

# 高温超导体材料临界转变温度的测定 实验报告

姓名：王炜致 学号：2022010542 实验日期：2024.4.9 实验台号：5

## 1 实验目的

超导现象是指材料低于某一临界温度时电阻变为零的现象，这一温度称为超导转变温度 ( $T_c$ )。零电阻和完全抗磁性是超导材料的两个基本特性。高温超导材料是指转变温度  $T_c$  超过液氮温度的超导材料。

本实验通过学习超导体的基本概念，理解理想导体与超导体的区别，加深对超导材料两个基本特性的认识。使用液氮冷却高温超导样品、用铂电阻温度计测量温度，初步了解低温技术。用四引线法测量高温超导样品的电阻—温度特性，观察零电阻现象。用电磁感应法测量超导样品对互感线圈感应电压的影响，通过得到的感应电压—温度特性，了解完全抗磁性。

## 2 实验仪器

稳压稳流直流电源（艾德克斯 IT6333A/B, CH1: 60V3A, CH2: 60V3A, CH3: 5V3A）；  
信号发生器（泰克 AFG1062, 双通道, 60 MHz, 采样率 300 MS/s）；  
5 位半数字万用表（Fluke F8808A）；4 位半数字万用表（胜利 Victor 8145B/C）；  
手持数字万用表（胜利 VC9806+, 四位半）；液氮罐（3L）；  
测试头；测试头接线盒；电阻板，装有 10 个串联的  $1\text{ k}\Omega$  电阻和 10 个串联的  $100\ \Omega$  电阻；  
双刀双掷换向开关；导线；BNC-香蕉头导线 1 根。

## 3 数据处理与分析

电源输出设置：CH1:  $10\text{V}/0.005\text{A}$ ; CH3:  $1\text{V}/1\text{A}$

### 3.1 万用表测量导线/引线电阻及超导样品电阻

- 数字万用表两条测试导线电阻：  $R_{\text{testwire}} = 0.044\ \Omega$
- 超导盒与样品间的引线电阻：  $R_{\text{wire}} = 0.456 - 0.044 = 0.412\ \Omega$
- 四引线法测量室温下超导样品电阻  $R_{\text{Super}}$

电源 CH3：工作模式恒流，输出电压  $U_{\text{CH3}} = 552\text{mV}$ ，输出电流  $I_{\text{CH3}} = 1000\text{mA}$

超导样品上的电压  $U_{\text{Super}} = 0.306\text{mV}$ ，样品电阻  $R_{\text{Super}} = 0.306\text{m}\Omega$

- 测试导线电阻、引线电阻、超导样品电阻量级比较

导线、引线电阻较超导样品电阻（室温）大 2-3 个数量级，可见导线、引线电阻确实对超导样品电阻测量造成极大影响。这就验证了使用四引线法测量的必要性。

### 3.2 电流换向法消除乱真电势的影响

1. 测量电压  $U_{Meas1} = 0.306mV$ ,  $U_{Meas2} = -0.310mV$ , 电流  $I = 1000mA$

乱真电势  $U_{Spur} = \frac{0.306 - 0.310}{2} = -0.002mV$ , 样品电压  $U_{Super} = 0.308mV$ , 样品电阻  $R_{Super} = 0.308m\Omega$

2. 乱真电势与样品上电压的数量级比较

乱真电势较超导样品上电压小 2 个数量级, 对超导样品上电压测量乃至超导样品电阻测量仍存在一定影响。

### 3.3 铂电阻温度计测量温度

1. 限流电阻  $R = 10k\Omega$ , 在 77K-室温范围铂电阻工作电流的变化  $0.9978 - 0.9892 = 8.58 \times 10^{-4}mA$

CH1 应恒压输出 10.000V, 为使输出电流为 1mA, 近似有限流电阻

$$R = \frac{U_{CH1}}{I_{CH1}} = 10k\Omega$$

由于铂电阻远小于该限流电阻值, CH1 输出电流应当可以近似视为 1mA。事实上, 将温度代入讲义公式

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)]$$

得到 77K 温度下铂电阻  $R_{77K} \approx 22.0517\Omega$ , 室温下铂电阻  $R_{23^\circ C} \approx 108.9589\Omega$ , 由  $U_{CH1} = 10.000V$ ,  $R = 10k\Omega$  计算得

$$I_{77K} \approx 0.9978mA, I_{23^\circ C} \approx 0.9892mA$$

可以判断电流实际工作值应当与预设值偏差很小。

2. 计算室温 (23°C) 时铂电阻上的电压:  $U_{t-calc} = 107.7845mV$

取上述数据, 由分压规律

$$U_{t-calc} = \frac{R_{23^\circ C}}{R_{23^\circ C} + R} U_{CH1} = \frac{108.9589}{108.9589 + 10k} \times 10.000V \approx 107.7845mV$$

3. 室温下铂电阻两端的电压测量值:  $U_{t-real} = 109.63mV$

示数与计算结果接近 (实验时室温约为 25°C), 表明电路没有问题。

4. 电源 CH1: 工作模式恒压, 输出电压  $U_{CH1} = 10.000V$ , 输出电流  $I_{CH1} = 1mA$

### 3.4 电磁感应法测超导样品对感应电压的影响

信号源设置: 输出波形正弦波, 频率  $f = 700Hz$ , 幅度  $V_{pp} = 2000mV$

线圈感应电压:  $U_m = 20.34mV$

### 3.5 样品超导转变温度测量

1. 查附表 1 预估铂电阻电压  $U_{t=-150^\circ C} = 40.07mV$ ,  $U_{t=-170^\circ C} = 31.89mV$

数据记录间隔参考下述规划: 在  $U_{Super}$  相对  $U_t$  变化较缓慢的阶段, 记录数据间隔取  $\Delta t \approx 2^\circ C$ , 在变化较快的阶段记录数据间隔取  $\Delta t \approx 0.1^\circ C$ 。又读表知: 温度每上升  $1^\circ C$ , 铂电阻阻值约增加  $0.4\Omega$ , 则由通过铂电阻电流  $I_{CH1} = 1mA$  知变化缓慢阶段应间隔  $\Delta U_t = 1mA \cdot 0.4\Omega \cdot 2 = 0.8mV$  记录数据, 变化较快阶段应间隔  $\Delta U_t = 1mA \cdot 0.4\Omega \cdot 0.1 = 0.04mV$  记录数据。

2. 降温测量 (略)

## 3. 进入超导态后的乱真电势

电压  $U_{Meas1} = 0.000mV$ ,  $U_{Meas2} = 0.000mV$ , 电流  $I = 1000mA$

乱真电势  $U_{Spur} = 0.000mV$ , 样品电压  $U_{Super} = 0.000mV$ , 样品电阻  $R_{Super} = 0.000m\Omega$

可见乱真电势与超导转变后样品电压可能处于同一数量级。

## 4. 升温测量

测量数据记录如下。由于  $I_{CH1} = 1mA$ , 不同温度下铂电阻阻值  $R_t$  和  $U_t$  栏所填在数值上相同 (如  $29.83mV$  对应  $29.83\Omega$ ), 不予单独列表。又由于  $I_{CH3} = 1000mA$ , 且乱真电势为 0, 不同温度下超导样品阻值和  $U_{Super}$  在数值上相同 (如  $0.026mV$  对应  $0.026m\Omega$ ), 亦不予单独列表。

$U_t/mV$	29.83	30.64	31.44	32.25	33.05	33.92	34.03	34.14	34.25	34.30
$U_{Super}/mV$	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.003
$U_m/mV$	20.45	20.49	20.56	20.66	20.85	21.26	21.36	21.46	21.61	21.69

$U_t/mV$	34.35	34.40	34.46	34.51	34.61	34.66	34.72	34.80	34.85	34.92
$U_{Super}/mV$	0.004	0.004	0.005	0.007	0.008	0.010	0.012	0.015	0.018	0.022
$U_m/mV$	21.76	21.87	21.98	22.10	22.30	22.43	22.55	22.72	22.81	22.90

$U_t/mV$	34.98	35.04	35.10	35.16	35.22	35.28	35.33	35.40	35.49	35.56
$U_{Super}/mV$	0.026	0.030	0.035	0.044	0.050	0.060	0.066	0.075	0.083	0.088
$U_m/mV$	22.96	23.00	23.04	23.06	23.07	23.08	23.08	23.09	23.09	23.09

$U_t/mV$	35.64	35.72	35.78	35.90	36.04	36.22	36.42	36.63	36.83	37.62
$U_{Super}/mV$	0.092	0.095	0.097	0.098	0.099	0.100	0.100	0.101	0.102	0.104
$U_m/mV$	23.08	23.08	23.08	23.08	23.07	23.07	23.06	23.06	23.05	23.03

$U_t/mV$	38.42	39.22	40.02	42.44	44.40	45.54
$U_{Super}/mV$	0.105	0.107	0.109	0.116	0.120	0.123
$U_m/mV$	23.00	22.97	22.94	22.85	22.79	22.75

利用讲义公式

$$t = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B(1 - 0.01R_t)}}{2B}$$

可通过铂电阻阻值计算对应温度。处理后数据列表如下。

$t/^{\circ}C$	-175.01	-173.04	-171.10	-169.12	-167.17	-165.05	-164.78	-164.51	-164.25	-164.12
$R_t/\Omega$	29.83	30.64	31.44	32.25	33.05	33.92	34.03	34.14	34.25	34.30
$R_{Super}/m\Omega$	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.003
$U_m/mV$	20.45	20.49	20.56	20.66	20.85	21.26	21.36	21.46	21.61	21.69

$t/^{\circ}C$	-164.00	-163.88	-163.73	-163.61	-163.37	-163.24	-163.10	-162.90	-162.78	-162.61
$R_t/\Omega$	34.35	34.40	34.46	34.51	34.61	34.66	34.72	34.80	34.85	34.92
$R_{Super}/m\Omega$	0.004	0.004	0.005	0.007	0.008	0.010	0.012	0.015	0.018	0.022
$U_m/mV$	21.76	21.87	21.98	22.10	22.30	22.43	22.55	22.72	22.81	22.90

$t/^{\circ}\text{C}$	-162.46	-162.32	-162.17	-162.02	-161.88	-161.73	-161.61	-161.44	-161.22	-161.05
$R_t/\Omega$	34.98	35.04	35.10	35.16	35.22	35.28	35.33	35.40	35.49	35.56
$R_{Super}/m\Omega$	0.026	0.030	0.035	0.044	0.050	0.060	0.066	0.075	0.083	0.088
$U_m/mV$	22.96	23.00	23.04	23.06	23.07	23.08	23.08	23.09	23.09	23.09

$t/^{\circ}\text{C}$	-160.85	-160.66	-160.51	-160.22	-159.87	-159.44	-158.95	-158.43	-157.94	-156.01
$R_t/\Omega$	35.64	35.72	35.78	35.90	36.04	36.22	36.42	36.63	36.83	37.62
$R_{Super}/m\Omega$	0.092	0.095	0.097	0.098	0.099	0.100	0.100	0.101	0.102	0.104
$U_m/mV$	23.08	23.08	23.08	23.08	23.07	23.07	23.06	23.06	23.05	23.03

$t/^{\circ}\text{C}$	-154.06	-152.10	-150.14	-144.20	-139.39	-136.59
$R_t/\Omega$	38.42	39.22	40.02	42.44	44.40	45.54
$R_{Super}/m\Omega$	0.105	0.107	0.109	0.116	0.120	0.123
$U_m/mV$	23.00	22.97	22.94	22.85	22.79	22.75

3.5.1  $R_{Super} - t$  曲线

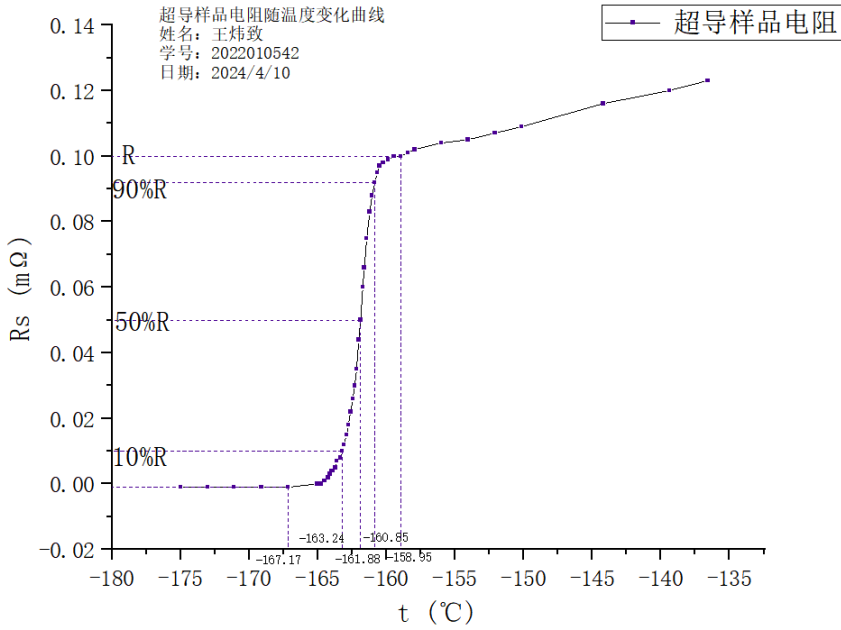


图 1:  $R_{Super} - t$  曲线

由图可见，超导中点转变温度

$$T_c^{middle} = T_{50\%R} = -161.88^{\circ}\text{C}$$

超导完全转变温度

$$T_c^0 = -167.17^\circ\text{C}$$

超导起始转变温度

$$T_c^{onset} = T_R = -158.95^\circ\text{C}$$

转变宽度

$$\Delta T_c = T_{90\%R} - T_{10\%R} = -160.85^\circ\text{C} + 163.24^\circ\text{C} = 2.39^\circ\text{C}$$

### 3.5.2 $U_m - t$ 曲线

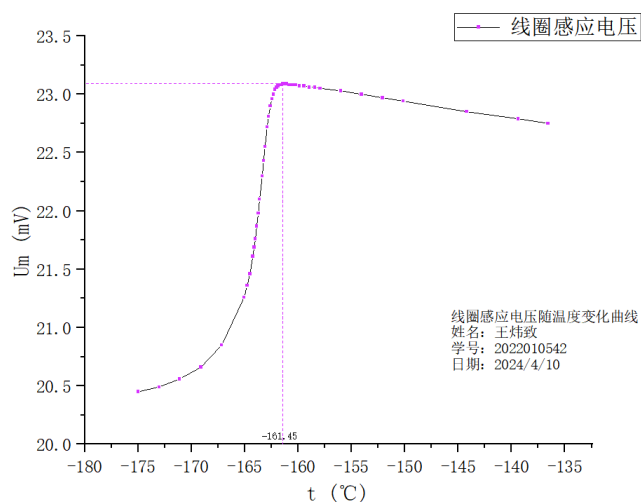


图 2:  $U_m - t$  曲线

可见样品进入超导状态后，线圈感应电压发生显著降低，事实上是完全抗磁性的体现。但由于超导样品尺寸较小且处于两个线圈之间，并没有将初级线圈与次级线圈完全屏蔽隔离，在样品进入超导态后，次级线圈仍能感应出电压，属于正常现象。

## 4 实验总结

通过本次实验，我了解了超导材料零电阻效应及迈斯纳效应两种基本性质，了解了利用四引线法、电流换向法进行精确测量的原理及方法，了解了通过电学方法（铂电阻温度计）测量温度的技术，了解了低温实验的基本操作，切实体会到超导材料在低温环境下性质的转变情况。同时，我巩固了 Origin 绘图工具的使用技能。

## 5 原始数据记录

注：图中 C、铂电阻温度计测量温度部分，工作电流变化计算有误，以前文电子版为准。

2024 春物理实验 B(2)课程资料

附录 2 实验测量数据记录参考表格

实验题目：测量高温超导材料的转变温度

姓名：王沛然，学号2022010533，实验组号：第二晚上，实验台号：5，实验日期2024/4/9

电源输出设置：CH1：10 V，0.05 A；CH3：1 V，1 A

A、万用表测量导线/引线电阻及超导样品电阻

- 数字万用表两条测试导线电阻： $R_{\text{wire1}} = 0.044 \Omega$
- 超导盒与样品间的引线电阻： $R_{\text{wire}} = 0.458 - 0.044 = 0.412 \Omega$
- 四引线法测量室温下超导样品电阻  $R_{\text{super}}$   
电源 CH3：工作模式恒压（恒压或恒流），输出电压  $U_{\text{CH3}} = 2.305 \text{ mV}$ ，输出电流  $I_{\text{CH3}} = 0.000 \text{ mA}$   
超导样品上的电压  $U_{\text{super}} = 0.306 \text{ mV}$ ，样品电阻  $R_{\text{super}} = 0.306 \text{ m}\Omega$
- 思考：测试导线电阻、引线电阻、超导样品电阻量级比较！  
 $\frac{U_{\text{super}}}{I_{\text{CH3}}}$

B、电流换向法消除乱真电势的影响

- 测量电压  $U_{\text{Hall1}} = 0.306 \text{ mV}$ ， $U_{\text{Hall2}} = -0.310 \text{ mV}$ ，电流  $I = 1000 \text{ mA}$ （电源屏幕显示值）  
乱真电势  $U_{\text{super}} = 0.002 \text{ mV}$ ，样品电压  $U_{\text{super}} = 0.308 \text{ mV}$ ，样品电阻  $R_{\text{super}} = 0.308 \text{ m}\Omega$
- 思考：乱真电势与样品上电压的数量级比较！  
 $U_{\text{super}} + U_{\text{super}} = U_{\text{Hall1}} - U_{\text{Hall2}}$   
 $U_{\text{super}} = \frac{U_{\text{Hall1}} - U_{\text{Hall2}}}{2} = I R_{\text{super}}$

C、铂电阻温度计测量温度

室温  $108.52 \text{ K}$ ，铂电阻  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ，在  $77 \text{ K}$ -室温范围铂电阻工作电流的变化  $0.5 \times 10^{-3} \text{ mA}$   
 $77 \text{ K} = 9.4700 \text{ mV}$   
2. 计算室温（23°C）时铂电阻上的电压： $U_{\text{CH3}} = 107.789 \text{ mV}$   
3. 室温下铂电阻两端的电压测量值： $U_{\text{CH3}} = 109.63 \text{ mV}$   
4. 电源 CH1：工作模式恒压（恒压或恒流），输出电压  $U_{\text{CH1}} = 10.000 \text{ V}$ ，输出电流  $I_{\text{CH1}} = 0.000 \text{ mA}$

D、电磁感应法测超导样品对感应电压的影响

信号源设置：输出波形正弦波，频率  $f = 700 \text{ Hz}$ ，幅度  $V_{\text{pp}} = 2000 \text{ mV}$   
线圈感应电压： $U_{\text{ind}} = 20.34 \text{ mV}$

E、样品超导转变温度测量

1. 查附表 1 预估：铂电阻电压  $U_{\text{Pt-100}} = 40.07 \text{ mV}$ ， $U_{\text{Pt-100}} = 31.09 \text{ mV}$

2. 升温测量  
参考：在  $U_{\text{Pt-100}}$  附近开始记录数据，在  $U_{\text{super}}$  相对  $U_{\text{Pt-100}}$  变化较缓慢的阶段记录数据间隔取  $\Delta U = 0.1^\circ \text{C}$ ，在变化较快的阶段记录数据间隔取  $\Delta U = 0.1^\circ \text{C}$

$U_{\text{Pt-100}}/\text{mV}$	$U_{\text{super}}/\text{mV}$	$U_{\text{ind}}/\text{mV}$
31.09		
31.20		
31.30		
31.40		
31.50		
31.60		
31.70		
31.80		
31.90		
32.00		
32.10		
32.20		
32.30		
32.40		
32.50		
32.60		
32.70		
32.80		
32.90		
33.00		
33.10		
33.20		
33.30		
33.40		
33.50		
33.60		
33.70		
33.80		
33.90		
34.00		
34.10		
34.20		
34.30		
34.40		
34.50		
34.60		
34.70		
34.80		
34.90		
35.00		
35.10		
35.20		
35.30		
35.40		
35.50		
35.60		
35.70		
35.80		
35.90		
36.00		
36.10		
36.20		
36.30		
36.40		
36.50		
36.60		
36.70		
36.80		
36.90		
37.00		
37.10		
37.20		
37.30		
37.40		
37.50		
37.60		
37.70		
37.80		
37.90		
38.00		
38.10		
38.20		
38.30		
38.40		
38.50		
38.60		
38.70		
38.80		
38.90		
39.00		
39.10		
39.20		
39.30		
39.40		
39.50		
39.60		
39.70		
39.80		
39.90		
40.00		

$\Delta t = 2^\circ \text{C}$ ， $\Delta U_{\text{Pt-100}} = 10 \text{ mV}$ ， $\Delta U_{\text{super}} = 0.04 \text{ mV}$ ， $\Delta U_{\text{ind}} = 0.04 \text{ mV}$

$\Delta t = 0.1^\circ \text{C}$ ， $\Delta U_{\text{Pt-100}} = 10 \text{ mV}$ ， $\Delta U_{\text{super}} = 0.04 \text{ mV}$ ， $\Delta U_{\text{ind}} = 0.04 \text{ mV}$

2024 春物理实验 B(2)课程资料

$U_{\text{Pt-100}}/\text{mV}$	$U_{\text{super}}/\text{mV}$	$U_{\text{ind}}/\text{mV}$
31.09		
31.20		
31.30		
31.40		
31.50		
31.60		
31.70		
31.80		
31.90		
32.00		
32.10		
32.20		
32.30		
32.40		
32.50		
32.60		
32.70		
32.80		
32.90		
33.00		
33.10		
33.20		
33.30		
33.40		
33.50		
33.60		
33.70		
33.80		
33.90		
34.00		
34.10		
34.20		
34.30		
34.40		
34.50		
34.60		
34.70		
34.80		
34.90		
35.00		
35.10		
35.20		
35.30		
35.40		
35.50		
35.60		
35.70		
35.80		
35.90		
36.00		
36.10		
36.20		
36.30		
36.40		
36.50		
36.60		
36.70		
36.80		
36.90		
37.00		
37.10		
37.20		
37.30		
37.40		
37.50		
37.60		
37.70		
37.80		
37.90		
38.00		
38.10		
38.20		
38.30		
38.40		
38.50		
38.60		
38.70		
38.80		
38.90		
39.00		
39.10		
39.20		
39.30		
39.40		
39.50		
39.60		
39.70		
39.80		
39.90		
40.00		

$\Delta t = 2^\circ \text{C}$ ， $\Delta U_{\text{Pt-100}} = 10 \text{ mV}$ ， $\Delta U_{\text{super}} = 0.04 \text{ mV}$ ， $\Delta U_{\text{ind}} = 0.04 \text{ mV}$

$\Delta t = 0.1^\circ \text{C}$ ， $\Delta U_{\text{Pt-100}} = 10 \text{ mV}$ ， $\Delta U_{\text{super}} = 0.04 \text{ mV}$ ， $\Delta U_{\text{ind}} = 0.04 \text{ mV}$