

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	

年级、专业：	18 物理	组号：	实验班 2
姓名：	董平正 张靖沛	学号：	18353009 18353098
董平正：完成预习报告，记录实验数据，完成实验思考题； 张靖沛：进行实验操作，完成设计性实验，记录实验问题并处理分析数据			
日期：		教师签名：	

实验 E1 低温技术与高温超导研究

【实验报告注意事项】

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。

实验报告就是预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来，加上本页封面。
2. 每次完成实验后的一周内交**实验报告**。
3. 除实验记录外，实验报告其他部分建议双面打印。

实验 E1 低温技术与高温超导研究

【实验目的】

1. 学习基本的低温技术，掌握深冷温区的获得和测量方法
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。
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。
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。
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）；

【仪器用具】

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	OE1022E （BNC 接口） 1022D 为双通道
2	NI 数据采集器	1	PXIe4081、PXIe4083/4 用于电测量
3	数字多用表	1	RIGOL DM3058E 测量 PT1000 电阻
4	直流恒流源	1	IT6411S （ITECH） 用于电测量
5	交流稳流源	1	OE4004 （SMA 接口）
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 4、5、6 号机
8	制冷机	1	CTI 微型制冷机，45~320K 1、2 号机
9	取样电阻	2	SMA 接口，10 Ω 、1 Ω
10	Y 系高温超导带（截片）	1	
11	Bi 系高温超导带（截片）	1	
12	高温超导陶瓷	1	
13	高温超导织构样品	1	

【原理概述】

一、超导

超导是一种**热力学态**：通过改变外部物理条件（如温度、磁场、外加电流）可以使超导体发生从正常态到超导态的可逆相变。

超导是一种**宏观量子态**：在发生玻色-爱因斯坦凝聚（即超导相变）后，所有的超导电子对（玻色子）都处于同一种量子态（可用同一个波函数来描述）。作为一种宏观量子现象，超导电性一般都发生在远低于室温的温度，使与之竞争的热涨落降到足够低。

超导体的分类：

- (1) 对磁场响应：第一类超导体和第二类超导体。第一类超导体只存在单一的临界磁场强度；第二类超导体有两个临界磁场强度值。
- (2) 临界温度：高温超导体和低温超导体。高温超导体通常指临界温度高于液氮温度（77K）的超导体，低温超导体则临界温度小于液氮温度。
- (3) 材料类型：元素超导体、合金超导体、氧化物超导体、有机超导体。
- (4) 理论解释：传统超导体（可以用BCS及其推论解释）和非传统超导体。

1、超导理论解释

BCS理论是以近自由电子模型为基础，以弱电子-声子相互作用为前提建立的理论。

BCS理论认为，金属中自旋和动量相反的电子可以配对形成库珀对，库珀对在晶格当中可以无损耗的运动，形成超导电流。对于库珀对产生的原因，BCS理论做出了如下解释：电子在晶格中移动时会吸引邻近格点上的正电荷，导致格点的局部畸变，形成一个局域的高正电荷区。这个局域的高正电荷区会吸引自旋相反的电子，和原来的电子以一定的结合能相结合配对。在很低的温度下，这个结合能可能高于晶格原子振动的能量，这样，电子对将不会和晶格发生能量交换，没有电阻，形成超导电流。

该理论较好地微观上解释了第一类超导体，但无法解释第二类超导体。且从该理论得出麦克米兰极限温度（40K）早已被突破。

GL理论是在朗道二级相变理论的基础上提出的唯象理论。GL理论认为，当外界磁场强度接近超导体的临近磁场强度时，超导体的电流不服从线性规律，且超导体的零点振动能不可忽略。

该理论预见了第二类超导体的存在，并给出了表面能 κ 的概念。

2、两个基本特征：**完全导电性**（零电阻）、**完全抗磁性**（迈纳斯效应）。

完全导电性：导体的电阻变为0。 $R = 0$

迈纳斯效应描述，在超导态：

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

$$\vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{M} = -\vec{H}_0$$

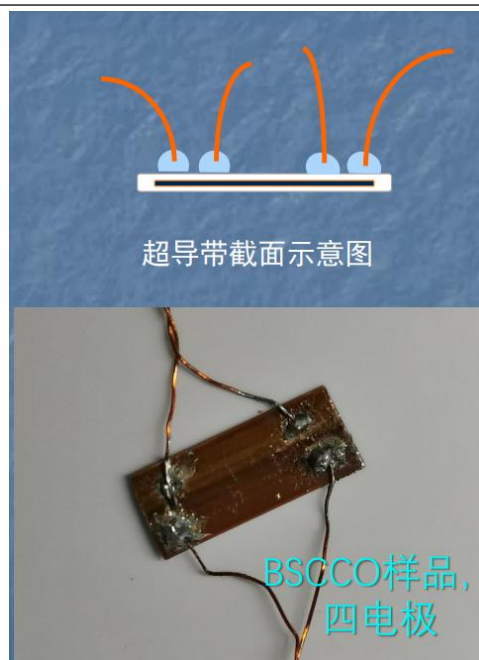
$$M = \chi_m \vec{H}, \mu = 1 + \chi_m \Rightarrow \chi_m = -1, \mu = 0$$

3、三个基本参量：**临界温度**（ T_c ）、**临界电流密度**（ J_c ）、**临界磁场**（ H_c ）

4、实验采用的样品

YBCO: $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 两电极

BSCCO: $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ 四电极



二、低温获得

维持低温：制冷量和漏热量相等的平衡态。因此关键就在于制冷和隔热。

1、真空

在真空中，热传导和对流几乎为零，只剩下**辐射**传热。考虑简化的一维辐射传热模型，对于温度为 T_L 的无辐射屏物体，与温度 T_E 的环境净传热（漏热）为

$$\Delta Q = \sigma(T_E^4 - T_L^4)$$

其中 $\sigma = 5.673 \times 10^{-12} \text{W/cm}^2 \text{K}^4$

如果在中间加入一块温度接近 T_L 的低温物体当作防辐射屏，则有

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

2、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。

我们采用制冷剂法。

注意：

加注液氮时一定要做好防护措施以防冻伤。

温度在 200K 以下可关闭真空泵，但需先关真空阀。

加液氮时，请确保漏斗上无水，防止水进入到液氮容器。离场前将恒温器加热到 290K。

电磁铁周围（1 米范围内）禁止有其它铁磁性物质。电磁铁调整极头间距或移动电磁铁时，保证电磁铁电源的输出电流为零；不需要磁场时，请将电磁铁电源输出电流设置为零。

【实验前思考题】

专业：	物理	年级：	18
姓名：	董平正 张靖沛	学号：	18353009 18353098
室温：		实验地点：	
学生签名：		评分：	
日期：		教师签名：	

实验 E1 低温技术与高温超导研究

【实验内容、步骤、结果】

一、抽取真空与制冷

1、通电前确认

真空球阀处于关闭状态，样品罩、机械泵等处的真空卡箍（夹紧型快卸法兰）是上紧的。

2、抽取真空

关闭真空阀门，打开真空泵，**2分钟**以后慢慢打开真空阀，听到“呼噜”声停止旋转阀，声音停止后继续缓慢旋转真空阀至全开（绿色阀柄与波纹管平行），真空泵打开**半小时**以后，开始制冷。

3、仪器通电

NI机箱电源（前面板按钮）→控温仪电源（前面板红色按钮）→电磁铁电源（背面红色按钮，长按前面板“power”三秒）→普源数字多用表电源

最后才接通电脑电源，开机。

4、制冷

我们采用的是液氮恒温器版本进行制冷

逆时针旋转丝杆，提高“液氮针阀”至完全打开（新版则只需要旋升丝杆只需提升）。

清洁漏斗的冷凝水，向注液漏斗中缓慢加入液氮，直到液氮有少量溢出。

使用纱布包围排气孔。

如果想减慢降温速率，可以顺时针旋转针阀（新版只需要往下插）

当温度降至**200K**附近时，先关闭真空阀，后关闭真空泵。

6、控温

打开LabVIEW，用TC202使用PID控制温度。设有三档加热功率，如果经过10分钟后实际温度仍低于设定温度，则需要调节液氮流量或者控温仪的加热功率。

实验一：观察超导状态下样品的电阻变化情况

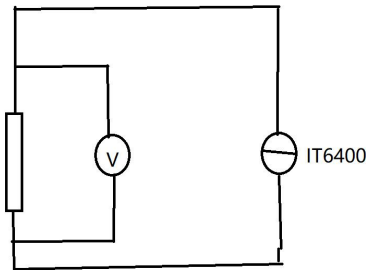
实验内容：

学会使用低温制冷机制备低温，利用直流四线法以及交流四线法分别测量样品材料温度逐渐降低时，其对应的电阻变化情况，验证在超导状态时样品的电阻为零。

实验步骤：

1、制冷参考前面的步骤（抽取真空与制冷）

2、使用直流四引线法连接电路，将数字万用表选择电压档，并且将万用表两端直接接入待测样品，再将样品连入直流恒流源电路中，电路连接如下：



3、连接完电路后，使用LabVIEW程序“直流四线法电阻测量”控温，设定目标温度，在当前温度稳定在目标温度后，读取稳流源电流值和数字万用表直流电压档示数并记录在下表。

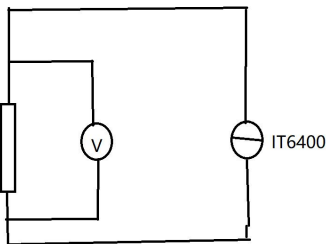
选用的样品类型： 样品一、降温			初始电流： 0.04996A	
温度（K）	正向电压（mV）	电阻（mΩ）	反向电压（mV）	电阻（mΩ）
110	-0.000336	0.00672538	-0.000325	0.006505204
106	-0.000366	0.007325861	-0.000415	0.008306645
100	-0.000493	0.009867894	-0.002685	0.053742994
99	-0.000117	0.002341873	-0.002092	0.041873499
98	-0.000212	0.004243395	-0.002274	0.045516413
97	-0.000394	0.007886309	-0.002539	0.050820657
96	-0.000714	0.014291433	-0.002403	0.048098479
94	-0.000673	0.013470777	-0.002526	0.050560448
93	-0.000759	0.015192154	-0.002612	0.052281825
92	-0.001744	0.034907926	-0.002895	0.057946357
91	-0.001556	0.031144916	-0.001885	0.037730184
90	-0.000840	0.016813451	-0.002802	0.056084868
85	-0.000235	0.004703763	-0.001537	0.030764612
80	-0.001268	0.025380304	-0.001910	0.038230584

- 4、将电流反向，重复步骤3。（此步骤可以和步骤6一起进行，只不过改变稳恒流的参数的正负值而已）
- 5、对测得的正、反向电流下的电压数据以及电流数据进行处理，得到直流四线法测得的准确电阻值。
- 6、处理电阻值和不同温度下的数据，找到超导转变起始温度、中点温度、结束温度，并总结超导状态下电阻的特性。

研究实验一：研究超导现象是否历史相关（如先降温后加场或先加场后降温）？

实验步骤：

- 1、制冷参考前面的步骤（抽取真空与制冷）
- 2、使用直流四引线法连接电路，将数字万用表选择电压档，并且将万用表两端直接接入待测样品，再将样品连入直流恒流源电路中，电路连接如下：



3、连接完电路后，使用LabVIEW程序“直流四线法电阻测量”控温，设定目标温度，定初始电压、电流、磁场，

在当前温度稳定在目标温度后，读取稳流源电流值和数字万用表直流电压档示数，然后将电源电压反向，再次记录；

4、改变设定温度，重复实验步骤3，直到出现超导现象（在该温度附近应多测几组数据）
（上述过程为先加磁场后降温）

5、将磁场调为零，重新加热样品，再设定温度，当当前温度稳定在目标温度后，重新设定磁场强度为3中的初始磁场强度，读取并记录数字万用表直流电压档示数，然后将电源电压反向，再次记录；

6、重复实验步骤5，直到出现超导现象（在该温度附近应多测几组数据），对比两过程所得结果

选用的样品类型：样品二 先加磁场后降温			初始电流：0.4996A 磁场：1.9026KG	
温度（K）	正向电压（mV）	电阻（mΩ）	反向电压（mV）	电阻（mΩ）
110	-0.007427	0.148658927	-0.008271	0.166253002
106	-0.007637	0.15286229	-0.00811	0.162269816
102	-0.007393	0.147978383	-0.007466	0.153082466
98	-0.006775	0.135608487	-0.007406	0.146377102
94	-0.006615	0.132405925	-0.006709	0.13448759
90	-0.005514	0.110368295	-0.005961	0.119135308
86	-0.004296	0.085988791	-0.004821	0.096777422
82	-0.004263	0.085328263	-0.004866	0.096076861
80	-0.004016	0.080384307	-0.004653	0.094295436

选用的样品类型：样品二 先降温后加磁场		初始电流：0.4996A 磁场：1.88KG	
温度（K）	电压（mV）	电阻（mΩ）	
115	-0.008213	0.016439	
110	-0.007998	0.015988	
105	-0.007837	0.015686	
101	-0.007248	0.014507	
95	-0.006928	0.013867	
94	-0.006871	0.013753	
93	-0.006384	0.012778	
92	-0.006771	0.013552	
91	-0.006028	0.012065	
90	-0.005488	0.010985	
89	-0.005041	0.010090	
88	-0.004862	0.009731	
85	-0.004993	0.009993	
80	-0.004520	0.009047	

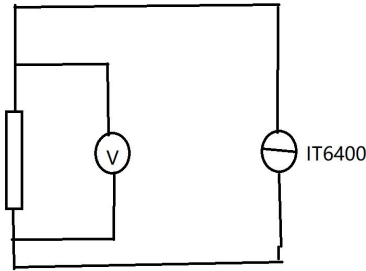
研究实验二：升温测量与降温测量有差别吗？

实验步骤：

1、制冷参考前面的步骤（抽取真空与制冷）

2、使用直流四引线法连接电路，将数字万用表选择电压档，并且将万用表两端直接接入待测样品，再将样品连

入直流恒流源电路中，电路连接如下：



- 3、连接完电路后，使用LabVIEW程序“直流四线法电阻测量”控温，设定目标温度，定初始电压、电流、同时将磁场调零，在当前温度稳定在目标温度后，读取稳流源电流值和数字万用表直流电压档示数，然后将电源电压反向，再次记录；
- 4、改变设定温度（降低设定温度），重复实验步骤3，直到出现超导现象（在该温度附近应多测几组数据）（上述过程为降温测量）
- 5、将目标温度设定在液氮温度（77K左右），改变设定温度（逐渐升高设定温度），重复实验步骤3，直到超导现象消失（在该温度附近应多测几组数据），对比两过程所得结果。（上述过程为升温测量）

选用的样品类型： 样品二、升温			初始电流： 0.04996A	
温度（K）	正向电压（mV）	电阻（mΩ）	反向电压（mV）	电阻（mΩ）
113	-0.00764	0.152922338	-0.008309	0.166293034
111	-0.007398	0.148078463	-0.008048	0.161088871
110	-0.007693	0.153983187	-0.007981	0.159747798
108	-0.007237	0.144855885	-0.007755	0.155224179
106	-0.007344	0.146997598	-0.007967	0.15948759
104	-0.004654	0.093154524	-0.007028	0.140572458
102	-0.004024	0.080544436	-0.004506	0.09021217
100	-0.004132	0.082706165	-0.004625	0.092574059
95	-0.004278	0.085628503	-0.004297	0.086008807
90	-0.003953	0.079123299	-0.004973	0.099539632
85	-0.004126	0.082586069	-0.004561	0.090392314
80	-0.004129	0.082646117	-0.004675	0.09357486

选用的样品类型： 样品二、升温			初始电流： 0.04996A	
温度（K）	正向电压（mV）	电阻（mΩ）	反向电压（mV）	电阻（mΩ）
80	-0.004632	0.092714171	-0.004871	0.097497998
85	-0.004671	0.093494796	-0.004807	0.09623699
90	-0.004661	0.093294636	-0.004614	0.092373899
95	-0.004444	0.088951161	-0.004645	0.092994396
100	-0.004408	0.088230584	-0.004489	0.089871898
102	-0.004402	0.088110488	-0.004637	0.092834267
104	-0.004376	0.087590072	-0.004565	0.091373098
106	-0.004336	0.086789432	-0.007707	0.154263411
108	-0.007392	0.147958367	-0.007517	0.159047238

110	-0.008021	0.160548439	-0.008151	0.16315052
112	-0.008002	0.160168135	-0.008047	0.161088871
114	-0.007952	0.159167334	-0.007985	0.159827862

【实验过程遇到问题记录】

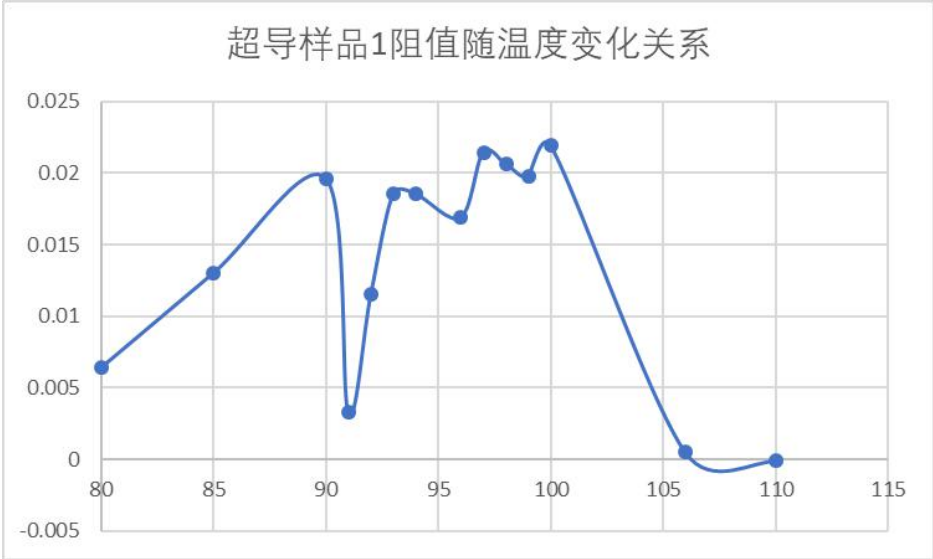
1. 第一次实验时采用了超导样品一，但实验情况并不理想。在控温精度保证在 0.03K 的条件下长时间等待，测量所得值仍不稳定，电压值剧烈跳动，给读数带来困难。但并未意识到是样品本身的问题。故第一天实验均采用样品一。
2. 因第一次实验样品一的问题，第二次实验我们改用了样品二进行探究。但因第一二次实验间隔太久，致使第二次实验 3 时我们操作流程出现失误。上午的实验中并没有对反向电压进行测量，而在下午的实验中，在我们意识到这一问题后，因为对于直流法测量电阻过程采用正负电压相减这一操作的本质理解不够透彻。我们组直接采用反向电压重新测量。出现操作性错误。因此在后续分析中我们仅使用正向电压测量值进行分析，至于这其中的误差后再后面的实验分析中给出。

专业：	物理	年级：	18
姓名：	董平正 张靖沛	学号：	18353009 18353098
日期：			
评分：		教师签名：	

实验 E1 低温技术与高温超导研究

【分析与讨论】

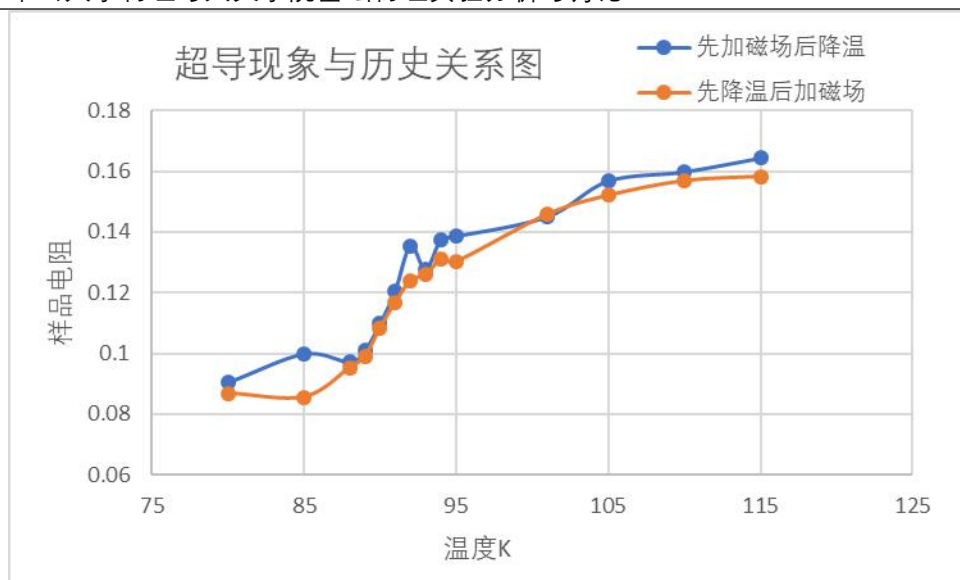
1. 直流四引线测量电阻



结果分析：超导样品 1 在实验时电压读数跳动剧烈，数据波动较大。（详情见数据记录部分-实验过程遇到问题记录）。具体数据波动原因暂不知晓，但应为样品一本身问题。

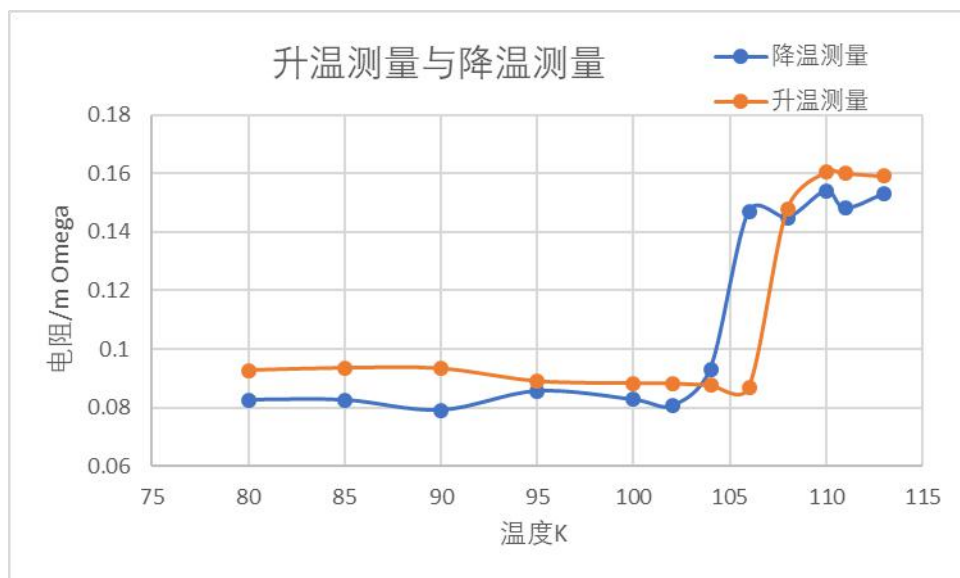
2. 研究型问题。

研究实验一：研究超导现象是否历史相关（如先降温后加场或先加场后降温）？



由图像可以判断超导现象与历史无关，无论先加磁场后降温还是先降温后加磁场，样品的超导状态不会有所差别。

研究实验二：升温测量与降温测量有差别吗？



由上图可以看出对于超导态升温测量与降温测量基本没有差别，超导转变温度皆在 105° 左右。但两条曲线相比理想理论情况又有差别。应该这是由于 PT100 与材料样品之间有距离，在实验过程中没有完全等待两者达到热平衡就进行了测量导致。另外由于我们操作的问题。（详见数据记录部分-实验过程遇到问题记录），此处仅使用了正向电压值进行处理，所以曲线对于理想情况的偏离应也有未能扣除的随机、热电势带来的误差。

【实验思考题】

【实验思考题】

1、深低温系统为什么要抽真空？真空度要求多高？

真空中因热传导和对流约为零，只有热辐射，故常用低温隔热方式。一般来说为 1Pa 级别，最好 0.1Pa。

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？

可以。正确的步骤是先关闭恒温器阀门，然后关闭机械泵。

3、为什么要安装屏蔽罩，屏蔽罩用哪种材料好？

屏蔽罩可以有效减少热辐射传热。用和物体温度接近的低温绝热材料来做屏蔽罩好。

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？

由斯特藩玻尔兹曼定律，将恒温器和环境看做理想黑体，假设环境温度为 300K。

表面积 S：

$$S = 2\pi rL + 2\pi r^2 = 1272\pi \text{ mm}^2$$

单位时间漏热：

$$\Delta Q = S \cdot \sigma [(T_E)^4 - (T_L)^4] = 1.84 \text{ W}$$

采用一层防辐射屏后，漏热平衡时，漏热减半。

$$\Delta Q' = S \cdot \sigma [(T_M)^4 - (T_L)^4] = 0.5 \cdot S \cdot \sigma [(T_E)^4 - (T_L)^4] = 0.92 \text{ W}$$

将防辐射屏温度降到 77K，则单位时间漏热：

$$\Delta Q'' = S \cdot \sigma [(T_M)^4 - (T_L)^4] = 7.96 \times 10^{-3} \text{ W}$$

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？能否通过建模进行定量分析？

固体热传导：

$$Q = k \Delta T \frac{S}{L}$$

可得 ΔT 为：

$$\Delta T = \frac{JL}{k}$$

其中， $J=Q/S$ 。由此可见，热流密度 J，样品和铂电阻之间的距离 L，样品和铂电阻之间的材料热导率 k 都能影响两者的温差。若导热性良好，热导率趋于无穷，则温差为 0，所以最好的办法是将铂电阻安装在样品上或者尽量靠近样品。

6、高磁场下电磁铁长时间工作会导致线圈温度升高，如何在满足实验需求同时，实现全电流最小，且实验时间最短，如何保护自己避免烫伤，由不影响线圈散热？

做实验时，可在需要时才打开磁场，其余时间关闭磁场使其冷却，让其处于间歇式工作，这样可令磁场处于工作的较好状态。

7、用直流法和交流法测电阻有何差异？

直流法测量需要考虑到热电势和接触电势的影响，通过改变电流方向分别完成两次测量来消除热电势和接触电势的影响。交流法电源输出的是交流电流，则电阻上的电压降也是交流电压，通过测量交流电压的有效值，可求得电阻。所以并不需要特别考虑热电势和接触电势的影响。

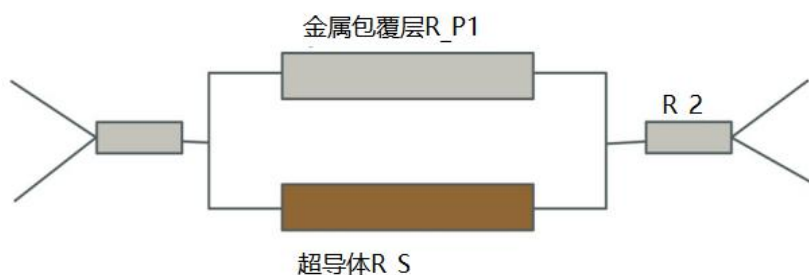
8、直流四引线法测量中的双绞线起什么作用？用屏蔽线如何？

由于直流四引线法用于测量微小电阻，本身电流信号较弱，所以需要尽可能屏蔽外界的，特别

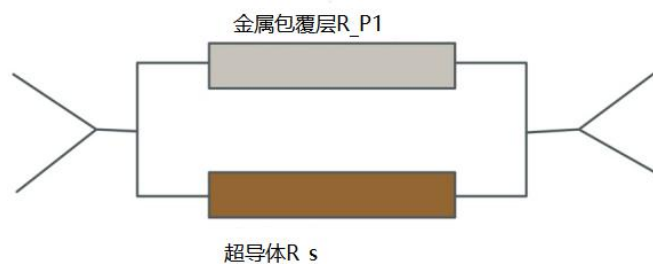
是电磁波干扰，双绞线的使用能够很好的减少这种电磁干扰。双绞线由一对相互绝缘的金属导线绞合而成，在实际使用的时候会通两个大小相同方向相反的电流，形成差模信号，在实际探测的时候将两个信号相见就能够得到有用的信号；当外界的干扰电磁波经过的时候，会在两条绞线上产生一个相同方向的感应电流，称为共模信号，而该信号则会在之后的相减处理中被直接扣除，由此电磁波产生的感应电流的影响被很大程度上消除了。

9、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。

两电极：



四电极：



四电极四线法与两电极四线法相比，可以略去电阻对结果的影响，且其在超导情况下可以测得零电阻。

10、本实验如何判断待测物品是否超导？【提示：超导体的两个基本特性】

可通过零电阻与抗磁性来判断待测物品是否超导。

11、本实验如何判读待测样品的超导态是否为热力学状态？【提示：零磁场降温后再加磁场与先加磁场后降温的区别，即是否与历史相关？】

热力学状态与历史无关。

可通过实验先降温再加场和先加场再降温测量得到差分电压，观察两次所得到的电压是否一样。