

高温超导材料特性和低温温度计 实验报告

隋源 2000011379 11 号

Mar 25 2022

1 实验目的和内容

1. 实验目的:

通过低温温度计的比对、测量超导体的转变曲线, 了解高临界温度超导材料的基本特性及其测试方法、金属和半导体 pn 结的伏安特性随温度的变化和温差电效应, 并学习几种低温温度计的比对和使用方法、低温温度控制的简便方法等。

2. 实验器材:

低温恒温器 (高临界温度超导体、铂电阻温度计、硅二极管温度计、温差电偶等), 不锈钢杜瓦容器和支架, PZ158 型数字电压表, BW2 型高温超导材料特性测试装置, 连接线缆。

2 实验数据和现象

2.1 室温的测量

打开装置电源后, 将探头置于室温环境下, 将开关拨到电流档位, 微调铂电阻和二极管温度计两个电路恒流源的输出, 得到读数

$$V_{R_{Pt}} = 100.01\text{mV}, \quad V_{R_{Si}} = 1.0001\text{V}$$

这两个电压值分别对应 100Ω 和 $1k\Omega$ 。将档位拨回电压, 此时电表示数

$$U_{Pt} = 108.04\text{mV}, \quad U_{Si} = 0.5188\text{V}$$

选定样品电路的电流输出为 10mA , 同样测量 10Ω 标准电阻和样品在室温下的电压值

$$V_T = 100.146\text{mV}, \quad U_T = 77\mu\text{V}$$

对原始数据进行处理, 容易得到初始时三温度计电流 (热电偶温度计和样品共用同一回路) 为

$$I_{Pt} = 1.0001\text{mA}, \quad I_{Si} = 1.0001\text{mA}, \quad I_{Th} = 10.0146\text{mA}$$

此时铂电阻和样品电阻为

$$R_{Pt} = 108.03\Omega, \quad R_T = 7.689\text{m}\Omega$$

本次使用的仪器编号是 BW2008, 对照其电阻随温度变化表可以得出室温的值

$$T_0 = 293.58K$$

2.2 低温温度计的比对

将低温恒温器 (探头) 放入杜瓦容器内, 调节深度使得液面计的读数接近零。随着样品温度的降低, 分别记录铂电阻、硅二极管与温差电偶的电压值。在温度降低的过程中根据液面计的读数调整探头的深度以保持降温的速度。根据铂电阻的电压计算出阻值并查表得到温度, 然后分别作出二极管温度计和温差电偶温度计的电压随温度变化曲线。相关图表如下

| U_{Pt} (mV) | U_{Si} (V) | U_{Th} (mV) | $R_{Pt}(\Omega)$ | T (K) |
|---------------|--------------|---------------|------------------|---------|
| 108.04 | 0.5188 | 5.960 | 108.03 | 293.58 |
| 104.00 | 0.5437 | 5.520 | 103.99 | 283.24 |
| 100.20 | 0.5673 | 5.164 | 100.19 | 273.49 |
| 96.04 | 0.5936 | 4.794 | 96.03 | 262.89 |
| 92.06 | 0.6192 | 4.441 | 92.05 | 252.77 |
| 88.11 | 0.6452 | 4.100 | 88.10 | 242.75 |
| 84.08 | 0.6720 | 3.763 | 84.07 | 232.59 |
| 80.18 | 0.6984 | 3.446 | 80.17 | 222.77 |
| 76.14 | 0.7259 | 3.128 | 76.13 | 212.65 |
| 72.15 | 0.7531 | 2.825 | 72.14 | 202.68 |
| 68.18 | 0.7801 | 2.538 | 68.17 | 192.80 |
| 64.13 | 0.8075 | 2.256 | 64.12 | 182.77 |
| 60.28 | 0.8331 | 1.998 | 60.27 | 173.26 |
| 56.05 | 0.8608 | 1.728 | 56.04 | 162.86 |
| 52.16 | 0.8858 | 1.493 | 52.15 | 153.34 |
| 48.19 | 0.9106 | 1.265 | 48.19 | 143.70 |
| 44.18 | 0.9352 | 1.045 | 44.18 | 133.99 |
| 40.69 | 0.9560 | 0.956 | 40.69 | 125.60 |
| 36.82 | 0.9786 | 0.675 | 36.82 | 116.34 |
| 32.85 | 1.0012 | 0.492 | 32.85 | 106.91 |
| 28.87 | 1.0234 | 0.321 | 28.87 | 97.53 |
| 26.09 | 1.0385 | 0.209 | 26.09 | 91.00 |
| 20.32 | 1.0692 | 0.001 | 20.32 | 77.49 |

Sheet1: 低温温度计比对数据表

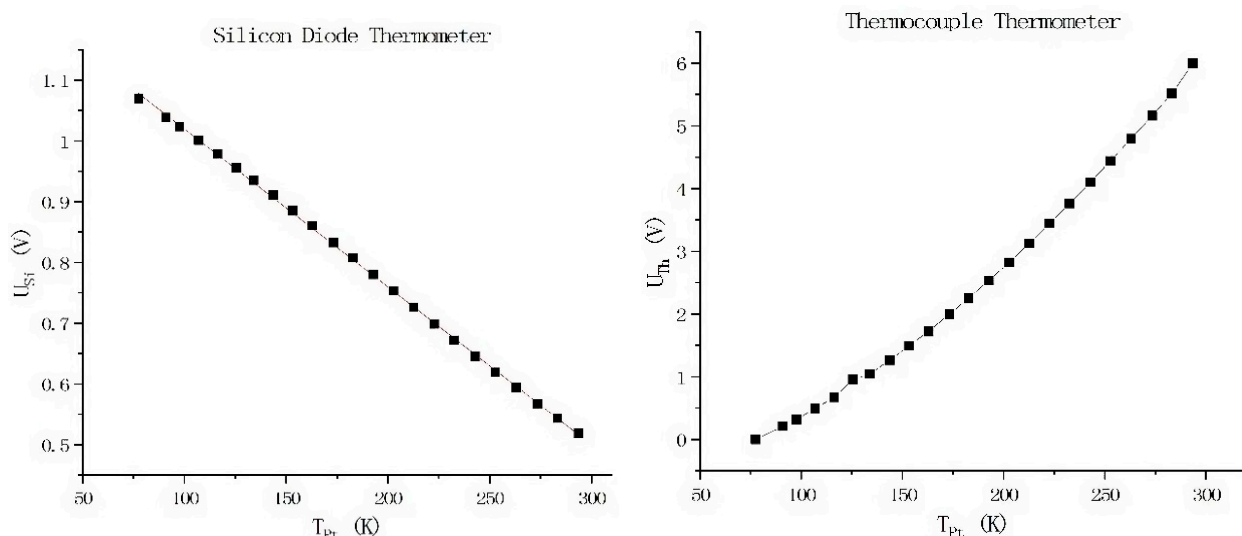


Figure1: 低温温度计比对 U-T 图

上图左侧是硅基二极管温度计的电压随温度变化曲线。采用线性拟合, 结果为

$$U_{Pt}(V) = -0.0026T(K) + 1.27958, \quad r = -0.9998$$

可以看到硅基二极管温度计在液氮沸点到室温区间的线性性质良好。相比较而言, 温差电偶温度计的线性性质就较差一些, 其斜率随温度的上升而上升, 这与铂电阻温度计正好相反 (根据 BW2008 的数据可以看出), 也即, 在本实验的测温区间内, 三种低温温度计的温度曲线有各自的特点:

硅基二极管温度计电阻随温度升高而下降, 线性性质良好;

温差电偶温度计电阻随温度升高而上升, 且上升斜率也随温度升高而上升;

铂电阻温度计电阻随温度升高而上升, 但上升斜率随温度升高而下降。

2.3 超导转变曲线的测定

在测量低温温度计电压的同时也进行了样品电压的测量。样品电压的测量主要分为几个阶段:

1. 探头温度降至 130K 左右 (对应示数约 43mV), 开始同时记录样品电压数据和铂电阻电压数据, 持续到铂电阻电压 27mV 之前;

2. 27mV 后, 样品电压下降速度变快, 记录好相关数据或者开始录制仪器数据的变化, 持续到铂电阻电压 10mV 之前;

3. 10mV 后, 开始反复换接电流反向开关, 观察同一温度下样品正反向电压的值; 并进行记录;

4. 观察到样品正反向电压相等并稳定不变时, 立刻记录此时的铂电阻温度数据及其他电压数据, 得到零电阻温度, 结束超导转变测定。

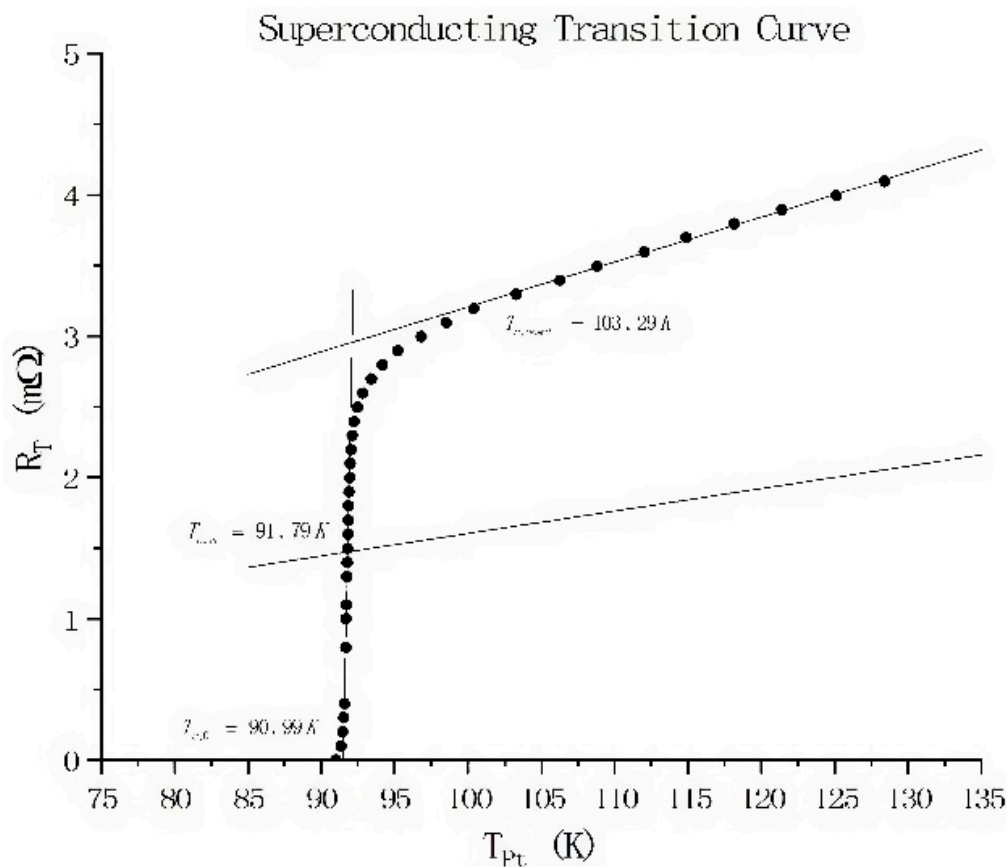


Figure2: 超导转变曲线

利用处理得到的样品电阻随温度的变化数据，作出超导转变曲线如图所示
从图中可以读出超导起始转变温度

$$T_{c,onset} = 103.29K$$

按照第 4 步描述判断零电阻温度，测量过程的数据如下

| | | | | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_{Pt}(mV)$ | 26.39 | 26.38 | 26.34 | 26.32 | 26.29 | 26.24 | 26.09 |
| $V_+(\mu V)$ | 10 | 8 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| $V_-(\mu V)$ | -6 | -4 | -2 | -1 | 0 | 0 | 0 |

Sheet2: 判断零电阻温度数据表

故查表得到零电阻温度

$$T_{c,0} = 90.99K$$

为得到转变中点温度，对超导转变曲线中缓慢变化和急剧变化的两段作最小二乘法拟合

$$r_1(m\Omega) = 0.03176T(T) + 0.03037, \quad r = 0.999, \quad 103.29K \leq T \leq 128.39K$$

$$r_2(m\Omega) = 4.7615T(T) - 435.58681, \quad r = 0.995, \quad 91.70K \leq T \leq 91.88K$$

作一条斜率截距均为 r_1 一半的直线交 r_2 于一点如图所示

$$r_2(T) = r_1(T)/2$$

计算出该点的温度值就是超导转变中点温度

$$T_{c,m} = 91.79\text{K}$$

2.4 液氮沸点的测量

实验完成后, 将样品完全插入液氮中, 稳定后记录各项数据。其中, 关于温度计电压的数据已经包含在 Sheet1 中。此时查表可以得到测得的液氮沸点

$$T_{N_2} = 77.49\text{K}$$

判断样品完全插入液氮的标准是热电偶温度计、液面计和样品电压。它们此时的值为

$$U_{Th} = U_{liq} = U_T = 0.000\text{mV}$$

3 结果分析与讨论

3.1 测量系统的精确性和稳定性

在测量液氮数据的时候, 测量得到的三个电路电流的大小为

$$V_{R_{Pt}} = 100.02\text{mV}, \quad V_{R_{Si}} = 1.0003\text{V}, \quad V_T = 100.160\text{mV}$$

可以看出, 三个回路在实验过程中恒流源的输出都有了微小的增量, 并且不同的测量模块的变化幅度不同, 这势必会对测量系统的精确性和稳定性带来影响。铂电阻、硅二极管与温差电偶的电压都有四至五位有效数字, 实验程中电流变化幅度也小, 因此温度计的比对实验的精度较高。但是样品电压最多只有两位有效数字, 前后电流也产生了一定变化, 导致其测量精度比较低。两方面的精度不匹配导致了温度测量精度的浪费, 也导致了起始转变温度、转变中点温度和零电阻温度测量与计算的精度较低。

4 实验收获与感想

本次试验通过液氮冷却法进行了高温超导和低温温度计实验, 对低温温度计的工作原理有了进一步的了解, 也对高温超导材料特性有了更深的认识; 关于液氮的使用也是本实验的特色之一, 近距离操作也使实验非常有趣; 最后, 十分感谢指导老师老师对仪器操作的讲解和实验注意事项的叮嘱, 让我对低温和超导试验的认识和相关仪器的操作受益良多。

附录: 超导转变曲线的测定数据

| U_{Pt} (mV) | U_T (μV) | $R_{Pt}(\Omega)$ | T (K) | $R_T(m\Omega)$ |
|---------------|-------------------|------------------|---------|----------------|
| 41.86 | 41 | 41.86 | 128.39 | 4.094 |
| 40.49 | 40 | 40.49 | 125.11 | 3.994 |
| 38.94 | 39 | 38.94 | 121.40 | 3.894 |
| 37.58 | 38 | 37.58 | 118.14 | 3.794 |
| 36.21 | 37 | 36.21 | 114.88 | 3.694 |
| 35.01 | 36 | 35.01 | 112.03 | 3.595 |
| 33.65 | 35 | 33.65 | 108.80 | 3.495 |
| 32.58 | 34 | 32.58 | 106.27 | 3.395 |
| 31.32 | 33 | 31.32 | 103.29 | 3.295 |
| 30.10 | 32 | 30.10 | 100.41 | 3.195 |
| 29.29 | 31 | 29.29 | 98.51 | 3.095 |
| 28.58 | 30 | 28.58 | 96.84 | 2.996 |
| 27.89 | 29 | 27.89 | 95.22 | 2.896 |
| 27.44 | 28 | 27.44 | 94.16 | 2.796 |
| 27.12 | 27 | 27.12 | 93.41 | 2.696 |
| 26.88 | 26 | 26.88 | 92.85 | 2.596 |
| 26.72 | 25 | 26.72 | 92.47 | 2.496 |
| 26.62 | 24 | 26.62 | 92.24 | 2.396 |
| 26.57 | 23 | 26.57 | 92.12 | 2.297 |
| 26.53 | 22 | 26.53 | 92.03 | 2.197 |
| 26.51 | 21 | 26.51 | 91.98 | 2.097 |
| 26.49 | 20 | 26.49 | 91.93 | 1.997 |
| 26.47 | 19 | 26.47 | 91.88 | 1.897 |
| 26.46 | 18 | 26.46 | 91.86 | 1.797 |
| 26.45 | 17 | 26.45 | 91.84 | 1.697 |
| 26.44 | 16 | 26.44 | 91.81 | 1.598 |
| 26.43 | 15 | 26.43 | 91.79 | 1.498 |
| 26.42 | 14 | 26.42 | 91.77 | 1.398 |
| 26.41 | 13 | 26.41 | 91.74 | 1.298 |
| 26.40 | 11 | 26.40 | 91.72 | 1.098 |
| 26.39 | 10 | 26.39 | 91.70 | 0.999 |
| 26.38 | 8 | 26.38 | 91.67 | 0.799 |
| 26.34 | 4 | 26.34 | 91.58 | 0.399 |
| 26.32 | 3 | 26.32 | 91.53 | 0.300 |
| 26.29 | 2 | 26.29 | 91.46 | 0.200 |
| 26.24 | 1 | 26.24 | 91.35 | 0.100 |
| 26.09 | 0 | 26.09 | 90.99 | 0.000 |