



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112198469 B

(45) 授权公告日 2023. 11. 07

(21) 申请号 202010962953.1

(22) 申请日 2020.09.14

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112198469 A

(43) 申请公布日 2021.01.08

(73) 专利权人 东南大学  
地址 211100 江苏省南京市江宁区东南大  
学路2号

(72) 发明人 王建立 陈璐 崔振宇

(74) 专利代理机构 北京德崇智捷知识产权代理  
有限公司 11467  
专利代理师 戴义保

(51) Int. Cl.  
G01R 33/12 (2006.01)  
G01R 27/02 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 1811401 A, 2006.08.02  
 CN 108181567 A, 2018.06.19  
 CN 107728036 A, 2018.02.23  
 CN 104237642 A, 2014.12.24  
 CN 106950484 A, 2017.07.14  
 CN 1885050 A, 2006.12.27  
 US 2013082694 A1, 2013.04.04  
 CN 204594875 U, 2015.08.26  
 Hector Castro等. Automated Setup for Van Der Pauw Hall Measurements. 《IEEE》. 2011, 第60卷(第1期), 第198-205页.  
 梁李敏等. 基于LabVIEW平台的霍尔效应测试系统设计. 《实验室科学》. 2018, 第21卷(第03期), 第26-29页.

审查员 谢佳琪

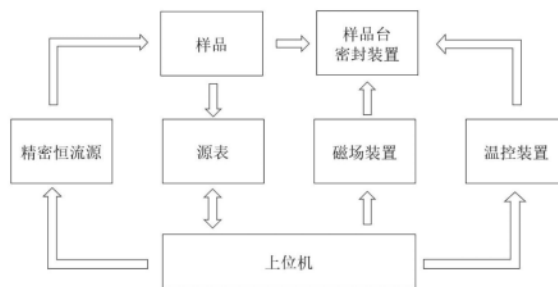
权利要求书4页 说明书7页 附图3页

## (54) 发明名称

一种霍尔效应自动测量系统及其测量方法

## (57) 摘要

本发明涉及提供了一种霍尔效应自动测量系统及其测量方法, 测量装置包括样品台、真空装置、温控装置、磁场发生装置、精密恒流源、数字源表, 设有可安放样品台的真空装置, 由温控装置控制样品台温度, 并置于磁场发生装置中; 样品台设有四个电极探针, 通过导线穿过真空装置上的电极引出孔连接到精密恒流源与数字源表, 构成测量电路, 其中数字源表包括开关模块。测量时, 数字源表切换开关模块状态, 精密恒流源向样品施加电流, 数字源表读取样品输出的电压信号。本发明以LabVIEW为软件平台, 实现对多个仪器的自动控制、数据自动记录和分析, 在安装完样品后, 可实现80K到325K的温度范围内自动测量并计算得到样品的电阻率、霍尔迁移率等重要参数。



1. 一种霍尔效应自动测量系统的测量方法,其特征是:

包括,

样品台:样品台为绝缘,用于放置样品,样品台上通过绝缘连接件连接有固定探针;

固定探针用于与样品各边角接触,通过固定探针给样品通入电流,并测量通入电流后样品的电压,固定探针一端绝缘固定到样品台上,另一端设置接触端;

测量电路:测量电路用于给固定探针施加电流和测试电压;其包括恒流源模块和电压信号测试模块以及控制电路;

其中恒流源模块通过控制电路分别连接到各个固定探针上;通过控制电路分别控制各个固定探针上电流的导通与断开;电压信号测试模块通过控制电路分别连接到各个固定探针上;通过控制电路测试各固定探针之间电压的测量;其中恒流源模块为精密恒流源,通过GPIB接口与上位机进行通信;各单刀双掷继电器开关通过数字源表进行控制,数字源表选用Agilent 34970,数字源表通过GPIB接口与上位机进行通信;

控制电路包括16组单刀双掷继电器和四组探针;

开始自动测量后,温控装置将使测量环境到达某一特定温度并保持稳定;系统对每一特定温度,进行5组不同输入电流下的测试;对于每一恒定输入电流,进行16次测量,记录测量的电压信号;系统通过源表控制继电器开关模块中16组单刀双掷继电器开关的状态,从而选择输入电流的两个探针和读取电压的两个探针,然后通过精密恒流源向探针输入恒定电流,之后利用源表读取样品输出电压信号大小;

前8组测量每次输入的恒定电流从相邻的两个探针经过,当电流从探针A流入,探针B流出,记电流为 $I_{12}^+$ ,并读取另两个相邻探针D和探针C之间的电压,记为 $V_{12,43}^+$ ;

通反向电流,测得电流 $I_{12}^-$ ,同时测得电压 $V_{12,43}^-$ ;

该8组测量在无磁场环境下进行,得到 $I_{12}^+, I_{12}^-, I_{23}^+, I_{23}^-, I_{34}^+, I_{34}^-, I_{41}^+, I_{41}^-, V_{12,43}^+, V_{12,43}^-, V_{23,14}^+, V_{23,14}^-, V_{34,21}^+, V_{34,21}^-, V_{41,32}^+, V_{41,32}^-$ ,测量结果用于计算材料的电阻率;

后8组测量,先加正向磁场测量四组结果,每次输入的恒定电流从对角线上的两个探针经过,并读取另一对角线上两个探针之间的电压;

当电流从探针C流入,探针A流出,记电流为 $I_{31}^+(+B)$ ,并读取探针D和探针B之间的电压,记为 $V_{31,42}^+(+B)$ ;通反向电流,测得电流 $I_{31}^- (+B)$ ,同时测得电压 $V_{12,43}^- (+B)$ ,后加反向磁场测量四组结果;

该8组测量得到 $I_{31}^+(+B), I_{31}^- (+B), V_{31,42}^+(+B), V_{12,43}^- (+B), I_{42}^+(+B), I_{42}^- (+B), V_{42,13}^+(+B), V_{42,13}^- (+B), I_{31}^+(-B), I_{31}^- (-B), V_{31,42}^+(-B), V_{31,42}^- (-B), I_{42}^+ (-B), I_{42}^- (-B), V_{42,13}^+(-B), V_{42,13}^- (-B)$ ;测量结果用于计算材料的霍尔系数;

测试环境控制装置:测试环境控制装置包括用于给样品提供磁场环境的磁场发生装置、用于调整样品温度的温控装置以及为样品提供真空环境的真空装置;真空装置包括一个密封的真空腔体,利用真空泵组对真空腔体进行抽真空;

磁场发生装置放置于真空腔体外部;磁场发生装置为电磁铁恒流源;

温控装置包括加热器和液氮腔体,加热器和冷却器分别对样品台进行加热和冷却,加热机构和冷却机构的工况利用设置于真空腔体内部温度传感器所获得的是温度参数进

行调节；

上位机模块：上位机模块通过LabVIEW控制软件，收集参数、对设备的工作进行调度并计算得到样品的电阻率和霍尔系数；上位机模块收集电压数据，并调整控制电路、磁场发生装置、温控装置、恒流源模块的工作参数；

上位机按照预设组温控装置将使测量环境到达某一特定温度并保持稳定；

系统对每一特定温度，进行2N组测试，分别输入恒定电流并读取电压信号；

系统通过源表控制继电器开关模块中2N组单刀双掷继电器开关的状态，从而选择输入电流的固定探针和读取电压的固定探针，然后通过精密恒流源向固定探针输入恒定电流，之后利用源表读取样品输出电压信号大小；

第1~N组测量每次输入的恒定电流从相邻的两个固定探针经过，并读取另两个相邻固定探针之间的电压，在无磁场环境下进行，测量结果用于计算材料的电阻率；

第N+1~2N组测量每次输入的恒定电流从对角线上的两个固定探针经过，并读取另一对角线上两个固定探针之间的电压，其中第N+1~3N/2组施加一定方向的磁场，第3N/2+1~2N组施加相反方向的磁场，测量结果用于计算材料的霍尔系数；

完成2N组测量后，通过上位机的LabVIEW软件将对材料在下一温度的电阻率和霍尔系数进行测量并计算；

依据范德堡法测量原理，使用上位机软件实现对所有测量结果进行计算，得到材料的电阻率和霍尔系数，显示于用户界面，并将所有测量结果于计算结果进行保存；

所述电阻率计算方法包括如下步骤：

由测量得到的电流值和电压值 $I_{12}^+$ ,  $I_{12}^-$ ,  $I_{23}^+$ ,  $I_{23}^-$ ,  $I_{34}^+$ ,  $I_{34}^-$ ,  $I_{41}^+$ ,  $I_{41}^-$ ,  $V_{12,43}^+$ ,  $V_{12,43}^-$ ,  $V_{23,14}^+$ ,  $V_{23,14}^-$ ,  $V_{34,21}^+$ ,  $V_{34,21}^-$ ,  $V_{41,32}^+$ ,  $V_{41,32}^-$ 按照式(1)(2)计算 $Q_A$ 、 $Q_B$ ：

$$Q_A = \left( \frac{V_{12,43}^+ - V_{12,43}^-}{I_{12}^+ - I_{12}^-} \right) \left( \frac{I_{23}^+ - I_{23}^-}{V_{23,14}^+ - V_{23,14}^-} \right) \quad (1)$$

$$Q_B = \left( \frac{V_{34,21}^+ - V_{34,21}^-}{I_{34}^+ - I_{34}^-} \right) \left( \frac{I_{41}^+ - I_{41}^-}{V_{41,32}^+ - V_{41,32}^-} \right) \quad (2)$$

用 $Q_A$ 或 $\frac{1}{Q_A}$ （两者中大于1的那个数）代入式(3)计算 $f_A$ 、 $f_B$ ：

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left( \frac{1}{2} e^{\frac{\ln 2}{f}} \right) \quad (3)$$

按照式(4)(5)计算 $R_A$ 、 $R_B$ ：

$$R_A = \frac{\pi \cdot f_A}{\ln 2} \left( \frac{V_{12,43}^+ - V_{12,43}^- + V_{23,14}^+ - V_{23,14}^-}{I_{12}^+ - I_{12}^- + I_{23}^+ - I_{23}^-} \right) \quad (4)$$

$$R_B = \frac{\pi \cdot f_B}{\ln 2} \left( \frac{V_{34,21}^+ - V_{34,21}^- + V_{41,32}^+ - V_{41,32}^-}{I_{34}^+ - I_{34}^- + I_{41}^+ - I_{41}^-} \right) \quad (5)$$

按照式(6)计算体电阻率 $\rho_A$ 、 $\rho_B$ ：

$$\rho = R \cdot t \quad (6)$$

其中t为样品厚度；

按照式(7)计算平均体电阻率：

$$\rho_{ave} = \frac{R_A \cdot t + R_B \cdot t}{2} \quad (7)$$

按照式(8)计算面电阻率 $\rho'_A$ 、 $\rho'_B$ ：

$$\rho' = R \quad (8)$$

按照式(9)计算平均面电阻率：

$$\rho'_{ave} = \frac{R_A + R_B}{2} \quad (9)$$

霍尔迁移率计算具体过程为：

由测量得到的 $I_{31}^+(+B)$ ,  $I_{31}^-(+B)$ ,  $V_{31,42}^+(+B)$ ,  $V_{31,42}^-(+B)$ ,  $I_{42}^+(+B)$ ,  $I_{42}^-(+B)$ ,  $V_{42,13}^+(+B)$ ,  $V_{42,13}^-(+B)$ ,  $I_{31}^+(-B)$ ,  $I_{31}^-(-B)$ ,  $V_{31,42}^+(-B)$ ,  $V_{31,42}^-(-B)$ ,  $I_{42}^+(-B)$ ,  $I_{42}^-(-B)$ ,  $V_{42,13}^+(-B)$ ,  $V_{42,13}^-(-B)$ ,按照式(10)

(11)计算 $R_{H1}$ 、 $R_{H2}$ ：

$$R_{H1} = \frac{1}{B} \cdot \frac{V_{31,42}^+(+B) - V_{31,42}^-(+B) + V_{31,42}^-(-B) - V_{31,42}^+(-B)}{I_{31}^+(+B) - I_{31}^-(+B) + I_{31}^-(-B) - I_{31}^+(-B)} \quad (10)$$

$$R_{H2} = \frac{1}{B} \cdot \frac{V_{42,13}^+(+B) - V_{42,13}^-(+B) + V_{42,13}^-(-B) - V_{42,13}^+(-B)}{I_{42}^+(+B) - I_{42}^-(+B) + I_{42}^-(-B) - I_{42}^+(-B)} \quad (11)$$

按照式(12) (13)计算体效应 $R_{HC}$ 、 $R_{HD}$ ：

$$R_{HC} = R_{H1} \cdot t \quad (12)$$

$$R_{HD} = R_{H2} \cdot t \quad (13)$$

按照式(14)计算平均值：

$$R_{Have} = \frac{R_{HC} + R_{HD}}{2} \quad (14)$$

按照式(15) (16)计算面效应 $R'_{HC}$ 、 $R'_{HD}$ ：

$$R'_{HC} = R_{H1} \quad (15)$$

$$R'_{HD} = R_{H2} \quad (16)$$

按照式(17)计算平均值：

$$R'_{Have} = \frac{R'_{HC} + R'_{HD}}{2} \quad (17)$$

按照式(18) (19)计算载流子浓度 $n(p)$ 、 $n(p)'$ ：

$$n(p) = \frac{1}{|R_{Have}| \times e} \quad (18)$$

$$n(p)' = \frac{1}{|R'_{Have}| \times e} \quad (19)$$

按照式(20)计算霍尔迁移率：

$$\mu_H = \frac{|R'_{Have}|}{\rho_{ave}} \quad (20)$$

上位机软件完成上述计算过程,得到材料的电阻率和霍尔系数,显示于用户界面,并将所有测量结果与计算结果进行保存;所有结果按照测量时不同温度存储在不同文件中;每个文件将不同输入电流对应的测量结果与计算结果进行分隔,方便后续的读取与使用。

2. 如权利要求1所述的霍尔效应自动测量系统的测量方法,其特征是:所述恒流源上并联有N组连接回路,每一组连接回路上分别各设有一个与恒流源正极、负极对应的单刀双掷继电器;

在电压信号测试模块上并联有N组检测回路,每一组检测回路上分别各设有一个与电压信号测试模块正极、负极对应的单刀双掷继电器;第N组连接回路的中部与第N组检测回路中部之间通过一条连接电路A导通,连接电路的中部通过一条连接电路B连接到其中一组固定探针上。

3. 如权利要求1所述的霍尔效应自动测量系统的测量方法,其特征是:样品台上表面中心位置为放置样品区域,加热机构和冷却机构对样品台进行加热或冷却。

4. 如权利要求3所述的霍尔效应自动测量系统的测量方法,其特征是:所述加热机构为内置的电阻线圈;所述冷却机构采用冷却管路内的液氮流量进行制冷;电阻线圈通过上位机控制电阻线圈的电流进行控制,液氮流量通过上位机控制液氮循环泵流量进行控制。

5. 如权利要求1所述的霍尔效应自动测量系统的测量方法,其特征是:上位机控制程序使用LabVIEW软件,通过LabVIEW软件进行精密恒流源的仪器开启和电流参数设定、数字源表的开关控制和电压读取、温控装置的仪器开启和参数设定、磁场装置的仪器开启和参数设定,完成自动测量并计算得到样品的电阻率和霍尔系数。

6. 如权利要求1所述的霍尔效应自动测量系统的测量方法,其特征是:真空装置的真空腔体主体为金属外壳,金属外壳由主体与罩壳构成可拆卸结构,主体与罩壳之间通过橡胶密封圈实现对腔体的真空密封;金属外壳的主体内部安装样品台;真空装置通过机械泵和分子泵两级真空发生装置实现抽真空。

7. 如权利要求1所述的霍尔效应自动测量系统的测量方法,其特征是:所述绝缘连接件包括陶瓷螺栓与弹簧,通过陶瓷螺栓对弹簧的压紧,并通过压紧的弹簧将固定探针固定于陶瓷螺栓上;陶瓷螺栓固定于样品台上。

## 一种霍尔效应自动测量系统及其测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及系统设计、测量技术、自动控制技术,特别涉及一种用于材料霍尔效应的自动测量系统。

### 背景技术

[0002] 近几十年来,半导体材料迅速发展。很多材料在特定温度范围内有高的电子迁移率等优越的物理性质,可以应用于特殊环境下的电子器件,因此这些材料的电阻率和霍尔系数具有研究价值。数字源表作为能够紧密结合电压源、电流源、电压表、电流表和电阻表的仪器,兼具多功能性和高精度性能,适用于半导体器件和材料的测试。

[0003] 1958年,范德堡提出了一种针对半导体材料电阻率和霍尔系数测量的方法,该方法适用于任意形状、厚度均匀、完整无孔的片状材料,该方法经过几十年的改进已成为比较成熟的测量方法,并被美国材料与试验协会制定了相应的标准。该测量方法实施过程中,四个固定探针与样品边缘上四个点接触,一次测量中选择特定的两个固定探针通入电流,另外两个固定探针测量电压。根据多次选择不同的两个固定探针通入电流,并测量得到的电流值、电压值和接触点之间距离计算得到样品材料的电阻率和霍尔系数。传统测量方法需要手动选择指定位置的固定探针,改变电路连接方式,具有测量速度低,手动操作复杂的缺点。

[0004] 因此,本发明提出一种基于范德堡法的多温度环境下霍尔效应自动测量系统,使用数字源表降低系统搭建的复杂性,所有仪器实现自动控制,极大地提高了测量效率。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于完成对材料在不同温度下的霍尔效应的自动测量,本系统基于范德堡法测量原理,并且为了减少测量过程中人工操作的复杂性,设计了一种温度可控,磁场无极可调,实现材料的电阻率和霍尔效应的自动测量的系统,可显示并存储测量结果。

[0006] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:

[0007] 一种霍尔效应自动测量系统,

[0008] 包括,

[0009] 样品台:样品台为绝缘,用于放置样品,样品台上通过绝缘连接件连接有固定探针;

[0010] 固定探针用于与样品各边角接触,通过固定探针给样品通入电流,并测量通入电流后样品的电压,固定探针一端绝缘固定到样品台上,另一端设置接触端;

[0011] 测量电路:测量电路用于给固定探针施加电流和测试电压;其包括恒流源模块和电压信号测试模块以及控制电路;

[0012] 其中恒流源模块通过控制电路分别连接到各个固定探针上;通过控制电路分别控制各个固定探针上电流的导通与断开;电压信号测试模块通过控制电路分别连接到各个固定探针上;通过控制电路测试各固定探针之间电压的测量;

[0013] 控制电路由若干组单刀双掷继电器开关组成；

[0014] 测试环境控制装置：测试环境控制装置包括用于给样品提供磁场环境的磁场发生装置、用于调整样品温度的温控装置以及为样品提供真空环境的真空装置；真空装置包括一个密封的真空腔体，利用真空泵组对真空腔体进行抽真空；磁场发生装置放置于真空腔体外部；温控装置包括加热器和液氮腔体，加热器和冷却器分别对样品台进行加热和冷却，加热机构和冷却机构的工况利用设置于真空腔体内部的温度传感器所获得的是温度参数进行调节；

[0015] 上位机模块：上位机模块通过LabVIEW控制软件，收集参数、对设备的工作进行调度并计算得到样品的电阻率和霍尔系数，；上位机模块收集电压数据，并调整控制电路、磁场发生装置、温控装置、恒流源模块的工作参数。

[0016] （本系统基于范德堡法测量原理，并且为了减少测量过程中人工操作的复杂性，设计了一种温度可控，磁场无极可调，实现材料的电阻率和霍尔效应的自动测量的系统，可显示并存储测量结果。）

[0017] 作为本发明的进一步改进，所述恒流源上并联有N组连接回路，每一组连接回路上分别各设有一个与恒流源正极、负极对应的单刀双掷继电器；在电压信号测试模块上并联有N组检测回路，每一组检测回路上分别各设有一个与电压信号测试模块正极、负极对应的单刀双掷继电器；第N组连接回路的中部与第N组检测回路中部之间通过一条连接电路A导通，连接电路的中部通过一条连接电路B连接到其中一组固定探针上。

[0018] （阵列式的单刀双掷继电器可以方便的通过上位机进行控制，快速的实现对电路的调整。）

[0019] 作为本发明的进一步改进，所述加热机构为电阻线圈；所述冷却机构采用冷却管路内的液氮流量进行制冷；电阻线圈通过上位机控制电阻线圈的电流进行控制，液氮流量通过上位机控制液氮循环泵的流量进行控制。

[0020] （通过电阻线圈加热，结构简易，适宜小型化；液氮间壁换热，制冷效率高，温度控制准确）

[0021] 作为本发明的进一步改进，其中恒流源模块为精密恒流源，通过GPIB接口与上位机进行通信；各单刀双掷继电器开关通过数字源表进行控制，数字源表选用Agilent 34970，数字源表通过GPIB接口与上位机进行通信。

[0022] （本发明利用数字源表降低了系统搭建的复杂性，利用自动控制减少了样品测量的工作量，提高了样品测量效率。）

[0023] 作为本发明的进一步改进，上位机控制程序使用LabVIEW软件，通过LabVIEW软件进行精密恒流源的仪器开启和电流参数设定、数字源表的开关控制和电压读取、温控装置的仪器开启和参数设定、磁场装置的仪器开启和参数设定，完成自动测量并计算得到样品的电阻率和霍尔系数。

[0024] （利用LabVIEW软件，实现了精密恒流源的仪器开启和电流参数设定、数字源表的开关控制和电压读取、温控装置的仪器开启和参数设定、磁场装置的仪器开启和参数设定，完成自动测量并计算得到样品的电阻率和霍尔系数；极大减少霍尔测量过程的人工操作部分，除样品安装外，其余操作包括温度控制、磁场控制、源表控制、恒流源控制等均由上位机软件程序实现自动测量。）

- [0025] 作为本发明的进一步改进,磁场发生装置为电磁铁恒流源。
- [0026] 作为本发明的进一步改进,真空装置的真空腔体主体为金属外壳,金属外壳由主体与罩壳构成可拆卸结构,主体与罩壳之间通过橡胶密封圈实现对腔体的真空密封。金属外壳主体内部安装样品台,并连接到温控装置;真空装置通过机械泵和分子泵两级真空发生装置实现抽真空。
- [0027] 作为本发明的进一步改进,所述绝缘连接件包括陶瓷螺栓与弹簧,通过陶瓷螺栓对弹簧的压紧,并通过压紧的弹簧将固定探针固定于陶瓷螺栓上;陶瓷螺栓固定于样品台上。
- [0028] 一种霍尔效应自动测量系统的测量方法,其特征是:
- [0029] 上位机按照预设组温控装置将使测量环境到达某一特定温度并保持稳定;
- [0030] 系统对每一特定温度,进行2N组测试,分别输入恒定电流并读取电压信号;
- [0031] 系统通过源表控制继电器开关模块中2N组单刀双掷继电器开关的状态,从而选择输入电流的固定探针和读取电压的固定探针,然后通过精密恒流源向固定探针输入恒定电流,之后利用源表读取样品输出电压信号大小;
- [0032] 第1~N组测量每次输入的恒定电流从相邻的两个固定探针经过,并读取另两个相邻固定探针之间的电压,在无磁场环境下进行,测量结果用于计算材料的电阻率;
- [0033] 第N+1~2N组测量每次输入的恒定电流从对角线上的两个固定探针经过,并读取另一对角线上两个固定探针之间的电压,其中第N+1~3N/2组施加一定方向的磁场,第3N/2+1~2N组施加相反方向的磁场,测量结果用于计算材料的霍尔系数;
- [0034] 完成2N组测量后,通过上位机的LabVIEW软件将对材料在下一温度的电阻率和霍尔系数进行测量并计算;
- [0035] 依据范德堡法测量原理,使用上位机软件实现对所有测量结果进行计算,得到材料的电阻率和霍尔系数,显示于用户界面,并将所有测量结果于计算结果进行保存。
- [0036] 本发明的有益效果是:
- [0037] 本系统基于范德堡法测量原理,并且为了减少测量过程中人工操作的复杂性,设计了一种温度可控,磁场无极可调,实现材料的电阻率和霍尔效应的自动测量的系统,可显示并存储测量结果。

## 附图说明

- [0038] 下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。
- [0039] 图1为本发明结构框图。
- [0040] 图2真空腔体主体与样品台的连接示意图;
- [0041] 图3为样品台的俯视图;
- [0042] 图4为本发明测量电路的电路图;
- [0043] 图5为本发明上位机程序流程图。

## 具体实施方式

- [0044] 现在结合附图对本发明作进一步详细的说明。这些附图均为简化的示意图,仅以示意方式说明本发明的基本结构,因此其仅显示与本发明有关的构成。



[0045] 如图1所示,霍尔效应自动测量系统包括样品台、真空装置、精密恒流源、数字源表、温控装置、磁场发生装置和上位机软件部分。

[0046] 装有测试材料的样品台放置于真空装置内;上位机控制的精密恒流源、数字源表、温控装置和磁场发生装置为样品台上材料提供测量条件,并实现材料电阻率和霍尔效应的自动测量。

[0047] 安装材料的样品台结构如图2和图3所示。样品台1正面四个孔用于安装固定探针B的四个陶瓷螺栓3,底部孔4用于样品台1与真空装置主体之间的固定。

[0048] 真空装置的真空腔体主体为金属外壳,金属外壳由主体7与罩壳8构成可拆卸结构,主体7与罩壳8之间通过橡胶密封圈实现对腔体的真空密封,在罩壳8上设置有负压连接孔10用于连接抽真空设备进行抽真空。金属外壳的主体7内部安装样品台1;金属外壳上安装航空插头9用于连接温控装置,并将样品台的四个电极探针通过导线连接到测量电路。真空装置通过机械泵和分子泵两级真空发生装置,可提供 $10^{-4}$ Pa腔体真空度。

[0049] 样品台上表面中心区域7用于放置样品,本发明温控装置将温度传感器和内置电阻加热器5安装到真空装置,并连接到样品台,利用上位机控制电阻加热器进行加热,在样品台内设置液氮冷却管路6实现对样品台的冷却(通过调节杆控制液氮流量就行制冷);在一组测量过程中保证真空装置内温度稳定,在80K到325K温度范围内,完成材料霍尔效应的自动测量。

[0050] 本发明磁场发生装置安装于真空装置外侧,使用电磁铁恒流源,通过设置电流大小控制测量过程中磁场大小,磁场强度为 $2.0\text{T}@18\text{mm}$ 磁极间距,并保持磁场 $>24$ 小时持续稳定工作。

[0051] 本发明的温控装置、磁场发生装置所使用仪器与上位机均采用GPIB接口实现通信。温控装置使用铂电阻温度计测量样品台温度;磁场发生装置使用电磁铁恒流源,最大工作电流 $\pm 70\text{A}$ ,线圈直流电阻小于 $0.5\ \Omega$ ,磁场强度为 $2.0\text{T}@18\text{mm}$ 磁极间距。

[0052] 所述数字化的恒流源上并联有4组连接回路,每一组连接回路上分别各设有一个与恒流源正极、负极对应的单刀双掷继电器,总计8个;在电压信号测试模块上并联有4组检测回路,每一组检测回路上分别各设有一个与电压信号测试模块正极、负极对应的单刀双掷继电器,总计8个;在第N组连接回路的中部与第N组检测回路中部之间通过一条连接电路A导通,连接电路的中部通过一条连接电路B连接到其中一组固定探针上。

[0053] 本发明设置了16组单刀双掷继电器和四组探针;

[0054] 如图3,用于测量的四边形样品四个角所接触的探针依照顺时针方向分别命名为A、B、C、D。如图4,开始自动测量后,温控装置将使测量环境到达某一特定温度并保持稳定。系统对每一特定温度,进行5组不同输入电流下的测试。对于每一恒定输入电流,进行16次测量,记录测量的电压信号。系统通过源表控制继电器开关模块中16组单刀双掷继电器开关的状态,从而选择输入电流的两个探针和读取电压的两个探针,然后通过精密恒流源向探针输入恒定电流,之后利用源表读取样品输出电压信号大小。前8组测量每次输入的恒定电流从相邻的两个探针经过,例如当电流从探针A流入,探针B流出,记电流为 $I_{12}^+$ ,并读取另两个相邻探针D和探针C之间的电压,记为 $V_{12,43}^+$ ;通反向电流,测得电流 $I_{12}^-$ ,同时测得电压 $V_{12,43}^-$ 。该8组测量在无磁场环境下进行,得到

$I_{12}^+, I_{12}^-, I_{23}^+, I_{23}^-, I_{34}^+, I_{34}^-, I_{41}^+, I_{41}^-, V_{12,43}^+, V_{12,43}^-, V_{23,14}^+, V_{23,14}^-, V_{34,21}^+, V_{34,21}^-, V_{41,32}^+, V_{41,32}^-$ 。测量结果用于计算材料的电阻率。后8组测量,先加正向磁场测量四组结果,每次输入的恒定电流从对角线上的两个探针经过,并读取另一对角线上两个探针之间的电压,例如当电流从探针C流入,探针A流出,记电流为 $I_{31}^+(\text{+B})$ ,并读取探针D和探针B之间的电压,记为 $V_{31,42}^+(\text{+B})$ ;通反向电流,测得电流 $I_{31}^-(\text{+B})$ ,同时测得电压 $V_{12,43}^-(\text{+B})$ 。后加反向磁场测量四组结果。该8组测量得到 $I_{31}^+(\text{+B}), I_{31}^-(\text{+B}), V_{31,42}^+(\text{+B}), V_{12,43}^-(\text{+B}), I_{42}^+(\text{+B}), I_{42}^-(\text{+B}), V_{42,13}^+(\text{+B}), V_{42,13}^-(\text{+B}), I_{31}^-(\text{-B}), I_{31}^+(\text{-B}), V_{31,42}^-(\text{-B}), V_{31,42}^+(\text{-B}), I_{42}^-(\text{-B}), I_{42}^+(\text{-B}), V_{42,13}^-(\text{-B}), V_{42,13}^+(\text{-B})$ 。测量结果用于计算材料的霍尔系数。完成16次测量后,调整输入电流大小对材料电阻率和霍尔系数再次进行测量并计算。完成5组不同输入电流下的测量后,对材料在另一温度下的电阻率和霍尔系数进行测量并计算

[0055] 依据范德堡法测量原理,使用上位机软件实现对所有测量结果进行电阻率、霍尔迁移率的计算。

[0056] 电阻率计算具体过程为:

[0057] 由测量得到的电流值和电压值 $I_{12}^+, I_{12}^-, I_{23}^+, I_{23}^-, I_{34}^+, I_{34}^-, I_{41}^+,$

$I_{41}^-, V_{12,43}^+, V_{12,43}^-, V_{23,14}^+, V_{23,14}^-, V_{34,21}^+, V_{34,21}^-, V_{41,32}^+, V_{41,32}^-$ ,按照式(1)

(2)计算 $Q_A, Q_B$ :

$$[0058] \quad Q_A = \left( \frac{V_{12,43}^+ - V_{12,43}^-}{I_{12}^+ - I_{12}^-} \right) \left( \frac{I_{23}^+ - I_{23}^-}{V_{23,14}^+ - V_{23,14}^-} \right) \quad (1)$$

$$[0059] \quad Q_B = \left( \frac{V_{34,21}^+ - V_{34,21}^-}{I_{34}^+ - I_{34}^-} \right) \left( \frac{I_{41}^+ - I_{41}^-}{V_{41,32}^+ - V_{41,32}^-} \right) \quad (2)$$

[0060] 用 $Q_A$ 或 $\frac{1}{Q_A}$ (两者中大于1的那个数)代入式(3)计算 $f_A, f_B$ :

$$[0061] \quad \frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left( \frac{1}{2} e^{\frac{\ln 2}{f}} \right) \quad (3)$$

[0062] 按照式(4)(5)计算 $R_A, R_B$ :

$$[0063] \quad R_A = \frac{\pi \cdot f_A}{\ln 2} \left( \frac{V_{12,43}^+ - V_{12,43}^- + V_{23,14}^+ - V_{23,14}^-}{I_{12}^+ - I_{12}^- + I_{23}^+ - I_{23}^-} \right) \quad (4)$$

$$[0064] \quad R_B = \frac{\pi \cdot f_B}{\ln 2} \left( \frac{V_{34,21}^+ - V_{34,21}^- + V_{41,32}^+ - V_{41,32}^-}{I_{34}^+ - I_{34}^- + I_{41}^+ - I_{41}^-} \right) \quad (5)$$

[0065] 按照式(6)计算体电阻率 $\rho_A, \rho_B$ :

$$[0066] \quad \rho = R \cdot t \quad (6)$$

[0067] 其中t为样品厚度。

[0068] 按照式(7)计算平均体电阻率:

[0069] 
$$\rho_{ave} = \frac{R_A \cdot t + R_B \cdot t}{2} \quad (7)$$

[0070] 按照式(8)计算面电阻率 $\rho'_A$ 、 $\rho'_B$ :

[0071]  $\rho' = R$  (8)

[0072] 按照式(9)计算平均面电阻率:

[0073] 
$$\rho'_{ave} = \frac{R_A + R_B}{2} \quad (9)$$

[0074] 霍尔迁移率计算具体过程为:

[0075] 由测量得到的 $I_{31}^+(+B)$ ,  $I_{31}^-(+B)$ ,  $V_{31,42}^+(+B)$ ,  $V_{12,43}^-(+B)$ ,  $I_{42}^+(+B)$ ,  $I_{42}^-(+B)$ ,

$V_{42,13}^+(+B)$ ,  $V_{42,13}^-(+B)$ ,  $I_{31}^+(-B)$ ,  $I_{31}^-(-B)$ ,  $V_{31,42}^+(-B)$ ,  $V_{31,42}^-(-B)$ ,  $I_{42}^+(-B)$ ,  $I_{42}^-(-B)$ ,

$V_{42,13}^+(-B)$ ,  $V_{42,13}^-(-B)$ ,按照式(10) (11)计算 $R_{H1}$ 、 $R_{H2}$ :

[0076] 
$$R_{H1} = \frac{1}{B} \cdot \frac{V_{31,42}^+(+B) - V_{31,42}^-(+B) + V_{31,42}^-(-B) - V_{31,42}^+(-B)}{I_{31}^+(+B) - I_{31}^-(+B) + I_{31}^-(-B) - I_{31}^+(-B)} \quad (10)$$

[0077] 
$$R_{H2} = \frac{1}{B} \cdot \frac{V_{42,13}^+(+B) - V_{42,13}^-(-B) + V_{42,13}^-(-B) - V_{42,13}^+(-B)}{I_{42}^+(+B) - I_{42}^-(-B) + I_{42}^-(-B) - I_{42}^+(-B)} \quad (11)$$

[0078] 按照式(12) (13)计算体效应 $R_{HC}$ 、 $R_{HD}$ :

[0079]  $R_{HC} = R_{H1} \cdot t$  (12)

[0080]  $R_{HD} = R_{H2} \cdot t$  (13)

按照式(14)计算平均值:

[0081] 
$$R_{Have} = \frac{R_{HC} + R_{HD}}{2} \quad (14)$$

[0082] 按照式(15) (16)计算面效应 $R'_{HC}$ 、 $R'_{HD}$ :

[0083]  $R'_{HC} = R_{H1}$  (15)

[0084]  $R'_{HD} = R_{H2}$  (16)

[0085] 按照式(17)计算平均值:

[0086] 
$$R'_{Have} = \frac{R'_{HC} + R'_{HD}}{2} \quad (17)$$

[0087] 按照式(18) (19)计算载流子浓度 $n(p)$ 、 $n(p)'$ :

[0088] 
$$n(p) = \frac{1}{|R_{Have}| \times e} \quad (18)$$

[0089] 
$$n(p)' = \frac{1}{|R'_{Have}| \times e} \quad (19)$$

[0090] 按照式(20)计算霍尔迁移率:

[0091] 
$$\mu_H = \frac{|R_{Have}|}{\rho_{ave}} \quad (20)$$

[0092] 上位机软件完成上述计算过程,得到材料的电阻率和霍尔系数,显示于用户界面,

并将所有测量结果与计算结果进行保存。所有结果按照测量时不同温度存储在不同文件中。每个文件将不同输入电流对应的测量结果与计算结果进行分隔,方便后续的读取与使用。

[0093] 以上述依据本发明的理想实施例为启示,通过上述的说明内容,相关工作人员完全可以在不偏离本项发明技术思想的范围内,进行多样的变更以及修改。本项发明的技术性范围并不局限于说明书上的内容,必须要根据权利要求范围来确定其技术性范围。

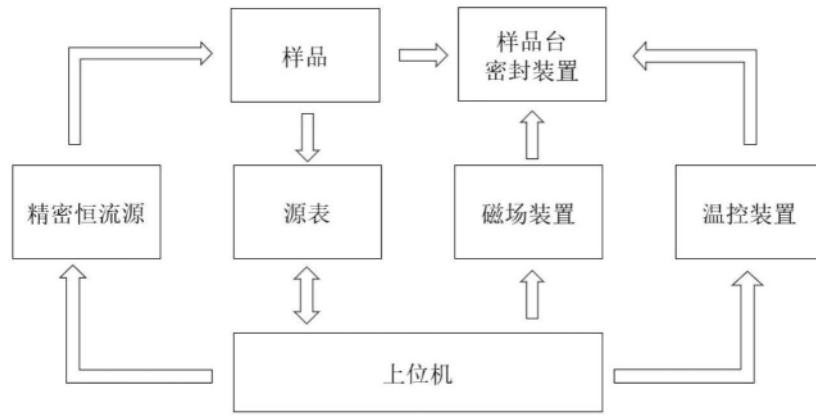


图1

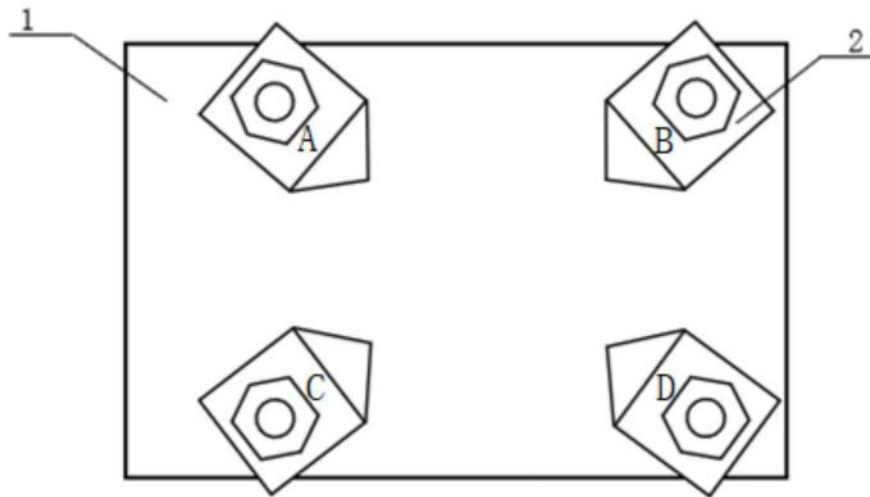


图2

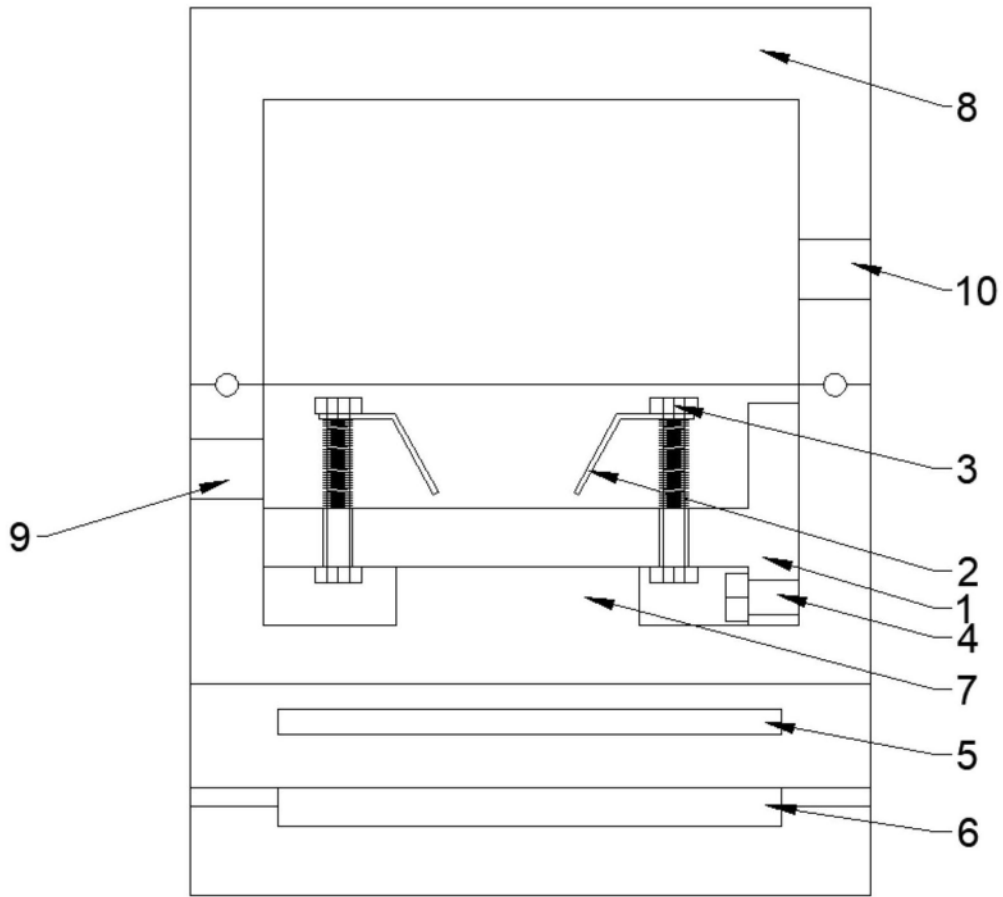


图3

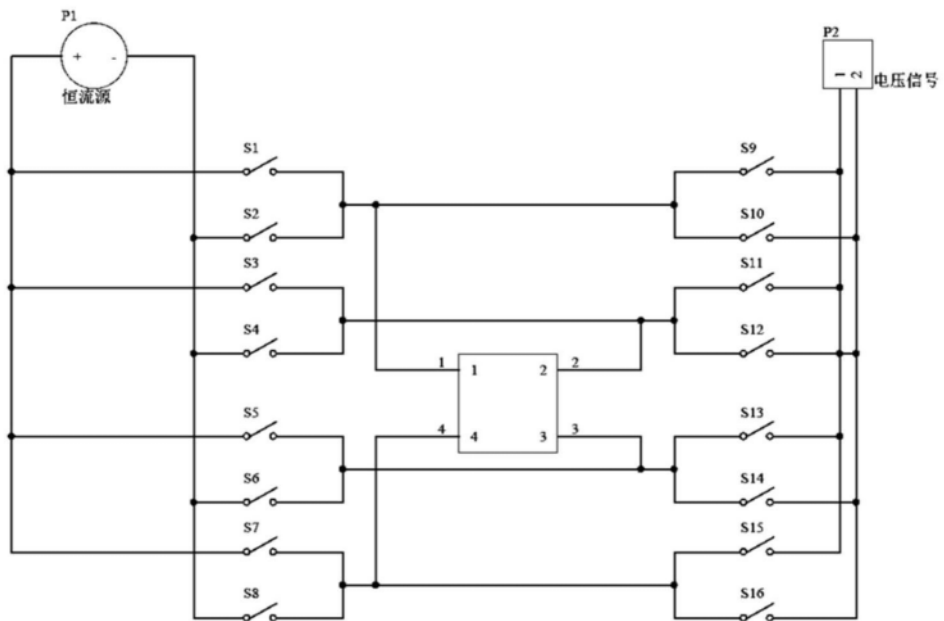


图4

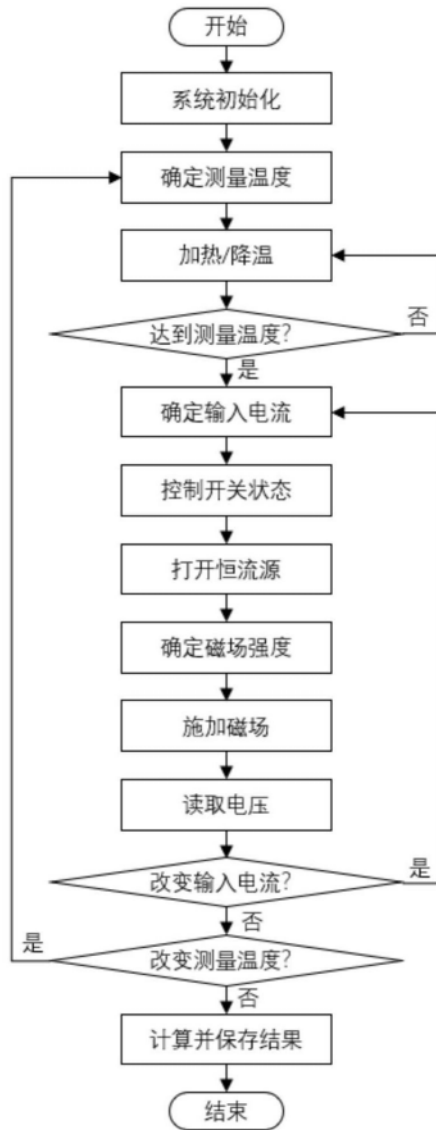


图5