哈爾濱工業大學(深圳)
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

霍尔效应
(The Hall Effect)

大学物理实验 II
(University Physics Experiments)

Outline

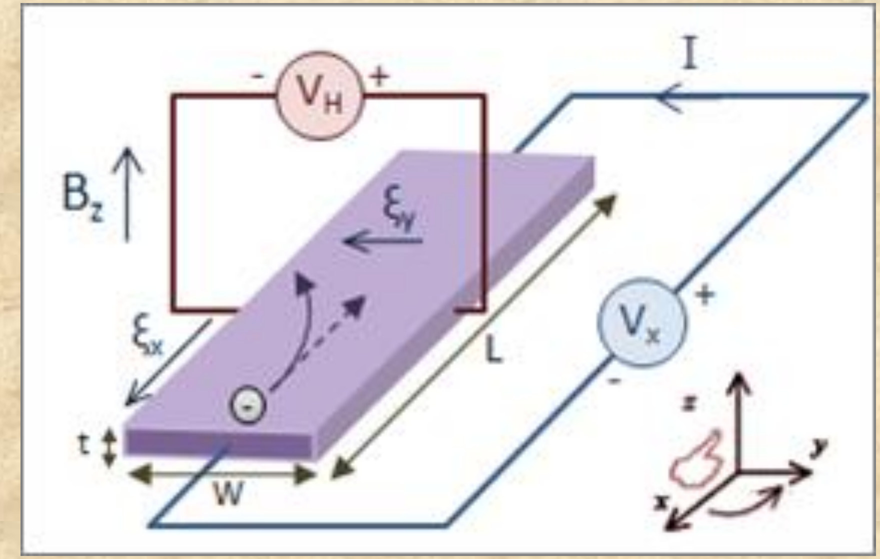
- Introduction
- Applications
- 实验任务
- 操作要点
- 注意事项
- 报告要求
- 讨论题

Introduction

- Discovered by
  - Edwin Hall, "On a New Action of the Magnet on Electric Currents", *American Journal of Mathematics* **2**, 3, 287–92 (1879)
  - While working on his doctoral degree
  - 18 years prior to the discovery of the electron.

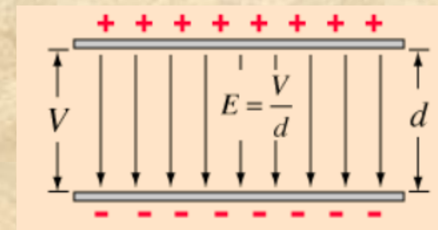
Introduction

- The Hall effect: production of a voltage difference U_H (the Hall voltage) across a conductor (sample) that is transverse to an applied electric current I_H **and** to an applied magnetic field $B(I_M)$ perpendicular to I_H.
- The Lorentz force: $\boldsymbol{F} = e\,[\boldsymbol{E} + (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})]$

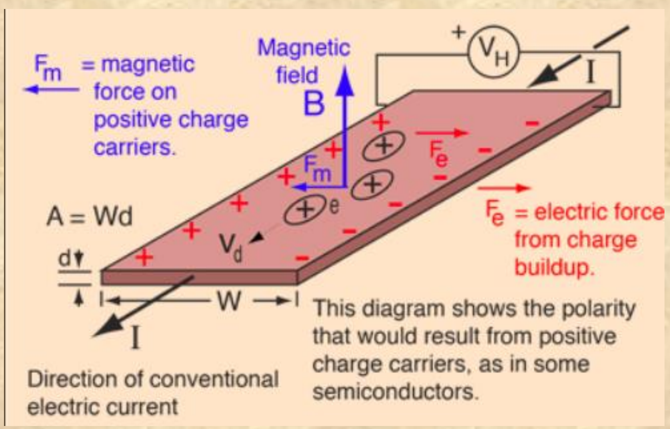


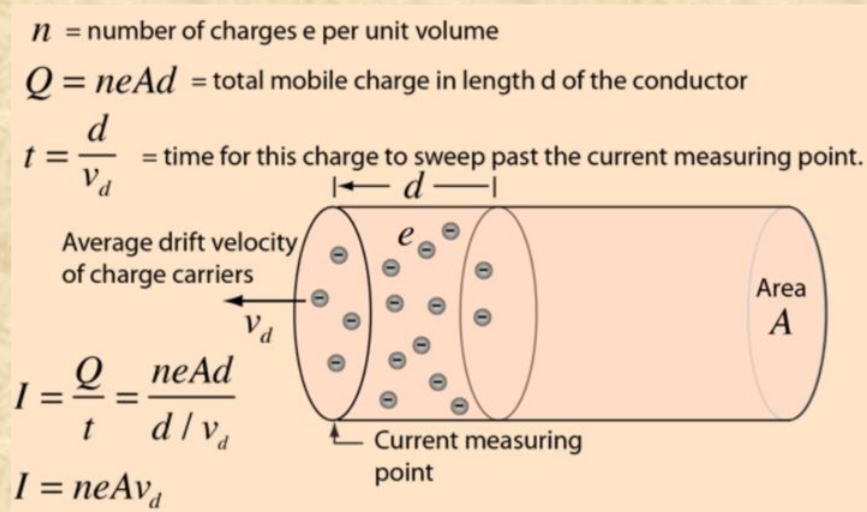
Introduction

- The magnetic force is $\boldsymbol{F}_m = e\boldsymbol{v}_d\boldsymbol{B}$ where $\boldsymbol{v}_d$ is the drift velocity



$F_m = F_e = V_H e/W$



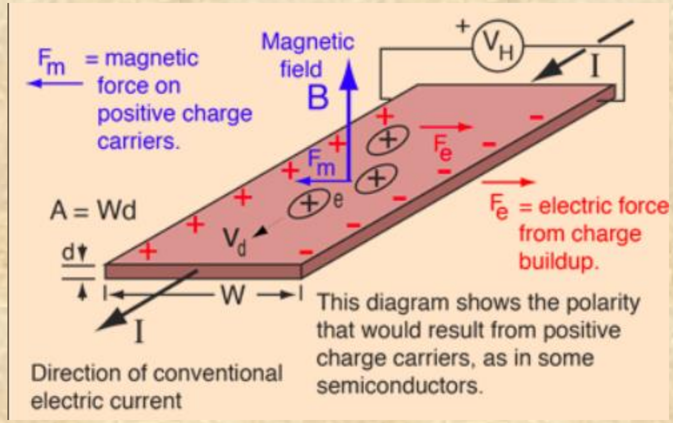


- The Hall Voltage is:

  $V_H = I_S B/ned$, where n is the number of charge carriers（载荷子）and e is the electron charge

Introduction

- The Hall coefficient is defined as $R_H = dV_H / IB$
- Substituting, $R_H = -1 / ne$, $K_H = -1 / ned$
- The Hall effect is very useful to measure:
  - Carrier density （载荷子密度）
  - Type of charge carrier
    - Electrons?
    - Holes? （正离子/空穴载流子）
    - Combination?
  - Magnetic Field



Applications

- The Hall probe: measurement of large magnetic fields is often performed by making use of the Hall effect. A thin film (~100 μm) Hall probe is placed in the magnetic field (~1 T) and a transverse voltage (~1 μV) is measured.
- Example: a Cu thin film, $n = 8.47\text{x}10^{28}$ electrons/m^3

Molar mass of copper = $63.54\,gm/mol = 63.54x10^{-3}\,kg/mol = M$

Density of copper = $9\,gm/cm^3 = 9x10^3\,kg/m^3 = \rho$

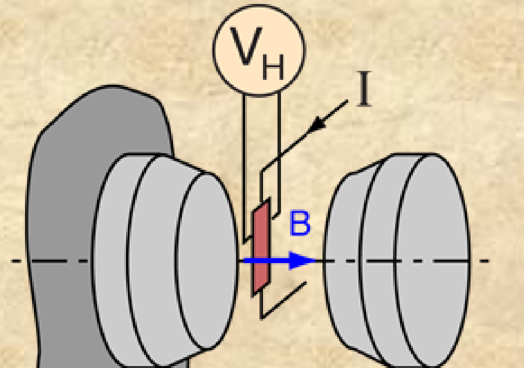
Number of free electrons per mol = Avogadro's number = $6.02x10^{23}/mol = N_A$

Number of free electrons per unit volume = n

$$n = \frac{mass/m^3 x\ \ atoms/mol}{mass/mol} = atoms/m^3$$

$$\boxed{n = \frac{\rho N_A}{M} = 8.5x10^{28}\ electrons/m^3}$$

This is a nominal value because the density of copper in electrical wiring cables varies somwhat with processing.



Hall probe between magnetic pole pieces

- For $I = 1$ A, $B = 1$ T, $d = 100\text{x}10^{-6}$ m, $V_H = 0.737\text{x}10^{-6}$ V

实验任务

$$U_H = I_H B(I_M)/ned$$

- 用“对称测量法”测量U_H-I_H曲线，计算霍尔元件灵敏度（Calculate the sensitivity of the Hall sensor via the measurement of its U_H-I_H curve）
- 用“对称测量法”测量U_H-I_M曲线，计算霍尔元件灵敏度（Calculate the sensitivity of the Hall sensor via the measurements of its U_H-I_M curve）
- 测量电磁铁气隙中磁感应强度B的大小和分布（Measure an unknown B with the calculated I_H and U_H values）

操作要点

1. 实验前的操作
   - 了解仪器各部分功能，连接好线路；
   - 打开及关闭电源开关前，应将工作电流、励磁电流调节旋钮逆时针旋转到底，使电流最小；
   - 为提高霍尔元件测量的准确性，实验前应将霍尔元件预热5分钟，具体操作如下：闭合工作电流开关，断开励磁电流开关，通入工作电流5 mA，待5分钟后开始实验。

操作要点

2. 测量霍尔元件灵敏度K_H
   - 移动二维移动尺，使霍尔元件处于电磁铁气隙中心位置；
   - 设置励磁电流I_M = 300 mA，通过公式$B=C\cdot I_M$计算并记录电磁铁气隙中的磁感应强度B（C为电磁铁的线圈常数，可从仪器面板上直接读取）；
   - 自行设计调节工作电流I_H的值，要求等间隔调节，且I_H的取值区间为1.0至10.0 mA；对每个I_H的值，改变I_H和I_M的方向，测出U_H的值。要求按表1至少测量5组数据。

表 1. 霍尔电压 U_H 与工作电流 I_H 的关系

I_M = ___ mA，C = ___ mT/A，d（霍尔元件厚度）= ___ mm

I_H (mA)	U_1 (mV)	U_2 (mV)	U_3 (mV)	U_4 (mV)	$U_H = (\lvert U_1\rvert + \lvert U_2\rvert + \lvert U_3\rvert + \lvert U_4\rvert)/4$
	$+I_M, +I_H$	$-I_M, +I_H$	$+I_M, -I_H$	$-I_M, -I_H$	(mV)
⋮					

操作要点

3. 测量U_H与I_M曲线
   - 移动二维移动尺，使霍尔元件处于电磁铁气隙中心位置；
   - 设置工作电流I_H = 3.00 mA；
   - 自行设计调节励磁电流I_M的值，要求等间隔调节，且I_M的取值区间为100至1000 mA；对每个I_M的值，改变I_H和I_M的方向，测出U_H的值。要求按表2至少测量5组数据。

表 2. 霍尔电压 U_H 与励磁电流 I_M 之间的关系

I_H = ___ mA，C = ___ mT/A，d（霍尔元件厚度）= ___ mm

I_M (mA)	U_1 (mV)	U_2 (mV)	U_3 (mV)	U_4 (mV)	$U_H = (\lvert U_1\rvert + \lvert U_2\rvert + \lvert U_3\rvert + \lvert U_4\rvert)/4$ (mV)	B (mT)
	$+I_M$, $+I_H$	$-I_M$, $+I_H$	$+I_M$, $-I_H$	$-I_M$, $-I_H$		
:						

操作要点

4. 测量电磁体气隙中磁感应强度B的大小和分布
   – 设置I_M = 600 mA，I_H = 5.00 mA；
   – 调节二维移动尺的垂直标尺，使霍尔元件处于电磁铁气隙垂直方向的中心位置；
   – 调节水平标尺，从0刻度开始，改变I_H和I_M的方向，测出U_H的值；并根据K_{H2}计算出磁感应强度；要求水平位置X范围覆盖[0, 50] mm，且至少测量15个点，以达到更好地描绘磁感应强度B的分布特征。建议[0, 10]和[40, 50]每2 mm获取一个点，[15, 35]每5 mm.

表 3. 电磁铁气隙中磁感应强度 B 的分布

I_H = ___ mA，I_M = ___ mA，C = ___ mT/A

X (mm)	U_1 (mV)	U_2 (mV)	U_3 (mV)	U_4 (mV)	$U_H = (\lvert U_1\rvert + \lvert U_2\rvert + \lvert U_3\rvert + \lvert U_4\rvert)/4$ (mV)	B (mT)
	$+I_M, +I_H$	$-I_M, +I_H$	$+I_M, -I_H$	$-I_M, -I_H$		
:						

注意事项

1. 霍尔元件及二维移动尺容易折断和变形，应注意避免使其受挤压或碰撞等；
2. 为避免使电磁体因过热而影响测量精度或受损，除在短时间内读取有关数据时通以励磁电流外，其余时间最好断开励磁电流开关。

报告要求

1. 画U_H-I_H曲线，用最小二乘法计算斜率K_1，计算霍尔元件灵敏度K_{H1}；
2. 画U_H-I_M曲线，用最小二乘法计算斜率K_2，计算霍尔元件灵敏度K_{H2}；
3. 画B-X图，描述电磁铁气隙内X方向上B的分布特征。

讨论题

1. 根据B、I_H和U_H方向判断本实验霍尔片的导电类型（N或P型半导体），要求画图说明。（注：N型半导体中，载流子为电子；P型半导体中将载流子视为正离子）
2. 估算本实验所用霍尔片的载流子密度。

References

- 哈尔滨工业大学（深圳）2018年春季班大学物理实验指导书 v1.4
- C. R. Nave, Hyper Physics, http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/Hall.html#c1, retrieved on May 16, 2018
- Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect, retrieved on May 16, 2018