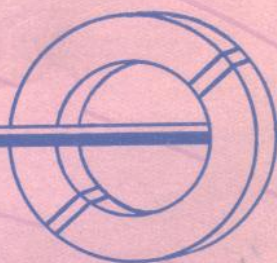


霍尔元件 及其应用

上海电子专科学校 编



53.665
115
C.2

霍尔元件及其应用

上海电子专科学校 编

2K563/05

上海人民出版社

内 容 提 要

这是一本有关霍尔元件的科技读物, 主要讨论霍尔元件的工作原理、特性及其在测量技术和自动化技术等方面的应用, 可供有关方面的工人和技术人员参考。

霍 尔 元 件 及 其 应 用

上海电子专科学校 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 上海海峰印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 4.125 插页 1 字数 89,000

1974年4月第1版 1974年4月第1次印刷

印数 1—12,000

统一书号: 15171.119 定价: 0.26 元

前 言

为了适应电子工业发展的需要，我们收集了一些有关霍尔元件及其应用的资料，经过综合分析，编写成这本《霍尔元件及其应用》。

本书力求以较通俗的理论来阐明霍尔元件的工作原理及其应用方法，书中注重了物理概念的叙述，尽可能避免繁复的数学推导，书后并附有参考文献，可供进一步查阅。霍尔元件使用广泛，涉及领域较多，因此，第二章的应用部分除介绍国内应用外也选入一些国外的资料，以供参考，读者可根据需要选读。

鉴于我们的思想水平和业务水平有限，书中一定存在不少缺点和错误，望读者给予指正。

31086

目 录

前 言

第一章 霍尔元件	1
第一节 霍尔元件的结构、符号及命名	1
第二节 霍尔元件的基本工作原理	3
第三节 霍尔元件的几何因子及效率	7
第四节 霍尔元件的常用参数及测试方法	14
第五节 元件的温度性能及补偿方法	22
第六节 元件的电磁特性	31
第七节 元件的零位误差	37
第八节 元件的频率特性	43
第九节 元件的使用	46
第二章 霍尔元件的应用	51
第一节 磁场测量	51
第二节 弱磁测定	55
第三节 磁读头	58
第四节 电流测量	62
第五节 无接触发讯	65
第六节 接近开关	70
第七节 微位移的测定	73
第八节 加速度测量	78
第九节 函数发生器	80
第十节 无触点电位差计	84
第十一节 分析器	86
第十二节 同步传动装置	89

• i •

第十三节	无刷直流电机	91
第十四节	运算器	94
第十五节	功率计	100
第十六节	信号变换	105
第十七节	频谱分析	109
第十八节	回转器、隔离器及环行器	110
附 录		115
参考文献		126

第一章 霍尔元件

霍尔元件是一种半导体磁电器件，它是利用霍尔效应来进行工作的。

早在 1879 年人们就在金属中发现了霍尔效应，1910 年就有人用铋制成了霍尔元件，用以测量磁场。但由于这种效应在金属中十分微弱，当时并没有引起什么重视。1948 年后，由于半导体技术的迅速发展，人们找到了霍尔效应较为显著的半导体材料——锗(Ge)，接着，在 1958 年前后，人们又对化合物半导体——锑化铟(InSb)、砷化铟(InAs)进行了大量的研究，并制成了较为满意的元件。这时，霍尔效应以及它所具有的广泛的应用才受到了人们普遍的重视。

近年来，随着半导体工艺的迅速发展，元件的性能有了进一步的提高，并已发展到薄膜化、硅集成化的阶段。

本章的讨论则以锗、锑化铟和砷化铟等单晶制成的霍尔元件为对象。

第一节 霍尔元件的结构、符号及命名

霍尔元件的外形如图 1-1 的照片所示。元件的外壳用非磁性金属、陶瓷或环氧树脂封装，去掉封装就是一块矩形半导体单晶薄片(如图 1-2)，通常称之为霍尔片，在它的长方向两端面上焊有二根引线(即 a 、 b)，称为控制电流端(或输入电流端)引线，通常以红色导线标记。另外二根引线以点的形式

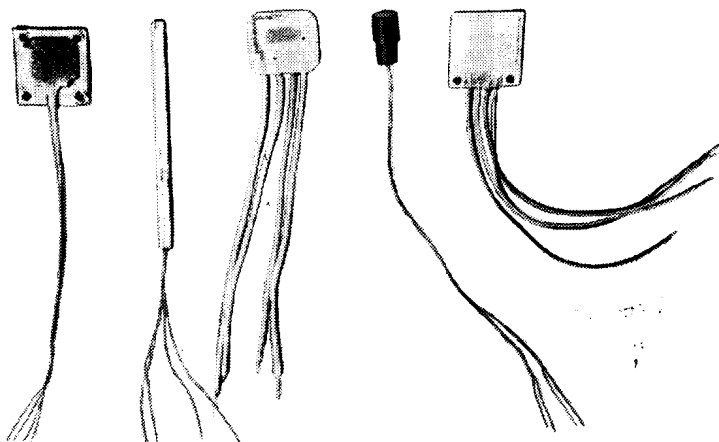


图 1-1 霍尔元件的外形

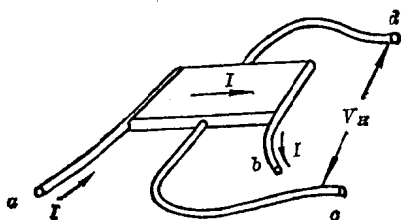


图 1-2 霍尔元件的结构

对称地焊在霍尔片两侧中点处（见图中 c 、 d ），称为霍尔输出端（或输出端）引线，通常以绿色导线标记。霍尔片一般采用 N 型的锗、铋化锗和砷化锗等半导体单晶材料制成。

根据使用霍尔元件的要求，引线焊在元件侧面，两者的接触电阻应很小并呈纯电阻性质（即无 PN 结的特性），通常称为欧姆接触。焊接处称为电极，引出控制电流端引线的两电极称为控制电流极，引出霍尔输出端引线的两电极称为霍尔

电势极。在霍尔元件的制造中,电极的欧姆接触和电极位置的对称性是制造工艺的关键。

在电路图中我们常把霍尔元件用图 1-3 所示的两种符号表示。

和晶体管一样为适应不同的需要,霍尔元件也有种种型号,下图表明了霍尔元件的命名法:

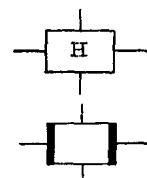
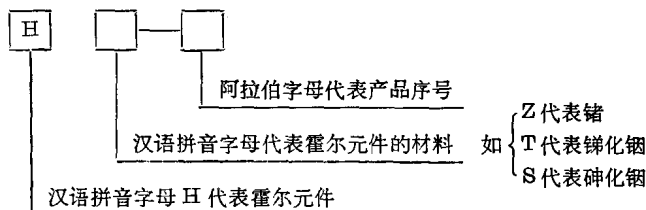


图 1-3 霍尔元件的符号



根据上面的命名法,我们知道 HZ-1 元件说明该元件是用锗制成的霍尔元件。而 HT-1 元件说明了该元件是用铋化铜材料制成的霍尔元件。

第二节 霍尔元件的基本工作原理

一、什么是霍尔效应

如图 1-4 所示,在元件的控制电流端通以电流 I ,并在片子平面的法线方向上,施以磁感应强度为 B 的磁场,那么在垂直于电流和磁场的方向上(即霍尔输出端之间)将产生一个电势 V_H (称霍尔电势,也有称霍尔电压),其大小正比于电流强度 I 和磁感应强度 B 的乘积,即:

$$V_H \propto IB \quad (1-1)$$

这一现象就是常称的霍尔效应。霍尔元件就是基于这一效应

来工作的。下面从电磁学原理简单解释一下。

二、基本原理

如图 1-4 所示, 在磁场垂直通过的半导体薄片上通以电流 I , 假设载流子为电子 (N 型半导体材料), 它沿与电流 I 相反的方向运动, 由于洛伦兹力 f_L 的作用, 电子即向一侧偏转 (如图中虚线方向), 并使该侧形成电子的积累, 与此同时, 元件的横向便形成了电场, 它使随后的电子在受到洛伦兹力 f_L 作用的同时, 还受到与此反向的电场力 f_E 的作用。最后, 当二力相等时, 电子的积累便达到动态平衡。这时在两横端面之间建立的电场称为霍尔电场 E_H , 相应的电势就称为霍尔电势 V_H 。

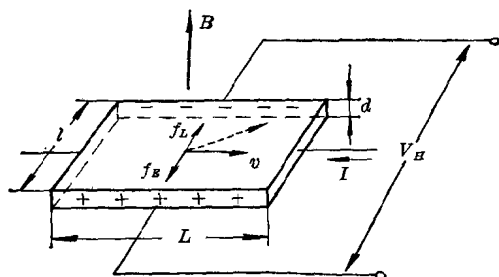
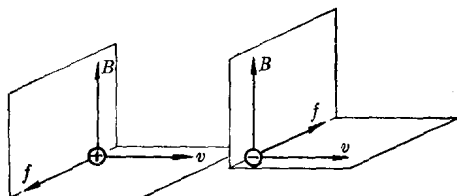


图 1-4 霍尔效应原理图

* 洛伦兹力——运动着的带电质点在磁场中所受的力称为洛伦兹力。若质点电量为 q , 速度为 v , 磁场的磁感应强度为 B , 则力 $f = qv \cdot B \sin(\theta)$, 其方向垂直于 v 和 B 所决定的平面, 如图中正电荷受力指向读者, 负电荷受力则离开读者。



假设电子都以均一速度 v 按图示方向运动，在磁感应强度为 B 的磁场作用下，并且以正电荷所受洛伦兹力方向为正方向，则电子受到的洛伦兹力可用下式表示：

$$f_L = -evB \quad (1-2)$$

式中， e 为电子电量。

同时，电场作用于电子的力可表示为：

$$f_E = (-e)(-E_H) = eV_H/l \quad (1-3)$$

式中， $-E_H$ 是指电场方向与我们所指定的正方向相反。

当达到动态平衡时，二力的代数和为零 ($f_L + f_E = 0$)，即：

$$vB = V_H/l \quad (1-4)$$

又

$$j = -nev$$

式中， j 为电流密度；

n 为电子浓度，负号表示速度与电流方向相反。

则：

$$I = -nevld$$

即：

$$v = -I/neld \quad (1-5)$$

式中， l 、 d 分别为元件的宽度与厚度。

将(1-5)式代入(1-4)式得：

$$V_H = -IB/ned \quad (1-6)$$

如果半导体材料是 P 型的，其空穴的浓度为 p ，则可推导出：

$$V_H = IB/ped \quad (1-7)$$

的结论。根据(1-6)式及(1-7)式，我们可以从 V_H 的正、负来判别材料的类型。

三、霍尔系数和灵敏度

设

$$R_H = -1/ne$$

则(1-6)式为:

$$V_H = R_H IB/d \quad (1-8)$$

R_H 称为霍尔系数, 霍尔系数的大小可以反映出霍尔效应的强弱。我们根据 $\rho = 1/ne\mu$ 的关系, 还可以得到

$$R_H = \rho\mu \quad (1-9)$$

式中, ρ 为材料的电阻率;

μ 为载流子的迁移率, 即单位电场下载流子的运动速度。

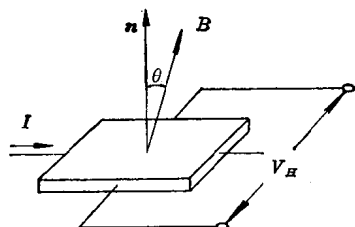
一般电子的迁移率大于空穴的迁移率, 因此制作霍尔元件时大多采用 N 型半导体材料。若设:

$$K_H = R_H/d = -1/ned \quad (1-10)$$

将(1-10)式代入(1-8)式, 则:

$$V_H = K_H IB \quad (1-11)$$

K_H 就称为元件的灵敏度, 这是一个重要的参数, 它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流时的霍尔输出大小, 其单位是 $[mV/mA \cdot kGs]$ 。一般要求它愈大愈好。(1-11)式告诉我们: 由于金属的电子浓度很高, 所以它的霍尔系数或灵敏度都不大, 因此不适宜制作霍尔元件。此外元件的厚度 d 愈薄, 灵敏度也愈高。所以在制作时, 往往都采用减小 d 的



办法来增加灵敏度。但也不能认为 d 愈薄愈好, 因为元件的输入和输出电阻因此会增加, 这对锗元件就往往是不希望的。

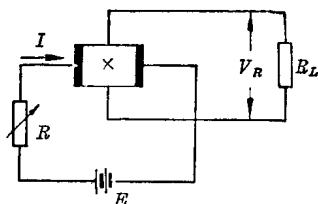
图 1-5 霍尔输出与磁场角度的关系 还须指出, 当磁感应强度 B 和元件平面法线 n 成一角度 θ 时 (见图 1-5), 实际上作用于元件的有效磁场是其法线方向的分量, 即 $B \cos \theta$, 这时的输出为:

$$V_H = K_H IB \cos \theta \quad (1-12)$$

从上式可以知道,当控制电流换向时,输出电势方向也随之变化;对磁场方向也是一样。若电流与磁场同时改变方向时,霍尔电势并不改变原来的方向。

四、基本电路形式

根据上述的霍尔效应原理,霍尔元件的基本电路形式如图 1-6 所示。控制电流由电源 E 供给, R 为调节电阻,以保证元件中得到所需要的控制电流 I 。霍尔输出端接负载 R_L , R_L 可以是一般电阻,也可以是放大器的输入电阻或表头内阻等。磁场 B 通过元件,在磁场与控制电流的作用下,负载上便得到电压。实际使用时, I 或 B 或这二者同时作为信号输入,而输出正比于 I 或 B 或二者乘积。



× 表示 B 方向指向纸面

图 1-6 霍尔元件的基本电路

第三节 霍尔元件的几何因子及效率

本节是在上一节的基础上进一步讨论霍尔效应,同时又为我们设计元件提供一定的依据。对于使用元件的读者可以不看。

一、几何因子对霍尔电势的影响^[1]

回顾上节的推导,可以发现霍尔片中霍尔电场被控制电流极短路的因素没有考虑。即把霍尔片的长 L 看作无限大。

实际上霍尔片总具有一定的长宽比 L/l , 从图 1-7 可以反映

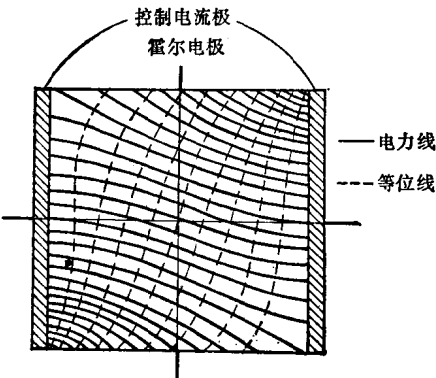


图 1-7 在磁场作用下霍尔元件的电流电位分布图

短路效应影响霍尔片内部的电位分布情况, 由于短路效应, 靠近控制电流极附近的等位线因控制电流极的短路而畸变。对于各种长宽比的霍尔片如果测试一下沿元件两侧面的霍尔电压分布, 可以得到图 1-8 所示的一簇曲线。从

此曲线可见, 无论长宽比如何, 中央处的短路影响小, 因此霍尔电势总是最大, 这正是霍尔电极选在中间的原因, 两旁, 则被控制电流极短路而趋向零。且长宽比 L/l 愈小, 霍尔电场被控制电流极短路而削弱得愈严重。

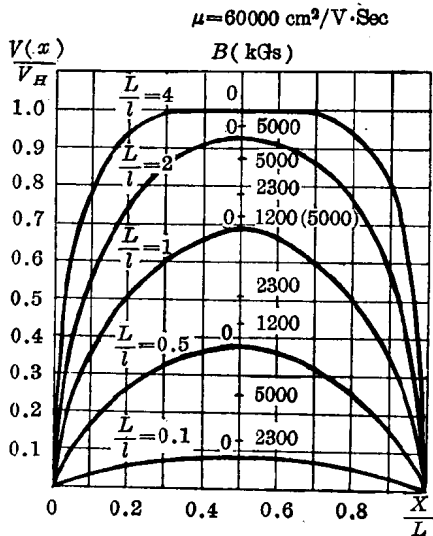
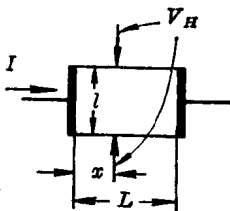


图 1-8 霍尔电势分布图

霍尔电场被短路而削弱势必造成霍尔输出减小。因此具有一定长宽比 L/l 的霍尔片,在一定磁场的作用下,霍尔输出电势的表示式中应增加一项与几何尺寸有关的因子。即:

$$V_H = (R_H/d) I \cdot B f_H(L/l, \theta) \quad (1-13)$$

式中, $f_H(L/l, \theta)$ 是与元件的几何尺寸 (L/l) 和 θ 有关的因子。

将(1-13)式写成: $f_H(L/l, \theta) = V_H / (R_H/d) \cdot I \cdot B$, 于是 $f_H(L/l, \theta)$ 也就是霍尔电势实际值和理论值的比值。这里的 θ 称为霍尔角, 它的定义为:

$$\operatorname{tg} \theta = E_H / E_I \quad (1-14)$$

式中, E_H 为霍尔电场(输出开路);

E_I 为控制电流极电场。

不难证明:

$$\operatorname{tg} \theta = \mu B \quad (1-15)$$

霍尔角的大小反映了霍尔效应的强弱。对一定的材料, 磁场愈强, 霍尔角也愈大。

不同磁场的情况下, $f_H(L/l)$ 的关系见图 1-9。可以想象, 磁场愈强(即 θ 愈大), 短路效应的影响将愈小。因此, 图中对同样的 L/l , θ 愈大, f_H 就愈大。在 $L/l > 2$ 时, f_H 趋于 1。这说明霍尔电压因短路受到的损失已很小了。在实际设计元件时, 取

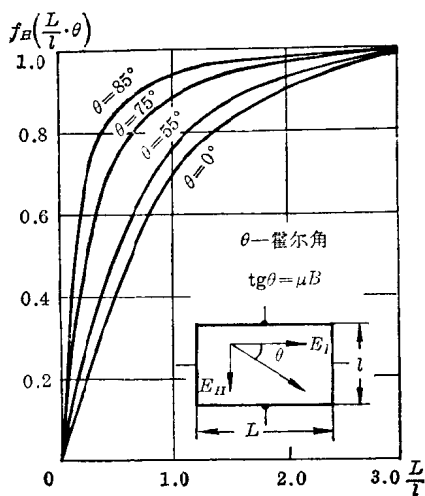


图 1-9 $f_H(L/l, \theta)$ 曲线

$L/l=2$ 已足够了, L/l 过大反而使输入功耗增加, 从而降低了元件的效率。

进一步研究表明, 霍尔电极的大小对霍尔电势的输出也会带来一定的影响。见图 1-10 所示, S 为霍尔电极的宽度。当 S/L 愈小时, 其输出线性愈好。现在生产的元件大多数要求 $S/L < 0.1$ 。图中, 曲线的弯曲部分在 $2 \sim 4 \text{ kGs}$ (千高斯) 左右。

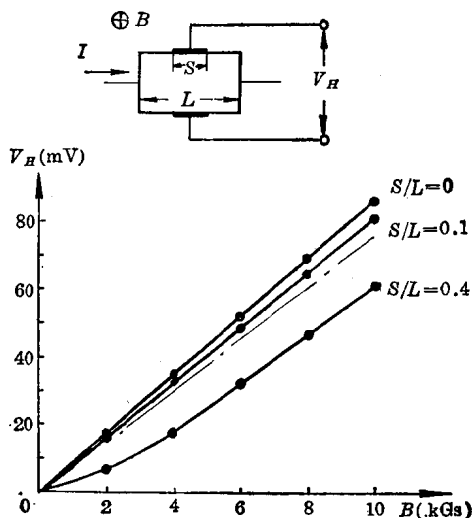


图 1-10 霍尔电极的大小对输出的影响

二、最大允许控制电流及最大磁感应强度灵敏度

实际使用元件时, 总希望得到较大的霍尔输出讯号。那么, 是否能通过增加控制电流来增加霍尔输出呢? 实际上元件的正常工作温度有一定的范围, 控制电流将受到温升的限制。设元件允许的温升为 ΔT (ΔT 的选取可参考本章第五

节),则在单位时间里,通过元件两个表面所散失的热量(对应于功率)为:

$$Q_1 = 2KL\Delta T \quad (1-16)$$

式中, K 为散热系数(瓦特/厘米²·度)。

在输出端开路时元件上所消耗的电功率:

$$Q_2 = I^2 R_l = LI^2 / \sigma ld \quad (1-17)$$

式中, R_l 为控制电流端的内阻;

σ 为电导率,即电阻率的倒数。

在热平衡时, $Q_1 = Q_2$ 。即:

$$2K \cdot l \cdot L \Delta T = LI^2 / \sigma ld \quad (1-18)$$

由此得到的电流即为最大允许控制电流,

$$I_{\max} = l \sqrt{2K d \sigma \Delta T} \quad (1-19)$$

上式说明,对于一定材料和一定尺寸的元件,控制电流最多能取多大决定于散热系数及允许的温升。

将(1-19)式代入(1-13)式,即得元件的(在最大允许电流时的)最大开路霍尔输出电势:

$$V_{H\max} = \mu B l f_H \sqrt{2K \Delta T / \sigma d} \quad (1-20)$$

定义 $V_{H\max} / B$ 为元件的最大磁感应强度灵敏度,则:

$$\begin{aligned} V_{H\max} &= l f_H \sqrt{2K R_H \mu \Delta T / d} \\ &= f_H \cdot \mu \cdot \rho^{1/2} \cdot \sqrt{Q_1 \cdot l / L \cdot d} \end{aligned} \quad (1-21)$$

上式说明了,在相同的几何形状和相等的功耗情况下,不同材料制成的元件,在单位磁感应强度下霍尔输出的最大值仅仅取决于 $\mu \rho^{1/2}$,即材料本身的性质。

三、最大输出功率及效率

当霍尔元件接了负载后,元件的最大输出功率就与负载