

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	

年级、专业：	19级物理学	实验班：	5
姓名：	刘旭	学号：	19342072
	邱宸		19342086
	尚子淇		19342089
日期：	2022/3/18	教师签名：	

实验E1 低温技术平台与高温超导研究

【实验报告注意事项】

0.1 实验报告由三部分组成：

- （1）预习报告：（提前一周）认真研读实验讲义，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用（强烈建议到实验室预习），完成讲义中的预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格（由学生自己在实验前设计好，可以打印）。预习成绩低于10分（共20分）者不能做实验。
- （2）实验记录：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（用铅笔记录的被认为无效）。保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。（不得输入电脑打印，但可扫描手记后打印扫描件）；离开前请实验教师检查记录并签名。
- （3）分析讨论：处理实验原始数据（学习仪器使用类型的实验除外），对数据的可靠性和合理性进行分析；按规范呈现数据和结果（图、表），包括数据、图表按顺序编号及其引用；分析物理现象（含回答实验思考题，写出问题思考过程，必要时按规范引用数据）；最后得出结论。

0.2 每次完成实验后的一周内交实验报告。

0.3 除实验记录外，实验报告其他部分建议双面打印。

实验E1 低温技术平台与高温超导研究

1 【实验目的】

- 1.1 学习基本的低温技术，掌握深冷温区的获得和测量方法
- 1.2 掌握超导电性的两个基本特征：零电阻和迈斯纳效应，认识磁场对超导临界温度的影响，对宏观量子化有一个初步的认识；学习多变量对研究对象影响的研究方法
- 1.3 学习将弱信号测量技术应用于超导转变的测量：直流四引线法用于零电阻特性测量（实验内容 1），交流磁化率用于迈斯纳效应测量（实验内容 2）；学习为测量提供磁场条件
- 1.4 复习巩固信号提取方法之“本底扣除”，包括硬件设计中的物理扣除和数据处理时的数值扣除
- 1.5 巩固和加深数据采集系统的认识，学习用 LabView 管理实验（实验内容 1、2、3）
- 1.6 （选）学习通过电磁铁获得强磁场的方法，了解磁场强度、分布均匀性与电磁铁的磁隙宽度的关系（实验内容 4）；

2 【实验用具】

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	锁相放大器	1	OE1022(BNC接口)
2	NI数据采集器	1	PXIE4081、PXIE4083/4
3	数字多用表	1	RIGOL DM3058E
4	直流源	1	IT6411S(ITECH)
5	交流稳压电源	1	OE4004
6	磁场系统	1	EM3电磁铁+P10-40电源
7	液氮低温恒温器	1	SV-12
8	制冷机	1	CT1微型制冷机，45-320K
9	高温超导带 (截片)	1	基带哈氏合金上 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 膜，银包裹层 (用于点测量厚 $2\mu m$)，稳定层(铜)厚 $5\mu m$
10	高温超导陶瓷	1	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 陶瓷样品， $2 * 2 * 10mm^3$
11	取样电阻	2	SMA接口， 10Ω ， 1Ω

3 【原理概述】

3.1 低温技术

3.1.1 低温的获得

低温的获得取决于两个因素，制冷和隔热。制冷就是从被冷却的物体中抽走热量；而隔热则阻碍外界的热量传回该物体。当外界漏入物体的热量等于制冷所抽走的热量时，物体达到热平衡，其温度不再变化。

制冷：制冷剂（液氮）和制冷机是低温实验常用的两种制冷方式。（1）制冷剂法：将专用制冷设备制备的制冷剂运到实验室，用它来冷却实验设备和样品。制冷剂法的优点是，投入少，实验过程中的噪声小，冷却快（制冷功率大），缺点是冷量利用率低[主要利用制冷剂的潜热，显热（比热）利用少]，使用成本高，输液不方便或维持低温的时间短等。（2）循环制冷机法：在实验室实现利用微型循环制冷机冷却样品台和样品。像使用空调一样简单，效率和冷量利用率高；缺点是制冷时间长，有一定的噪声和振动。

隔热：从斯特藩-玻耳兹曼定律知，辐射传热与辐射体绝对温度的 4 次方成正比。对于温度为 T_L 无防（热）辐射屏的物体，与温度为 T_E 环境的净传热（漏热）为：

$$\Delta Q = \sigma(T_E^4 - T_L^4) \tag{1.1}$$

若在物体与环境之间插入一块温度接近 T_L 的低温物体作为防辐射屏，则从防辐射屏到物体之间的漏热比从环境的直接漏大大降低。即使不控制该防辐射屏的温度，让其自动达到热平衡，此时，从环境对防辐射屏的净漏等于从防辐射屏到低温物体的净漏热，则从环境到低温物体的净漏热减半为：

$$\Delta Q = \sigma(T_E^4 - T_M^4) = \sigma(T_M^4 - T_L^4) = \frac{1}{2}\sigma(T_E^4 - T_L^4) \tag{1.2}$$

3.1.2 低温恒温器

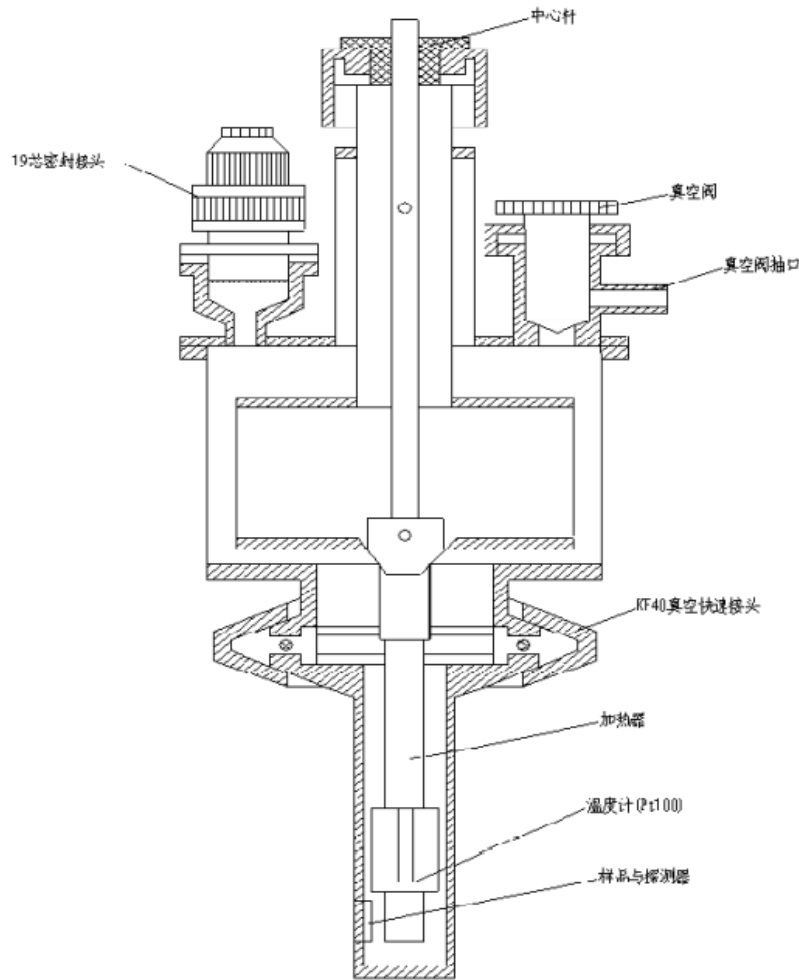


Figure 1: 漏热式液氮恒温器结构（无防辐射屏）

漏热式低温恒温器（冷指），通过控制恒温器冷端与冷源的热接触或通过恒温器与冷源的热通道（冷颈）做热补偿，使恒温器在某一温度下，恒温器向其冷端的漏热与环境向恒温器的漏热相等（达到平衡）。漏热

有三种方式——传导、对流、和辐射。恒温器与环境通过真空隔热，可基本消除对流漏热，固体传导漏热和稀薄气体的传导漏热也大大降低；为减少恒温器与环境之间的辐射漏热，（通常在低于液氮温区或以下温度）在恒温器与环境之间设置防辐射屏。本实验（制冷机）装置的冷指和防辐射屏材料为黄铜，外表面镀金。

3.2 强磁场技术

本实验采用电磁铁来产生磁场。近代物理实验室的电磁铁的最大磁感应强度为 0.6T。由于磁化或退磁化过程中，铁磁材料内部的磁畴运动不可避免地受到阻碍，造成“磁滞”现象，电磁铁磁隙内的磁场并不与外加电流形成严格的对应关系。因此，在使用电磁铁时，建议使用电磁铁电源中的磁场模式（FIELD），一方面，该模式自带自动消磁的功能（需要在设定磁场为 0 时等待较长的一段时间）；另一方面，该模式是通过特斯拉计测量磁场值反馈控制、从而准确获得所需磁场。对于液氮恒温器，电磁铁相对固定，即样品相对于磁隙的位置相对固定；对于循环制冷机恒温器，电磁铁可通过导轨水平移动，即相对于恒温器可进行水平调节，使用前请注意标定磁场及相应的电磁铁位置。

磁场标定：实验用的电磁铁自配特斯拉计，但特斯拉计不能直接放置在样品的位置。如果要求高，则需要安装在样品的位置用霍尔探头测量磁场的磁感应强度，或者可通过用特斯拉计测量磁隙内不同的位置的磁感应强度，获得样品位置与传感器位置的磁感应强度关系，此时应采用电流模式（CURRENT），该模式下施加到电磁铁的电流受输入电流值控制，而不受特斯拉计测量值的反馈控制，因此，当电流稳定后，电磁铁磁隙内的磁场分布就已固定。

3.3 直流四引线测量电阻

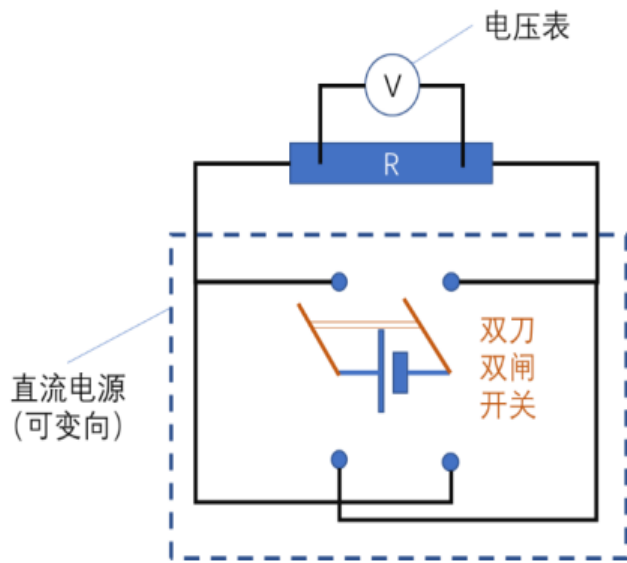


Figure 2: 直流四引线法测量电阻原理图

两引线测量电阻时，不可避免地引入了引线电阻和接触电阻。当测量小电阻时，引线电阻和接触电阻对误差的贡献大，不能被忽略。为消除引线电阻、接触电阻，可采用四引线法测量电阻；因电压表的输入阻抗大（10MΩ量级），流过电压表测量引线的电流小，即接触电阻和引线电阻所造成的电压降小，可以忽略。直流四引线法测量电阻时，通过改变电流的方向来消除温差电势和接触电势：

$$V_+ = IR + V_T + V_C \tag{3.1}$$

$$V_- = -IR + V_T + V_C \tag{3.2}$$

$$R = \frac{V_+ - V_-}{2I} \quad (3.3)$$

3.4 交流四引线测量电阻

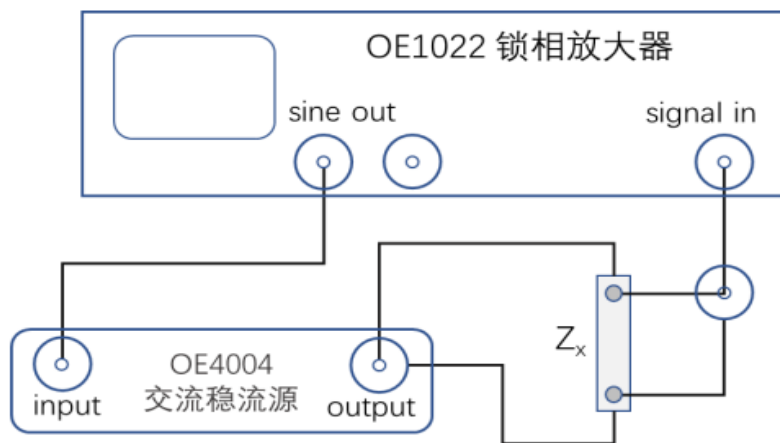


Figure 3: 交流四引线测量电阻原理图

对于交流四引线法，与直流四引线法相似，通过测量交流电压的有效值 ($V_{pp}/2\sqrt{2}$, 与热电势和接触电势无关)，可求得电阻（交流电抗，即包含了感抗和容抗）。对于小电压测量，采用锁相放大器是一个不错的选择，它不但不会放大直流（电压）信号，而且可有效地滤除噪声的影响（与《近代物理实验 I》, D1 锁相放大器与微弱信号测量中的实验内容4测量交流电抗的电路原理类似）。目前交流稳流源的最大电流输出为 100mA，对于电阻法测量中电流对超导转变温度影响的研究而言，这个电流输出偏小。

3.5 互感法测量交流磁化率

3.5.1 原理

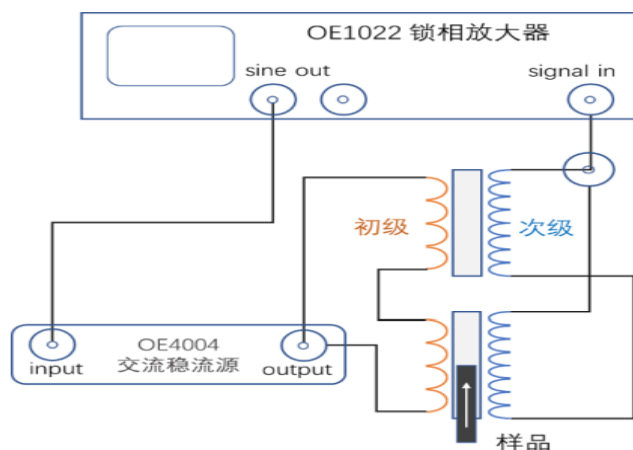


Figure 4: 交流磁化率测量原理图

对于小振幅交变磁场，交流磁化率 $\tilde{\chi}$ 反映的是材料磁化曲线的斜率，亦称微分磁化率：

$$M = \chi H$$

$$\tilde{\chi} = \frac{\partial M}{\partial H} \quad (5.1)$$

交流磁化率通常通过一对缠绕在一起的互感线圈来测量：负责产生磁场的线圈称为初级线圈，负责检测样品磁响应的线圈称为次级线圈。单个次级线圈感应的电动势与线圈内部磁感应强度 $B(t)$ 的变化率成正比：

$$\tilde{\varepsilon}_2 = k_2 \frac{\partial \tilde{B}}{\partial t} \quad (5.2)$$

可得

$$\tilde{\chi} = \frac{\tilde{\varepsilon}_2}{k_1 k_2 \mu_0 \frac{\partial \tilde{I}_1}{\partial t}} - 1 \quad (5.3)$$

通常交流磁化率是个复数,即 $\tilde{\chi} = \chi' + i\chi''$ 对于铁磁性材料, 由于其磁化率 $\chi' \gg 1$, 互感系数约等于 $k_1 k_2 \mu_0 \chi'$, 即单个次级线圈的感生电动势约正比于交流磁化率, 则一对线圈就能以较小的误差测出磁化率。次级线圈组输出的差分电压信号等于输出电动势。

$$\Delta \tilde{\varepsilon}_2 \approx \Delta V_2 = V_2 e^{i(\omega t + \theta)} \quad (5.4)$$

3.5.2 交流稳流电源

设稳流源的输入控制电压为（锁相放大器的参考电压输出）：

$$\tilde{V}_S = V_0 e^{i\omega t} \quad (5.5)$$

则稳流源输出为：

$$\tilde{I}_1 = C V_0 e^{i(\omega t + \theta_I)} \quad (5.6)$$

其中, $C = 0.1(A/V)$ 等效于电导, θ_I 为电流输出的相位延迟

3.5.3 交流磁化率

将 (5.4) 和 (5.6) 代入 (5.3), 得：

$$\tilde{\chi} = \frac{1}{k_1 k_2 \mu_0} \frac{V_2}{C \omega V_0} [\cos(\theta - \theta_I - \frac{\pi}{2}) + i \sin(\theta - \theta_I - \frac{\pi}{2})] \quad (5.7)$$

由此可得到交流磁化率的实部和虚部；互感系数或常数 k_1 k_2 可通过标样标定。

3.6 Labview 实验管理技术

本实验的低温与磁场系统由东方晨景提供, 其温控系统和加场系统已固定（厂家提供Labview 驱动程序）, 可接受电脑指令, 将温度控制在指定的温度、或将磁场加至所指定的强度。

4 【实验前思考题】(研究问题方向为交流四引线法测电阻)

4.1 深低温系统为什么要抽真空？真空度要求多高？

低温系统需要降低传热保证低温, 而抽真空可以降低因对流和热传导而导致的传热, 真空度要求应低于 $10^{-5} Pa$ 。

4.2 真空泵产生一定的噪声, 在达到真空要求后, 是否可以关真空泵？关真空泵前, 是否要先关真空阀门？

不可以直接关闭真空泵, 真空泵会维持恒温器内部的抽气和漏气达到平衡, 关闭真空泵后会因漏气而降低真空度。所以关闭真空泵前, 应该关闭真空阀门, 真空阀门关紧后可以关闭真空泵

4.3 为什么要安装屏蔽罩（防辐射屏）？屏蔽罩用哪一类材料最好？

在真空度较高的环境中，低温系统仅由热辐射传递热量，而在物体与环境之间插入低温物体作为防辐射屏，则从防辐射屏到物体之间的漏热比会降低一半。故而可以使用多层的低温屏蔽罩以降低热辐射的传热。屏蔽罩应用厚度较薄且防辐射穿透性能较好的材料，以保证样品不会与环境的热辐射直接接触，且最好使用比热较高的材料，保证低温。本实验中使用的材料为石墨。

4.4 请估计直径为 12mm、长为 100mm，温度为 4K 的恒温器在无防辐射屏时的漏热约为多少？在采用一层防辐射屏后，其与环境之间的辐射漏热减少了多少？如果将防辐射屏的温度降到液氮温度（77K），则该防辐射屏的辐射漏热又为多少？

由（1.1）可得漏热功率： $\Delta Q_1 = \sigma(T_E^4 - T_L^4) * S = 1.835W$ ，而由（1.2）可得，采用了一层防辐射屏，漏热功率为 $\Delta Q_2 = \frac{1}{2}\Delta Q_1 = 0.9175W$ ，假设防辐射屏与恒温器尺寸相当，由（1.1）可得漏热功率 $\Delta Q_1 = \sigma(T_E^4 - T_M^4) * S = 0.9135W$

4.5 铂电阻温度计位置不在样品旁边，有什么因素会影响样品温度偏离温度计的温度？偏离有多大？能否测量或通过建模进行定量分析？

固体的热传导公式： $Q = \frac{\kappa S \Delta T}{L}$ ，则热流密度 $J = Q/S$ ，样品和铂电阻之间的距离 L ，以及样品和铂电阻之间外裹石墨带的导热率 κ 会影响样品温度偏离温度计的温度。查阅资料可得：石墨的热导率为 $129W/(m * K)$ ，而图纸显示石墨的厚度为 $0.05mm$ ，则 $\Delta T = J * 3.876 * 10^{-7}(m^2 * K/W)$ ，故在热流很小的情况下温度差距应该不超过 $1K$ 。

4.6 用直流法和交流法测量电阻有何差异？对于交流法测量电阻，是否可以有效地扣除测量系统中感抗和容抗的贡献？

直流法测电阻所加电压为直流电压，通过改变电流方向来消除热电势与接触电势；而用交流法测电阻中，电源输出及电阻上的电压降均为交流电，已经消除了热电势与接触电势，电阻可以用其电压降的有效值来进行计算，在测量时通过使用锁相放大器来消除直流电压与噪声的影响。而在交流法测量电阻时，利用锁相放大器的四引线测量原理，稳流电源输出电流： $\tilde{I} = CV_0 e^{i(\omega t + \theta_I)}$ ，样品两端电压： $\tilde{V} = V_X e^{i\omega(t + \theta_V)}$ 则可计算出 $\tilde{R} = \frac{V_X}{I_S} [\cos(\theta_V - \theta_I) + i \sin(\theta_V - \theta_I)]$ ，所以可以只看电抗的实部 $R = \frac{V_X}{I_S} \cos(\theta_V - \theta_I)$ ，即为样品的电阻，消除了容抗，感抗的影响。

4.7 与标准四引线法（四电极）相比，两电极四引线有何不同，请画出等效电路图，并说明在超导态能否测出零电阻。

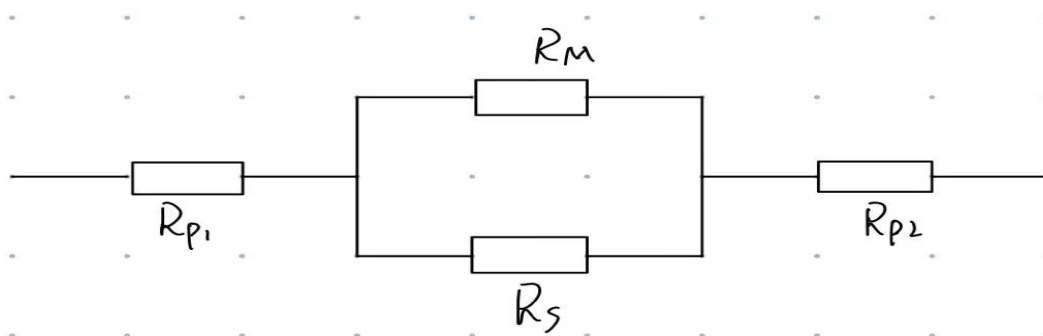


Figure 5: 两电极四线法等效电路图

四电极四线法与两电极四线法相比，可以略去电极电阻对结果的影响，两电极四线法等效电路图如下图所示。在两电极四线法测量结果为：正常态： $R = \frac{R_m R_s}{R_m + R_s} + R_{p1} + R_{p2}$ 超导态： $R=0$

4.8 线圈架用材料做合适？为什么不能用金属？【提示：应用电磁学中的电磁感应知识。】

用导热率较高的非金属材料如石墨做较为合适，而使用金属会在磁场作用下产生感应电流，感生电场产生磁场，造成外磁场分布的不均匀性，影响实验结果。

专业：	19级物理学	年级	19级
姓名：	刘旭	学号：	19342072
	邱宸		19342086
	尚子淇		19342089
室温：		实验地点：	A102
学生签名：		评分：	
日期：		教师签名：	

实验E1 低温技术平台与高温超导研究

5 【实验内容、步骤】

- 5.1 研究的问题：升温测量与降温测量有差别吗？
- 5.2 实验方案：

5.2.1 通电前准备：确认真空球阀处于关闭状态，关闭真空阀门，打开真空泵，慢慢打开真空阀至全开。

5.2.2 抽真空的过程中，其他仪器依次通电，保证电脑最后开机，并且打开Labview程序，连接各个设备。

5.2.3 加入液氮：用手提升“液氮针阀”至完全打开）向注液漏斗中缓慢加入液氮，直到液氮有少量溢出，当温度降至 200K 附近时，关闭真空阀，再关闭真空泵。

5.2.4 将样品和交流稳压源、锁相放大器如图进行连接

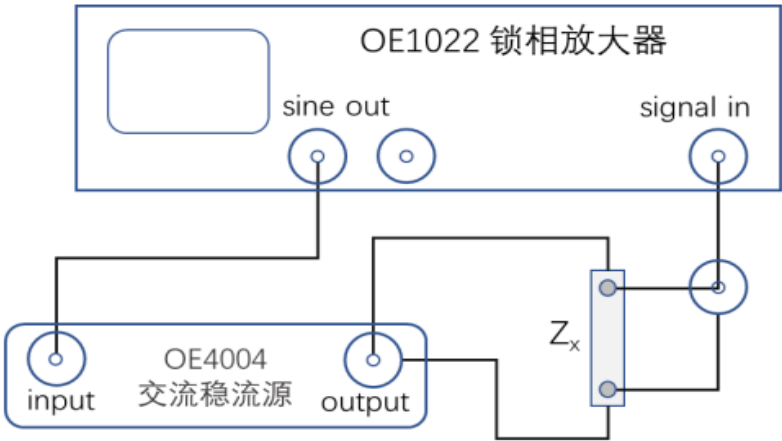


Figure 6: 交流四引线测量电阻原理图

- 5.2.5 在不加磁场的情况下，输入交流信号不变的情况下利用TC202控温在连续采样的状态下将样品温度从77K升至110K，再从110K连续的降至77K，分别观察升降温时的转变温度的不同，并粗略的找出转变温度所在的区间。
- 5.2.6 在同样不加磁场的情况下，根据步骤5.2.5中测得的转变温度所在区间，在升降温各自的转变温度左右2K的区间内以0.2K为步长逐点进行升温以及降温测量电阻，绘制出图像比较升降温过程中的，电阻转变规律的不同。
- 5.2.7 改变外加磁场的大小，重复步骤5.2.5和5.2.6在不同的外加磁场下再测量3次，比较在外加磁场的情况下升降温的超导现象有何差异。
- 5.2.8 根据公式 $R = \frac{V_X}{I_S} \cos(\theta_V - \theta_I)$ ，算出样品具体的电阻，并且用公式 $\Delta T = J * 3.876 * 10^{-7} (m^2 * K/W)$ 进行Pt1000所测得样品的温度修正，绘制出不同磁场条件下升降温的电阻-温度曲线，比较升降温之间的超导现象差异

6 【实验结果】

原始数据已经发至邮箱

7 【实验过程遇到问题记录】

7.1 技术改进

- 7.1.1 (温度定标)样品实际温度与测温点温度之差有多大？它与什么因素有关？如何在相同的测量精度范围内，如何缩短测量时间？应该不会很大，大概1K数量级（根据升降温曲线差别），因为pt1000直接接触样品，热阻相对很小。样品与控温点之间的距离，控稳点与测温点之间的距离，材料的热导率……将液氮恒温器的中心杆向上提以减小降温速率，控制labview程序提高加热效率（含1%，15%，100%）
- 7.1.2 (系统误差分析之焦耳热的影响)初级线圈的电流振幅对样品温度是否有影响？影响有多大（能否设计实验探索该影响）？如何扣除？存在影响，但不大，因为从实际操作看，小于等于0.6T的磁感应强度下线圈发热并不严重
- 7.1.3 通过编程控制系统的升温或降温速率，从而获得更高的测量精度，这点没做到，导致升降温速度不可控。

7.2 方案实现

由于实验中具体的控温方案比较繁琐，以及PID控温时间较长，时间不足，没有研究加磁场后的升降温超导差异。

专业：	19级物理学	年级	19级
姓名：	刘旭	学号：	19342072
	邱宸		19342086
	尚子淇		19342089
室温：		实验地点：	A102
学生签名：		评分：	
日期：	2021.4.2	教师签名：	

实验E1 低温技术平台与高温超导研究

8 【分析与讨论】

8.1 数据处理

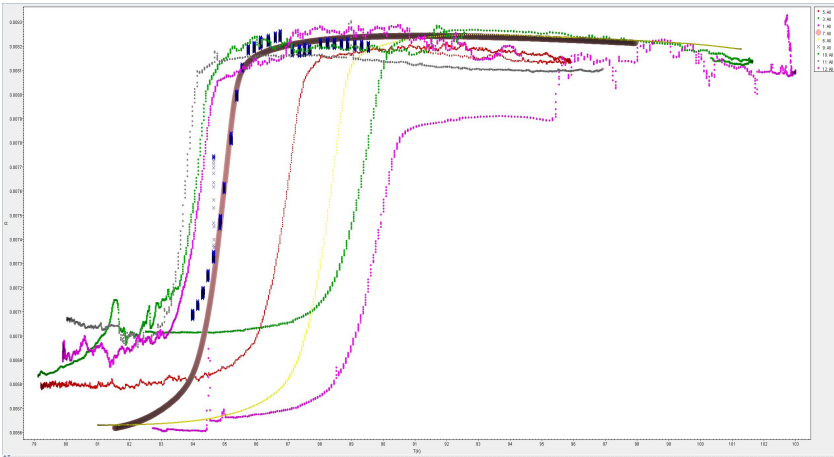


Figure 7: 实验原始数据图

实验测得的原始数据如上图所示，其中棕色线为两次准静态逐点升降温测量的电阻-温度曲线，而右侧是降温线，左侧是升温线。准静态的图中起始转变温度为84.2摄氏度，中点转变温度为84.6摄氏度，转变结束温度为85摄氏度，但升降温连续测量与准静态的转化温度偏差较大。实验中分别用连续升降温以及逐点准静态升降温的方法测量到了高温超导材料在转变温度附近的电阻（交流法中需要测量电压有效值）、控温器温度以及Pt1000温度传感器阻值，但在具体实验以及液氮恒温器的内部结构中Pt1000距离样品更近，我们发现由于控温的温度距离材料过远，温度传导不够精确，Pt1000的温度更加与材料的温度契合，Pt1000理论上需要标定（准确起见，建议用一个原点即1000Ω, 0℃，剩下的点也建议用我们实验的较低的温度区间；不过根据老师的说法，Pt1000相对很稳定，用资料给的参数也应该基本没影响）所以直接用公式拟合出温度和阻值的关系并作为自变量。而另一方面，对于交流四引线法测量电阻的方法，在D1锁相放大器实验的微小阻抗的测量中有涉及到，测量到的直流电阻应该为 $R = \frac{V_x}{I_s} \cos(\theta_V - \theta_I)$ 所以阻抗测量应用相位进行修正为直流电阻，实验所得的数据如下图所示，图中的黑线为两次准静态逐点升降温测量的电阻-温度曲线，而右侧是降温线，左侧是升温线。当然连续升降温的测量由于温度传感器与材料有距离所导致的热滞效应，以及升降温速度，尤其是降温时速率不够平滑，导致曲线与实际测量有较大误差，但曲线的趋势还是可以分析出升降温之间的差异。图中起始转变温度为84.2摄氏度，中点转变温度为84.7摄氏度，转变结束温度为85摄氏度，而电阻变化为0.04Ω

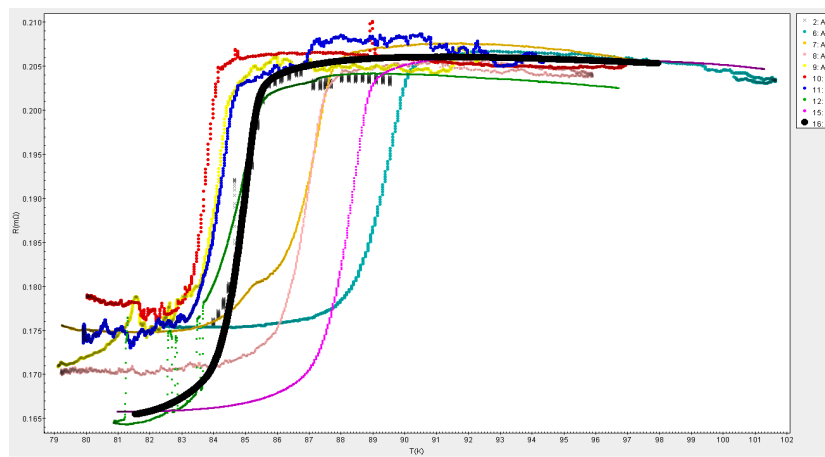


Figure 8: 实验数据拟合图

8.2 问题讨论：升温测量与降温测量有差别吗？

由实验结果的图像可以看出在准静态的测量中，升温测量与降温测量的数据点十分接近，温差在0.1摄氏度之内，说明超导过程与材料的温度变化趋势基本无关，而主要的影响因素还是具体的温度。而连续进行的升温降温测量中升温测量会导致转变温度降低，而降温测量会导致转变温度升高，且多次测量后，升温的转变温度区间大约在83-84摄氏度之间，与准静态测量的转变温度约差1摄氏度，而降温过程中转变温度区间大约在86-88摄氏度之间，测量的随机误差较大，与准静态测量的转变温度约差2-3摄氏度，主要原因在于热滞效应，此次数据是用的Pt1000温度传感器的阻值，而Pt1000附在了包裹材料的石墨外，所以温度的响应较慢。如果能得到具体的厚度以及导热率可以用固体的热传导公式： $Q = \frac{\kappa S \Delta T}{L}$ 更加具体的建模标出样品的温度。同时，在升降温的过程中由于降温时几乎无法用PID控制降温速率，所以导致降温的速度先快后慢，导致了转换温度的误差较大，而升温时速率较为平缓，与准静态的情况符合较好，误差在1摄氏度之内。

8.3 误差分析

实验的自变量与因变量都是需要测量的，所以分别存在误差，对于温度测量的系统误差在于温度传感器的温度与实际温度之间所存在的热滞效应，即无法真实的反馈样品实际温度，并且由于数据不足无法建模分析，所以在连续测量以及准静态测量中，我们只能通过保证pt1000控温，确定到小数点后一位不再变动，即精度在0.1摄氏度范围内，但是由于不是样品温度，所以仍无法保证样品温度的稳定，且无法保证升降温的速度恒定会导致热滞效应的误差无法进行抵扣。而对于电阻的交流四引线法测量，正常状态下是金属包层（轴向）的电阻；在超导状态下，超导体电阻为零，此时测量得到的电阻是（电流穿过金属包层）沿包层厚度方向的金属电阻（远小于沿轴向的金属电阻），但实际测量中在超导状态下仍有0.0165Ω的阻值，可能是由于实验室中的电磁干扰的影响，在996Hz无法完全消除热电势、接触电势，也可能是因为由于交流恒流源有一个微小的相位差导致计算中一直与理论值存在偏差。

8.4 实验方案分析及改进

对于所研究的问题我们得出了结论，主要的升降温过程的超导电阻差异是来源于测温技术的不精准导致的热滞效应，而在准静态的升降温过程中超导的转变温度几乎没有区别。而方案还需要几方面的改进，如在电阻测量环节，应寻找出最小电磁干扰的交流电频率，保证在超导态时测量的电阻远小于正常电阻，而方案也需要完善温度点的修正，即通过Pt1000的阻值去计算样品温度以及实现连续的匀速稳定升降温以更好地获得升降温曲线数据这两个技术问题。