**霍尔效应**

**及其应用与发展**

**姓名：王浩宇**

**学号：PB21061285**

摘要

霍尔效应是电磁学中的一个重要的现象，在当今半导体科学和产业飞速发展的背景下，其应用场景十分的广泛。本文通过阐述和推导霍尔效应的产生原理，说明霍尔效应伴随的副效应及其消除方式,介绍霍尔效应的主要应用场景和搜集整理霍尔效应的新发展较为系统性地完成电磁学中与霍尔效应相关内容的综述。

**关键词：**电磁学；霍尔效应；磁场；电场；综述；

前言

在磁场中的载流导体上出现横向电势差的现象称作霍尔效应，由霍尔(A.H.Hall,1855–1938)于1879年发现。后来人们发现，半导体、导电流体等也有这种效应，而半导体的霍尔效应比金属的强得多。近些年来半导体物理学和相关的工业迅猛发展，利用这种现象制成的各种霍尔元件，已经广泛地应用于工业自动化技术、检测技术以及信息处理等方面。霍尔效应也是研究半导体材料性能的基本方法。通过霍尔效应实验测定的霍尔系数，能够判断半导体材料的载流子类型、载流子浓度、载流子迁移率等重要参数。

作为电磁学中一个重要的现象，霍尔效应产生的原理值得我们深入理解。同时，笔者本学期也在大学物理实验课程中参加进了“霍尔效应”实验，在实验过程中笔者也了解了更多的知识，也收获了许多实验数据，参加该实验为本文的撰写提供了巨大的帮助。本文希望从霍尔效应的产生原理、霍尔效应的副效应、霍尔效应的应用和霍尔效应的发展四个角度较为全面的介绍霍尔效应这一电磁学现象。

1 霍尔效应产生原理

霍尔效应是磁电效应的一种。1879年，24岁的霍尔是美国霍普金斯大学的一名研究生，他在研究金属的导电机制时发现了霍尔效应：当一电流垂直于外磁场方向流过导体时，在垂直于电流和磁场的方向导体的两侧会产生一电势差。而这一电势差，现在被称作霍尔电压。根据霍尔效应原理制成的元件称作霍尔元件。

图示

描述已自动生成

图1 霍尔元件示意图

如图1所示，设一块长为、宽为、厚为的N型半导体薄片，置于沿轴方向的磁场中，在轴正方向通过电流，则其中的载流子（因为是N型半导体，所以载流子为电子）受到的洛伦兹力为

其中，是电子的电荷量，是电子的漂移速度，方向与相同，是半导体薄片所处的磁场强度，方向与相同。故指向轴负方向，因此电子会向A侧面堆积，同时在B侧面上出现相同数量的正电荷，在A、B两侧面之间形成一个沿轴负方向的横向电场，两侧面之间电势差为即为霍尔电压，运动的载流子在横向电场中受到一个沿轴正方向的电场力，有

电子受到电场力方向与受到的洛伦兹力方向相反，当两个力大小相等时，电子穿过导体时不再偏转，电荷不再继续在两侧聚集，达到稳定状态。此时有

另一方面，设N型半导体中的电子浓度为，则流过元件横截面的电流为

所以有

令，称为霍尔系数，它表示材料产生霍尔效应的本领大小。

令，称为霍尔元件的灵敏度。对于霍尔元件，一般来说，越大越好，以便能获得较大的霍尔电压。因为与载流子浓度成反比，而半导体载流子浓度远比金属的小，所以半导体材料制作的霍尔元件灵敏度较高。又与样品厚度成反比，所以霍尔片一般都切的很薄。

以上即为霍尔效应产生的基本原理。上面讨论了N型半导体制成的霍尔元件产生的霍尔效应。而P型半导体制成的霍尔元件中载流子为带正电荷的空穴。通过相同方向的电流时，载流子受到的力的方向相同，但由于电荷极性相反，所以A、B两侧电位与N型半导体的情况相反。因此可以通过判断两侧面电位高低，来判断制成霍尔元件所使用的半导体的类型。

2 霍尔效应的副效应

在实际应用中，伴随霍尔效应经常存在其他的一些副效应。本节中会简单介绍一些副效应的产生原理和消除方法。

2.1 不等电位引起的误差

当样品不加磁场时，使样品通过电流，理想情况下应该处于一等位线上，，但是实际操作中，两点可能并不在同一等位线上，因而会存在电势差。得益于现在生产工艺水平较高，这一误差已经非常小，实验中基本可以忽略。

2.2 爱廷豪森效应

当样品在x轴方向通过电流，在z轴方向加磁场，因为通过样品的电流中载流子的速度并不是完全相等的，存在速度快和速度慢的电子，他们都受到洛伦兹力和霍尔电压对应的电场力，但是由于速度不同，所以其所受合力的方向不同，会积累到不同的位置。又因为快慢不同的载流子与金属晶格碰撞产生的焦耳热不同，因此会在垂直于电场与此磁场的方向产生温度梯度，这一温差和会造成对应方向上的塞贝克效应，产生温差电动势。

爱廷豪森效应中产生的电势差无论从器材制备上还是实验操作上都无法消除。但是温度梯度的建立需要一定的时间，因此，在样品中通过具有一定频率的交流电流而非直流电流，使其内部的温度梯度来不及完全建立，便可有效减少爱廷豪森效应产生的误差。

2.3 里吉-勒杜克效应

样品在x轴方向有热流通过时，在z方向的磁场中受洛伦兹力作用，向垂直温度梯度和磁场合成的平面方向运动，冲击晶格点阵而产生新的温度梯度，从而产生温差电动势。

里吉-勒杜克效应的产生原理与霍尔效应十分相似，只不过霍尔效应产生电场梯度时由于电流的电子受洛伦兹力的作用，而里吉-勒杜克效应受洛伦兹力作用的是“热流”电子。因此，里吉-勒杜克效应也可以看成是热霍尔效应。

里吉-勒杜克效应产生的电势差符号与磁感应强度方向有关，因此在实验中可以通过改变磁场方向消除。

2.4 能斯特效应

当热流通过样品时，在x方向存在温度梯度。沿温度梯度而有扩散倾向的电子在z方向磁场的作用下，在y方向建立电位差。

这一电位差与磁场大小以及热流的温度梯度成正比，因此的符号与磁感应强度方向有关，在实验中可以通过改变磁场方向消除。

2.5 小结

了解霍尔效应伴随霍尔效应产生的副效应，对于霍尔效应的实际应用非常重要。在后文中介绍到的利用霍尔效应测量半导体特性实验中，就需要涉及到如何处理这些副效应对测量带来的影响。

3 霍尔效应的应用

3.1 霍尔效应高斯计

上面的推到中得到了公式

因此在已知霍尔元件灵敏度时，测得电流和霍尔电压后，可以计算出磁感应强度

霍尔效应高斯计就是利用这一原理测量磁场强度的仪器。当已知时，控制电流不变时，电场强度与成正比，因此可以通过对电压表重新绘制刻度将其改造成一台可以直接读出磁场强度的高斯计。

霍尔效应高斯计有着极其广泛的应用场景。例如：

(a)永磁体的表面磁场测量：采用高斯计测量永磁产品表面磁场强度，主要是对永磁产品的质量及充磁后磁性能一致性的评估;通常测量中磁体表面中心点的磁场强度进行测量，通过对标准样品数据进行比较从而判断产品是否合格，同时也可以保证材料的一致性。

(b)气隙磁场的测量：采用高斯计测量气磁场的应用比较广泛，在科研、电子制造、机械等领域均有用到。应用比较典型的行业主要有电机和电声两大行业。

(c)余磁测量：如工件退磁后的退磁效果检测。

(d)漏磁测量：如喇叭漏磁测量。

3.2 测量半导体特性

根据半导体元件的霍尔效应的基本原理，我们可以通过测量待测元件的几何（长宽高）、控制通过元件的电流以及加以特定的电场，通过计算得出半导体元件的载流子类型、载流子浓度和迁移速度等半导体元件的重要特性参数。

3.2.1 测量实验原理

图示, 工程绘图

描述已自动生成

图2 实验装置图（霍尔元件部分） 图3 电磁铁气隙中的磁场

霍尔效应装置如图2、3所示。当半导体薄片放置在沿z轴方向的磁场中，通入沿y方向的电流时，薄片内定向移动的载流子受到洛伦兹力作用沿x轴方向发生偏移。

根据实验原理中

又，电磁铁气隙中磁感应强度

导出霍尔系数

电导率可以根据欧姆定律测定：

电导率，载流子浓度，迁移率之间的关系为：

3.2.2 实验器材

恒流源，电磁铁，霍尔样品和样品架，换向开关和接线柱，数字万用表，小磁针。

3.2.3 实验步骤

**用六脚霍尔片，连接好线路，霍尔片的尺寸为：.**

1. 保持不变，依次取，测绘曲线，计算.
2. 保持不变，依次取，测绘曲线，计算.
3. 在零磁场下，取，测量.
4. 确定样品导电类型，并求出

**用四脚锑化铟片，连接好电路.**

1、取，在之间，测绘锑化铟片曲线。

3.2.4 实验结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.50 | 3.00 | 3.50 | 4.00 | 4.50 |
|  | 2.18 | 3.15 | 4.15 | 5.16 | 6.16 | 7.11 | 8.13 | 9.13 |
|  | -2.34 | -3.37 | -4.46 | -5.52 | -6.60 | -7.62 | -8.71 | -9.78 |
|  | 2.36 | 3.38 | 4.45 | 5.53 | 6.60 | 7.64 | 8.72 | 9.78 |
|  | -2.19 | -3.15 | -4.15 | -5.15 | -6.14 | -7.13 | -8.12 | -9.13 |
|  | 2.27 | 3.26 | 4.30 | 5.34 | 6.38 | 7.38 | 8.42 | 9.46 |

表1 时，与的关系

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
|  | 1.73 | 2.72 | 3.77 | 4.80 | 5.85 | 6.90 | 7.95 | 9.01 |
|  | -2.38 | -3.41 | -4.45 | -5.52 | -6.59 | -7.66 | -8.74 | -9.79 |
|  | 2.39 | 3.39 | 4.42 | 5.46 | 6.50 | 7.56 | 8.60 | 9.67 |
|  | -1.72 | -2.75 | -3.79 | -4.86 | -5.93 | -7.01 | -8.08 | -9.13 |
|  | 2.06 | 3.07 | 4.11 | 5.16 | 6.22 | 7.28 | 8.34 | 9.40 |

表2 时，与的关系

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0.00 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 |
|  | -13.7 | 33.8 | 80.5 | 124.1 | 164.7 | 194.6 | 212.9 | 227.8 | 240.4 |
|  | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.80 |  |
|  | 252.1 | 264.3 | 277.5 | 289.9 | 302.2 | 315.0 | 328.0 | 340.9 |  |

表3 时，与的关系

3.2.5 数据处理与分析

1、根据测得的数据绘制图像如下：

图4 时的曲线

通过线性拟合，求出函数的解析式为

代入，所以

2、根据测得的数据绘制图像如下：

图5 时的曲线

通过线性拟合，求出函数的解析式为

代入，所以

3、零磁场时，时，

4、

-----------------------

+++++++++++++++++++++++

E

**I**

B

图6 实验中电流、磁场、电场方向示意图

电流、磁场和电场在霍尔片中的方向如上图所示，载流子受力指向下表面，而下表面电势低，故下表面堆积带负电的载流子。载流子带负电，所以实验室用的霍尔片为n型半导体。

根据欧姆定律：

由, 取实验1、2所得的平均值

1. 锑化铟曲线如下图所示：

图7 锑化铟曲线

3.2.6 小结

本小节中引用了大学物理实验中的实验流程，全面地阐述了利用霍尔效应测量半导体元件特性的具体流程。该实验操作较为简便，但是这种测量方式却十分精准，在现代的工业生产和学术研究中仍被广泛使用。

3.3 霍尔传感器

霍尔传感器是根据霍尔效应制作的一种磁场传感器。由霍尔效应的原理可知，给定一个霍尔器件，当通过的电流确定时，霍尔电压完全由被测的磁感应强度决定。当霍尔元件置于磁场中时，如果霍尔电压的两输出端之间构成回路，就会产生霍尔电流，经过集成电路中的放大器放大，就可以作为控制电路使用。

霍尔传感器有许多的优点，如：

1、 霍尔传感器可以测量任意波形的电流和电压，如：直流、交流、脉冲波形等，甚至对瞬态峰值的测量。副边电流忠实地反应原边电流的波形。而普通互感器则是无法与其比拟的，它一般只适用于测量50Hz正弦波；

2、 原边电路与副边电路之间有良好的电气隔离，隔离电压可达9600Vrms；

3、精度高：在工作温度区内精度优于1%，该精度适合于任何波形的测量；

4、线性度好：优于0.1%；

5、宽带宽：高带宽的电流传感器上升时间可小于1μs；但是，电压传感器带宽较窄，一般在15kHz以内，6400Vrms的高压电压传感器上升时间约500uS，带宽约700Hz。

6、测量范围：霍尔传感器为系列产品，电流测量可达50KA，电压测量可达6400V。

在日常生活中，霍尔传感器就有极其丰富的应用场景。例如，录音机中的换向结构，就是使用霍尔传感器检测磁带终点并完成换向功能；洗衣机中的电动机主要依靠霍尔传感器检测与控制电动机的转速、转向功能等。

4 霍尔效应的发展

4.1 研究领域

在霍尔效应被发现近100年后，量子霍尔效应被发现。量子霍尔效应是量子力学版本的霍尔效应，需要在低温强磁场的极端条件下才可以被观察到，此时霍尔电阻与磁场不再呈现线性关系，而出现量子化平台。

整数量子霍尔效应被马普所的德国物理学家冯·克利青发现。他因此获得1985年诺贝尔物理学奖。分数量子霍尔效应被崔琦、霍斯特·路德维希·施特默和亚瑟·戈萨德发现，前两者因此与罗伯特·劳克林分享1998年诺贝尔物理学奖。

整数量子霍尔效应最初在高磁场下的二维电子气中被观测到，整数量子霍尔效应中，量子化电导被观测到，为弹道输运这一重要概念提供了实验支持。

分数量子霍尔效应通常在迁移率更高的二维电子气下才能被观测到，劳克林与J·K·珍解释了它的起源，两人的工作解释了涡旋和准粒子在凝聚态物理学中的重要性。

量子霍尔效应的种种新发现不仅有助于量子物理的研究，也有望被用于发展新一代低功耗晶体管和电子学器件，进而推动信息技术的进步。

4.2 应用领域

4.2.1 新的霍尔元件结构

常规霍尔元件要求磁场垂直于霍尔元件，且在整个霍尔元件上是均匀磁场，而在其他情况，需要根据磁场的分布情况，设计各种各样相应的非平面霍尔结构。其中垂直式霍尔元件是一种最新开发出来的。这种垂直式霍尔片具有低噪声、低失调和高稳定性的特点。目前国际上有许多相关的项目在开展。

4.2.2 微型化

最新研制的超小型三位霍尔传感器，工作面可以小于，只有六个管脚。这种器件非常适合在空间狭小的检测环境中使用，例如电动机中的间隙、磁力轴承以及其他如永磁体扫描等需要接近测量表面的场合使用。

4.2.3 高集成度

霍尔传感器的发展方向中有一种是制成高集成度的霍尔传感器。借助CMOS技术的高度集成化，同样的功能可以集成在非常小的芯片内。同时可以在集成电路中附加诸如温度补偿、电压恒定、数据存储等功能。这种发展方向增强了霍尔元件的应用灵活性，开辟了霍尔元件新的应用领域。

5 结论

霍尔效应是一个跨时代的、富有重大意义的电磁学发现，经典霍尔效应的基本原理非常通俗易懂，但是却拥有着及其广泛的应用，并且随着科学的不断进步，霍尔效应的诸多性质都不断地被发现，同时也衍生出很多新的科学研究方向。希望未来能有更多的科学研究成果出现，在科学领域取得突破，在技术领域投入应用。

参考文献

[1] 电磁学 中国科学技术大学交叉学科基础物理教程(第2版) 叶邦角 中国科学技术大学 2018

[2] 普通物理学教程 电磁学（第四版） 梁灿彬 秦光戎 梁竹健 高等教育出版社 2018

[3] 大学物理实验第二册(第2版) 谢行恕 康士秀 霍剑青 高等教育出版社 2005

[4] 霍尔效应的应用于发展[J] 程姝丹 张强 水泥技术 2007,04:78-82

[5] [Klaus von Klitzing, et al, New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance, Phys. Rev. Lett. 45, 494 (1980).](https://baike.baidu.com/item/%E9%87%8F%E5%AD%90%E9%9C%8D%E5%B0%94%E6%95%88%E5%BA%94/9045164?fr=aladdin)