

# 基于转角样品杆的脉冲强磁场电输运测量系统\*

刘沁莹<sup>1)2)</sup> 王俊峰<sup>1)</sup> 左华坤<sup>1)†</sup> 杨明<sup>1)</sup> 韩小涛<sup>1)2)‡</sup>

1) (华中科技大学, 国家脉冲强磁场科学中心(筹), 武汉 430074)

2) (华中科技大学, 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

(2019年7月19日收到; 2019年8月24日收到修改稿)

测量物质在不同外加磁场方向下的电输运性质是近年来研究拓扑量子材料的一种重要实验方法, 为探索物质的新奇特性提供了独特的视角和手段. 研究表明, 在超高强度的脉冲强磁场下, 材料的电输运研究可能扩展至量子极限区域, 将观察到更加丰富的物理现象. 而现有的电输运测量系统中, 稳态场下的样品测量杆受限于尺寸和材料, 难以适应脉冲场测量要求; 脉冲场下的传统样品测量杆的角度分辨率和空间利用率较低, 亟需研制更高性能的转角测量系统. 为此, 本文提出一种拉杆式转角样品杆, 基于该转角样品杆的脉冲强磁场电输运测量系统, 能够在极低温、强磁场的极端环境下, 于脉冲磁体中心通孔的微型样品腔内开展磁场方向  $190^\circ$  范围内任意变化的电输运性质测量实验, 其旋转结构稳定性良好, 转角控制精度达到  $0.1^\circ$ ; 通过合理设计集成电路布局、前置补偿放大和数字锁相提取等信号处理环节, 电输运测量结果的精确度优于  $0.1 \text{ m}\Omega$ . 本文详细阐述了该测量系统的组成、转角测量杆的设计与研制、校准原理与信号处理过程, 并简要介绍了该测量系统在费米面重构、拓扑绝缘体表面态、量子极限输运、超导电性等前沿研究领域的应用.

**关键词:** 脉冲强磁场, 电输运测量, 拉杆式转角样品杆

**PACS:** 07.05.Fb, 07.50.-e, 07.55.-w, 72.90.+y

**DOI:** 10.7498/aps.68.20191115

## 1 引言

现代科学研究越来越重视利用极端实验环境来探索常规条件下不能观测到的新现象和新物态. 大量实验已经表明, 外界磁场达到一定强度时, 物质将被诱导出现各种新奇量子现象. 随着凝聚态物理研究的不断深入, 人们发现当外磁场方向与样品晶轴方向之间的夹角发生变化时, 其 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡规律会发生相应的改变. 通过电输运手段测量材料的 SdH 振荡性质, 可以研究材料的费米面特性<sup>[1]</sup>. 由此衍生出的转角测量方法为强磁场下研究样品更多的奇异性提供了一个新的视角和手段<sup>[2,3]</sup>, 相关研究在磁扭矩测量<sup>[1]</sup>、超

导材料的费米口袋特性<sup>[4,5]</sup>、超导体临界场<sup>[6]</sup>、拓扑表面态行为<sup>[7]</sup>等方面都取得了阶段性成果. 在此基础上, 进一步提高磁场强度, 将材料的电输运研究扩展至量子极限区域逐渐成为发现更加丰富的物理现象的有效途径. 然而, 现有商用物性综合测量系统 (physical property measurement system, PPMS) 最高仅能在磁场强度  $\pm 16 \text{ T}$  范围内使用<sup>[8]</sup>. 而脉冲强磁场的最高场强值已达  $100.75 \text{ T}$ <sup>[9]</sup>, 研制脉冲强磁场下具有高精度、高稳定度的转角测量系统成为相关领域实验研究的迫切需求. 由于脉冲强磁场下的科学实验工作于极低温、强磁场、高压、小空间孔径、强机械噪声和电磁干扰的特殊环境中<sup>[10-12]</sup>, 传统商用测量仪器的固有设计与稳态磁场工作模式难以适用, 无法满足测量需要. 如何

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0401703) 和国家自然科学基金 (批准号: 51821005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zuohuakun@163.com

‡ 通信作者. E-mail: xthan@mail.hust.edu.cn

在这种复杂的测量环境下搭建出具有良好转角性能的电输运测量系统, 成为亟待解决的难题.

武汉国家脉冲强磁场科学中心(以下简称武汉强磁场中心)自建成以来, 多项技术指标达到国际一流水平<sup>[13]</sup>, 目前最高磁场达 90.6 T, 电源设计、磁体技术和测量水平位列世界前沿. 依托此脉冲强磁场大装置平台, 本文提出了具有拉杆式传动结构的转角样品测量杆, 研制了转角电输运测量系统, 在强磁场和极低温等极端实验条件下, 实现了磁电阻、霍尔电阻等参数的精准测量, 为研究材料在强磁场下的物理特性提供了有效的研究手段<sup>[14]</sup>, 有力支撑了凝聚态物理中的相关前沿科学问题如近藤效应、高温超导、量子霍尔效应、拓扑量子材料等课题研究的深入发展<sup>[15-17]</sup>.

## 2 脉冲场电输运测量系统构成

脉冲强磁场下的电输运测量系统如图 1 所示, 主要包括脉冲电源、脉冲磁体、控制中心、低温系统、信号测量系统等五大模块. 其中, 脉冲电源主要采用总能量为 25.6 MJ 的电容器型电源, 为电输运实验站中的脉冲磁体供电<sup>[10]</sup>; 脉冲磁体浸泡在

液氮中, 磁体中心孔径  $d \approx 22$  cm, 孔内样品腔直径  $d < 9$  mm, 常规实验峰值磁场可达 65 T, 放电持续时间为 10—100 ms, 磁体冷却时间约为 50 min; 控制中心通过光纤进行远程控制, 采用高精度高可靠时序控制和就地保护策略, 对强磁场装置进行实时监控和保护<sup>[18]</sup>; 低温系统由液氮低温恒温器和真空泵组成, 液氮低温恒温器可以保持 24 h 恒定低温. 样品可直接浸入液氮中, 也可置入真空插件中与液氮隔开. 必要时, 采用 <sup>3</sup>He 插件替换真空插件, 可以达到更低的温度(约 400 mK); 信号测量系统由信号采集单元、信号提取单元, 信号调制单元等构成, 用于对样品信号进行采集和初步的处理.

其中, 信号采集单元中的测量插件转角样品杆是一个特殊的精密仪器部件, 它用于搭载极小样品及微型 pick-up 线圈, 并深入磁体孔径中心处. 科学实验中针对不同类型的样品, 样品杆的机械结构及搭建的电路布局也不相同. 因此, 为满足各类新材料相关物理性质的测量要求, 设计出适用于极端环境及狭小空间的转角样品杆, 是转角电输运测量实验顺利开展的基础和前提.

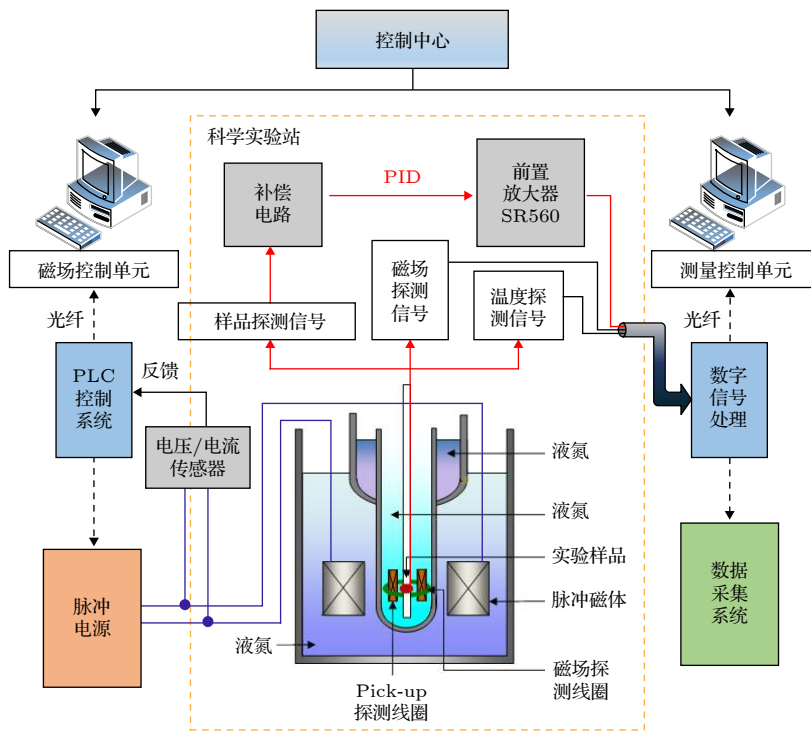


图 1 脉冲强磁场电输运测量系统

Fig. 1. Electrical transport measurement system in pulsed high magnetic field.

### 3 高性能转角样品测量杆研制

转角样品测量杆性能好坏直接影响实验结果的有效性和准确性. 脉冲强磁场实验环境特殊, 极低温、强脉冲等因素会产生陡峭的温度梯度、巨大的瞬时应力和感应涡流, 这些干扰都可能引起样品杆材料性能突变, 降低测量环节信噪比. 另外, 由于脉冲磁体孔径的限制, 样品杆所在的测量空间通常是一个只有 7—9 mm 直径的圆形区域, 严格限制了样品杆的宽度范围, 这对探测杆的结构设计、加工精度、空间利用率提出了极高的要求<sup>[19]</sup>.

传统稳态强磁场所用的金属结构转角样品杆如图 2(a) 所示, 杆件整体框架和齿轮结构均由金属材料制成, 宽度约为 25 mm, 适用于较低场下的 PPMS 物性综合测量系统<sup>[8]</sup>. 然而在脉冲场中, 一方面由于脉冲磁体孔径空间小, 严格限制了样品杆宽度必须小于 9 mm, 稳态场下的样品杆尺寸无法满足要求; 另一方面, 受脉冲电流感应涡流的影响, 沿用稳态场中使用大量的金属材料制作转角杆的传统方法显然是不合适的.

现有脉冲场环境下, 目前国外相关实验室通常使用拉绳牵引滑轮的结构来研制转角样品杆<sup>[20,21]</sup>, 其宽度约为 9 mm, 如图 2(b) 所示. 然而, 这种拉绳结构的线材温度伸缩系数较大, 在极低温下非常容易损坏, 存在角度控制精度较差、摩擦力不足导

致回拉易打滑等问题. 同时, 由于滑轮与样品台并行排列, 占用了本就有限的样品台空间, 导致该结构的空间利用率低, 当样品尺寸较大时, 难以满足测量需求.

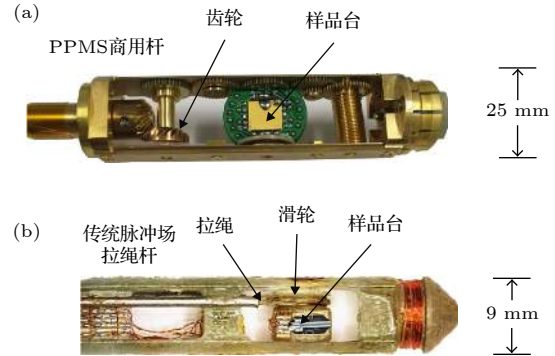


图 2 国内外已有转角样品杆 (a) 稳态强磁场中使用的探测样品杆; (b) 美国国家脉冲强磁场中心样品杆

Fig. 2. Rotation sample rod in: (a) Steady-state strong magnetic field; (b) NHMFL (National High Magnetic Field Laboratory).

#### 3.1 拉杆式转角样品杆的结构设计

为了解决以上问题, 设计了一种新型的基于多重拉杆结构的转角样品杆, 其旋转杆内部机械结构如图 3(a) 所示, 其中, 1 是角度控制旋钮, 2 是带有螺纹的传导管, 1 与 2 分别作为螺母和螺杆, 共同构成螺栓结构. 转动旋钮螺母时, 带动螺杆 2 做上下移动; 3 是传动杆, 4 是水平滑槽, 5 是斜滑槽,

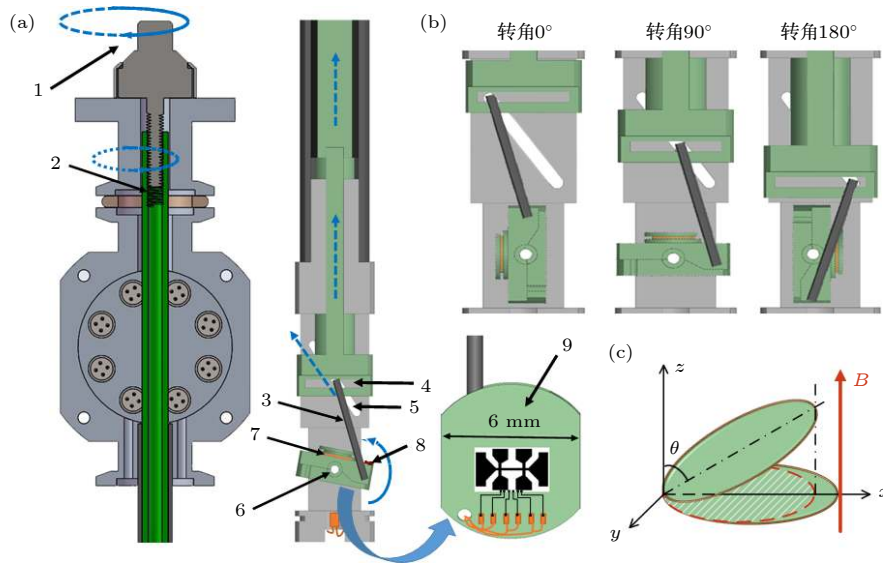


图 3 武汉强磁场中心转角样品杆 (a) 机械结构图; (b) 转角示意图; (c) 角度标定原理图

Fig. 3. Rotation sample rod in WHMFC (Wuhan National High Magnetic Field Center): (a) Mechanical structure diagram; (b) situation at different angles; (c) principle of angle calibration.

4 和 5 同时对 3 进行限位, 使其仅有一个位移自由度, 保证了运动轨迹的唯一性. 通过交叉滑槽结构控制传动杆, 只需要在样品台背面取一个支撑点 6, 即可形成杠杆结构, 实现  $-5^\circ$ — $185^\circ$  转角功能. 其转角为  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  时, 机械结构状态如图 3(b) 所示. 其中位于样品台背面的 7 是角度标定线圈, 用于检测样品台的旋转角度, 8 是温度计, 即热敏贴片电阻, 用于实验过程中测量样品台的即时温度; 9 是样品台正面, 用于搭载样品并固定引线, 一般通过四线法来测量样品的磁阻、霍尔电阻等参数. 这种旋转机构中传动杆下方支点通过样品台背面的转轴孔与样品台连接, 从背面带动样品台旋转, 不占用样品台正面空间, 从而最大限度地保留了样品台面积, 较传统方式有更高的空间利用率, 最小可以在直径 7—9 mm 的圆柱空间内使用, 在测量准确度和可靠性方面均取得有效提升.

### 3.2 旋转角度的精确控制

目前, 大多数商用转角样品测量杆在角度控制上没有角度值的实时反馈, 直接影响物理效应的测量效果. 针对这一问题, 设计的测量杆通过杆件底部角度标定线圈进行反馈控制, 实现旋转角度的精确控制. 先根据所需实验角度旋转旋钮, 此时旋钮示数反映期望值; 而旋转角度的实际值由角度标定线圈上感应电压根据空间投影原理计算得到; 对比期望值与实际值, 可以对控制旋钮进行快速反馈校正. 样品台空间几何示意图如图 3(c) 所示, 其旋转角度  $\theta$  计算公式如下:

$$\sin \theta = \frac{S'}{S_0} = \frac{\frac{d}{dt} \int_s B \cdot \sin \theta \cdot dS_0}{\frac{d}{dt} \int_s B \cdot dS_0}$$

$$= \frac{\oint_c E' \cdot dl}{\oint_c E_0 \cdot dl} = \frac{U'}{U_0}, \quad (1)$$

$$\theta = \arcsin \frac{U'}{U_0}, \quad (2)$$

其中,  $U$  是角度标定线圈的感应电压, 通过高速数据采集卡采集;  $S_0$  是感应线圈的固有面积,  $U_0$  是样品台垂直磁场方向、通过磁通量最大时刻的感应电压值;  $S'$  是转过某个角度时线圈感应电压的有效投影面积,  $U'$  是此刻测得的角度标定线圈的感应电

压值.

此外, 由于拉杆结构远比滑轮结构稳定, 不受热胀冷缩影响, 因此可以在使用过程中可重复对照, 将角度控制旋钮上的刻度和  $\theta$  角严格对应起来, 这种双重角度标定方法保证了角度旋转调节过程的严谨性, 可以达到  $0.1^\circ$  的角度分辨率, 使样品杆的测量准确度得到了很大提高.

### 3.3 样品杆非金属选材与集成化布局设计

另一方面, 样品杆结构材料的选取对其性能稳定性好坏、使用寿命长短有着很大的影响. 脉冲场实验过程中, 磁体放电瞬间将产生一个很大的  $dB/dT$  值, 变化的电磁场在金属材料中形成涡流场, 引发的热效应会对实验环境的热稳定性造成影响, 同时伴随涡流产生的电磁干扰也会对样品微弱的本征信号造成干扰, 因此金属材料不宜作为脉冲场下的转角样品杆原材料. 此外, 由于实际情况下样品杆的零件需浸泡在最低 1.3 K 的液氮中, 而绝大多数非金属材料在这种极低温下脆性都会变大, 可能产生较大的形变, 从而影响转角杆性能的稳定性, 故而常规的非金属材料也不能满足要求. 考虑到上述问题, 我们经过反复调研、实验, 最终确定了聚醚醚铜 (PEEK) 作为转角样品杆主体框架结构材料. 这是一种新型特种工程塑料, 其耐高温性、耐化学药品性、耐磨性、尺寸稳定性、绝缘性都表现优异, 且 PEEK 具有较低的热膨胀系数 (约  $20 \times 10^{-6}/K$ ), 与传动轴在实验中过程中相对形变量小于 2‰, 严格控制了由于材料温升形变带来的角度控制误差, 进一步保证了样品杆测量过程中的稳定可靠.

最后, 为了使样品杆在进行磁电阻、霍尔电阻、信号传输测量的同时, 兼具温度传感、加热控制等功能, 在样品台背面焊接贴片电阻以测量样品台温度, 在样品杆尾部缠绕线圈构成加热器, 绕线类型使用双绞型, 以避免感应电流对温控造成影响, 加热器在实验腔中通过氦气传热, 低温下保持了较高的导热效率. 基于如上设计, 于外部配套搭载了与实验需求相匹配的电气引线集成布局方案, 终端与测量杆顶部的高真空接头相连. 经过反复测试改良, 我们制作了基于杠杆结构的高精度转角样品测量杆, 宽度仅为 8 mm 左右, 成功达到电输运科学研究实验中脉冲磁体孔径的尺寸要求, 如图 4 所示.

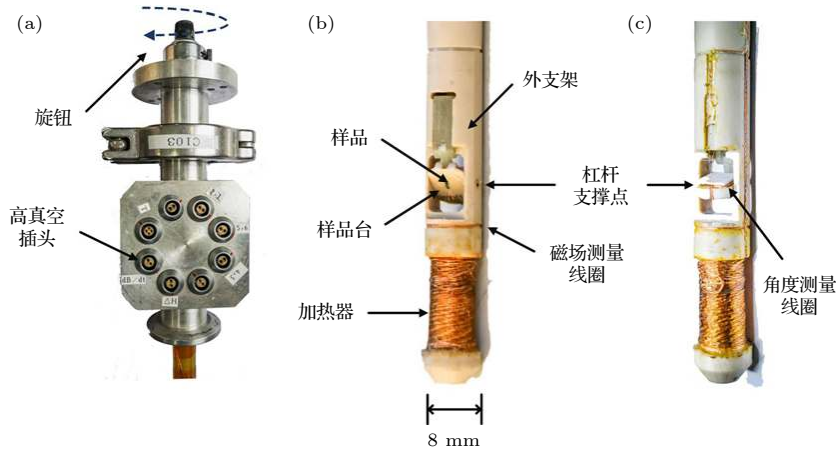


图 4 转角样品测量杆实物图 (a) 杆件顶部旋钮及引线罗盘; (b) 底部样品台正面; (c) 底部样品台背面

Fig. 4. Physical diagram rotation sample rod: (a) Top part; (b) the front of the bottom sample stage; (c) the back of the bottom sample stage.

表 1 不同样品杆技术参数比较

Table 1. Technical parameters of different kind of measurement rod.

样品杆类型及参数	角度范围 $\theta/(\circ)$	角度分辨率 $\theta/(\circ)$	磁场范围 $B/T$	适应孔径 $d/mm$	样品台空间
PPMS商用样品杆	-10—370	0.05	$\pm 16$ (稳态)	25	相对孔径较大
传统拉绳式样品杆	0—180	1.00	>60 (脉冲)	9	相对孔径较小
新型拉杆式样品杆	-5—185	0.10	>60 (脉冲)	8	相对孔径较大

### 3.4 不同转角样品杆性能对比

表 1 列出了本文拉杆式样品杆与 PPMS 商用样品杆<sup>[8]</sup>、传统脉冲场拉绳式样品杆<sup>[22,23]</sup>的参数对比,可以看出我们研制的新型拉杆式样品杆在保证脉冲场测量范围足够大的同时,在较小的空间孔径中实现了样品台空间利用的最大化,并且保证了较高的角度分辨率.

### 3.5 基于转角样品杆的电输运测量过程

以半金属样品  $WTe_2$  为例,介绍本文转角样品杆在脉冲强磁场电输运测量系统中的实际操作步骤.

第一步,确定旋转角.将  $WTe_2$  样品焊接在样品台上,根据研究目的确定所需角度范围为  $0^\circ-90^\circ$ ,选取  $0^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  为一组实验角度值,转动旋钮控制样品台旋转到估值附近,操作脉冲电源对脉冲磁体放电产生脉冲磁场,样品台背部角度标定线圈感应出实时转角并反馈至控制中心,此时角度测量线圈与磁场测量线圈测得的信号如图 5(a) 所示,由 (1) 式和 (2) 式可以计算得出此时样品的精确转角值为  $33^\circ$ .

第二步,测量样品输运信号.对样品通入高频

电流,通过四线法测量得到样品电压,测量结果如图 5(b) 所示,可以看出,这一信号信噪比 (signal-noise ratio, SNR) 极小,必须进行降噪信号处理.

第三步,获得测试结果.基于虚拟数字锁相放大 (virtual digital lock-in amplify, VDLIA) 的方法来计算并提取出微弱的样品磁电阻信号,其相关计算原理可参考文献<sup>[24]</sup>,其结果分辨率可达  $0.1\text{ m}\Omega$ . 处理完样品的  $B-T$  与  $Amp-T$  信号后,将其拟合并得到这一角度下样品磁阻随磁场的变化曲线,如图 5(c) 所示,重复这一过程,直到获得整组角度信息,如图 5(d) 所示,此时已经可以看出各个角度下清晰的 SdH 量子振荡现象.

实际测量过程中,高速采集卡得到的所有信号经补偿、放大、数字处理单元后进入上位机总线,通过光纤返回控制中心,对脉冲磁体、脉冲电源、样品转角等参数进行反馈调节,从而构成完整的脉冲强磁场下的转角电输运测量系统.

## 4 脉冲场转角电输运实验

近年来,通过使用转角样品杆作为工具,国内外科学工作者开展了一系列转角电输运测量实验,揭示了各类新型材料在强磁场、极低温环境下的电

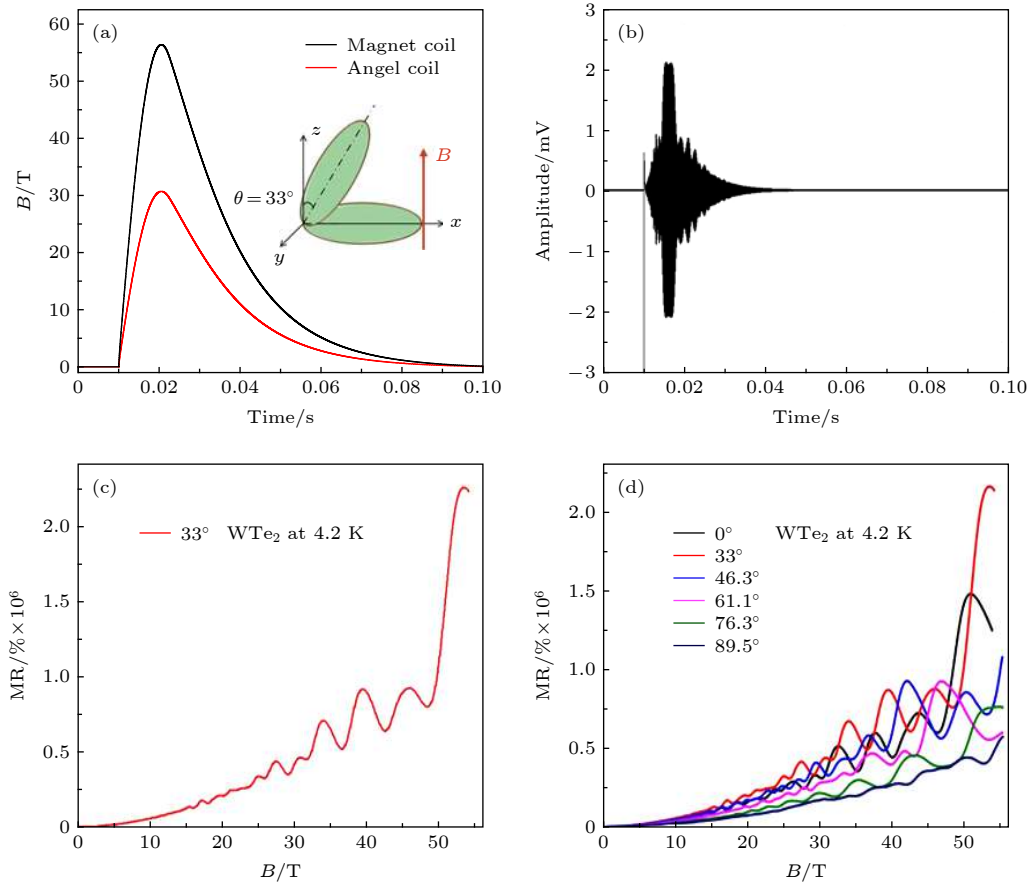


图 5 60 T 脉冲强磁场下角电输运实验相关数据处理过程

Fig. 5. Signal processing of angular-dependent electrical transport experiment in 60 T pulsed high magnetic field.

输运行为, 有力推动了凝聚态物理学探索拓扑材料微观结构的进程, 在以下几个热点方向都取得了重要的研究成果.

1) 构造量子材料三维费米面结构. 费米面是动量空间中占据最高能级的等能面, 只有费米面附近的电子决定材料中的各类物理性质, 因此费米面结构的研究对探索材料的电学行为具有重要意义. 电输运测量实验中, 科研工作者通过旋转样品角度至不同的晶轴方向, 在强磁场下进行低温 Shubnikov-de Haas 效应测量 SdH 频率的角度依赖性, 根据昂色格 (Onsager) 关系推出不同角度下的费米面截面积, 从而构造三维费米面信息. 例如北京大学量子材料中心王健课题组<sup>[25]</sup>在武汉强磁场中心 4.2 K, 60 T 脉冲强磁场下, 观察到三维狄拉克半金属  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  沿不同晶轴方向上的 SdH 振荡表现出显著的各向异性, 如图 6 所示. 通过分析各个角度下的磁阻振荡数据, 揭示出单晶  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  的费米面是由两个嵌套在一起的椭球结构. 类似方法在研究重费米子超导体<sup>[26]</sup>、外尔半金属<sup>[27,28]</sup>、拓

扑半金属<sup>[29]</sup>、过渡金属二硫化物<sup>[30]</sup>等体系中都获得了应用.

2) 研究拓扑绝缘体二维表面态特征. 这种无能隙的表面态完全由体电子态的拓扑结构所决定, 在时间反演对称性的保护下, 不会受到杂质和无序的影响, 在未来的自旋电子学和量子计算中有着巨大的应用潜力. 理论上, 三维拓扑绝缘体的体态是绝缘性的, 边界上存在着导电的二维表面态. 而实际中由于样品缺陷等原因, 三维拓扑绝缘体的体态并不完全绝缘, 因而对验证其无能隙的表面态带来了极大的干扰. 斯坦福大学材料与能源科学研究所 Analytis 等<sup>[31]</sup>在研究  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  晶体时将磁场提高到 50 T 左右, 使样品体态电子坍塌至朗道能级为零的量子极限状态, 此时在磁场中旋转样品, 发现如图 7(a) 所示的量子振荡现象仅仅依赖于磁场  $B$  的垂直分量, 这一奇特的 SdH 振荡信息为其二维表面态特征提供了明确的证据. 两年后, Tel Aviv University 物理与天文学院 Petrushevsky<sup>[32]</sup>也在强磁场环境下进行了类似实验, 结果如图 7(b)

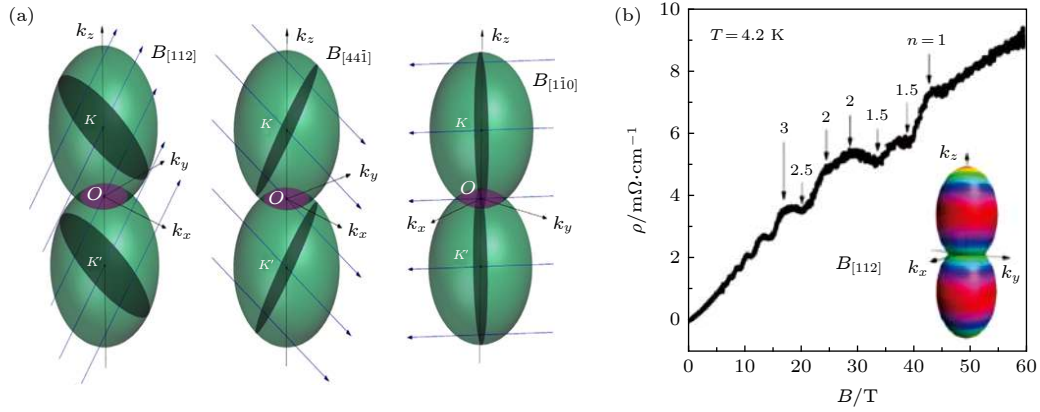


图 6  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  三维嵌套各向异性费米面构造图 (a) 不同晶轴方向的费米面最大横截面; (b)  $B_{[112]}$  方向上的量子振荡  
 Fig. 6. 3D nested anisotropic Fermi surface construction of  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ : (a) Largest cross section of Fermi surface versus the magnetic field orientation; (b) quantum oscillation for  $B_{[112]}$  direction.

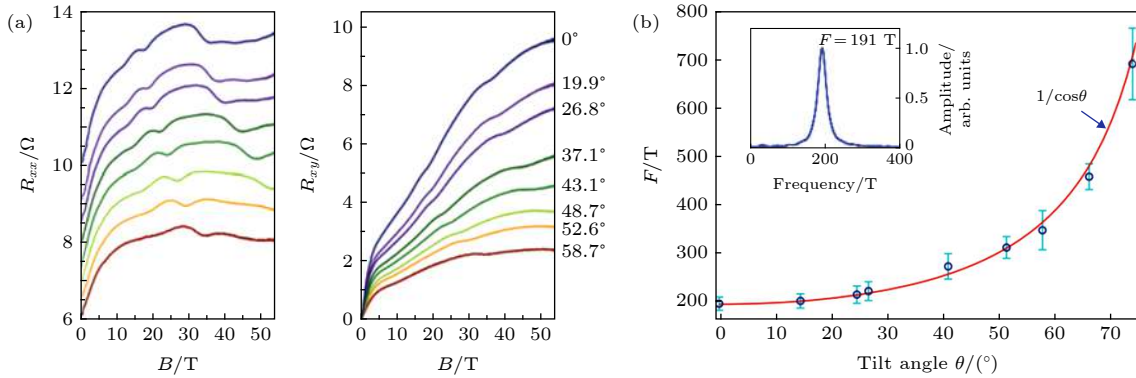


图 7 拓扑绝缘体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  二维表面态特征 (a) 量子振荡现象<sup>[31]</sup>; (b) 振荡频率随转角的变化曲线<sup>[32]</sup>  
 Fig. 7. 2D surface state of a topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ : (a) Quantum oscillation<sup>[31]</sup>; (b) frequency of the oscillations as a function of  $\theta$ <sup>[32]</sup>.

所示, 表明 SdH 振荡频率与旋转角度呈明显的  $\cos\theta$  函数关系, 拓扑绝缘体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  的二维表面态得到了进一步的证明.

3) 量子极限输运性质研究. 量子极限态指的是磁场到达一定强度时电子高度简并在最低朗道能带, 成为一种强关联体系, 此时样品会表现出许多新奇的物理性质. 武汉强磁场中心王俊峰与合作者利用 65 T 脉冲磁体, 通过一系列的变温和转角电输运测量, 对新型 Weyl 半金属 TaP 开展了强磁场下的转角电输运研究<sup>[33]</sup>. 如图 7(a) 所示, 在 34.4 T 的临界磁场下, TaP 的霍尔信号发生明显反转, 由此证实了 TaP 的一对手性相反的 Weyl 点在强磁场下发生湮灭. 在量子极限范围内, 具有相反手性的 Weyl 点将被移动到同一动量坐标上, 电子的磁长度倒数与 Weyl 点的动量距离相比拟而发生磁隧穿效应时, 有可能实现能隙的打开以及 Weyl 费米子的湮灭. 该研究在国际上首次观察

并证实了 Weyl 点的湮灭现象, 通过强磁场下的量子极限输运研究深刻揭示了 Weyl 费米子在强磁场下的非平庸拓扑性质. 文献 [34] 研究了元素 Bi 的输运性质, 通过测量 SdH 振荡周期的角度依赖性, 发现当进入量子极限状态时, 在某些特定角度下霍尔电阻率与磁场无关. 文献 [35] 则描述了 Bi 在量子极限状态外的极大不稳定性, 通过  $-10^\circ-10^\circ$  的转角测量, 发现在磁场强度 40 T 时, 超量子体系的输运特性表现出了显著不与角相关的电子不稳定性, 增强了导电率的绝对值和金属温度的依赖性, 见图 8(b).

4) 探索超导材料的超导电性. 超导是凝聚态物质中电子的一种宏观多体量子态, 同时满足零电阻和迈斯纳效应两个物理性质, 其中发现的种种奇异量子现象是现代基础科学研究的重要源泉, 在能源、医疗、通信等领域都有着广泛的应用前景. 武汉强磁场中心左华坤及其合作者进行了准一维络

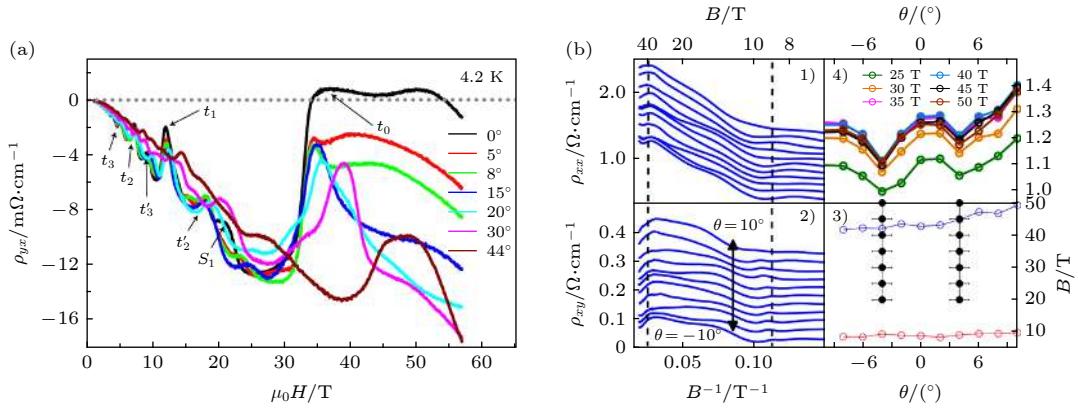


图 8 脉冲强磁场下的半金属材料量子极限运输研究 (a) TaP; (b) Bi

Fig. 8. Quantum limit electrical transport of semi-metal materials in pulsed high magnetic fields: (a) TaP; (b) Bi.

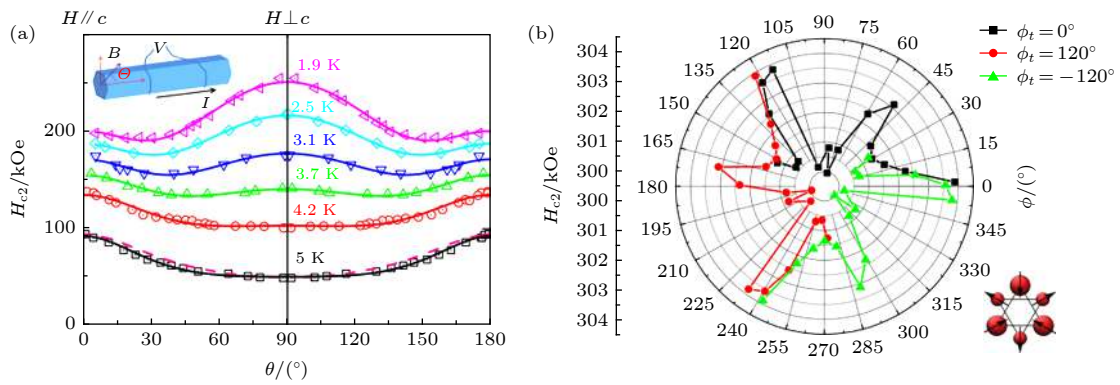


图 9 超导材料  $K_2Cr_3As_3$  的转角电输实验结果 (a)  $\pi/2$  处出现上方临界场 ( $H_{c2}$ ) 的最大值表明了泡利极限的缺失; (b) 极坐标图则体现了  $H_{c2}$  的三重调制性

Fig. 9. Electrical transport of the superconducting material  $K_2Cr_3As_3$ : (a) The maximum value of the upper critical field ( $H_{c2}$ ) at  $\pi/2$  indicates the absence the Pauli paramagnetic effect; (b) the polar map of  $H_{c2}$  shows a unique three fold modulation.

基砷化物超导材料  $K_2Cr_3As_3$  在强磁场下的转角电输实验, 得到如图 9 所示的实验结果 [36], 可以看出上方临界场中的各向异性随温度的降低成反比关系, 在  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  时取最大值 (远超泡利顺磁极限), 其正常态表现出具有线性电阻率的非费米液体行为, 并且在低温下显示出独特的三重调制, 表明这类准一维铬基材料可能具有非常规的自旋-三重态超导电性。

## 5 结 论

电输测量是探测量子材料物理属性的最基本方法之一. 本文介绍了基于转角样品杆的脉冲强磁场电输测量系统, 其中搭载样品的测量杆是构成信号探测单元的关键部分, 所述样品测量杆基于杠杆传动原理和双重角度标定方法, 使用聚醚醚铜特殊材料制作, 在不到 9 mm 的样品空间内, 顺利

开展了最高磁场强度 65 T、最低温度 1.3 K 下的样品转角电输实验. 这种新型样品杆的转角范围  $-5^\circ-185^\circ$ , 角度分辨率优于  $0.1^\circ$ , 电输测量精确度优于  $0.1 \text{ m}\Omega$ , 相关实验精确度、使用便捷性、空间利用率等性能指标优于现有转角样品杆。

本文研制的脉冲强磁场转角电输测量系统, 突破了目前大多数电输实验系统磁场强度有限、样品台空间利用率低下、转角估值不准的瓶颈, 实现了在极端环境下对微小样品腔中对样品姿态的精确控制, 基于此完成了不同磁场方向下的各类角度相关的电输测量研究. 相关实验结果表明, 该类系统在三维费米面分析、拓扑表面态判断、量子极限输运探测、超导电性分析等方面的研究具有重要应用价值. 基于此系统, 武汉强磁场中心取得了一批丰硕的研究成果, 并为国内外相关研究团队在强磁场、极低温环境下探索量子材料本征物理性能和机制提供了一种有效研究手段。



## 参考文献

- [1] Li G, Xiang Z, Yu F, Asaba T, Lawson B, Cai P, Tinsman C, Berkley A, Wolgast S, Eo Y S, Kim D J, Kurdak C, Allen J W, Sun K, Chen X H, Wang Y Y, Fisk Z, Li L 2014 *Science* **346** 1208
- [2] Huang X C, Zhao L X, Long Y J, Wang P P, Chen D, Yang Z H, Liang H, Xue M Q, Wen H M, Fang Z, Dai X, Chen G F 2015 *Phys. Rev. X* **5** 031023
- [3] Wang Y J, Yu J H, Wang Y Q, Xi C Y, Ling L S, Zhang S L, Wang J R, Xiong Y M, Han T, Han H, Yang J, Gong J X, Luo L, Tong W, Zhang L, Qu Z, Han Y Y, Zhu W K, Pi L, Wan X G, Zhang C J, Zhang Y H 2018 *Phys. Rev. B* **97** 115133
- [4] Ramshaw B J, Vignolle B, Day J, Liang R X, Hardy W N, Proust C, Bonn D A 2011 *Nature Phys.* **7** 234
- [5] Sebastian S E, Harrison N, Altarawneh M M, Liang R X, Bonn D A, Hardy W N, Lonzarich G 2011 *Nat. Commun.* **2** 471
- [6] Murphy J, Tanatar M A, Graf D, Brooks J S, Bud'ko S L, Canfield P C, Kogan V G, Prozorov R 2013 *Phys. Rev. B* **87** 094505
- [7] Qu D X, Hor Y S, Xiong J, Cava R J 2010 *Science* **329** 821
- [8] Quantum Design PPMS Specification <https://www.qdusa.com/sitedocs/productBrochures/1070-002.pdf> [2019-7-12]
- [9] Doan N N, James M, Chuck H M 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 4300905
- [10] Fritz H, Miura N 2003 *Magnetic Fields Science and Technology* (Vol. 1) (New Jersey: World Scientific Publishing) pp285–316
- [11] Han X T, Peng T, Ding H F, Ding T H, Zhu Z W, Xia Z C, Wang J F, Han J B, Ouyang Z W, Han Y B, Xiao H X, Cao Q L, Lü Y L, Pan Y, Li L 2017 *Matter and Radiation at Extremes* **2** 278
- [12] Wang S L, Li L, Ouyang Z W, Xia Z C, Xia N M, Peng T, Zhang K B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 107601 (in Chinese) [王绍良, 李亮, 欧阳钟文, 夏正才, 夏念明, 彭涛, 张凯波 2012 *物理学报* **61** 107601]
- [13] Li L, Lü Y L, Xiao H X, Pan Y, Peng T 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 4303204
- [14] Liu Y J, Lin Z Q, Wang J F 2016 *Physics* **45** 19 (in Chinese) [刘永杰, 林梓泉, 王俊峰 2016 *物理* **45** 19]
- [15] Cheng K Q, Wang L, Xu Y J, Yang F, Zhu H P, Ke J Z, Lu X F, Xia Z C, Wang J F, Shi Y G, Yang Y F, Luo Y K 2019 *Phys. Rev. Mater.* **3** 021402(R)
- [16] Wang H C, Liu H W, Li Y N, Liu Y J, Wang J F, Liu J, Dai J Y, Wang Y, Li L, Yan J Q, Mandrus D, Xie X C, Wang J 2018 *Sci. Adv.* **4** 5096
- [17] Zhao L X, Xu L C, Zuo H K, Wu X M, Gao G Y, Zhu Z W 2018 *Phys. Rev. B* **98** 085137
- [18] Shi J T, Han X T, Xie J F, Li L 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 4300604
- [19] Zuo H K, Xia Z C, Li L 2014 *CN Patent for Utility Model* 203704948 U
- [20] Coldea A I, Andrew C M J, Analytis J G, McDonald R D, Bangure A F, Chu J H, Fisher I R, Canrington A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 026404
- [21] Torque Magnetometry in Pulsed Fields, National High Magnetic Field Laboratory <https://nationalmaglab.org/user-facilities/pulsed-field-facility/pff-measurement-techniques/torque-magnetometry-pff> [2019-7-12]
- [22] Wang K F, Graf D, Lei H C, Tozer S W, Petrovic C 2011 *Phys. Rev. B* **84** 220401
- [23] Wang K F, Graf D, Wang L M, Lei H C, Tozer S W, Petrovic C 2012 *Phys. Rev. B* **85** 041101
- [24] Liu Q Y, Zhang S Z, Ding L C, Zuo H K, Han X T 2019 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings* Auckland, New Zealand, May 20–23, 2019 p504
- [25] Zhao Y F, Liu H W, Zhang C L, Wang H C, Wang J F, Lin Z Q, Xing Y, Lu H, Liu J, Wang Y, Brombosz S M, Xiao Z L, Jia S, Xie X C, Wang J 2015 *Phys. Rev. X* **5** 031037
- [26] Gotze K, Klotz J, Gnida D, Harima H, Aoki D, Demuer A, Elgazzar S, Wosnitza J, Kazzorowski D, Sheikin I 2015 *Phys. Rev. B* **92** 115141
- [27] Arnold F, Shekhar C, Wu S C, Sun Y, Reis R D, Kumar N, Naumann M, Ajeesh M O, Schmidt M, Grushin A G, Bardarson J H, Baenitz M, Sokolov D, Borrmann H, Nicklas M, Felser C, Hassinger E, Yan B H 2016 *Nat. Commun.* **7** 11615
- [28] Zhang C L, Schindler F, Liu H W, Chang T R, Xu S Y, Chang G Q, Hua W, Jiang H, Yuan Z J, Sun J L, Jeng H T, Lu H Z, Lin H, Hasan M Z, Xie X C, Nerpert T, Jia S 2017 *Phys. Rev. B* **96** 165148
- [29] Kim H, Wang K F, Nakajima Y, Hu R W, Ziemak S, Syers P, Wang L M, Hodovanets H, Denlinger J D, Brydon P M, Agterberg D F, Tanatar M A, Prozorov R, Paglione J 2018 *Sci. Adv.* **4** 4513
- [30] Zhu Z W, Lin X, Liu J, Fauque B, Tao Q, Yang C L, Shi Y G, Behnia K 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 176601
- [31] Analytis J G, McDonald R D, Riggs S C, Chu J H, Boebinger G S, Fisher L R 2010 *Nature Phys.* **6** 960
- [32] Petrushevsky M, Lahoud E, Ron A, Maniv E, Diamant I, Neder I, Wiedmann S, Guduru V K, Chiappini F, Zeitler U, Maan J C, Chashka K, Kanigel A, Dagan Y 2012 *Phys. Rev. B* **86** 045131
- [33] Zhang C L, Xu S Y, Wang C M, Lin Z Q, Du Z Z, Guo C, Lee C C, Lu H, Feng Y Y, Huang S M, Chang G Q, Hsu C H, Liu H W, Li L, Zhang C, Zhang J L, Xie X C, Neupert T, Hasan M Z, Lu H Z, Wang J F, Jia S 2017 *Nature Phys.* **13** 979
- [34] Fauque B, Yang H, Sheikin I, Balicas L, Issi J P, Behnia K 2009 *Phys. Rev. B* **79** 245124
- [35] Fauque B, Vignolle B, Proust C, Issi J P, Behnia K 2009 *New J. Phys.* **11** 113012
- [36] Zuo H K, Bao J K, Liu Y, Wang J H, Jin Z, Xia Z C, Li L, Xu Z, Kang J, Zhu Z W, Cao G H 2017 *Phys. Rev. B* **95** 014502

# Electrical transport measurement system in pulsed high magnetic field based on rotation sample rod\*

Liu Qin-Ying<sup>1)2)</sup> Wang Jun-Feng<sup>1)</sup> Zuo Hua-Kun<sup>1)†</sup>Yang Ming<sup>1)</sup> Han Xiao-Tao<sup>1)2)‡</sup>1) (*Wuhan National High Magnetic Field Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)2) (*State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,**Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 19 July 2019; revised manuscript received 24 August 2019)

## Abstract

In recent years, measuring the electrical transport properties of materials in different directions of applied magnetic field has become an important experimental study of topological quantum materials. With the development of condensed matter physics, scientific research has shown that under the ultra-high intensity pulsed magnetic field, the electrical transport study of materials may extend to the quantum limit region, and more abundant physical phenomena will be observed. However, in the existing electric transport measurement system, the rotation sample rod under the action of steady-state field presents a large size and significant eddy current effect, which makes it difficult to meet the requirements for pulsed field measurement, and the current commercial physical property measurement system (PPMS) can only operate under  $\pm 16$  T steady magnetic field. In addition, the conventional rotation sample rod encounters the problems of insufficient angular resolution and space utilization when used in pulsed high magnetic environment. So there is an urgent need to develop a higher performance rotation measurement system. In view of the above background, in this paper we present a kind of electrical transport measurement system designed by Wuhan National High Magnetic Field Center (WHMFC), which consists of five modules: pulse power supply, pulse magnet, control center, cryogenic system, and signal measurement. The key component is the sample measuring rod with rotation function, which restricts the movement of the drawbar through a double-groove structure to achieve an angular change in a range from  $-5^\circ$  to  $185^\circ$ . An angle calibration coil is mounted on the back of the sample stage. Based on the double-calibration method, the angle control accuracy of  $0.1^\circ$  is achieved. The temperature, magnetoresistance and Hall resistance signal are collected by the integrated circuit on sample stage and extracted by compensation circuit and virtual digital lock-in amplifier, and the accuracy of electric transport measurement is better than  $0.1$  m $\Omega$ . Furthermore, the effect of eddycurrent and material deformation at low temperatures are completely eliminated by using polyetheretherketone material, which effectively improves the stability and reliability of the rotation sample rod. Using this measuring rod, we complete a series of experiments in the 8 mm sample cavity in the center of the pulse magnet: the minimum ambient temperature reaches 1.3 K, the maximum magnetic field strength arrives at 65 T, and the direction angle of the magnetic field is able to change in a  $190^\circ$  range. Thus the universally applicable measurement system of electric transport experiment in pulsed high magnetic field is successfully established. In this paper, we elaborate the principle and device components of the measurement system, the design and fabrication of the angle measuring rod, and the calibration principle and measurement process. Relevant experimental results show that the system has important application value in the research of 3D Fermi surface, topological insulator surface state, quantum limit transport, superconductivity analysis, etc. Based on this system, the electrical transport experimental system at WHMFC provides an effective means for the relevant research teams (home and abroad) engaged in the exploration of the intrinsic physical characteristics of quantum materials in extremely pulsed high magnetic field and low temperature environment.

**Keywords:** pulsed high magnetic field, electrical transport measurement, level rotation sample rod

**PACS:** 07.05.Fb, 07.50.-e, 07.55.-w, 72.90.+y

**DOI:** 10.7498/aps.68.20191115

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0401703) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51821005).

† Corresponding author. E-mail: [zuohuakun@163.com](mailto:zuohuakun@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [xthan@mail.hust.edu.cn](mailto:xthan@mail.hust.edu.cn)