

# 泰克电输运/物性表征/量子材料/超导材料测试方案

**关键词：**电输运、物性表征、凝聚态、量子材料、拓扑材料、超硬材料、异质结构材料、半金属材料、超导低温、量子自旋、量子振荡

## 概述：

凝聚态物理学是研究由大量微观粒子(原子、分子、离子、电子)组成的凝聚态物质的微观结构、粒子间的相互作用、运动规律及其物质性质与应用的科学，是当代材料科学的物理学基础。

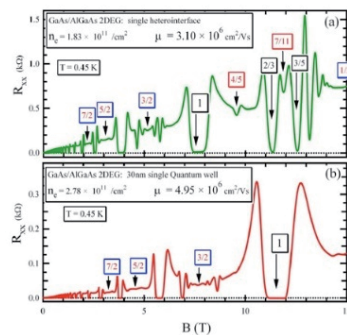
凝聚态物理学研究的方向主要有：高温超导及相关强关联体系的基本电子性质、低维自旋和电荷系统、纳米功能材料的基本电子性质研究、自旋电子学材料基本性质等，量子材料/超导材料/半金属材料/异质结构材料/超硬等都是凝聚态物理学研究的对象。

综合物性测试是凝聚态物理学的主要测试，包括电输运测试如：电阻率、微分电阻、霍尔系数、伏安特性、临界电流等；磁学测试如：交流磁化率、磁滞回线，磁阻等；热学测试如：比热、热磁曲线、热电效应、塞贝克系数、热导率等；还包括光学测试、压力测试、形貌表征等。通常综合物性测试由PPMS完成。

电输运性质是物质（或材料）的最基本和最重要的物理属性之一，反映了与电荷相关的基本物理行为，如电阻、Hall电阻随温度、磁场、压力变化的规律，以及相关的物理效应如Shubnikov-de Haas量子振荡、量子霍尔效应等，是综合物性中最重要的性质之一。

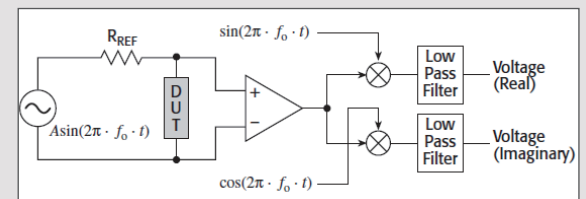
## 电输运测试面临的挑战

1. 特殊的测试条件。一般条件下，被测样品被放置在低温(通常是超导)及磁场环境中，其低温最低可达0.1mK，磁场可高达16T。在极端条件下，磁场可达100T脉冲强磁场，压力可达100GPa。PPMS可以提供一般条件下的测试环境，在此环境下，测试电缆连线需考虑热效应及对测试结果的误差因素。
2. 需要极小或极大电阻的测试。在超导条件下，被测样品电阻可能低至nΩ级。而极端情况下，被测样品电阻可能高达GΩ级，PPMS内置输运测试选件达不到要求。
3. 需要测试极小电压、电流及微分电导，此时信号往往淹没在噪声中，PPMS内置测试选件往往不能满足要求。

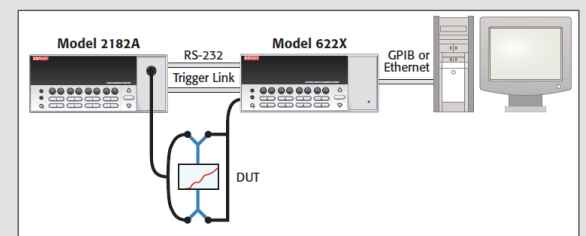


## 应对挑战：

为应对电输运测试面临的挑战，在PPMS的基础上，必须添加高精度适合极低电平测试的仪器作为必要的补充，该仪器必须具备去除噪声的能力。以锁相放大器为测试仪器的AC法和以泰克(吉时利)622x低电平电流源/2182A纳伏计组合构成的Delta模式是两种主要的应对挑战的方法，两种方法的框图如下：



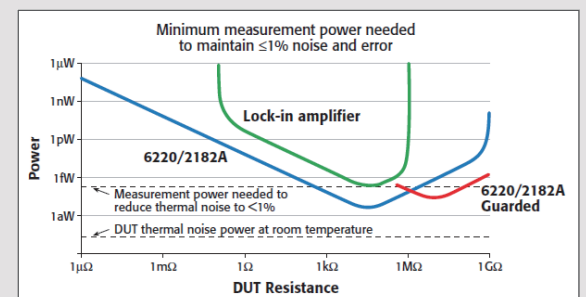
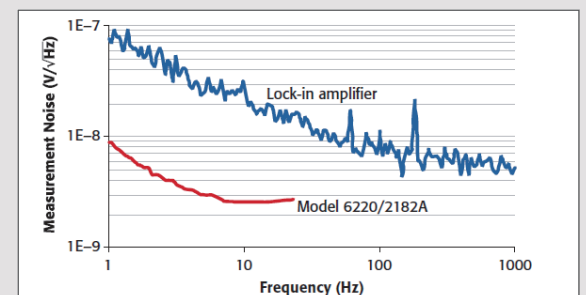
AC 法框图



Delta 模式

Delta模式可以提供准直流电流反向技术的测量和计算，以消除温差电动势的影响，每个Delta读数都是根据通道1的两个电压测量结果计算而来；一个测量电流源的正相，一个测量负相，从而使噪声降低1000倍。

AC 法和 Delta 模式法各有优势，相辅相成，一般在电输运测试时都配置。下图示意出两者应用范围：



# 泰克电输运/物性表征/量子材料/超导材料测试方案

从上两图可以看出，锁放可在更高频率应用，比如脉冲测试，但锁放较适合 100mΩ~1MΩ范围的测试，而Delta 模式可测试更低电平的信号，也更适合低于100mΩ及大于1MΩ的电阻测试。

## 泰克电输运测试方案:

除了低电平测试仪器，通常电输运测试还要配置SMU作为直流激励源。特殊情况下还需要AFG作为交流激励源，采集卡或示波器用于采集锁放输出信号。如果测试介电常数，还需配置静电计。

高频输运特性的研究是电输运特性测试的发展方向，研究高频输运特性时，需配置带宽达GHz的任意波形发生器。

### 单一被测样品测试方案:

- 6221/2182A 一套
- 24XX 或 26XX 一台
- 选配(各一台)
  - AFG31252
  - 2002八位半数字万用表
  - 6514或6517或6430 (测试介电常数)



### 多被测样品同时测试方案:

多样品测试，可以在单一样品的配置基础上加开关阵列轮回测试，但某些情况下，比如热和磁阻测试时，同一过程无法用轮回方式测试，此时需配置多套SMU及低电平测试仪器，套数与PPMS锁提供的测试线的数量相关。其原则是每四根连一套源表，每八根线连一套6221/2182A。下表给出某研究院四套PPMS多样品同时测试的典型配置。



6221 电流源



2182A 纳伏表



6517B 静电计

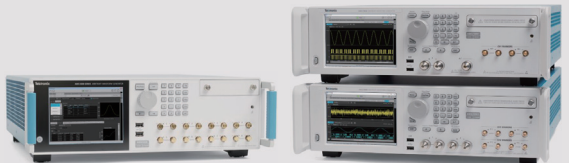


2400 系列SMU

Keithley 6221/2182A	微弱电流源 + 纳伏表	8
Keithley 6514	飞安表，静电计	4
Keithley 6430	超高精度源表，高输入阻抗	2
Keithley 2636B	双通道高精度源表，高输入阻抗	2
Keithley 2400	源表，200V	16
Keithley 2410	高压源表，1100V	2
Keithley 2604B	双通道源表 40V	8
Keithley DMM6500	数字万用表	16
Keithley 2002	高精度数字万用表	8
Keithley 4200A-SCS	半导体测量仪主机	1
Keithley 4200-SMU	IV 模块	3
Keithley 4200-PA	前置放大器	3
Keithley 4200A-CVIV	I-V/C-V 多开关模块	1
Keithley 4200-CVU	CV 模块	1
Keithley 8101-PIV	夹具盒	1
AFG31102	信号发生器，100MHz，2 通道	4
AFG31152	信号发生器，150MHz，2 能道	4

### 高频输运特性测试方案:

高频输运特性测试，在一般输运特性配置基础上，需增配AWG系列任意波形发生器。泰克提供AWG5200及AWG70000系列任意波形发生器。下表为泰克任意波形发生器的主要参数：



AWG5200

AWG70001B与AWG70002B

型号	AWG70001B	AWG70002B	AWG520X
通道数	1	2	2, 4, 8
最高带宽	15GHz	13.5GHz	4GHz
最高采样率	50GHz	25GHz	10GHz
垂直分辨率	10bits	10bits	16bits
SFDR	-80dBc	-80dBc	-70dBc
最大波形存储深度	2G/CH( 标配 ) 32G/CH( 选配 )	2G/CH( 标配 ) 16G/CH( 选配 )	2G/CH

### 方案优势:

- 00fA~100mA电流输出，1nV电压测试灵敏度，高达10nΩ电阻测量灵敏度
- 泰克独有的TSP LINK连接6221/2182A，自动完成 Delta模式测试
- Delta 模式可降低噪声1000倍
- 多型号高精度SMU供激励源选择
- 领先的AWG为高频输运特性研究提供强力支持
- 电输运测试领域普遍采用