

文章编号:1005-4642(2021)03-0016-05

调制磁场交流霍尔电压测量技术

李潮锐^{a,b}

(中山大学 a. 物理学院; b. 物理国家级实验教学示范中心, 广东 广州 510275)

摘 要:霍尔效应测量伴随着多种副效应,直流换向法在变温测量中存在难以克服的技术缺点. 采用调制磁场与交流样品电流测量技术,并选择后者频率为前者的整数倍. 当数据采集历遍调制磁场完整周期时,实验结果等效于磁场和样品电流换向测量. 利用数字锁相放大器对被测信号谐波分量离散傅里叶分析原理,实现调制磁场交流霍尔电压实时测量. 实验说明调制磁场交流霍尔测量技术方案的合理性,进而由变温霍尔测量结果表明该方法的科学性.

关键词:霍尔效应;锁相技术;调制磁场;傅里叶分析

中图分类号:O472.6

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.03.004

利用导体或半导体的霍尔效应,可以测定材料的导电类型和载流子浓度. 通过测量霍尔系数随温度变化关系,可以确定半导体的禁带宽度、杂质的电离能及迁移率的温度特性等. 从微观角度,可研究材料的磁性质和磁相变. 霍尔效应测量中总伴随着爱廷豪森效应、能斯特效应、里纪-勒杜克效应和不等位电势差等各种副效应^[1-4],从而影响霍尔电压测量准确性. 霍尔效应最基本实验技术是直流电测量法^[5-9],即采用直流样品电流和稳恒外磁场测量材料霍尔系数(电压),通过对样品电流和外磁场分别换向测量取平均以消除主要副效应. 对于变温霍尔效应测量,由于每温度点需要改变 4 次实验条件产生测量采样延时,样品温度稳定性将直接影响实验结果可靠性. 调制磁场交流霍尔电压测量方法既可达到变温快速测量,又能实时消除若干副效应. 原理上,建立霍尔电场(电压)所需时间极短,为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ s. 一般认为,频率不高于 1 kHz 交流样品电流的实验结果与直流实验结果反映了相同的物理过程(霍尔效应),因而使用交流样品电流取代直流换向是合理的测量方法. 当采用调制磁场取代直流磁场换向时,使用低频交流励磁电流以确保产生低畸变的同频调制磁场(用于霍尔测量). 利用数字锁相放大器对被测信号的完整周期离散傅里叶分析

技术特点,确保调制磁场交流霍尔电压测量的准确性. 以使用范德堡法碲镉汞样品变温测量为例,展示调制磁场交流霍尔电压测量方法的技术优势及其科学性.

1 测量技术原理

爱廷豪森效应的实质是温差电势. 由于载流子速度并不相等,在外磁场作用下,较快载流子和较慢载流子所输运能量不同,从而建立横向温度差,并由此产生温差电势. 爱廷豪森效应随磁场和电流变化关系与霍尔效应情形相同.

另一方面,由于样品电流在两端电极产生焦耳热使沿电流方向形成温度梯度,载流子将倾向于从热端扩散到冷端. 当有磁场存在时,载流子扩散过程分别成为对应于霍尔效应和爱廷豪森效应的 2 个效应:能斯特效应和里纪-勒杜克效应. 不同的是,它们与电流方向无关,但与电流二次方成正比^[10-11].

第 1 种情形:考虑稳恒磁场 B_0 和样品电流 I_0 直流测量方法. 磁场和电流换向测量组合为 $(B_0^+, I_0^+): +(U_H + U_E) + (U_N + U_R) + U_1 = U_1$,

(1)

$(B_0^+, I_0^-): -(U_H + U_E) + (U_N + U_R) - U_1 = U_2$,

(2)

收稿日期:2020-08-24;修改日期:2020-12-14

基金项目:中山大学物理学人才培养支撑条件建设项目(No. J1210034);中山大学本科教学质量工程项目(No. 2018WL-ZLJG026, No. 2019WL-ZLJG004)

作者简介:李潮锐(1962-),男,广东汕头人,中山大学物理学院副教授,博士,主要从事凝聚态电磁性质研究. E-mail:zdstlcr@mail.sysu.edu.cn



$$(B_0^-, I_0^-): +(U_H + U_E) - (U_N + U_R) - U_1 = U_3, \quad (3)$$

$$(B_0^-, I_0^+): -(U_H + U_E) - (U_N + U_R) + U_1 = U_4, \quad (4)$$

其中, U_H, U_E, U_N 和 U_R 分别表示由霍尔效应、爱廷豪森效应、能斯特效应和里纪-勒杜克效应所产生的电压(或附加电压), 而 U_1 则为不等位电势差. 由上述4次换向独立测量结果, 可得

$$U_H + U_E = (U_1 - U_2 + U_3 - U_4)/4, \quad (5)$$

通常认为, $U_E \ll U_H$, 那么

$$U_H \approx (U_1 - U_2 + U_3 - U_4)/4. \quad (6)$$

文献[12]采用上述直流方法, 通过稳恒磁场和样品电流换向实施变温霍尔测量.

第2种情形: 考虑稳恒磁场 B_0 与交流样品电流 $I_0 \cos(\omega t + \varphi)$ 实验条件. 若测量采样积分(或累加)历遍交变电流的完整周期, 其结果等效于完成电流换向测量. 由于能斯特效应和里纪-勒杜克效应源于电流电极焦耳热效应, U_N 和 U_R 在样品输出电压附加直流偏移量和倍频分量, 它们都对基频交流分量没有贡献, 因此交流电流的作用相当于将式(1)和式(2)两者合并, 其有效值可表示为

$$B_0^+: +(U_H + U_E) + U_1 = U^+, \quad (7)$$

同理, 式(3)和式(4)可合并为

$$B_0^-: -(U_H + U_E) + U_1 = U^-, \quad (8)$$

由式(7)和(8)可得

$$U_H + U_E = (U^+ - U^-)/2, \quad (9)$$

其中, U^+ 和 U^- 为样品输出电压交流分量有效值.

爱廷豪森效应所产生的附加电压 U_E , 其本质是电流所产生的温差电势, 且(如霍尔效应)跟磁场和电流都有关系. 如上所述, 建立霍尔电场(电压)所需时间极短(约 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s), 但建立稳定温差需要较长时间(可达几 s)^[10]. 当样品电流频率为 10^2 Hz 时, 尽管 U_E 无法产生如霍尔电压 U_H 般的电流同频响应, 但仍存在与稳恒磁场所对应温差电势. 由此可见, 在稳恒磁场和交流电流情形中, U_E 贡献减小但不能完全消除. 一旦以样品电流的完整周期对响应电压采样(离散傅里叶)分析, 即可减弱爱廷豪森效应影响. 由此可见, 当采用(适当频率)交流样品电流时, 由稳恒磁场换向的2次测量平均可得霍尔电压(有效值)依然为

$$U_H \approx (U^+ - U^-)/2. \quad (10)$$

第3种情形: 考虑磁场 $B = B_0 \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$, 样品电流 $I = I_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$. 霍尔电压可表示为

$$U_H = K_H I_0 B_0 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \cos(\omega_2 t + \varphi_2) = \frac{K_H I_0 B_0}{2} \cos[(\omega_2 + \omega_1)t + (\varphi_2 + \varphi_1)] + \frac{K_H I_0 B_0}{2} \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1)]. \quad (11)$$

为便于实验测量, 选择 $\omega_2 = n\omega_1 = n\omega$, 其中 n 为非零正整数. 式(11)可改写为

$$U_H^+ = \frac{K_H I_0 B_0}{2} \cos[(n+1)\omega t + (\varphi_2 + \varphi_1)], \quad (12)$$

$$U_H^- = \frac{K_H I_0 B_0}{2} \cos[(n-1)\omega t + (\varphi_2 - \varphi_1)], \quad (13)$$

其中, U_H^+ 与 U_H^- 表示和频与差频交流分量.

在第2种情形中, 需要通过磁场换向消除 U_N 和 U_R . 当处于交变(调制)外磁场环境时, 在1个完整周期中, 样品经历了磁场正半周与负半周作用, 它相当于磁场换向. 因此, 如果测量采样积分(或累加)历遍调制磁场的完整周期, 其结果等效于完成磁场换向测量. 由上述分析已知, 选择适当频率样品电流可以消除与电流相关 U_E 影响; 同理, 选择合适频率的调制磁场也能消除与磁场相关 U_E 贡献. 当选择样品交流电流频率为调制磁场频率的整数倍, 只要测量采样历遍调制磁场完整周期, 必然也历遍样品电流的完整周期. 由此可见, 一旦采样历遍调制磁场的完整周期, 式(12)与式(13)有效值 U_H^+ 与 U_H^- 均为霍尔电压有效值一半, 或它们之和即为霍尔电压有效值

$$U_H = U_H^+ + U_H^-. \quad (14)$$

由此可见, 当采用调制磁场与交流样品电流时, 通过测量调制磁场的完整周期的样品输出电压和频与差频分量有效值, 可实时消除 U_E, U_N 和 U_R 等附加电压, 从而快速获得准确的霍尔电压有效值.

固纬 APS1102A 电源 DC 或 AC 输出分别提供稳恒磁场 B_0 或简谐调制磁场 $B_0 \cos(\omega t + \varphi_1)$ 所需的励磁电流, 使用中大科仪 OE1022 数字锁相放大器同步测量样品输出电压不同谐波分量. 泰克 AFG5232 信号源通道1和通道2分别设置为频率 ω 和 $n\omega$ 简谐输出, 前者同步输出为 APS1102A 和 OE1022 提供触发或参考信号, 后者用于控制中大科仪 OE4004 压控电流源提供幅值恒定的样品工作电流 $I_0 \cos(n\omega t + \varphi_2)$. 或者,

使用吉时利 6221 电流源提供样品简谐电流,以其同步信号(相标)经分频的方波输出为 APS1102A 和 OE1022 触发或参考信号. 对复旦天欣微波电子自旋共振实验所用磁体进行改造,卸去原有永磁体并将两侧励磁线圈同相串联,根据测量需要产生稳恒磁场或简谐调制磁场. 考虑到该磁体可为电子自旋共振实验提供 50 Hz 低畸变简谐扫场,适当选择低于 50 Hz 简谐励磁电流以满足调制磁场的实验要求. 使用东方晨景 SV-15 液氮恒温器,且由普源 DM3068 多用表测量样品温度. 所有仪器通过 USB 或 GPIB 接口实现计算机(远程)测控分析,还可用于远程课堂示教^[13]. 实验使用范德堡法测量碲镉汞样品霍尔电压,采用自液氮温区至室温自然升温改变样品温度.

2 实验结果及分析

使用中大科仪 OE4004 压控电流源和吉时利 6221 电流源 2 种方案的实验事实表明,整数 n 取值 $[3, 9]$ 的实验结果一致. 以下选用 OE4004 压控电流源方案且 $n=3$ 数据进行分析. 设定调制磁场频率 $\omega_1 = \omega = 42$ Hz,既满足低于 50 Hz 的实验要求,又处于 APS1102A 有效外同步频率范围. 样品简谐电流频率 $\omega_2 = n\omega = 126$ Hz,且 $I_0 = 25$ mA 等实验参量.

图 1 和图 2 分别为稳恒磁场与交流样品电流情形,样品输出电压有效值和相位随稳恒磁场强度变化情况. 图 1 明显可见,稳恒磁场换向的 2 次测量电压有效值(红色线和蓝色线)存在差异,由式(7)和式(8)可知来自不等位电势差的贡献. 图 2 显示稳恒磁场换向时,样品输出电压相位也随之反相,进一步说明式(7)和式(8)的合理性. 综合上述结果及分析,根据有效值(或模量)和相位的物理涵义,利用稳恒磁场换向的 2 次测量值,由式(10)可得如图 1(黑色线)所示的霍尔电压(有效值).

需要说明的是,图 1 中(蓝色线)在反向稳恒磁场较弱区域,样品输出电压有效值随磁场强度减小而增大,结合图 2 对应磁场强度的输出电压相位变化,说明其实际信号为负值. 式(7)和式(8)表明存在不等位电势差平移量,负值来自的贡献和 2 次测量时样品温度已发生变化的影响(以下将进一步说明). 同理,图 2 相位变化表明当稳恒磁场换向时,样品输出电压也随之反相. 实验

所用数字锁相放大器是以参考信号完整周期对被测信号进行采样,进而通过离散傅里叶分析准确获得各个谐波分量^[14]. 这一技术方法,是上述测量结果及分析科学性的根本保证. 由此可见,理解测量技术原理并合理运用其方法,对实验研究具有重要意义.

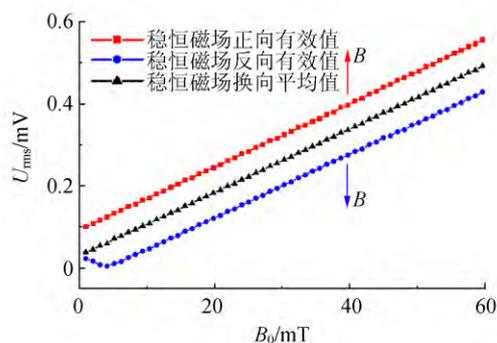


图 1 电压有效值随稳恒磁场变化

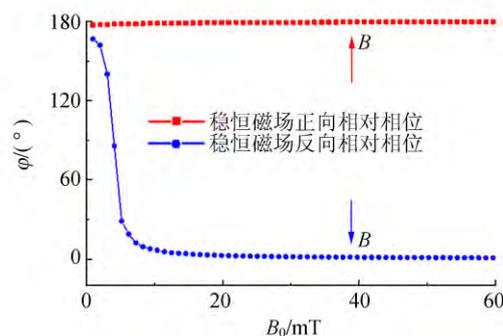


图 2 电压相位随稳恒磁场变化

励磁电流产生焦耳热使磁体及周围环境温度升高,样品温度也随之变化. 实验事实显示,保持样品电流参量不变,励磁电流由低向高再返回的电压测量值并不重合. 由于磁体温度变化,相同励磁电流产生不等值的磁场强度;当样品温度变化,即使相同磁场也可产生不同霍尔电压. 因此,往返等强度磁场时样品温度不同,其平均值(黑色)还包含了样品温漂影响. 图 1 中,往返磁场都为零但霍尔电压不为零现象,就是由于 2 次测量的样品温度发生变化(温漂)所引起. 事实再次说明,为确保磁场和电流换向测量达到消除附加电压影响,需要在实施换向测量过程中维持样品恒温.

分析表明,在调制磁场的完整周期中,磁场正半周与负半周作用等效于磁场换向,而式(12)和

式(13)说明和频和差频分量幅值与调制磁场和交流样品电流初相位(或相对相位)无关. 选择励磁电流反接实现调制磁场相位反相为例检验上述推断. 图 3 为调制磁场与交流样品电流情形的实验结果. 图中包含了样品输出电压的和频与差频分量有效值, 以及调制磁场反相的测量结果. 如式(12)和式(13)所示, 和频与差频分量电压有效值(或模量)一致; 磁场反相, 和频与差频分量电压有效值也几乎完全重合. 由此说明, 测量采样历遍调制磁场的完整周期, 由和频与差频分量电压有效值都可准确获得霍尔电压(有效值), 而无需磁场换向. 换句话说, 调制磁场与交流样品电流组合的测量方法可实时准确得到霍尔电压, 为变温霍尔效应快速准确测量提供解决方案.

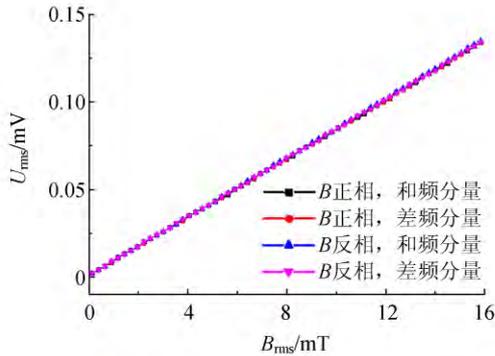


图 3 电压和频与差频分量随调制磁场变化

图 4 显示了在调制磁场为 10 mT(有效值)条件下, 样品输出电压的和频与差频分量有效值随温度变化情况. 2 个分量有效值几乎完全重合, 表明与式(12)和式(13)分析结果一致. 2 个分量(相对于调制磁场)的相位随温度变化如图 5 所示.

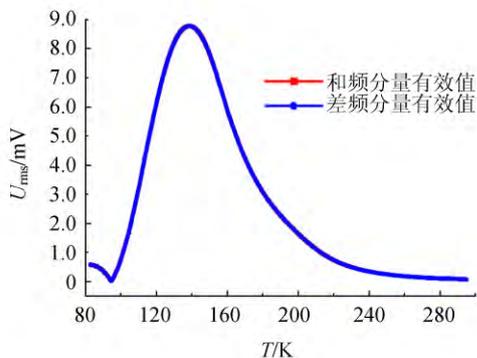


图 4 变温霍尔电压和频与差频分量有效值

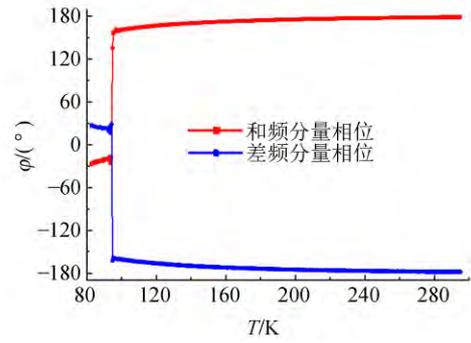


图 5 变温霍尔电压和频与差频分量相位

由图 4 和图 5 原始实验数据, 结合电压有效值及其相位变化情况, 利用式(14)可得到图 6 实验结果, 其物理分析参考文献[7].

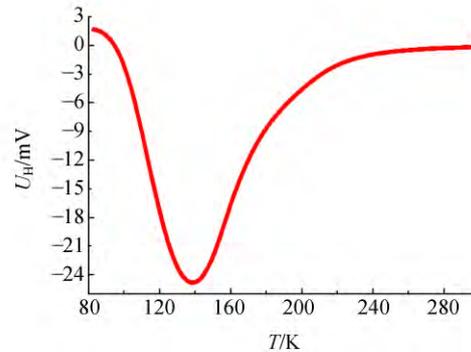


图 6 调制磁场交流霍尔电压随温度变化

3 结 论

由于霍尔效应测量中伴随着多种副效应, 从而影响霍尔电压测量准确性. 霍尔效应最基本实验技术是直流法, 它也是霍尔测量的原理性方法. 采用磁场和样品电流分别换向测量平均虽可消除主要副效应, 但由于改变 4 次实验条件产生测量采样延时, 样品温度稳定性将直接影响实验结果可靠性. 显然, 在变温霍尔测量中, 直流法存在难以克服的技术缺点. 技术原理上, 采用交流样品电流且测量采样历遍完整周期时, 等效于样品电流换向测量. 因此, 通过稳恒磁场换向 2 次测量平均即可消除主要副效应所产生的附加电压. 同理, 若采用调制磁场且测量采样历遍完整周期时, 也等效于磁场换向. 当样品电流频率为调制磁场频率的整数倍时, 只要调制磁场交流电流霍尔测量满足测量采样历遍调制磁场完整周期, 这一测量技术等效于磁场与样品电流都实现分别换向.

利用数字锁相放大器对被测信号完整周期采样并通过离散傅里叶分析获得各个谐波分量的信号处理方法符合本研究的测量要求。通过实验事实检验了上述技术方案的合理性,并利用变温霍尔测量结果展示调制磁场交流样品电流方法的科学性。本文工作不仅说明物理测量不可忽视深刻理解实验技术原理,也再次表明相位测量的物理意义。

参考文献:

- [1] 黄响麟,何琛娟,廖红波,等. 变温霍尔效应中副效应的研究[J]. 大学物理,2011,30(3):48-51,65.
- [2] 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):36-40,44.
- [3] 杨晓阳,林杏潮,李向阳,等. 碲镉汞霍耳测试副效应及其与组分的关系[J]. 红外与激光工程,2007,36(4):457-460.
- [4] 刘昶丁,柳纪虎. 霍尔效应中的副效应及其消除方法[J]. 物理实验,1987,7(2):1-2.
- [5] 曹伟然,段立永,赵启博. 霍尔效应实验的改进和扩展[J]. 物理实验,2009,29(2):41-44.
- [6] 翟文生. 碲镉汞材料的 P、N 型和其霍尔系数的正负[J]. 红外与激光工程,1996,25(5):52-55.
- [7] 陶小平,孙腊珍. $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料变温特性的实验研究[J]. 物理实验,2010,30(9):28-30,34.
- [8] 宁家庆. 霍尔效应实验的改进[J]. 物理实验,2000,20(2):45-48.
- [9] 刘德全,王宇航. 利用导电橡胶改进薄膜霍尔效应实验装置[J]. 物理实验,2007,27(11):45-47.
- [10] 吴思诚,王祖铨. 近代物理实验[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2005:406-408.
- [11] 普特来 E H. 霍尔效应及有关现象[M]. 傅德中,译. 上海:上海科学技术出版社,1964:22-28.
- [12] 李潮锐. 变温霍尔效应简易测量方法[J]. 物理实验,2018,38(6):26-28.
- [13] 李潮锐. 基于虚拟仪器技术的远程物理实验及示教[J]. 物理实验,2018,38(5):37-39,43.
- [14] 陈泽宁,王自鑫,贺子芸,等. 数字锁相放大器中相敏检测技术的基本原理实验[J]. 物理实验,2018,38(1):22-28.

Measuring Hall effect with modulated magnetic field and AC sample current

LI Chao-rui^{a,b}

(a. School of Physics; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The measurement on Hall effect is accompanied with some side effects, so that the DC reversing method is not suitable for variable temperature measurement. The measurement technology that combined with both modulated magnetic field and AC sample current was introduced, while the frequency of the latter was set to be the integral multiple of the former. When the whole period of modulated magnetic field was covered by the data sampling, the results were equivalent to the measurement of reversing both magnetic field and sample current. The harmonic component of the measured signal was analyzed with DFT using digital lock-in amplifier, which could be used to realize real-time measurement of AC Hall voltage with modulated magnetic field. The experiment illustrated that the new measurement technology was reasonable for Hall measurement of variable temperature.

Key words: Hall effect; phase-lock technology; modulated magnetic field; Fourier transform

[责任编辑:郭伟]