光 徐 彬 李士俊 傅长保

(北京师范大学半导体器件厂)

霍耳效应是美国物理学家霍耳于 1879 年在金属中发现的。1948 年以后，半导体的霍耳效应得到了广泛重视，制成了各种霍耳元件。首先出现的是锗霍耳元件，1955 年出现了硅霍耳元件。近二十年来，随着化合物半导体材料(如 InAs, InAsP, GaAs 等)的出现，用化合物半导体制造的霍耳元件由于有较高的稳定性而越来越引起人们的重视(如西德西门子公司的 FA, FC 和 SV 系列, 美国贝尔公司的 BH 系列)。其中有的元件可用作 0.2 级甚至 0.1 级特斯拉计的测磁探头。而硅霍耳元件则相形见拙，在进口产品中，我们只见过配用在 2.5 级特斯拉计(日本横河电机 3251 样机)上的硅霍耳测磁探头，更高精度的至今未见过。

我们经过对硅霍耳元件制造工艺的研究和试验，提高了硅霍耳元件的稳定性，形成了硅霍耳元件生产线。并且用自己生产的 SH 型硅霍耳元件测磁探头制造出了 SG-1 型和 SG-2 型 1.0 级数字特斯拉计，其中部分产品在定标范围内实际精度可达 0.5 级。

一、对霍耳元件性能的要求

霍耳元件是根据霍耳效应在形状规则(最简单的是矩形)的 n 型单晶薄片(或外延层)上制造四个欧姆接触电极并焊上四条引线(a, b, c, d)构成的。(如图 1 中实线部分所示)。

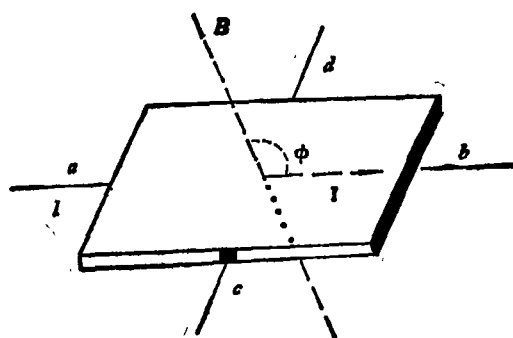


图 1 霍耳元件工作原理示意图

霍耳元件的输入量有三个(图 1 中虚线所示): (1) 由电流极 a, b 输入的电信号 I (mA); (2) 穿过半导体片的磁信号 B (T); (3) I 与 B

表 1 某些半导体材料在 300K 时的参数

材 料 (单晶)	禁带宽度 E_g (eV)	电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	电子迁移率 μ ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$)	霍尔系数 R_H (cm^3/c)	$\mu \sqrt{\rho}$
Ge	0.66	1.3	3500	4250	4000
Si	1.11	1.5	1500	2250	1840
InSb	0.17	0.005	60000	350	4240
InAs	0.36	0.0035	25000	100	1480
InAsP	0.63	0.08	10500	850	2970
GaAs	1.42	0.2	8500	1700	3800

方向间的夹角 ϕ 。只要 I 与 B 同时存在，霍尔元件就有相应的输出电压 V_H ，从电压极 c, d 给出。输出量与输入量之间的关系为

$$V_H = f_H K_H I B \sin \phi, \quad (1)$$

式中 f_H 是元件的设计常数，与元件的长宽比有关； $K_H = \frac{R_H}{d} = (3/8)(1/d)\pi\rho\mu$ 为霍尔元件的灵敏度 ($\text{mV}/\text{mA} \cdot \text{T}$)， R_H 是半导体材料的霍尔常数，由半导体材料的电阻率 ρ 和载流子迁移率 μ 决定， d 是霍尔元件的有效厚度。

由 (1) 式可知，在霍尔元件的三个输入量中，只要保证其中两个量为恒量，则霍尔输出电压就与另一个输入量成正比关系；若使输入量之一为恒量，则输出电压 V_H 就正比其他两个量之积。这是对 I, B 和 ϕ 为直接测量量而言。对非 I, B 和 ϕ 的其他物理量，只要通过一定的转换装置把它们转换成 I, B 或 ϕ ，同样可以用霍尔元件进行测量或控制。

因为与霍尔效应有关的半导体材料参数，对不同的半导体材料是不一样的 (见表 1)，所以用不同的半导体材料制造的相同尺寸的霍尔元件将有不同的特性。

1. 霍尔元件的磁灵敏度 K_{HB}

当采用不同材料制成尺寸相同的霍尔元件时，在功率消耗相同的情况下，其磁灵敏度由下式表示：

$$K_{HB} = f_H \mu \rho^{1/2} \sqrt{Q_1 \frac{l}{L} d}, \quad (2)$$

式中 Q_1 是在单位时间内通过元件表面散失的热量， $\frac{l}{L}$ 是元件的宽度与长度之比。(2) 式说

明霍尔元件的磁灵敏度 K_{HB} 正比于 $\mu \rho^{1/2}$ ，取决于半导体材料的性质。

2. 霍尔元件的最大功率传输效率 (即最大的输出与输入功率之比) η_{\max}

η_{\max} 由下式给出：

$$\eta_{\max} = \frac{1}{4} \mu^2 B^2 f_H. \quad (3)$$

(3) 式说明，霍尔元件的效率正比于 $\mu^2 B^2$ ，在一定的磁感应强度下，只与 μ^2 成正比，即取决于半导体材料的性质。

3. 霍尔输出电压的稳定性

霍尔输出电压的稳定性是决定其实用价值的关键特性。它主要取决于半导体材料的质量 (杂质浓度和晶体缺陷以及它们的均匀性、杂质补偿程度等) 和制造工艺水平 (包括四个电极的接触势垒、比接触电阻、电极附近产生的晶格应力的作用及其一致性、表面沾污和表面漏电的程度等)。元件在工作过程中基于上述某些原因产生的温度 (来源于焦耳热) 梯度，是热磁效应、热电效应以及与热有关的压阻效应产生的基础。与这些效应相应的电动势，将和霍尔输出电压 (它本身也受温度影响) 混同在一起成为输出的误差成分。此误差成分带有随机性，这是因为误差成分的大小随元件具体的工作条件 (主要是热传导和热应力) 和工作环境 (主要是力、热和电磁干扰) 而变化。

因为决定霍尔输出电压稳定性的因素比较复杂，并且无统一的计量标准，所以在评价霍尔输出的稳定性时，一般都采用对比法进行比较和挑选。而在国内外的产品说明中，一般都不给出这一特性参数。

二、SH型硅霍尔元件的特点

1. 硅霍尔元件的缺点

(1) 由表1和(2)式及(3)式可以看出,用硅材料制作霍尔元件,其磁灵敏度和效率都不是理想的。但由于各种高信噪比、低漂移集成电路的出现,这两个缺点已被弥补。

(2) 在相同n型杂质浓度下(例如都是 $10^{17}/\text{cm}^3$),硅材料的电阻率最高,如 $\rho_{Ge}=1\Omega\cdot\text{cm}$, $\rho_{Si}=5\Omega\cdot\text{cm}$, $\rho_{InAs}=0.1\Omega\cdot\text{cm}$, $\rho_{GaAs}=0.5\Omega\cdot\text{cm}$ 。电阻率高不仅使元件内阻大,而且更重要的是不易做出理想的欧姆接触,有可觉察的接触势垒,这是造成硅霍尔元件稳定性差的原因之一。电阻率越高,半导体的表面效应越明显,这是形成硅霍尔元件稳定性差的又一原因。

为提高硅霍尔元件的稳定性,我们除注意选择比较理想的单晶外,主要是在工艺上注意降低电极的接触电阻和减小接触势垒的厚度,使场致发射在传输过程中占绝对优势。同时在选择合金材料与合金工艺时注意减小因重掺杂而引起的局部晶格应力,从而制造出了稳定性比较好的SH型硅霍尔元件。经过对比测试,在稳定性方面一般都比日本横河电机3251高斯计的测磁探头高一个数量级,并与西德西门子公司FC33型霍尔元件不相上下,满足了0.5级特斯拉计的需要。

2. 硅霍尔元件的优点

(1) 硅材料是半导体材料中价格最便宜的,

而且加工工艺(即硅平面工艺)最成熟,便于批量生产,尚能与集成电路相容,从而可进一步降低成本,减小体积,提高可靠性。

(2) 硅半导体的禁带比较宽(见表1),仅次于GaAs,故硅霍尔元件能适应较宽的温度范围。SH型硅霍尔元件的极限工作温区为 $-100\sim+160^\circ\text{C}$ 。

(3) 硅霍尔元件的输出电压与外加磁感应强度的线性关系好。SH型硅霍尔元件一般在1T范围内 V_H 的非线性偏差在0.3%左右。所以,一般无需进行线性补偿就能得到满意的测磁效果。

(4) SH型硅霍尔元件有正的温度系数,可以用最简单的办法进行温度补偿,使霍尔输出的温度系数达 $(2 \times 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}})$,进一步提高了霍尔输出的稳定性。

3. SH型硅霍尔元件的常用参数(见表2)

三、SH型硅霍尔元件应用举例

1. 磁测量

根据 $V_H \propto B$ 的关系,用硅霍尔元件可以测量磁通、磁场强度、磁感应强度、磁场分布等,用两只霍尔元件配合使用可以描绘磁性材料的磁滞回线,测定其剩磁(B_r)、矫顽力(H_c)以及最大磁能积(BH)_m。用霍尔元件测磁,方法简便易行,在生产和科研单位已被广泛应用。

在高等学校的电磁学教学中,用霍尔元件

表 2

参数名称	单 位	测试条件	元 件 型 号		
			6SH	4SH	1SH
电流极内阻 R_I	Ω	室 温	170—350	170—350	300—500
电压极内阻 R_V	Ω	室 温	略小于 R_I		
额定工作电流 I	mA		10		7
灵敏度 K_H	$\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{T}$	$I = 10\text{mA}$ $B = 0.15\text{T}$	$10 \leq K_H \leq 20$		$I = 7\text{mA}$ $20 \leq K_H \leq 30$
使用温度范围	$^\circ\text{C}$		-40—+100 极限温区 -100—+160		

可以非常方便、直观地演示和测定圆线圈、亥姆霍兹线圈、无限长直导线以及长直螺线管的磁场分布。可验证有关定理公式，加强学生对“磁”的感性认识。

由于霍尔元件可等效于一个四臂电桥，所以其输出电压测量或显示装置的通用性很强。可以用电位差计、数字电压表、函数记录仪和示波器等直接进行计量与显示。

2. 交直流电流的测量

根据 $V_H \propto B \sin \phi$ ，霍尔元件可用来测量电流。测量原理见图 2。

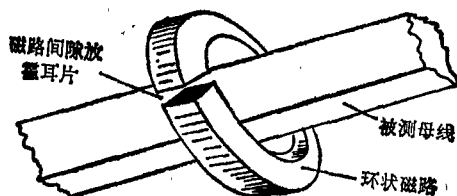


图2 测电流示意图

把一只或几只霍尔元件置于环形铁芯断面的间隙中。间隙大小由被测电流的上限决定，当有最大电流通过时，铁芯磁通未饱和。这样，元件输出值将正比于被测电流。这种装置已用于 1 至几千安培电流的测量。

3. 测电压

被测的交直流电压可通过简单的装置转换成电流或磁感应强度 B ，将 B 作为霍尔元件的输入量，则元件的输出电压就与被测电压之间有对应关系。

4. 测电功率

原理如图 3 所示。

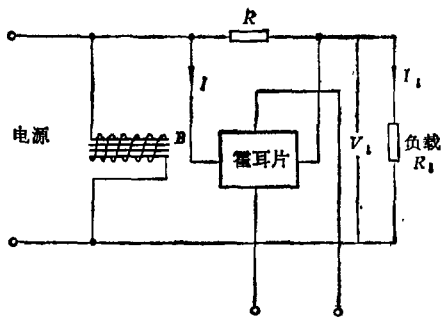


图3 测电功率原理图

负载 R_L 所消耗的功率 $W_L = I_L \cdot V_L$ 。根据 $V_H \propto IB \sin \phi$ ，使霍尔元件中通过的电流 I 与负载中通过的电流 I_L 之间成一定数量关系，使由电磁铁产生的 B 与负载两端电压 V_L 之间成一定数量关系，这样霍尔元件的输出电压就与负载所消耗的功率形成对应关系。只要测出霍尔输出电压，就可以知道负载的消耗功率。

某研究所将 SH 型硅霍尔元件用于内燃机车恒功率控制和防空转装置中，执行机车运行信息的检测与反馈任务。其测流器（6000A）、测压器（770V）和测功器（2400 kW）的检测误差均低于 $\pm 1\%$ 。实践证明 SH 型硅霍尔元件能适应机车的振动和温度变化大的恶劣环境。

5. 角位移传感器

原理如图 4 所示。

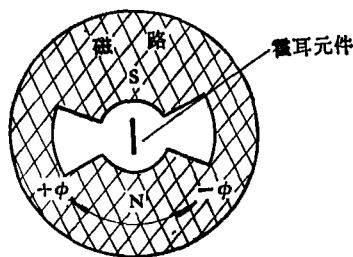


图4 角位移传感器示意图

根据 $V_H \propto \sin \phi$ ，传感器的输出信号与输入角度 ϕ 呈正弦函数关系，这实际上是一函数发生器。作为角度测量，可以通过信号调节装置解算正弦函数，求得待测角度 ϕ 。如果被测角度 ϕ 能局限于 $\pm 60^\circ$ 之内，问题就比较简单了，可设计适当的磁极形状，使 $V_H \propto \phi$ 。这种传感器可用于测量飞机方向舵、副翼、襟翼以及其它系统的角度变化，具有精度高、寿命长、工作频率高和稳定可靠的优点。

6. 振幅、位移传感器

原理如图 5 所示。

根据 $V_H \propto B$ ，如永磁体相对于霍尔元件只沿 x 方向移动或振动，则作用在元件上的磁感应强度 B 与永磁体到霍尔元件之间的距离成比例，于是 V_H 是 x 的函数，即

$$V_H = K_H I b_0 (x + a_0)^{-n} + U_0,$$

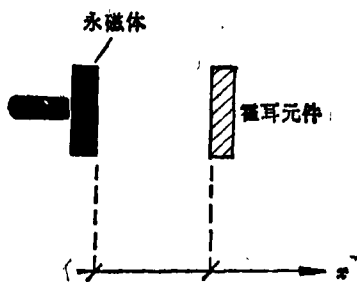


图5 振幅位移传感器示意图

U_0 是霍尔元件的不等位电压, a, b_0, ν 是与材料、结构和实验条件有关的常数。这种传感器具有性能稳定、灵敏度高、频响范围宽、体积小、重量轻等优点。

7. 其它

除上述应用外, 还可以用霍尔元件测定半导体材料的参数。如教学中配合学生学习半导体基础知识, 对硅霍尔元件样品的输出电压进行测量, 并通过(1)式对 K_H 进行计算, 可测定硅材料的载流子迁移率、载流子浓度 ($R_H = \frac{1}{en}$, n 是载流子浓度, e 是载流子电荷) 以及它们对温度的依赖关系等。

四、特斯拉计

前面已经提到, 用 SH 型硅霍尔元件可以生产出较高精度的特斯拉计。目前除鹤岗电工仪表厂生产的 CSG-1 型 0.5 级数字特斯拉计

(上接第 121 页)

变输出模的位置, 它可在毫微秒时间内使模发生突跳, 总的调谐范围可达 300 埃。如果用四个频率调谐来代替通常的数字光纤通讯的二进制振幅调制, 那么每个脉冲所携带的信息将加倍。还可使几个 c^2 激光器耦合到一条光纤上, 每一个激光器调谐在不同的频率上, 从而可进一步提高线路的信息容量。

(顾世杰)

(用我厂生产的 SH 型硅霍尔元件作测磁探头) 外, 我厂自己生产的特斯拉计有:

1. SG-1 型两用 (测磁和测电压) 1.0 级数字特斯拉计, 测磁的最小分辨率为 0.01mT (即 0.1Gs), 测电压的最小分辨率为 $10\mu V$ 。

2. SG-2 型双探头 1.0 级数字特斯拉计。它具有两个独立的硅霍尔测磁探头, 用转换开关可任意显示其中一个被测磁场值, 并设有霍尔电压输出端, 以便接入示波器、函数记录仪, 显示交变磁场波形, 描绘磁场分布及磁滞回线等。这给磁测量、磁性材料和磁性元件的研究带来了方便。

为便于更换不同规格的测磁探头, 以上两种特斯拉计都安排了校准档。凡配用本厂生产的不同规格的探头时, 只要按探头说明书中注明的定标值校准即可使用。

以上两种特斯拉计的技术指标, 详见《物理》杂志 1983 年第 7 期封底。

参 考 文 献

- [1] 上海电子专科学校著, 霍尔元件及其应用, 上海科学技术出版社, (1974)。
- [2] 片岗照荣著, 磁电变换素子, 日刊工业新闻社, (1965)。
- [3] H. Weiss, Structure and Application of Galvanomagnetic, Pergamon Press, (1969)。
- [4] W. R. 鲁尼安著, 上海科学技术大学半导体材料教研室译, 半导体测量和仪器, 上海科学技术出版社, (1983)。
- [5] H. F. 沃尔夫著, 天津半导体器件厂译, 硅半导体工艺数据手册, 国防工业出版社, (1975)。

参 考 文 献

- [1] W. T. Tsang et al., *Appl. Phys. Lett.* **42** (1983), 650.
- [2] *Phys. Today*, **36-10** (1983), 20.