

实验 4.7 霍尔效应与磁场测量

置于磁场中的载流体，如果电流方向与磁场垂直，则在垂直于电流和磁场的方向会产生一附加的横向电场，这个现象是霍普斯金大学研究生霍尔 1879 年发现的，霍尔的发现在当时震动了科学界，这种效应被称为霍尔效应。

随着半导体物理学的迅速发展，霍尔系数和电导率的测量已成为研究半导体材料的主要方法之一。通过实验测量半导体材料的霍尔系数和电导率可以判断材料的导电类型、载流子浓度、载流子迁移率等主要参数。若能测量霍尔系数和电导率随温度变化的关系，还可以求出半导体材料的杂质电离能和材料的禁带宽度。如今，霍尔效应不但是测定半导体材料电学参数的主要手段，而且随着电子技术的发展，利用该效应制成的霍尔器件，由于结构简单、频率响应宽（高达 10GHz）、寿命长、可靠性高等优点，已广泛用于非电量测量、自动控制和信息处理等方面。

霍尔效应发现一百多年来，在基础和应用研究范围不断扩展壮大，反常霍尔效应、自旋霍尔效应、轨道霍尔效应、整数量子霍尔效应、分数量子霍尔效应、反常量子霍尔效应、量子自旋霍尔效应等相继被发现，并构成了一个庞大的霍尔效应家族。此领域的相关研究也被多次授予诺贝尔物理学奖：量子霍尔效应-1985 年诺贝尔物理学奖，分数量子霍尔效应-1998 年诺贝尔物理学奖。

【开篇设问】

1. 霍尔效应在基础研究和应用研究方面有什么价值？
2. 如何利用实验室提供的仪器测量半导体材料的霍尔系数？
3. 怎样判断霍尔元件载流子的类型，计算载流子的浓度和迁移速率？
4. 伴随霍尔效应有那些副效应？如何消除？
5. 如何利用霍尔效应原理测量磁场？
6. 如何利用霍尔元件进行非电磁的物理量的测量？
7. 若磁场的法线不恰好与霍尔元件片的法线一致，对测量结果会有何影响？如何用实验的方法判断 B 与元件法线是否一致？
8. 能否用霍尔元件片测量交变磁场？

【实验目的】

1. 通过实验掌握霍尔效应基本原理，了解霍尔元件的基本结构；
2. 学会测量半导体材料的霍尔系数、电导率、迁移率等参数的实验方法和技术；
3. 学会用“对称测量法”消除副效应所产生的系统误差的实验方法。
4. 学习利用霍尔效应测量磁感应强度 B 及磁场分布。

【实验原理】

一、霍尔效应原理

霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力作用而引起的偏转。当带电粒子（电子或空穴）被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直电流和磁场的方向上产生正负电荷的聚积，从而形成附加的横向电场 E_H 。对于图 4.7—1 所示的半导体试样，若在 X 方向通以电流 I_s ，在 Z 方向加磁场 B ，则在 Y 方向即试样 A、A' 两侧就开始聚积异号电荷而产生相应的附加电场。电场的指向取决于试样的导电类型。对图 4.7—1 (a) 所示的 N 型试样，霍尔电场 E_H 朝下，图 4.7—1 (b) 所示的 P 型试样 E_H 朝上。

显然，该电场是阻止载流子继续向侧面偏移，当载流子所受的横向电场力 $f_e = eE_H$ 与洛伦兹力 $f_m = evB$ 相等时，样品两侧电荷的积累就达到平衡，故有

$$eE_H = e\bar{v}B \quad (4.7-1)$$

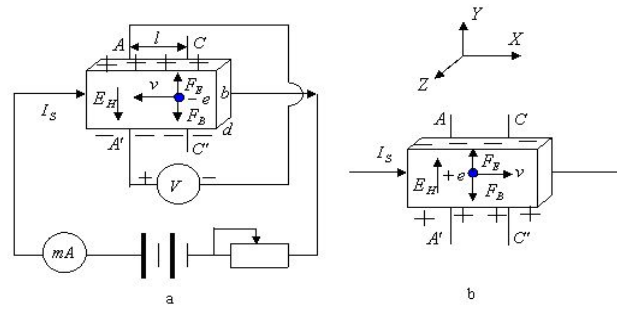


图 4.7—1. 霍尔效应原理示意图，a) 为 N 型（电子） b) 为 P 型（空穴）

其中 E_H 称为霍尔电场， \bar{v} 是载流子在电流方向上的平均漂移速度。设试样的宽度为 b ，厚度为 d ，载流子浓度为 n ，则

$$I_s = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{n\Delta l b d e}{\Delta t} = ne\bar{v}bd \quad (4.7-2)$$

由 (4.7-1)、(4.7-2) 两式可得：

$$V_H = E_H \cdot b = \frac{1}{ne} \cdot \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (4.7-3)$$

比例系数 $R_H = 1/ne$ 称为霍尔系数，它是反映材料霍尔效应强弱的重要参数。

$$R_H = \frac{V_H \cdot d}{I_s \cdot B} \times 10^8 \quad (4.7-4)$$

上式中的 10^8 是由于磁场强度 B 用电磁单位（高斯）而其它各量均采用 C、G、S 实用单位而引入。

应该指出，这个关系式是假定所有载流子都具有相同的漂移速度得到的，如果考虑载流子的速度统计分布，需引入 $3\pi/8$ 的修正因子（可参阅黄昆、谢希德著《半导体物理学》）。

根据霍尔系数 R_H 可进一步确定以下参数。

1. 由 R_H 的符号（或霍尔电压的正负）判断样品的导电类型。
2. 由 R_H 求载流子浓度 n ，即

$$n = \frac{1}{|R_H| \cdot e} \quad (4.7-5)$$

3. 结合电导率的测量，求载流子的迁移率 μ 。

电导率 σ 与载流子浓度 n 以及迁移率 μ 之间有如下关系

$$\sigma = ne\mu \quad (4.7-6)$$

即 $\mu = |R_H| \cdot \sigma$ ，测出 σ 值即可求 μ 。

电导率 σ 可以通过在零磁场下，测量 A、C 电极间的电位差为 V_{AC} ，由下式求得 σ 。

$$\sigma = \frac{I_s}{V_{BC}} \cdot \frac{L_{AC}}{S} \quad (4.7-7)$$

根据上述可知，要得到大的霍尔电压，关键是要选择霍尔系数大（即迁移率高，电阻率 ρ 亦较高）的材料。因 $|R_H| = \mu\rho$ ，就金属导体而言， μ 和 ρ 均很低，而不良导体 ρ 虽高，但 μ 极小；因而上述两种材料的霍尔系数都很小不能用来制造霍尔器件。半导体 μ 高， ρ 适中，是制造霍尔元件较理想的材料。由于电子的迁移率比空穴迁移率大，所以霍尔元件多采用 N 型材料，其次霍尔电压的大小与材料的厚度成反比，因此薄膜型的霍尔器件的输出电压较片状要高得多，所以制作时，往往采用减少 d 的办法来增加灵敏度，但不能认为 d 愈薄愈好，因为此时元件的输入和输出电阻将会增加，这对霍尔元件是不希望的。

就霍尔器件而言，其厚度是一定的，所以实用上采用 $K_H = R_H/d$ 来表示器件的灵敏度， K_H 称为霍尔灵敏度，单位为 $\text{mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$

二、实验中的副效应及其消除方法：

在产生霍尔效应的同时，因伴随着多种副效应，以致实验测得的霍尔电极 A、A' 之间的电压为 V_H 与各副效应电压的叠加值，因此必须设法消除。

(1) 不等势电压降 V_0

如图 4.7-2 所示，由于测量霍尔电压的 A、A' 两电极不可能绝对对称地焊在霍尔片的两侧，位置不在同一个理想的等势面上，因此，即使不加磁场，只要有电流 I_s 通过，就有电压 $V_0 = I_s r$ 产生，其中 r 为 A、A' 所在的两个等势面之间的电阻，结果在测量 V_H 时，就叠加了 V_0 ，使得 V_H 值偏大，（当 V_0 与 V_H 同号）或偏小（当 V_0 与 V_H 异号）。 V_H 的符号取决于 I_s 和 B 两者的方向，而 V_0 只与 I_s 的方向有关，而与磁感应强度 B 的方向无关，因此 V_0 可以通过改变 I_s 的方向予以消除。

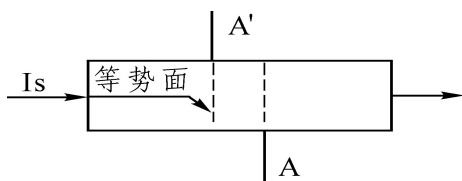


图 4.7-2

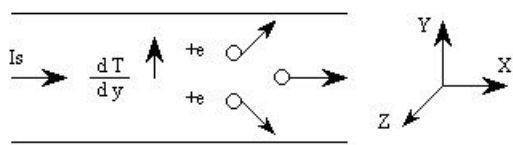


图 4.7-3

(2) 爱廷豪森效应—热电效应引起的附加电压 V_E

从微观来看,当霍尔电压达到一个稳定值 V_H 时,速度为 v 的载流子的运动达到动态平衡。但实际上载流子迁移速率服从统计分布规律,构成电流的载流子速度不同,若速度为 v 的载流子所受的洛伦兹力与霍尔电场的作用力刚好抵消,则速度小于 v 的载流子受到的洛伦兹力小于霍尔电场的作用力,将向霍尔电场作用力方向偏转,速度大于 v 的载流子受到的洛伦兹力大于霍尔电场的作用力,将向洛伦兹力方向偏转。因而速度大的载流子会聚集在半导体材料的一侧,而速度小的载流子聚集在另一侧,又因速度大的载流子的能量大,所以速度大的粒子聚集的一侧温度高于另一侧。由于测量电极和半导体两者材料不同,电极和半导体之间形成温差电偶,这一温差产生温差电动势 V_E ,这种由于温差而产生电势差的现象称为爱廷豪森效应。如图 4.7-3 所示。这种效应的建立需要一定的时间,如果采用直流电则由于爱廷豪森效应的存在而给霍尔电压的测量带来误差,如果采用交流电,则由于交流变化快使得爱廷豪森效应来不及建立,可以减小测量误差,因此在实际应用霍尔元件片时,一般都采用交流电。由于 V_E 的大小和正负号与 I_s 、 B 的大小和方向有关,跟 V_H 与 I_s 、 B 的关系相同,所以不能在测量中用改变 I_s 和 B 方向的方法予以消除,但其引入的误差很小,可以忽略。

(3) 能斯托效应—热磁效应直接引起的附加电压 V_N

在半导体试样上引出测量电极时,不可能做到接触电阻完全相同。当工作电流 I_s 通过不同接触电阻时会产生不同的焦耳热,并因温差产生一个温差电动势,此电动势又产生温差电流 Q (称为热电流),热电流在磁场的作用下将发生偏转,结果在 Y 方向产生附加电势差 V_N ,这就是能斯托效应。而 V_N 的符号只与 B 的方向有关,与 I_s 的方向无关,因此可通过改变 B 的方向予以消除。

(4) 里纪—勒杜克效应—热磁效应产生的温差引起的附加电压 V_{RL}

因载流子的速度统计分布,由能斯托效应产生的 X 方向热扩散电热电流也有爱廷豪森效应,在 Z 的方向磁场 B 作用下,将在 Y 方向产生温度梯度 dT/dy' ,此温差在 Y 方向产生附加温差电动势 V_{RL} 。 V_{RL} 的符号只与 B 的方向有关,亦能消除。

综上所述,实验中测得的 A 、 A' 之间的电压除 V_H 外还包含 V_O 、 V_N 、 V_{RL} 和 V_E 各电压的代数和,其中 V_O 、 V_N 和 V_{RH} 均通过改变 I_s 和 B 方向的方法予以消除。具体方法是在规定了电流和磁场正、反方向后,分别测量由下列四组不同方向的 I_s 和 B 的组合的 A 、 A' 之间的电压。

- | | |
|--------------------|---|
| ① 当 $(+I_s, +B)$ 时 | $V_1 = V_H + V_O + V_N + V_{RL} + V_E$ |
| ② 当 $(+I_s, -B)$ 时 | $V_2 = -V_H + V_O - V_N - V_{RL} - V_E$ |
| ③ 当 $(-I_s, -B)$ 时 | $V_3 = V_H - V_O - V_N - V_{RL} + V_E$ |
| ④ 当 $(-I_s, +B)$ 时 | $V_4 = -V_H - V_O + V_N + V_{RL} - V_E$ |

求以上四组数据 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 可得

$$V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (4.7-8)$$

由于 V_E 符号与 I_s 和 B 两者方向关系和 V_H 是相同的,故无法消除,但在非大电流,非强磁场

下, $V_H \gg V_E$, 因此 V_E 可略而不计, 所以霍尔电压为:

$$V_H \approx \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} \quad (4.7-9)$$

此方法称为“对称测量法”。

三、利用霍尔效应原理测量磁场

利用霍尔效应测量磁场是霍尔效应原理的典型应用。若已知材料的霍尔系数 R_H , 根据 (4.7-3) 式, 通过测量霍尔电压 V_H , 即可测得磁场。其关系式是:

$$B = \frac{V_H \cdot d}{I_S \cdot R_H} = \frac{V_H}{I_S K_H} \quad (4.7-10)$$

【实验仪器】

TH-H 型霍尔效应实验组合仪由测试平台和测试仪两部分组成。



图 4.7-5 TH-H 型霍尔效应实验组合仪

1. 测试平台: 含霍尔样品和样品架; 电磁铁 (含励磁电流线圈); 三个双刀双掷开关分别控制霍尔元件的工作电路、测量电路和励磁电路。

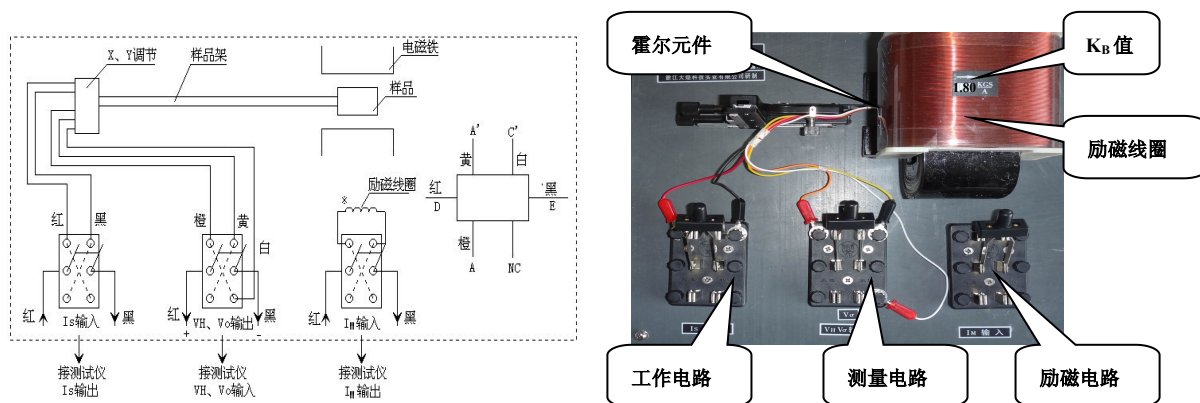


图 4.7-6 测试平台示意图

(1) 电磁铁

规格为 $>3.00 \text{ KGS/A}$, 磁铁线包的引线有星标者为头 (见实验仪上图示), 线包绕向为顺时针 (操作者面对实验仪) 根据线包绕向及励磁电流 I_M 流向, 可确定磁感应强度 B 的方向, 而 B 的大小与励磁电流 I_M 的关系由制造厂家给定并标明在实验仪上 (K_B 值)。

(2) 测试样品类型及尺寸:

霍尔片类型: N 型半导体硅单晶片

样品尺寸：

厚度 $d=0.5\text{mm}$ ，

宽度 $b=4.0\text{mm}$ ，

A、C 电极间距 $l=3.0\text{mm}$ 。

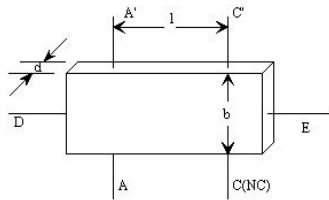


图 4.7-7 样品示意图

2. 测试仪：由励磁恒流源 I_M ，样品工作恒流源 I_S ，数字电流表，数字毫伏表等单元组成。

(1) “ I_S 输出” 为 $0\sim 10\text{mA}$ 样品工作电流源，“ I_M 输出” 为 $0\sim 1\text{A}$ 励磁电流源。

两组电流源彼此独立，两路输出电流大小通过 I_S 调节旋钮及 I_M 调节旋钮进行调节，二者均连续可调。其值可通过“测量选择”按键由同一只数字电流表进行测量，按键测 I_M ，放键测 I_S 。



图 4.7-8 测试面板图

(2) 直流数字电压表

V_H 和 V_o 通过功能切换开关由同一只数字电压表进行测量。电压表零位可通过调零电位器进行调整。当显示器的数字前出现 “-” 号时，表示被测电压极性为负值。

【实验内容】

1. 恒定磁场，保持 I_M 不变（取 $I_M=0.45\text{A}$ ），测绘 V_H-I_S 曲线（ I_S 取 $1.00, 1.50, \dots, 4.50\text{mA}$ ）

表 1 测绘 V_H-I_S 实验曲线数据记录表 $I_M=0.45\text{A}$

I_S (mA)	V_1 (mV)		V_2 (mV)		V_3 (mV)		V_4 (mV)		V_H (mV)
	+ I_S	+B	+ I_S	-B	- I_S	-B	- I_S	+B	
1.00									
1.50									
...									
4.50									

2. 恒定工作电流，保持 I_S 不变（取 $I_S=4.50\text{mA}$ ），测绘 V_H-I_M 曲线（ I_M 取 $0.100, 0.200, \dots, 0.450\text{A}$ ），表格设计参阅表 1。

3. 在零磁场下（即 $I_M=0$ ），测量 V_{AC} （即 V_σ ）。（ I_S 取 $0.10, 0.20, 0.30, \dots, 1.00\text{mA}$ ）

数据记录参考表格 2

$I_S(\text{mA})$	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
$V_{AC}(\text{mV})$										

4. 根据实验所测得的霍尔样品的霍尔系数 R_H （或霍尔元件的灵敏度 K_H ），测量电磁铁铁芯之间的空隙处的磁场分布。如图 4.7-9 所示，分别沿 X、Y 两个方向调节霍尔元件的位置，可分别测量该区域磁场沿 X、Y 两个方向的分布情况。

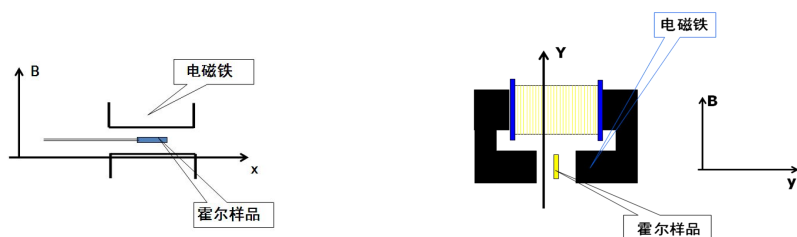


图 4.7-9 利用霍尔效应测量电磁铁的磁场分布

【数据处理】

- (1) 根据测量数据绘制规范的 V_H-I_s 和 V_H-I_M 特征曲线（直线）用最小二乘法计算 V_H-I_s 和 V_H-I_M 直线斜率，由此计算霍尔系数 R_H 和载流子浓度 n ，并估算其不确定度。
- (2) 用最小二乘法计算 I_s-V_{AC} 直线斜率由此计算电导率 σ 和载流子的迁移率 μ ，并估算其不确定度。
- (3) 根据图 4.7-9 所示，简述测量磁场分布原理，设计表格测量并记录实验数据，作出 $B-x$ （或 $Y-x$ ）分别曲线。

【拓展内容】

1. 自行设计一个实验方案，用霍尔元件判断任意通电线圈产生的磁场方向，测量其空间磁场分布。
2. 用实验室的现有设备和器材设计一个测量位移的简单装置，并对测量结果进行数据拟合，给出经验公式。
3. 提出一种利用霍尔效应测定非电磁学量的设计方案。

【参考文献】

1. H.F.迈纳斯等主编，《普通物理实验》，科学出版社，1987 年
2. 熊永红等主编，《大学物理实验》，华中科技大学出版社，2004 年
3. 谢行恕等主编，《大学物理实验》第二册，高教出版社，2001 年
4. Murakami S, Nagaosa N, Zhang S C., Science, 2003, 301:1348
5. Sinova J et al., Phys. Rev. Lett. , 2004, 92: 126603
6. CulcerD et al. Phys. Rev. Lett. , 2004, 93: 046602