

实验 18 霍耳效应法测量磁场

1879 年, 24 岁的美国物理学家霍耳 (E.H.Hall) 在研究载流导体在磁场中所受力的性质时, 发现了一种电磁效应, 即如果在电流的垂直方向加上磁场, 则在与电流和磁场都垂直的方向上将建立一个电场。这一效应称为霍耳效应。由于这种效应对一般材料而言很不明显, 因而长期未得到实际应用。20 世纪 50 年代以来, 随着半导体工艺和材料的发展, 先后制成了有显著霍耳效应的材料, 如 N 型锗、铋化钢、磷砷化钢等, 对这一效应实际应用的研究随之增加, 其中比较突出的是用它来测量磁场。用霍耳元件作探头制成的磁场测量仪器, 其测量范围宽、精度高, 且频率响应宽。既可测大范围的均匀场, 也可测不均匀场或某点的磁场。

霍耳元件是一种利用霍耳效应通过把磁信号形式转变为电信号形式以实现信号检测的半导体器件。具有响应快、工作频率高、功耗低等特点。集成开关型霍耳传感器是将霍耳器件、硅集成电路、放大器、开关三极管集成在一起的一种单片集成传感器, 可作为开关电路满足自动控制 and 检测的要求, 如应用于转速测量、液位控制、液体流量检测、产品计数、车辆行程检测等, 它在物理实验的周期测量中也有许多应用。

通过研究霍耳效应还可测得霍耳系数, 由此能判断材料的导电类型、载流子浓度及载流子迁移率等重要参数, 因此霍耳效应也是研究半导体材料的一个重要实验。

【预习提要】

- (1) 什么是霍耳效应?什么是霍耳系数?什么是霍耳元件的灵敏度?
- (2) 为什么霍耳效应可以测磁场?通过哪些物理量的测量来对磁场进行测量?
- (3) 霍耳效应测量磁场装置怎样使用?应当注意些什么?
- (4) 本实验可采取什么方法消除副效应的影响?

【实验要求】

- (1) 了解霍耳效应的机理和霍耳元件的性能。
- (2) 学习用霍耳元件测量磁场的实验方法。
- (3) 学习一种消除系统误差的方法 (异号法)。

【实验目的】

测量长直螺线管轴线上的磁感应强度。

【实验器材】

霍耳效应测磁场装置, 稳压电源, 数字毫伏表 (或箱式电势差计), 直流毫安表等。

【实验原理】

(一) 霍耳效应现象

将一块半导体（或金属）薄片放在磁感应强度为 B 的磁场中，并让薄片平面与磁场方向（如 Y 方向）垂直。如在薄片的横向（ X 方向）加一电流强度为 I_H 的电流，那么在与磁场方向和电流方向垂直的 Z 方向将产生一电动势 U_H 。

如图 3-18-1 所示，这种现象称为霍耳效应， U_H 称为霍耳电压。霍耳发现，霍耳电压 U_H 与电流强度 I_H 和磁感应强度 B 成正比，与磁场方向薄片的厚度 d 反比，即

$$U_H = R \frac{I_H B}{d} \quad (3-18-1)$$

式中，比例系数 R 称为霍耳系数，对同一材料 R 为一常数。因成品霍耳元件（根据霍耳效应制成的器件）的 d 也是一常数，故 R/d 常用另一常数 K 来表示，有

$$U_H = K I_H B \quad (3-18-2)$$

式中， K 称为霍耳元件的灵敏度，它是一个重要参数，表示该元件在单位磁感应强度和单位电流作用下霍耳电压的大小。如果霍耳元件的灵敏度 K 知道（一般由实验室给出），再测出电流 I_H 和霍耳电压 U_H ，就可根据式

$$B = \frac{U_H}{K I_H} \quad (3-18-3)$$

算出磁感应强度 B 。

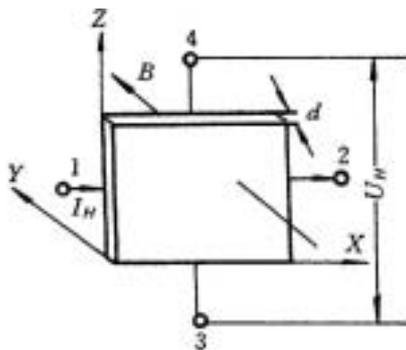


图 3-18-1 霍耳效应示意图

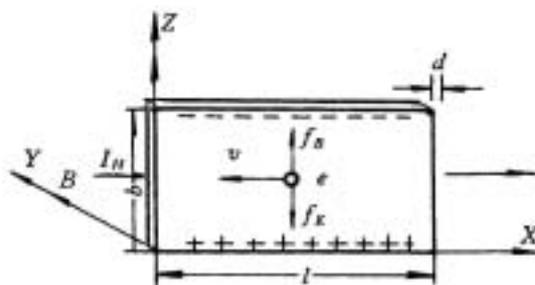


图 3-18-2 霍耳效应解释

(二) 霍耳效应的解释

现研究一个长度为 l 、宽度为 b 、厚度为 d 的 N 型半导体制成的霍耳元件。当沿 X 方向通以电流 I_H 后，载流子（对 N 型半导体是电子） e 将以平均速度 v 沿与电流方向相反的

方向运动，在磁感应强度为 B 的磁场中，电子将受到洛仑兹力的作用，其大小为

$$f_B = evB$$

方向沿 Z 方向。在 f_B 的作用下，电荷将在元件沿 Z 方向的两端面堆积形成电场 E_H （见图 3-18-2），它会对载流子产生一静电力 f_E ，其大小为

$$f_E = eE_H$$

方向与洛仑兹力 f_B 相反，即它是阻止电荷继续堆积的。当 f_B 和 f_E 达到静态平衡后，有 $f_B = f_E$ ，即 $evB = eE_H = eU_H/b$ ，于是电荷堆积的两端面（ Z 方向）的电势差为

$$U_H = vbB \quad (3-18-4)$$

通过的电流 I_H 可表示为

$$I_H = -nevbd$$

式中 n 是电子浓度，得

$$v = -\frac{I_H}{nebd} \quad (3-18-5)$$

将式 (3-18-5) 代入式 (3-18-4) 可得

$$U_H = -\frac{I_H B}{ned}$$

可改写为

$$U_H = R \frac{I_H B}{d} = KI_H B$$

该式与式 (3-18-1) 和式 (3-18-2) 一致， $R = -\frac{1}{ne}$ 就是霍尔系数。

（三）霍尔元件副效应的影响及其消除

1. 霍尔元件的副效应

在研究固体导电过程中，继霍尔效应之后不久又发现了厄廷豪森（Etinghausen）、能斯特（Nernst）和里纪—勒杜克（Righi-Leduc）效应，它们都归属于热磁效应。

（1）厄廷豪森效应

1887 年厄廷豪森发现，由于载流子的速度不相等，它们在磁场的作用下，速度大的受到洛仑兹力大，绕大圆轨道运动；速度小的则绕小圆轨道运动，这样导致霍尔元件的一端较另一端具有较多的能量而形成一个横向的温度梯度。因而产生温差电效应，形成电势差，

记为 U_E 。其方向决定于 I_H 和磁场 B 的方向，并可判断 U_E 与 U_H 始终同向。

(2) 能斯特效应

如图 3-18-3 所示，由于输入电流端引线的焊接点 a 、 b 处的电阻不相等，通电后发热程度不同，使 a 和 b 两端之间存在温度差，于是在 a 和 b 之间出现热扩散电流。在磁场的作用下，在 c 、 e 两端出现了横向电场，由此产生附加电势差，记为 U_N 。其方向与 I_H 无关，只随磁场方向而变。

(3) 里纪—勒杜克效应

由于热扩散电流的载流子的迁移率不同，类似于厄廷豪森效应中载流子速度不同一样，也将形成一个横向的温度梯度，以产生附加电势差，记为 U_{RL} 。其方向只与磁场方向有关，且与 U_H 同向。

2. 不等势电势差

不等势电势差是由于霍尔元件的材料本身不均匀，以及电压输入端引线在制作时不可能绝对对称地焊接在霍尔片的两侧所引起的，如图 3-18-4 所示。因此，当电流 I_H 流过霍尔元件时，在电极 3、4 之间也具有电势差，记为 U_0 ，其方向只随 I_H 方向不同而改变，与磁场方向无关。

3. 副效应的消除

根据以上副效应产生的机理和特点，除 U_E 外，其余的都可利用异号法消除其影响，因

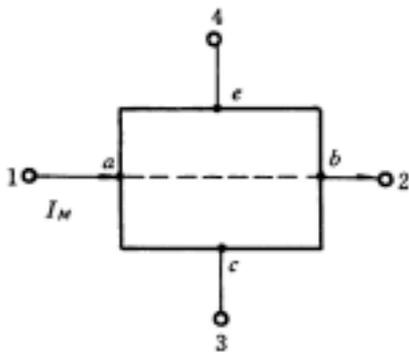


图 3-18-3 能斯特效应

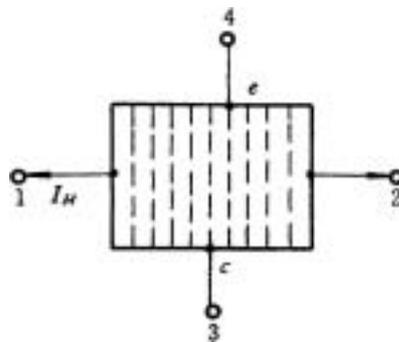


图 3-18-4 不等势电势差

而需要分别改变 I_H 和 B 的方向，测量四组不同的电势差，然后作适当的数据处理，而得到

U_H 。

取 $+B$ 、 $+I_H$ 测得

$$U_1 = U_H + U_E + U_N + U_{RL} + U_0$$

取 $+B$ 、 $-I_H$ 测得

$$U_2 = -U_H - U_E + U_N + U_{RL} - U_0$$

取 $-B$ 、 $-I_H$ 测得

$$U_3 = U_H + U_E - U_N - U_{RL} - U_0$$

取 $-B$ 、 $+I_H$ 测得

$$U_4 = -U_H - U_E - U_N - U_{RL} + U_0$$

消去 U_N 、 U_{RL} 和 U_0 得

$$U_H = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 + U_3 - U_4) - U_E$$

因 $U_E \ll U_H$ ，一般可忽略不计，所以

$$U_H = \frac{1}{4}(U_1 - U_2 + U_3 - U_4) \quad (3-18-6)$$

【实验内容】

(1) 研究长直螺线管轴线上的磁场分布。要求工作电流 I_H 和励磁电流 I_N 都固定，并让 $I_M = 500 \text{ mA}$ ，逐点（约 10 个点）测试霍尔电压 U_H ，记下 I_H 和 K 的值，同时记录长直螺线管的长度和匝数。

(2) 研究励磁特性。固定 I_H 和霍尔元件在轴线上的位置（如在螺线管中心），改变 I_M ，测量相应的 U_H 。

* (3) 研究 $I_H \sim U_H$ 特性。 I_M 保持不变（例如 $I_M = 500 \text{ mA}$ ），将霍尔元件置于螺线

管轴线中心附近, 改变 I_H , 测量相应的 U_H 。

* (4) 利用异号法消除副效应, 测量霍尔灵敏度 K (设 $I_H < 10.0 \text{ mA}$, $I_M = 500 \text{ mA}$, $X = 10.0 \text{ cm}$)。

【数据处理】

(1) 根据式 (3-18-3) 计算 B 值, 在坐标纸上绘制 $B \sim X$ 曲线, 分析螺线管内磁场的分布规律。

(2) 把记录的螺线管长度 L 、直径 D 、匝数 n 和励磁电流 I 代入计算长直螺线管磁感应强度 B 的公式即 $B = \frac{\mu_0}{2} nI(\cos \beta_2 - \cos \beta_1)$ 中算出 B 的理论值 (参见实验 16), 并将其与在螺线管中心处的实验值比较, 分析误差原因。

(3) 绘制 $I_M \sim B$ 曲线, 分析励磁电流与磁感应强度的关系。

(4) 绘制 $I_H \sim U_H$ 曲线, 分析工作电流 I_H 与霍尔电压 U_H 的关系。

(5) 将实际测量的霍尔灵敏度 K 值与实验室给出的值进行比较, 分析异号法的作用。

【注意事项】

(1) 霍尔元件质脆、引线易断, 实验时要注意不要碰触或振动霍尔探头 (霍尔元件)。

(2) 霍尔元件的工作电流 I_H 有一额定值, 超过额定值后会因发热而烧毁, 实验时要注意实验室给出的额定值, 一定不要超过。

(3) 螺线管励磁电流额定值为 1 A , 为避免过热和节约用电, 在不测量时应立即断开电源。

【思考题】

(1) 霍尔元件都用半导体材料制成而不用金属材料, 为什么?

(2) 为提高霍尔元件的灵敏度将采用什么办法?

(3) 本实验中怎样消除副效应的影响? 还有什么实验中采用类似方法去消除系统误差?