

文章编号: 1007-2934(2018) 03-0059-05

霍尔效应实验中一些问题的分析探讨

安盼龙 郑永秋 赵瑞娟 刘争光

(中北大学 测控技术与仪器国家级实验教学示范中心, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对霍尔效应实验教学过程中, 存在的一些教学难点, 从实验原理出发, 对实验过程中涉及到的原理、半导体材料的选取、霍尔系数的计算等关键问题进行系统讨论。通过做图及计算得到了半导体材料的各项霍尔参量。对实验教学及霍尔传感器的设计提供理论和实验指导。

关 键 词: 霍尔效应; 问题; 探讨

中图分类号: O 433; TP 212.1

文献标志码: A

DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2018.03.017

置于磁场中的带电载流体, 如果电流方向与磁场垂直, 则在垂直于磁场和电流的方向上产生一个附加的横向电场, 于 1879 年被美国物理学家霍尔所发现, 称为霍尔效应。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于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, 即霍尔电场, 已经被大量应用在传感领域^[1, 2]。1980 年, 德国教师冯·克利青发现整数量子霍尔效应。二年后, 物理学家崔琦继而发现分数量子霍尔效应, 使霍尔效应的研究成为影响物理学发展的重要实验。因为在量子霍尔态电子的运动是无能量损耗的, 可用于制备低能耗的高速电子器件, 故又使得量子霍尔器件的研究成为热点^[3]。霍尔效应实验在教学过程中比较棘手, 涉及的方面较多, 既有原理方面的问题, 又存在实验自身的测试问题。利用实验课堂有限的教学时间把各个物理学问题阐述清楚, 较难把握, 针对本次实验教学过程中存在的各项问题, 阐明各问题的来龙去脉, 为霍尔实验的教学和传感器的设计提供相应指导。

1 存在的主要问题及分析

1.1 霍尔电压形成机制及正负

载流子以电子为例进行分析:

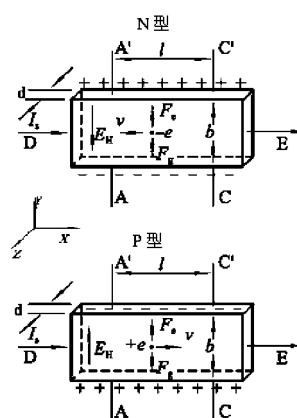


图1 样品示意图

图1中 F_g 为洛伦兹力, F_e 为霍尔电场对载流子的作用力, 洛伦兹力方向判定法: 先平摊开右手手掌, 根据矢量叉积定义判断一下 $\vec{f}_g = e\vec{v} \times \vec{B}$, 电子沿 x 轴负方向运动; 四指沿 v 的方向, 转过小于 180° 的角度, 转到 B 的方向, 此时大拇指指的方向为正电荷的受力方向; 因运动电荷带负电, 上式带有一个负号, 因此大拇指所指方向的反方向, 才是电子的受力方向。电子所受霍尔电场力 $\vec{f}_e = -E \cdot e$, 当洛伦兹力和电场力数值相等, 方向相反达到平衡: $evB = Ee$

$$\frac{V_H}{b} = \frac{I_s}{neS} \cdot B$$

$$\text{变换可得到: } V_H = R_H \cdot \frac{I_s \cdot B}{d}$$

收稿日期: 2018-01-17

基金项目: 中北大学校级教改项目

式中令 $R_H = \frac{1}{ne}$ (霍尔系数)

$$\text{故有 } R_H = \frac{V_H}{I_s} \cdot \frac{d}{B}$$

可知要获得较大的霍尔电压,在霍尔系数确定的情况下应该减小霍尔片子的厚度,加大磁场,提高平均漂移电流。

1.2 电导率公式推导

据漂移电流的积分形式

$$I_s = \int \vec{j} \cdot d\vec{s} = \vec{j} \cdot \vec{S} = j \cdot S$$

又因为

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad E = \frac{V_\sigma}{l} \quad S = bd \quad \sigma = \frac{I_s l}{V_\sigma S}$$

上式中 I_s 表示平均漂移电流, j 为电流密度, σ 表示电导率, E 表示横向电场强度(近似可认为电流方向), S 为霍尔元件的横截面积。

1.3 霍尔半导体导电类型

利用霍尔效应,来判断半导体材料的导电类型:

先建立一个直角坐标系,令其 x 轴沿着电流 I_s 的方向; z 轴沿着磁场方向;则,若霍尔电场的方向沿着 y 轴方向时,霍尔电压为正值,该元件为 P 型;反之,霍尔电压为负,该元件为 N 型。当电流 I_s 和磁感应强度 B 的值稳定时,霍尔电压 V_H 值也稳定。

N 、 P 型半导体掺杂原理:

(1) N 型半导体: 掺 5 价元素,每个 5 价元素与周围四个 Si 原子形成 4 个共价键,而多余一个电子,成为自由电子。

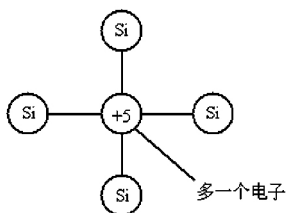


图2 N 型半导体掺杂原理图

(2) P 型半导体: 掺 3 价元素,每个 3 价元素与周围四个 Si 原子中的 3 个形成共价键,而和最后一个 Si 原子之间少一个电子,从而产生一个空穴。

使用半导体而不使用导体和绝缘体是因为半导体的霍尔效应现象明显,因其载流子浓度 n 适

中;而良导体的霍尔效应不明显,因为它的载流子浓度 n 太大, $R_H = 1/(ne)$, 所以霍尔电压太小。一般不用本征半导体的霍尔效应现象来进行测量,因为它的温度稳定性太差。

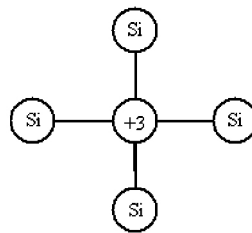


图3 P 型半导体掺杂原理图

由欧姆定律的微分形式 $\vec{j} = \sigma \vec{E}$,

$$\sigma E = nev \quad \sigma = \frac{1}{\rho} \quad v = \frac{1}{ne} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot E$$

$$R_H = \frac{1}{ne} \quad v = \frac{1}{ne} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot E \quad v = \mu \cdot E$$

最后得到 $|R_H| = \rho \cdot \mu$

金属材料中起导电作用的载流子主要是电子,迁移率较大,但是电阻率较小,故其乘积值霍尔系数不理想;对于绝缘体材料,其电阻率大,但是迁移率小,其乘积也是不理想;只有半导体材料的 ρ 、 μ 都比较适中,所以其是最佳的霍尔元件的制造材料。

1.4 霍尔系数的推导(霍尔系数的相关条件)

通过作 $V_H - I_s$ 曲线图,求出斜率 k ,代入此公式求 R_H

$$R_H = \frac{V_H \cdot d}{I_s \cdot B} = K \frac{d}{B}$$

$$K = \frac{\Delta V_H}{\Delta I_s} = \frac{V_H - 0}{I_s - 0} = \frac{V_H}{I_s}$$

$$B = K_M \times I_M$$

V_H 为霍尔电压,也即 $V_{AA'}$,为霍尔元件的厚度 b 为霍尔元件的宽度; I_s 为导体内通过的电流, B 为外加磁场的场强; R_H 单位为 $\Omega \cdot m/T$,为导出单位;电磁铁线包上有 K_M ,单位 KGS/A ,即千高斯每安培,有 $1T = 10^4 GS$ 。

1.5 对称法测量霍尔电压 V_H

因为线路中除了霍尔电压,还伴随有一些其他副效应电压产生^[4-7],影响霍尔电压的测量结果,如零点误差(固定不变的误差)、温差电动势(随温度改变其值的大小,符号始终不变)、欧姆电压(随电流方向改变值的正负),因此采用将电

流和磁场换向的对称测量法,即使 I_s 和 B 的大小不变,方向按以下方法依次做改变,测量对应的霍尔电压值:

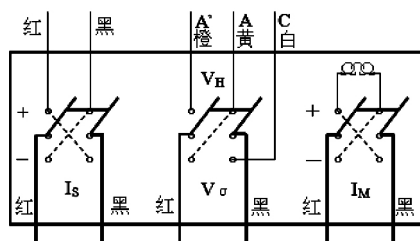


图4 实验仪面板图(双刀双掷开关)

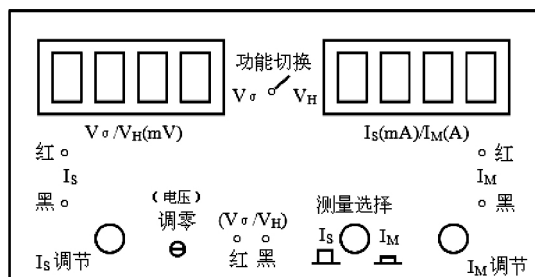


图5 测试仪面板图

$+I_s$	$+B$	V_1
$+I_s$	$-B$	V_2
$-I_s$	$-B$	V_3
$-I_s$	$+B$	V_4

然后按下式计算霍尔电压 V_H 值,这样就可基本消除附加电压,使得测量值接近于真实值, $V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$ 。对称测量法可基本消除附加电压的原因:

在本实验中, $V_1 < 0$, $V_2 > 0$, $V_3 < 0$, $V_4 > 0$;

1) 温差电动势始终同号,它的去除(假设测量时间很短,温度没有改变):

$$V_1 = (V_H + \Delta), V_2 = (-V_H + \Delta), V_3 = (V_H + \Delta), V_4 = (-V_H + \Delta)$$

所以误差以温差电动势为主的测量值,有 V_1 与 V_3 , V_2 与 V_4 两组值的绝对值各自接近的特点。

$$\frac{V_1 - V_4}{2} = \frac{(V_H + \Delta) - (-V_H + \Delta)}{2} = \frac{2V_H}{2} = V_H$$

2) 附加欧姆电压随 I_s 的方向改变而改变符号,它的去除:

$$V_1 = (V_H + U_{AB}), V_2 = (-V_H + U_{AB}), V_3 = (V_H - U_{AB}), V_4 = (-V_H - U_{AB})$$

所以误差以附加欧姆电压为主的测量值,有

V_1 与 V_4 , V_2 与 V_3 两组值的绝对值各自接近的特点。

$$\frac{V_1 + V_3}{2} = \frac{(V_H + U_{AB}) + (V_H - U_{AB})}{2} = \frac{2V_H}{2} = V_H = V_{AA}$$

1.6 励磁电流 I_M 换向调零

励磁电流 I_M 换向时,要先将 I_M 电流值调到零附近,然后再换向,原因是由于 $E = -\frac{d\phi}{dt}$

$\frac{di}{dt}$ L 很大,大于 $10H$, I 较大, dt 很小,才 $10^{-3}s$,所以 E 可以达到 $10^4 V$,可把空气击穿,所以很危险,一定要按要求操作;

另外实验中,由于要不断切换开关,实验仪的开关有时在切换的过程中不小心触碰裸露的金属柄。开关已经断开或已经接通后,用手接触开关没有事,原因是因为输出电压小于 $36 V$ (不到 $110 V$) 属于安全电压,且人体电阻比线路电阻大,电流不会通过人体导通。

2 霍尔参数计算

2.1 由 $V_H - I_s$ 图和 $V_H - I_M$ 图求霍尔系数^[8]

霍尔电压与电流及磁场的关系见图6。

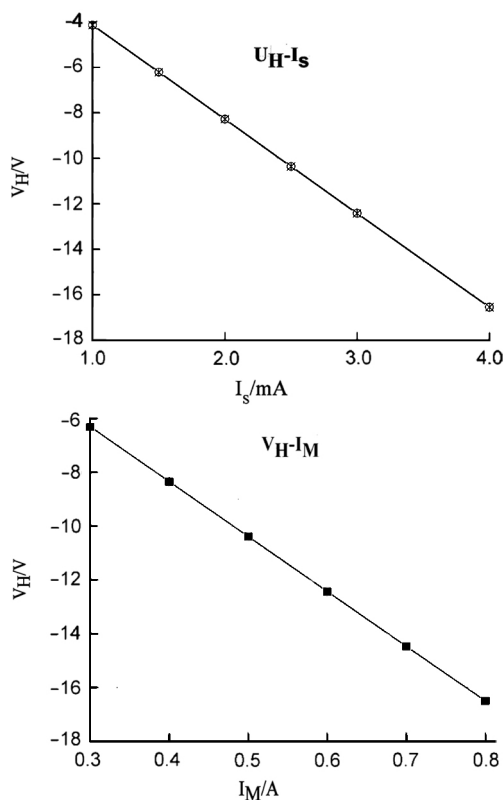


图6 霍尔电压与电流及磁场的关系

表1 V_H-I_s

I_s (mA)	V_1 /mV		V_2 /mV		V_3 /mV		V_4 /mV		$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$ /mV
	+ I_s	+B	+ I_s	-B	- I_s	-B	- I_s	+B	
1.00	-4.17		4.10		-4.10		4.19		-4.14
1.50	-6.24		6.17		-6.17		6.26		-6.21
2.00	-8.33		8.21		-8.22		8.36		-8.28
2.50	-10.43		10.28		-10.28		10.44		-10.36
3.00	-12.49		12.34		-12.34		12.52		-12.42
4.00	-16.66		16.44		-16.42		16.68		-16.55

表2 V_H-I_M

I_M /A ($I_s = 3.00$ mA)	V_1 /mV		V_2 /mV		V_3 /mV		V_4 /mV		$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$ /mV
	+ I_s	+B	+ I_s	-B	- I_s	-B	- I_s	+B	
0.300	-6.27		6.22		-6.22		6.40		-6.30
0.400	-8.42		8.28		-8.22		8.46		-8.35
0.500	-10.43		10.34		-10.26		10.51		-10.39
0.600	-12.46		12.38		-12.31		12.58		-12.43
0.700	-14.52		14.41		-14.34		14.62		-14.47
0.800	-16.57		16.40		-16.42		16.60		-16.50

2.2 霍尔效应各参数计算

$$K_M = 0.386 \text{ T/A} = 3.86 \text{ KGS/A}$$

1) 霍尔系数 R_H : 作出 V_H-I_s 曲线, 并求出其斜率:

$$k = \frac{V_{H2} - V_{H1}}{I_{s2} - I_{s1}} = \frac{-16.70 - (-4.20)}{4.00 - 1.00} = -4.17 \Omega$$

$$R_H = \frac{V_H \cdot d}{I_s \cdot B} = \frac{K \cdot d}{B} = \frac{-4.17 \times 0.5 \times 10^{-3}}{0.232} = -8.987 \times 10^{-3} \approx -8.99 \times 10^{-3} (\Omega \text{m/T}) \text{ [或 } \text{V} \cdot \text{m}/(\text{A} \cdot \text{T}) \text{]}$$

2) 载流子浓度 n

$$n = \frac{1}{|R_H| \cdot e} = \frac{1}{|-8.99| \times 10^{-3} \times 1.602 \times 10^{-19}} = 6.943 \times 10^{20} \approx 6.94 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ [或 } \text{A} \cdot \text{T}/(\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{C}) \text{]}$$

3) 电导率 σ (西门子/米, 西门子是欧姆的倒数)

$$\sigma = \frac{l \cdot I_s}{S \cdot V_\sigma} = \frac{3.0 \times 2.00 \times 10^{-6}}{0.5 \times 4.0 \times 169.50 \times 10^{-9}} = 17.699 \approx 17.7 (\text{S/m}) \text{ [或 } \text{A}/(\text{V} \cdot \text{m}) \text{]}$$

4) 迁移率 μ (米平方/(伏秒))

$$\mu = \frac{\sigma}{n \cdot e} = \sigma \cdot |R_H| = 17.7 \times |-8.99 \times 10^{-3}| = 159.123 \times 10^{-3} \approx 0.159 \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s}) \text{ [或 } \text{T}^{-1} \text{]}$$

京: 高等教育出版社 2013: 197.

3 结 论

系统分析了霍尔实验中涉及到的理论和实验关键环节, 阐明了在实验过程中如何带着问题进行分析, 得到了霍尔参数的各项计算值, 为霍尔片及材料的传感测试提供相应实验指导。

参考文献:

- [1] 张旭峰, 王志斌, 王秉仁. 大学物理实验[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 202-206.
- [2] 吕斯骅, 段家祗, 张朝晖. 新编基础物理实验[M]. 北

- [3] 李海. 量子霍尔效应及量子反常霍尔效应的探索历程[J]. 大学物理, 2014, 33(12): 23-26.
- [4] 罗浩, 向泽英, 谢英英, 等. 霍尔效应法测磁场实验误差研究[J]. 大学物理实验, 2015, 28(4): 99-102.
- [5] 孙可芊, 李智, 廖慧敏, 等. 霍尔效应测量磁场实验中副效应的研究[J]. 物理实验, 2016, 36(11): 36-40.
- [6] 周日贵, 聂爱球, 龚勇清, 等. 霍尔效应实验误差分析[J]. 物理实验, 2002, 22(6): 41-42.
- [7] 刘晓云. 霍尔效应实验直流测量法的误差探讨及处理[J]. 大学物理实验, 2004, 17(2): 58-61.
- [8] 王燕, 程敏熙. 用 Origin7.5 处理霍尔效应测量螺线

管轴向磁场的实验数据[J].大学物理实验,2014,27(2):81-84.

Analysis and Discussion of the Hall Effect Experiment

AN Pan-long ZHENG Yong-qiu ZHAO Rui-juan LIU Zheng-guang

(College of Science ,National Demonstration Center for Experimental Measuring Technology and Instruments Education of North University of China ,Shanxi Taiyuan 030051)

Abstract: At some difficulties in the teaching of Hall effect experiment ,from the experimental principle ,the key problems involved in the experiment process are discussed systematically ,including the selection of semiconductor materials and the calculation of Hall coefficient.The Hall parameters of the semiconductor materials are obtained by drawing and calculating.It provides theoretical and experimental guidance for the design of experimental teaching and the design of Hall sensor.

Key words: Hall effect; problem; discussion

(上接第 48 页)

Modern Design on Einstein-de-Haas Experiment

XU Yan SONG Ren-gang ZHOU Zhi-fei XIAN Fu-zheng

(Shandong University of Science & Technology ,Shandong Qingdao 266590)

Abstract: A multifunctional teaching experimental apparatus is proposed and designed based on Einstein-de-Haas experiment.This experimental device integrates Angle sensor and hysteresis loop measurement module , which not only can verify Einstein-de-Haas experiment ,but also can measure the magnetization curve and hysteresis loop of magnetic materials.Through the experimental test ,the device can realize the function of teaching experiment ,and further application development can provide feasible equipment for precision measurement.

Key words: Einstein-de-Haas experiment; tunneling magnetoresistance; angle sensor; hysteresis loop