

预习实验		实验记录		分析讨论		总成绩	

专业:	物理学	年级:	2018 级
姓名:	杨研律	学号:	18353088
日期:	2021.3.12	教师签名:	

E1 低温技术平台与高温超导研究 ——零电阻效应部分

小组成员：杨研律、郑立明，选择内容为测量电阻部分

预习报告

1 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（实验内容 1、2、3
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
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 实验仪器

编号	仪器用具名称	数量	主要参数	备注
1	锁相放大器	1OE1022E (BNC 接口)	1	单通道锁相放大器
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	
4	直流恒流源	1	IT6411S (ITECH)	用于电测量
5	交流稳流电源	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	
8	Y 系高温超导带 (截片)	1	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, 银包 裹 ($T_c \approx 90K$)	用于电测量
9	Bi 系高温超导带 (截片)	1	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$, ($T_c \approx 105$)	用于电测量

3 原理概述

1 低温技术

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。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:

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

制冷剂 (液氮) 和制冷机是低温实验常用的两种制冷方式。

- 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, 缺点是冷量利用率低, 使用成本高输液不方便或维持低温的时间短等。
- 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。

低温恒温器通过与冷源漏热和与热源漏热达到平衡来实现恒温器温度控制。本实验采用出了多种低温恒温器。本实验介绍漏热式低温恒温器 (冷指), 出了多种低温恒温器。本实验介绍漏热式低温恒温器 (冷指), 通过控制恒温器冷端与冷源的热接触或通过在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。实验中恒温器与环境通过真空隔热，需要先打开真空泵将恒温器墙内抽至真空，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，然后加入液氮或使用制冷机降至目标温度。

2 强磁场技术

本实验都采用电磁铁来产生磁场。出于安全考虑，近代物理实验室的电磁铁的最大磁感应强度为 0.6T。并要求将与实验无关的物品存放在实验区外；也不允许将铁磁材料（金属）带入实验区。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）。

3 四引线法测电阻

本实验采用四引线法测电阻，并分为直流四引线法和交流四引线法。四引线法分直流四引线法和交流四引线法。由于样品的不对称性，被测样品两电极间的热电势和接触电势会产生不对称。因此，我们通过改变电流方向，分别测量正向和反向电压用于消除温差电势 V_T 和接触电势 V_C 。

使用正向电压时，有： $V_+ = IR + V_T + V_C$

使用反向电压时，有： $V_- = -IR + V_T + V_C$

因此最终求得的电阻的表达式为：

$$R = \frac{V_+ - V_-}{2I}$$

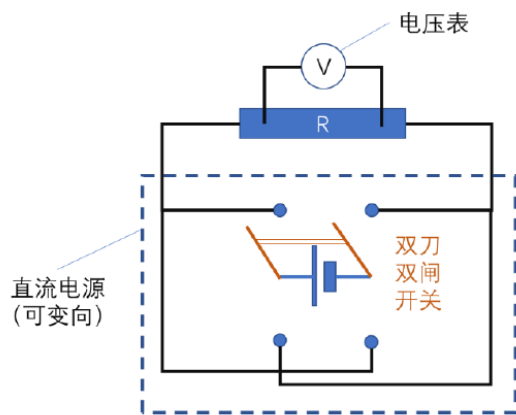


图 E1-9 直流四引线法测量电阻的原理图

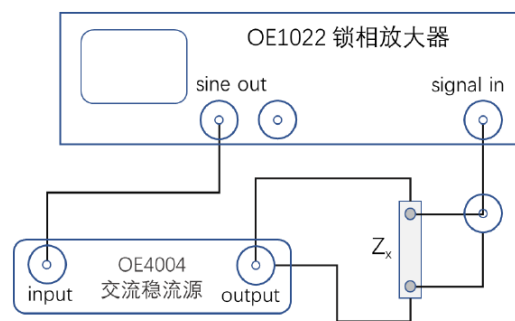


图 E1-10 交流四引线法测量电阻的原理图

对于交流四引线法，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 ($V_{pp}/\sqrt{2}$ 与热电势和接触电势无关)，可求得电阻流电抗，即包含了感抗和容抗。交流四线法测量时，用锁相放大器电压输出接入恒流源输出，使用内部参考信号模式，锁相放大器的测量可用于测量微小信号且有效滤除噪声的影响。

4 超导电性

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。

超导有两个基本特征：零电阻和抗磁性（即迈斯纳效应）。

- 零电阻：通过测量超导环电流衰减的实验，其衰减常数比宇宙年龄还长。
- 抗磁性：与历史无关（先降温后加磁场或是先加磁场后降温），证明超导态是一种热力学态。

高温超导一般指超导转变温度超出 BCS 理论预言极限 ($\sim 33K$) 超导体。

本实验电阻测量用的是第二代高温超导带材 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ，它是一种层状结构，在柔软金属基带（哈氏合金）外延生长缓冲层、超导层（层厚 $2\mu m$ 、保护层（银层，层厚 $2\mu m$ ）、稳定层（Cu 层，层厚 $5\mu m$ ）。在常温下，高温超导样品处于正常态，其电阻明显高于金属包层，因此，测量得到的是金属包层（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）。

从热力学角度看，超导转变过程有三个临界参量：临界温度、临界电流和临界电流密度。

- 对于电阻测量而言，临界温度 (T_c) 定义为起始转变温度、中点转变温度和转变结束温度。它与测量所加的电流密度和磁场相关 $T_c(H, J)$ ，在实验中，我们可以通过验证超导体的转变温度与历史无关验证它是关于 H 和 J 的热力学态函数，仅与初末状态有关而与过程路径无关。
- 临界电流 (I_c) 和临界电流密度 (J_c) 定义为定义：在某超导状态下，保持超导体的温度和外磁场不变，加大测量电流至样品转变为正常态，此时，对应的电流称临界电流 $I_c(T, H)$ ，根据样品的横截面积和该临界电流计算出来的电流密度称为临界电流密度 $J_c(T, H)$ ，他们同样是关于温度 T 和磁场强度 H 的热力学态函数。
- 临界磁场 (H_c) 定义为：在某超导状态下，加大外磁场至样品转变为正常态，此时，对应的磁场称临界磁场。对于 II 类超导体，当加大外磁场至样品先进入混合态（量子磁通线进入超导体，而量子磁通线的中心是处于正常态的），此时所对应的磁场称为下临界磁场 H_{c1} ；当再加大外磁场至样品进入正常态时，所对应的磁场称为上临界磁场 H_{c2} 。

4 思考题

（仅电阻测量部分）

1 本实验如何判断待测样品是否超导？

方法一：利用零电阻性，在使用直流四线法测量电阻时，若样品已经处于超导态，则改变电压的正负方向测得的电压大小均相等（均为零，但实验过程中由于噪声影响，测得电压大约为 $\sim 10^{-5}V$ ）

方法二：利用抗磁性，对于同一磁场强度 H 和同一温度 T 下，先加磁场后降温或先降温后加磁场两种方法实验测得的电阻均相等，此时可判断样品在该状态 (T, H) 下为超导态。

2 本实验如何判断待测样品的超导态是否热力学状态？

通过两次对照实验：先加磁场后降温，和先降温后加磁场到达相同的条件 (T, H) ，若两次实验结果相同，则可证明该超导态为热力学状态。对于 II 类超导体，当加大外磁场时样品先进入混合态再进入正常态，混合态的临界磁场 H_{c1} 小于正常态临界磁场 H_{c2} ，混合态下超导体没有表现出完全抗磁性，其相图和磁化曲线如下图所示：

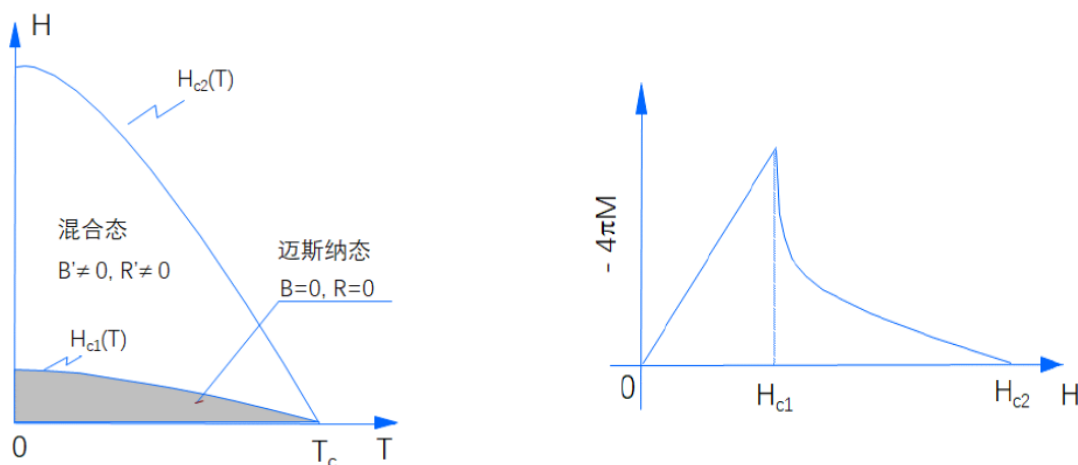


图 1: II 类超导体相图（左）及其磁化曲线（右，高斯单位）

3 在磁化率定标前，如何把测量次级线圈的电压信号转换为磁化率（相同的量纲）？

在本实验中，次级线圈的输出阻抗远小于锁相放大器输出的阻抗，因此次级线圈输出的电压信号可近似等于电动势 $\tilde{\epsilon}$ ，可根据实验原理中的公式 E1-14：

$$\tilde{\chi} = \frac{\Delta \tilde{\epsilon}}{k_1 k_2 \mu_0 \frac{\partial \tilde{I}_1}{\partial t}}$$

求得磁化率 $\tilde{\chi}$

专业:	物理学	年级:	2018 级
姓名:	杨研律	学号:	18353088
日期:	2020.3.12	实验地点:	A103
评分:		教师签名:	

实验记录

1 实验内容、步骤、结果

基础内容

1. 制冷前准备

- 1) 通电前确认：真空阀处于关闭状态，样品罩、机械泵等处的真空卡箍（又称夹紧型快卸法兰）是拧紧的
- 2) 关闭真空阀门，打开真空泵（开关位于泵的侧面，见图 2 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），真空泵打开以半个小时后可按照第 4 步致冷。
- 3) 抽真空的过程中，其他仪器依次通电：先开 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（背后红色按钮，然后按前面板 power” 长按 3 秒、普源数字多用表通电先观察下图 4 中的前面板开关按钮是否闪烁：若是闪烁则按一下表头屏幕亮，开机完成；若前面板按钮常暗，则需要先拨通后面板的开关至 1 使其闪烁，然后重复上一个步骤最后通电脑的电源。注意：请保持电脑是最后开机否则引起通讯紊乱。
- 4) 关闭真空阀，再关闭真空泵。
逆时针旋转“中心杆旋钮”至液氮流量塞完全打开（此时比较费劲）；
向注液漏斗中缓慢加入液氮，直到液氮有少量溢出，表明液氮已经加注满。
如果想减慢降温速率，可以顺时针旋转“中心杆旋钮”，这样液氮流量塞部分关闭；顺时针旋转到底时（最多旋转 8 圈），使流量塞完全关闭。
- 5) 控温 TC202 使用 PID 算法控制温度；加热功率有三档选择 15 经过 10 分钟实际温度依然低于设定温度，说明加热功率选择偏低，请将加热功率选择 100%。经过 10 分钟以后如果温度还没有稳定在设定温度，需要调节液氮流量或者控温仪的加热功率

2. 致冷使用完毕后

实验完成后，且不再马上有下一个实验使用时将针阀提升至全开的位置。

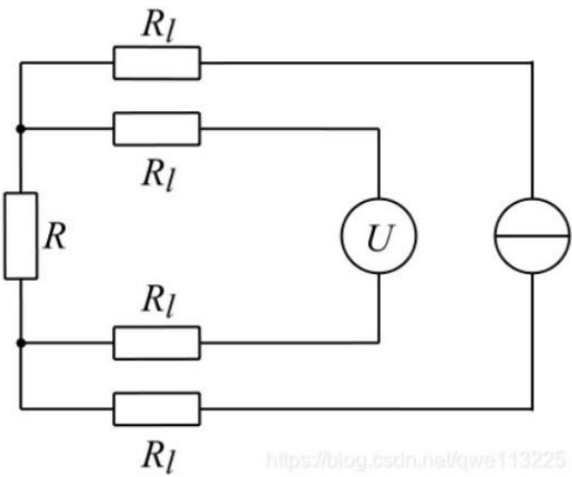
- 确认真空阀关闭状态，关闭真空泵。

- 控温仪加热至 290K 稳定后，关闭其他仪器控温仪以及测试仪表。

3. 直流四引线法测电阻：

所需仪器与软件：直流电源、电压表、数据采集系统、待测电阻、控温热源等步骤如下：

(1) 根据下图连接电路



- (2) 通过软件控温，逐渐升温，在每一个温度点读出电压表与电流表的数值，再通过软件改变电流方向并记录电压表与电流表，并将他们都记录表格中。
- (3) 根据实验原理中的相关公式可求出每一温度点的电阻值
- (4) 待冷却后，可重复上述步骤 2 多次测量，取平均。

进阶内容——科学问题 准备环节（与前面步骤相同）：

1. 检查实验台环境与仪器连接，制备真空环境
2. 按与上实验相同的方式连接好电路：直流和交流四线法测电阻的电路图如上
3. 预热仪器，加入液氮，打开控温系统将温度降至目标区间后开始实验

表 1: 外加磁场实验步骤

步骤	实验操作	记录	备注
1	确认电磁铁周围 1 米范围内禁止有其它铁磁性物质，防止工作时发生设备损坏	✓	
2	调整磁极间距之前首先调整电磁铁电源输出电流为零	✓	
3	为尽量反映样品处的磁场强度，高斯计探头处于样品附近	✓	
4	设置电磁铁电源的磁场值时，请务必确认磁感应线垂直穿过高斯计的探测面	✓	

表 2: 加入液氮实验步骤

步骤	实验操作	记录	备注
1	检查液氮恒温器接口是否锁紧，真空阀是否关闭	✓	
2	检查漏斗以及管内是否有水珠	✓	
3	开真空泵 10 分钟后打开真空阀，半小时后关闭真空阀	✓	
4	加液氮前注意避免误伤同学	✓	
5	注意控制加入速度避免逸出浪费	✓	
6	顺时针慢慢打开旋钮控制加入的液氮量	✓	

探究问题 1：外磁场或外加电流如何影响超导转变时的电阻随温度 T_c 的变化？实验装置：直流电源、电磁铁、数据采集系统、待测电阻、控温热源、液氮、恒温装置等

我们可以在不同温度、电流以及磁场条件下进行实验，测量临界温度，使用直流四线法测量，测量步骤如下。

表 3: 测量临界温度实验步骤

步骤	实验操作	记录	备注
1	加入液氮待温度降至 78K 左右	✓	
2	设置电流为 50mA，外加磁场为 1kGs	✓	
3	以 0.5K 为间隔提高温度，一直测到 100K 为止	✓	100K 后停升温测量
4	记录每次改变温度并稳定后的测量电压，正反各一次	✓	
5	改变外加磁场分别为 2kGs 和 3kGs，重复步骤 1、2、3、4	✓	
6	改变设置电流分别为 100mA，150mA，200mA，重复步骤 1、2、3、4	✓	

探究问题 2：超导现象是否历史相关（如先降温后加场或先加场后降温）？

在上面问题的基础上，增加探究加入磁场和降温先后顺序的对照实验。实验记录表格如下，分别在先降温后加磁场和先加磁场后降温的情况下，运用直流四线法测量电阻值：

温度/K	外加磁场/kGs	设置电流/mA	先降温后加磁场		先加磁场后降温	
			正向电压	反向电压	正向电压	反向电压

探究问题 3：升温测量与降温测量有差别吗？

在原使用四引线法测量直流和交流电阻的基础上增加降温测试：在探究问题 1 和 2 中使用的均为升温测量。本实验中我们使用降温测量，测温区间在 78-110K. 实验记录表格如下：

温度/K	外加磁场/kGs	设置电流/mA	正向电压/mV 反向电压/mV	电阻值/ $\mu\Omega$

实验原始数据记录（使用 word 电子记录）：

1. 直流四引线法测量样品 1

设置电流恒定为 50mA，无外加磁场

温度/K	正向电压 /mV	反向电压 /mV
78.5	-0.01153	-0.0116
80	-0.01218	-0.01213
83.2	-0.01327	-0.01329
85	-0.0128	-0.01274
86.9	-0.01314	-0.01309
90	-0.01372	-0.01359
91.54	-0.01403	-0.01384
92.86	-0.01406	-0.01398
94.12	-0.01402	-0.0141
97.1	-0.01446	-0.0143
102.11	-0.01523	-0.01519
103.36	-0.01417	-0.01433
104.08	-0.01428	-0.01426
105	-0.01409	-0.01461
106.1	-0.01163	-0.01696
108.5	-0.01208	-0.01817
109.8	-0.01236	-0.01859
111.2	-0.0125	-0.01874
112	-0.01244	-0.01863
113.3	-0.01292	-0.01945
115.1	-0.01309	-0.01972
116.1	-0.01273	-0.0194
118.1	-0.01245	-0.01947
119.6	-0.01237	-0.01957
122.1	-0.01255	-0.01958
124.1	-0.01265	-0.02011
126	-0.01273	-0.0199
128.1	-0.01316	-0.02064
129.7	-0.01303	-0.0205
131.6	-0.01287	-0.02063
134.1	-0.01283	-0.0208
137.7	-0.01283	-0.02137

2. 直流四引线法测量样品 2

设置电流恒定为 50mA，无外加磁场

温度/K	正向电压/mV	反向电压/mV
------	---------	---------

80.25	-0.0085	-0.00895
82.45	-0.00816	-0.00859
84.2	-0.00851	-0.00891
85.93	-0.00818	-0.00845
88.12	-0.00857	-0.00898
89.71	-0.00823	-0.0087
90.53	-0.00839	-0.00903
90.84	-0.00879	-0.00938
90.98	-0.00811	-0.0095
91.88	-0.00818	-0.01003
92.46	-0.00813	-0.00993
93.89	-0.00837	-0.01026
95.34	-0.00787	-0.00994
97.6	-0.00841	-0.01042
99.25	-0.0078	-0.00988
101.95	-0.00826	-0.01037

3. 直流四引线法探究磁场关系

设定磁场 1kGs，先加磁场后降温，电流恒定为 50mA

温度/K	正向电压/mV	反向电压/mV
82	-0.00687	-0.00708
84	-0.0094	-0.00938
86	-0.01049	-0.01043
88	-0.0092	-0.00923
90	-0.00959	-0.00952
91	-0.00991	-0.01009
91.5	-0.01012	-0.01036
92	-0.00953	-0.00994
92.3	-0.00974	-0.01027
92.6	-0.00969	-0.01014
92.9	-0.00997	-0.01067
93.2	-0.0103	-0.01118
93.5	-0.00959	-0.01059
93.8	-0.01006	-0.01027
94.1	-0.00996	-0.01139
94.4	-0.00984	-0.01153
94.7	-0.00982	-0.01194
95	-0.00973	-0.0121
95.3	-0.00991	-0.01239
95.6	-0.00951	-0.01227
95.9	-0.00968	-0.01279
96.2	-0.00953	-0.01276
97	-0.00954	-0.01317

98	-0.00933	-0.01358
99	-0.00938	-0.01392
100	-0.00952	-0.01428
102.1	-0.00962	-0.01475
104	-0.00953	-0.0151
106	-0.00974	-0.01546

设定磁场 1kGs，先降温后加磁场，电流恒定为 50mA

温度/K	正向电压/mV	反向电压/mV
84	-0.01043	-0.01044
86	-0.01057	-0.01064
88	-0.01087	-0.01069
90	-0.01108	-0.01113
92	-0.01114	-0.01171
94	-0.00998	-0.01216
96	-0.09215	-0.01382

设定磁场 1.5kGs，先加磁场后降温，电流恒定为 50mA

温度/K	正向电压/mV	反向电压/mV
79.5	-0.00966	-0.00961
81.5	-0.01026	-0.01025
82.5	-0.01081	-0.0108
83	-0.0107	-0.01086
84	-0.01093	-0.01107
84.5	-0.01104	-0.01113
85	-0.01096	-0.01118
86	-0.01139	-0.01156
87	-0.01144	-0.01155
89	-0.01161	-0.0123
89.3	-0.01164	-0.01212
89.6	-0.01177	-0.01227
89.9	-0.01143	-0.01223
90.2	-0.01133	-0.01234
90.5	-0.01151	-0.0127
90.8	-0.01147	-0.01266
91.1	-0.01147	-0.01292
91.4	-0.01133	-0.01305
91.8	-0.01106	-0.01314
92	-0.01089	-0.01329
92.3	-0.01085	-0.01327
92.6	-0.01071	-0.01335
93	-0.01071	-0.01369
94	-0.01044	-0.0138

95	-0.01063	-0.01444
96	-0.01069	-0.01493
98	-0.01067	-0.01517
100	-0.01057	-0.01567
102	-0.01067	-0.01608
104	-0.01098	-0.01647

设定磁场 1.5kGs，先降温后加磁场，电流恒定为 50mA

温度/K	正向电压/mV	反向电压/mV
84	-0.01031	-0.01024
86	-0.01037	-0.01038
88	-0.01061	-0.01063
90	-0.01058	-0.01163
92	-0.01008	-0.01263
94	-0.00922	-0.01291
96	-0.00907	-0.01339

设定磁场 2kGs，先加磁场后降温，电流恒定为 50mA

温度/K	正向电压/mV	反向电压/mV
79.6	-0.0101	-0.01008
80	-0.01028	-0.01027
82.2	-0.01056	-0.01058
83	-0.01092	-0.01098
84	-0.01137	-0.01134
85	-0.01118	-0.01137
85.5	-0.01136	-0.0116
86	-0.01122	-0.01155
86.3	-0.01141	-0.0118
86.6	-0.01155	-0.01182
86.9	-0.01143	-0.01189
87.2	-0.01093	-0.0117
87.5	-0.01105	-0.01201
87.8	-0.01097	-0.01206
88.1	-0.01107	-0.01227
88.4	-0.0112	-0.01254
88.8	-0.01138	-0.01305
89	-0.01125	-0.01292
89.5	-0.0111	-0.01316
89.9	-0.01071	-0.01317
90.5	-0.01076	-0.01349
91	-0.01054	-0.01359
92	-0.01072	-0.01416
93	-0.01028	-0.01421

94	-0.01046	-0.01457
96	-0.01106	-0.01552
98	-0.01035	-0.01539
101	-0.0105	-0.01571

设定磁场 2kGs，先降温后加磁场，电流恒定为 50mA

温度/K	正向电压/mV	反向电压/mV
84	-0.01008	-0.01013
86	-0.01051	-0.01064
88	-0.01024	-0.01123
90	-0.00977	-0.01217
92	-0.00939	-0.01293
94	-0.00909	-0.01313
96	-0.00899	-0.01368

专业:	物理学	年级:	2018 级
姓名:	杨研律	学号:	18353088
日期:	2020.	实验地点:	A103
评分:		教师签名:	

分析与讨论

1 分析与讨论

1. 基础内容：直流四引线法测量电阻

根据实验基础内容中的方法，我们选定横流 50mA 改变正负电压对直流四线电阻进行测量，样品 1 和样品 2 电阻随温度的变化曲线如下图所示：

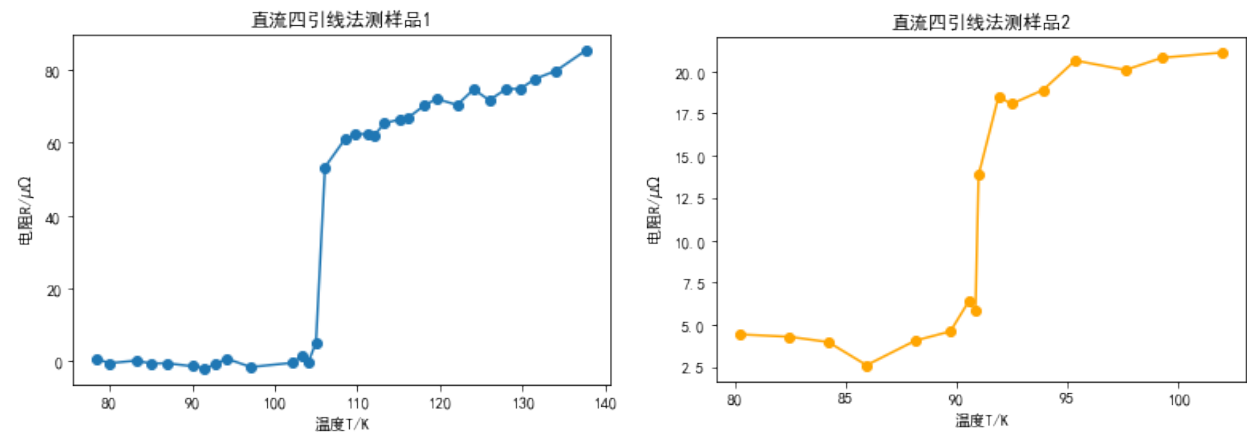


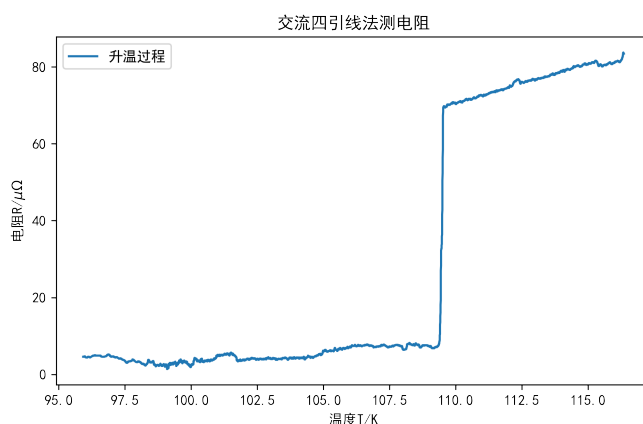
图 2: 直流四引线法测量电阻

由上述两图可以看出：样品 1 的转变温度 $T_c \approx 105K$ ，样品 2 的转变温度 $T_c \approx 92K$ ，因此样品 1 为 Y 系高温超导带，样品 2 为 Bi 系高温超导带。

从上图中还可以看出样品 1 在转变温度以下的测量电阻几乎为 0，转变点之上的电阻约为 $\sim 80\Omega$ ，且电阻仍然在随着温度的升高而增发；而样品 2 转变点之下的温度不为零，偏差较大，从图中也可以看出样品 2 转变点一下的电阻测量波动误差较大，样品 2 转变点之上的电阻约为 $\sim 20\Omega$ 。

2. 基础内容：交流四线法测电阻

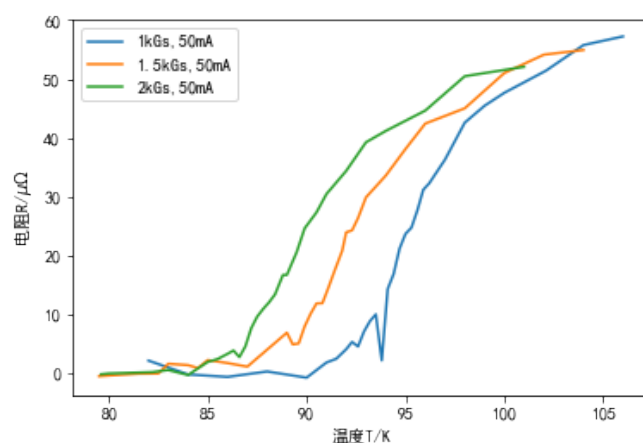
使用交流四线法测电阻，由于温度变化较快，在测量过程中难以稳定，因此测量较困难，下图显示的是本组测量较为成功的一组图像，测量电阻为样品 2（Bi 系高温超导带），其电阻随温度的变化如下：



从上图中可以看出交流四引线法测得的转变前后的电阻值基本符合直流四引线法的测量值，而交流法测得的转变温度约为 109K，与直流四引线法测得结果相比偏高，可能造成误差的原因是：交流法测量的是连续的温度变化点，在实验过程中温度变化较快，记录数据时测温点与样品之间还没有达到热平衡，则会造成图像上的数据点滞后，测得的转变温度 T_c 偏大。

3. 进阶内容：磁场对超导转变温度的影响

为探究磁场对超导转变温度的影响，我们选取了三组不同的磁场，选定恒流 50mA 使用直流四引线法对不同磁场下的电阻进行测量，测量结果如下图所示：

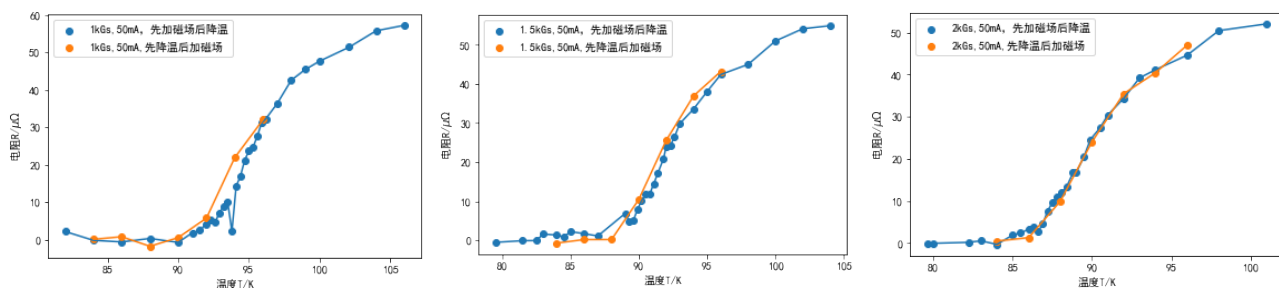


从上图中可以看出，本实验选取了 1kGs, 1.5kGs, 2kGs 三个不同磁场下进行测量，随着磁场的逐渐增大，电阻-温度的变化曲线在逐渐上移，起始转变温度变低，但转变前和转变后的电阻大小变化不大。从图中可以看出图线不够平滑，可能造成误差的原因有：

- 读数时温度存在抖动，温度难以稳定在一个值
- 测温点测量的温度并非样品的实际温度值，样品与测温点达到热平衡存在时间延迟
- 测量中其他噪声的影响，导致读数时测量的电阻值一直在抖动，造成误差

本实验验证了磁场对导体转变温度的影响：磁场增大导致转变点提前。

4. 进阶内容：探究转变温度是否与历史有关



如上图可以看出，在三组不同磁场下，先加磁场后降温和先降温后加磁场测得的电阻-温度变化曲线基本重合，不重合部分的测量误差主要来源于温度变化过快导致测温点来不及和样品达到热平衡，温度变化较快的测量组图像会出现右移。

2 实验后思考题

【思考题】（实验目的 1）

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，只有热辐射传热，成为常用的低温隔热方式。本实验中抽真空需打开真空泵半小时以上以保证深低温系统的真空度

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？

可以关闭。关真空泵前，需要先保证真空阀门处于关闭状态，然后关闭机械泵，以免机械泵由于压力差造成反油。

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？

在物体与环境之间插入一块防辐射屏幕，可以使得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：

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

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？

由恒温器的直径和长度得到，恒温器的表面积为上下表面积和侧面积之和：

$$S = 2\pi r * L + 2\pi r^2 = 3996.11mm^2$$

假设环境温度为 300K，由斯特藩-玻尔兹曼定律（简化成理想黑体）计算得单位时间漏热：

$$\Delta Q = \sigma(T_E^4 - T_L^4) = 1.84W$$

其中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ 为斯特藩-玻耳兹曼常数

- 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？

固体热传导公式：

$$\dot{Q} = \kappa \Delta T \frac{S}{L}$$

则有温度变化：

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

其中热流密度 $J = \dot{Q}/S$ 为单位面积内传导的热量，由此公式可以看出影响温度计偏离的主要因素是样品与测温点之间没有达到热平衡，当等待时间较长，系统趋于稳态，热流密度 J 趋于零，则温差也趋于零。

【思考题】（实验目的 3 之电磁测量）

- 1 外加磁场与电流方向的夹角不同，洛伦兹力不同，从而超导体的磁流阻大小不同，你怎么设计实验以研究磁场（矢量）对超导转变的影响？

由洛伦兹力公式 $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ 得知磁场与电流方向的叉乘决定洛伦兹力的大小，因此洛伦兹力 $\vec{F} \approx \sin\theta$ ， θ 为磁场与电流方向的夹角。当外加磁场与电流平行时，洛伦兹力为零，磁流阻最小；而当它们相互垂直时，洛伦兹力最大，磁通会在洛伦兹力的作用下运动，从而产生电压降，磁流阻最大。

设计实验：在使用直流或交流四引线法测电阻时，先降温到超导临界点 T_c 前的某一温度，然后外加磁场使其进入混合态，在该状态下测得一个阻值，然后将固体样品装置旋转，改变角度 θ ，记录不同角度下测得的阻值。

- 2 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感抗和容抗的贡献？

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，分别测量正向和负向电压来消除热电势和接触电势的影响，直流阻抗测量不包含感抗和容抗。

而对于交流四线法，交流电压的有效值 $V_{pp}/\sqrt{2}$ 与热电势和接触电势无关，可直接测得交流阻抗，其中交流电抗即包含了感抗和容抗。

- 3 直流四引线法测量中的双绞线 (twisted pair) 起到什么作用？用屏蔽线如何？

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，能有效减少电磁辐射干扰，提高四引线法的测量精度；使用屏蔽线同样可以屏蔽外界电磁场对电阻电信号测量的影响，屏蔽线的屏蔽层需要接地，外来的干扰信号可被该层导入大地。

- 4 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。

标准四引线法的测量原理如下图，由样品超导体和金属包覆层并联得到，在超导态和正常态测得的电阻分别为：

正常态：

$$R = \frac{R_m R_s}{R_m + R_s}$$

超导态：

$$R = 0$$

在超导态时能够测得零电阻



图 3: 标准四引线法接线原理示意图

两电极四引线法测量原理如下图所示，在超导体两端同时同时加入了两电极电阻 R_{p1} 和 R_{p2} ，因此在电阻测量时会带入两电极的阻值，不能在超导时测出零电阻

正常态：

$$R = \frac{R_m R_s}{R_m + R_s} + R_{p1} + R_{p2}$$

超导态：

$$R = R_{p1} + R_{p2}$$

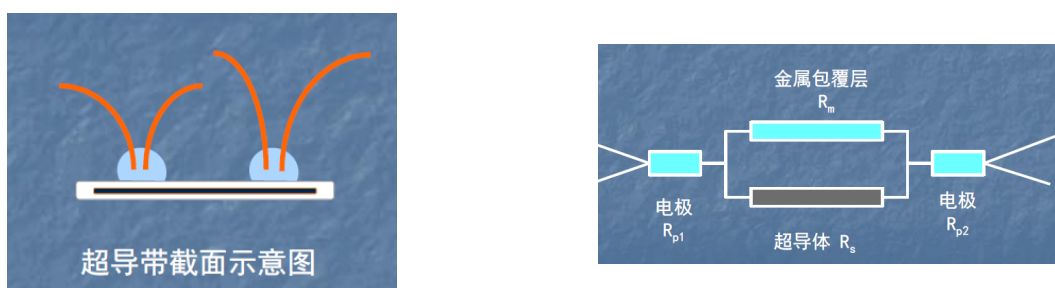
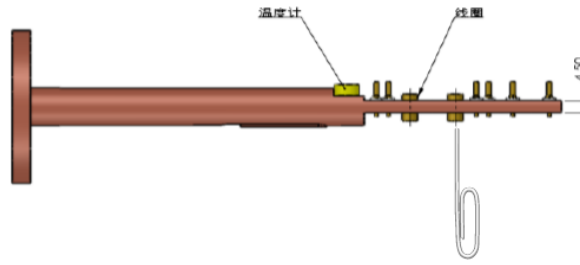


图 4: 两电极四引线法接线原理示意图

- 5 实验装置上的两个次级线圈不能做到对称，它们已被连接好，你又不知道单个线圈的输出是多少，如何判断测量交流磁化率的次级线圈（相对于初级线圈）是否接反以抵消本底？



用回形针分别插入两个线圈，输入信号反相则反接，同相则正接。

6 交流信号包含幅值（ R 和相位 θ ），或实部和虚部，由于实际制备时两个次级线圈不可能做到完全对称，那么

1) 可以在物理上抵消本底信号（含幅值和相位吗）？

两个次级线圈不完全对称，则幅值和相位信号不能在物理上抵消本地信号；若严格单独测量每个次级线圈得到幅值和相位，单独把 $k_2, k_2 I, \theta_1, \theta_2$ 测量出来，则可以通过理论计算消除影响

2) 由两对线圈完全对称假设而推出的式（E1-18）会是怎样？请推导。

当不完全对称时，没有放样品的线圈感应电动势为：

$$\tilde{\epsilon}_1 = k_1 k_2 \mu_0 \frac{\partial \tilde{I}_1}{\partial t}$$

放来样品的线圈感应电动势为：

$$\tilde{\epsilon}_2 = k_1 k_2 I \mu_0 (1 + \tilde{\chi}) \frac{\partial \tilde{I}_2}{\partial t}$$

则差分电势为：

$$\Delta \tilde{\epsilon} = k_1 \mu_0 \left[(1 + \tilde{\chi}) k_2 I \frac{\partial \tilde{I}_2}{\partial t} - k_2 \frac{\partial \tilde{I}_1}{\partial t} \right]$$

由于两个线圈不完全对称，所以会造成幅值和相位一定程度上的偏差，将 $\Delta \epsilon = V_2 e^{(i\omega t + \theta)}$, $\tilde{I}_1 = C V_0 e^{(i\omega t + \theta_1 + \theta_1)}$, $\tilde{I}_2 = C V_0 e^{(i\omega t + \theta_1 + \theta_2)}$ 代入，得到：

$$\tilde{\chi} = \frac{1}{k_1 k_2 I \mu_0} \frac{V_2}{C \omega V_0} \exp \left[i \left(\theta - \theta_I - \theta_1 - \frac{\pi}{2} \right) \right] + \frac{k_2}{k_2 I} \exp [i (\theta_2 - \theta_1)] - 1$$

在完全对称条件下， $k_2 = k_2 I, \theta_1 = \theta_2$ ，带入则得到：

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

3) 实部与虚部的区分依赖于相位差测量，如何扣除交流磁化率测量系统的相位差本底？

可以分别测量取样电阻和次级线圈的输出相位与内部参考信号的对比，然后相减，对于双通道锁相放大器，可以直接同时测量初级线圈和次级线圈，读出两个信号的相位差。

7 如何对磁化率定标？实部或虚部能同时定标吗？

通过已知磁化率的标样可以对系数定标。将标样放进样品槽中，设定一个确定的频率值，后续实验不改变频率值，然后通过锁相放大器的相位读数，得到 $\frac{V_2}{C\omega V_0} \cos(\theta - \theta_I - \frac{\pi}{2})$ 和 $\tilde{\chi}$ 之间的关系，其比值就是互感系数。由于实部和虚部的系数一致，所以两者可以同时定标。

- 8 交流互感一级线圈的电阻为 34Ω ，对于稳流源的最大输出 $0.1A$ ，所产生的焦耳热为 $0.34W$ ，它对样品温度产生多大的影响有什么方法降低该影响？

由热传导公式得 $\Delta T = 0.34W \times 20K/W = 6.8K$ 即为对温度产生的偏差，减少影响的方法有：

- 减少一级线圈与样品的接触面积，减慢热量传导的过程
- 测量时尽量保持温度稳定在一个值，使其尽量到达稳态

- 9 线圈架用材料做合适？为什么不能用金属？

用绝缘材料合适，使用金属会造成短路。