

## II-5 测定高温超导材料的转变温度

### 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. 理论背景

#### (1) 超导电性

1908 年，荷兰物理学家卡末林 昂内斯 (H. Kamerlingh Onnes) 首次液化了氦气，获得了 4.2 K 的低温。随后，将液氦通过进一步节流膨胀又获得了 1.5 K 的低温。1911 年，昂内斯在研究低温下金属的电阻率时，发现汞的电阻率在 4.2 K 左右突然降低到零 (图 1)，这就是超导现象。1913 年，昂内斯因氦的液化和超导现象的发现而获得诺贝尔物理学奖。

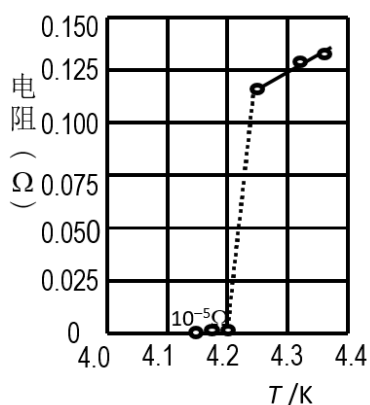


图 1 汞的零电阻现象

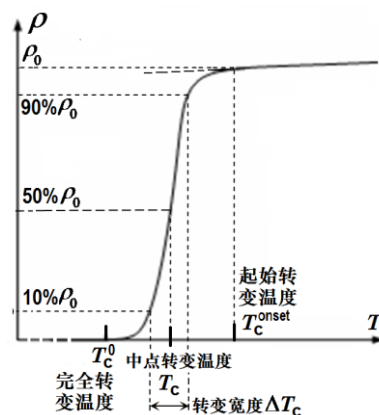


图 2 超导材料由正常态转变为超导态时的电阻率温度特性

金属的电阻是由于晶格原子热振动以及杂质原子、位错等缺陷对电子的散射造成的。在温度远低于德拜温度  $\Theta_D$  的低温区，金属的电阻率  $\rho$  随温度  $T$  的降低而逐渐减小，电阻—温度关系近似为  $\rho = \rho_r + b_1 T^5$ ，但在  $T=0K$  时电阻率仍不为零，剩余电阻率  $\rho_r$  与金属的纯度、晶格完整性等有关。在温度高于  $\Theta_D/2$  的较大范围，电阻率  $\rho$  与温度  $T$  近似成线性关系。

与金属的电阻率—温度特性不同，超导材料在低于转变温度  $T_c$  时电阻为零。实验发现，一旦在超导回路中建立起电流，则无需外电源就能持续几年并且观测不到衰减，这就是“持续电流”。现代超导重力仪的观测表明，超导态即使有电阻，其电阻率也小于  $10^{-28} \Omega \cdot m$ 。这个值远小于常规金属迄今所能达到的最小电阻率  $10^{-15} \Omega \cdot m$ 。需要注意的是，零电阻现象只在直流情况下存在。

超导材料在降温过程中由正常态转变为超导态一般是在一定的温度区间范围内发生的，如图 2 所示。超导转变温度有着不同的定义：零电阻转变温度  $T_c^0$  (也称为完全转变温度)，起始转变温度  $T_c^{onset}$ ，和中点

转变温度  $T_C^{middle}$ 。本实验中超导转变温度  $T_C$  指中点转变温度，即电阻率降至起始转变温度时的电阻率的一半处的温度，转变宽度  $\Delta T_C$  指电阻率从  $\rho_0$  的 90% 降到 10% 的温度间隔。

## (2) 临界磁场及临界电流密度

上述转变温度  $T_C$  是在无外加磁场的情况下样品转变至超导态时的温度。超导体置于磁场中时，对于低于  $T_C$  的任一温度  $T$ ，存在一个临界磁场  $H_C(T)$ 。当磁场强度大于临界磁场时，即使在转变温度以下，超导性也被破坏，样品从超导态回到正常态。对于传统的第 I 类超导体，实验和理论研究表明，临界磁场与温度的关系为

$$H_C(T) = H_C(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_C} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中  $H_C(0)$  是温度趋于 0 K 时的临界磁场。图 3 所示为传统超导材料的临界磁场—温度关系示意图。该图也可认为是传统超导体的相图：在曲线以下，材料处于超导相；在曲线上方，材料处于非超导相。

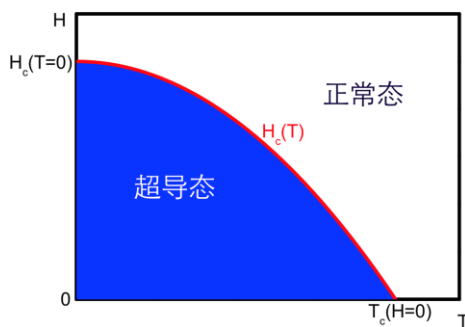


图 3 超导材料的临界磁场—温度关系示意图

另外，实验也表明超导材料的超导态还受电流密度的影响。当电流密度达到或超过某一临界值  $J_C$  后，超导体恢复到正常态。这个电流密度值称为**临界电流密度**。

临界电流密度  $J_C$  与临界磁场  $H_C$  一样也依赖于温度：它随温度升高而减小，并在转变温度  $T_C$  时降为零。

转变温度  $T_C$ 、临界电流密度  $J_C$  和临界磁场  $H_C$  这三个超导体的临界参数与其内部微观结构有关。在实验中要使超导体处于超导态，必须将这三个量都控制在临界值以下。

## (3) 完全抗磁性，以及理想导体与超导体的区别

超导体是不是电阻率为零的理想导体？实验发现，超导体在磁场中的行为与理想导体不同，具有**完全抗磁性**。

对于常规导体，施加外磁场后，磁场可进入导体。撤去磁场后，导体恢复到原先的状态，如图 4 所示。对于理想导体，处于无外加磁场环境时，其内部磁场自然为零。而当施加外磁场后，可以证明，其内部磁感应强度的**变化率** $\vec{B}$ 随着距离导体表面深度  $z$  的增加呈指数衰减，即  $\vec{B}(z) = \vec{B}(0)e^{-z/\lambda}$ 。在理想导体内部距离表面一定深度以下，无论外磁场如何变化，磁感应强度保持不变，仍然为零。假设理想导体中的载流子浓度和铜导体一样 ( $8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ )，计算可得磁场的穿透深度  $\lambda$  约为 18.4 nm。其物理意义是：当外磁场改变时，按照楞次定律，在理想导体表面上要感应出感生电流，该电流产生的磁场正好与外磁场完全**抵消**。在理想导体外部，屏蔽电流产生的磁场与外磁场叠加形成的总的磁场分布如图 4 所示，仿佛是理想导体排斥了外加

磁场。而撤去外加磁场后，理想导体恢复到原先的状态，其表面的感生电流也随之消失。

假设理想导体样品在某一转变温度之上时为正常导体。在外加磁场后，磁场进入正常导体内部。此时，将导体降温至转变温度以下，使其从正常态进入理想导体态。如前所述，无论外磁场如何变化，理想导体内部磁感应强度保持不变，仍维持原先的磁场。因此，当撤去外加磁场后，在理想导体表面会感应出感生电流，维持其内部的磁感应强度不变，磁场仿佛被“冻结”在理想导体内部。而感生电流在理想导体外部产生的磁场如图 4 所示。

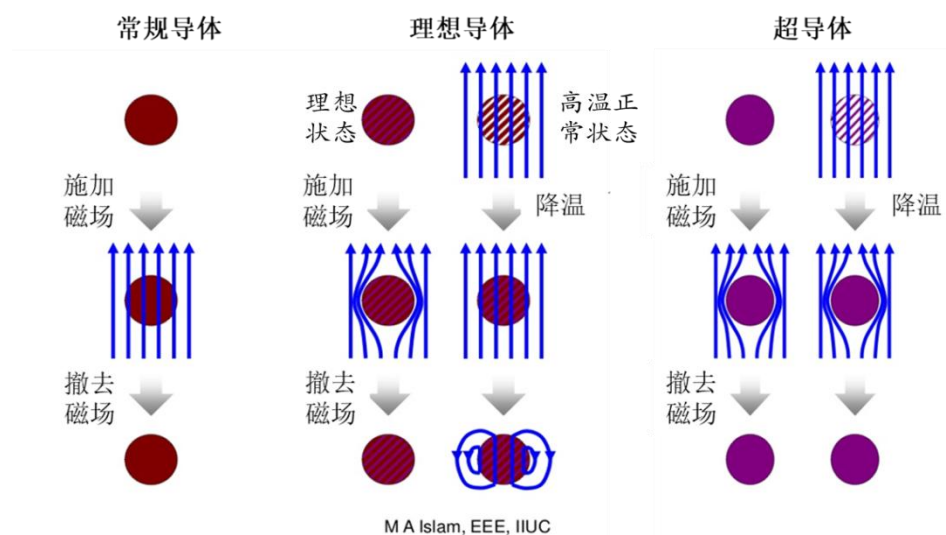


图 4 正常金属、理想导体以及超导体的区别<sup>[8]</sup>

1933 年，德国物理学家瓦尔特 迈斯纳 (Walther Meissner) 和罗伯特 奥克森菲尔德 (Robert Ochsenfeld) 发现了超导体的**完全抗磁性**(又称为迈斯纳效应)，即超导体处于超导态时其内部**磁感应强度为零**即  $\vec{B} = 0$ ，与其先处于外磁场中再降温至超导态，还是先进入超导态再施加外磁场的**过程无关**。对超导体施加外磁场，其产生的感应电流将完全抵消磁场。这和理想导体的行为大不相同，是超导体的另一基本特性。完全抗磁性不能由零电阻特性派生出来，但是零电阻特性是完全抗磁性的必要条件。

F. London 和 H. London 给出了超导体迈斯纳效应的维象模型，即  $\vec{B} = \vec{B}_0 e^{-z/\lambda_L}$ ，在超导体内部一定深度以下  $\vec{B} \approx 0$ ， $\lambda_L$  称为伦敦穿透深度。

#### 思考题：

设想一个中空的超导圆管样品，转变温度为  $T_C$ 。在温度高于  $T_C$  时，对圆管施加外磁场。而后将温度降低到转变温度  $T_C$  以下。在分析样品的磁感应强度和感应电流情况。撤掉外磁场后，样品的磁感应强度和感应电流如何变化？

#### (4) BCS 理论

1957 年，巴丁、库珀和施里弗提出了 BCS 理论 (以其发明者名字首字母命名)，揭示了超导现象的微观机理，因此获得 1972 年的诺贝尔物理学奖。BCS 理论把超导现象看作一种宏观量子效应，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**地运动，形成超导电流。

电子间的直接相互作用是相互排斥的库仑力。如果电子间仅存在库仑力的直接作用，电子不能形成配对。但电子间还存在以晶格振动（声子）为媒介的间接相互作用——电声子交互作用。这种相互作用在满足一定条件时，可以是相互吸引的，正是这种吸引作用导致了“库珀对”的产生。其机理为：电子在晶格中移动时会吸引邻近格点上的正电荷，导致格点局部发生畸变，形成一个局域高正电荷区，如图 5（左）所示。在第一个电子完全通过和点阵恢复之前，第二个电子进入该通道。因为畸变尚未恢复，第二个电子就会感受到畸变的晶格的吸引作用力。因此，两个电子之间好象有吸引作用一样，以一定的结合能相结合配对，形成库珀对，见图 5（右）。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。此时，电子对将不会和晶格发生能量交换，也就没有电阻，具有超导电性。而当温度超过超导材料转变温度时，晶格振动的能量高于结合能，库珀对被破坏，材料失去超导电性。不过，BCS 理论尚未成功地解释非常规高温超导电性。

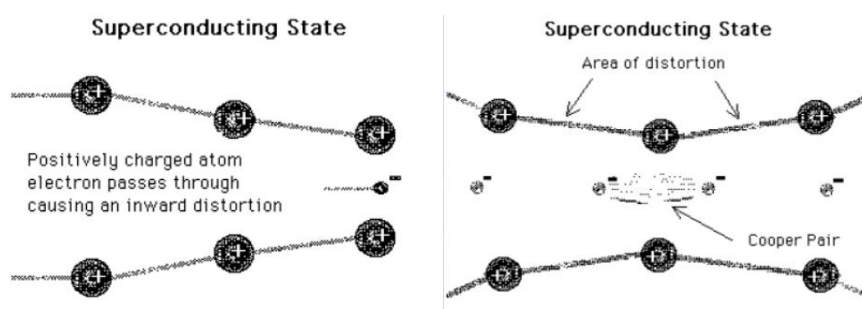


图 5 超导体中电子形成库珀对示意图<sup>[9]</sup>

### （5）高温超导材料的研究进展

由 BCS 理论表明，超导体的转变温度受限于材料中可存在的最高声子频率。由此可知超导材料的最高转变温度约为 40 K，一般被称为麦克米兰极限。

1986 年，瑞士 IBM 实验室的 Bednorz 和 Muller 发现在常温时为绝缘体的 La-Ba-Cu-O 氧化物材料具有超导电性，其转变温度约为 40 K。两人因此获得 1987 年的诺贝尔物理学奖。此后，各国科学家相继取得重要突破，1987 年发现转变温度高于 90 K 的 Y-Ba-Cu-O 氧化物超导体，超过了液氮温度（77 K）。1988 年初又研制出 Bi 系和 Tl 系氧化物超导体，后者的超导转变温度达到 125 K。

高温超导研究的一系列新进展，特别是大面积高温超导薄膜和高临界电流密度超导带材的成功制备，为超导材料的应用开辟了广阔的前景。

### （6）铁基超导体

铁基超导体是指化合物中含有铁，在低温时具有超导现象，且铁扮演形成超导的主体材料。根据 BCS 理论，产生超导性的必要条件是材料中的电子必须形成库珀对。库珀对中的两个电子自旋相反，所以总自旋为零。因此普遍认为超导性与铁磁性可能无法共存，材料中如果加入磁性元素（如铁、镍）会大大降低超导性。

铁基超导体虽然含有铁元素且是产生超导的主体，但是铁和其他元素（如砷、硒）形成铁基平面后，已不再具有铁磁性。2006 年日本东京工业大学细野秀雄教授的团队发现第一个以铁为超导主体的化合物

LaFeOP，打破以往普遍认定铁元素不利形成超导的迷思。2012 年，清华大学的薛其坤教授及其合作者发现生长在  $\text{SrTiO}_3$  衬底上的单原子层 FeSe 具有高于 77 K 的超导临界温度，这也是目前铁基超导体的最高超导临界温度记录，为研究非常规高温超导电性的微观机理提供了新的思路和途径

铜基导体和铁基导体一般被认为是非传统超导体，即非 BCS 超导体，电子声子耦合不能解释这两个体系的超导现象。目前还没有统一的理论来解释这两类非常规高温超导体。

2015 年，物理学者发现，硫化氢在极度高压的环境下(至少 150 GPa，也就是约 150 万标准大气压)，约于温度 203 K ( $-70^\circ\text{C}$ ) 时会发生超导相变，是目前已知最高温度的超导体。非常有趣的是，硫化氢属于传统 BCS 超导体，这一发现也重新开拓了传统超导体的新领域。目前，含氢体系 (C-S-H) 在高压下能达到的转变温度已经达到了室温 (288 K)。

迄今为止，已发现近 30 种金属元素和上千种合金和化合物具有超导电性。图 6 为典型的超导材料的转变温度及其发现年代。

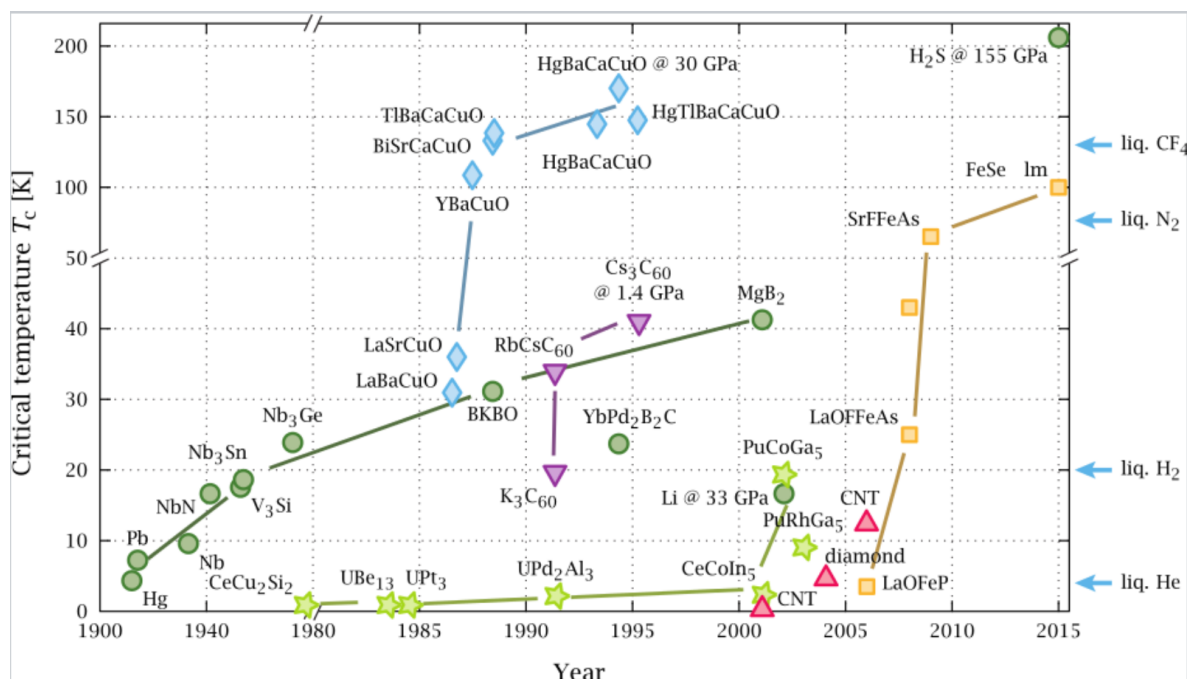


图 6 超导材料：转变温度 vs.发现时间

([https://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature\\_superconductivity](https://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_superconductivity))

### 3. 实验装置

实验装置如图 7 照片所示，包括：①稳压稳流直流电源（艾德克斯 IT6333A/B，CH1：60V3A，CH2：60V3A，CH3：5V3A）；②信号发生器（泰克 AFG1062，双通道，60 MHz，采样率 300 MS/s）；③5 位半数字万用表(Fluke F8808A)；④4 位半数字万用表(胜利 Victor 8145B/C)；⑤手持数字万用表(胜利 VC9806+，四位半)；⑥液氮罐（3L）；⑦测试头；⑧测试头接线盒；⑨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；⑩双刀双掷换向开关；⑪导线（0.5m 长，双香蕉插头， $\geq 9$  根）；⑫BNC-香蕉头导线 1 根。





图 7 实验装置

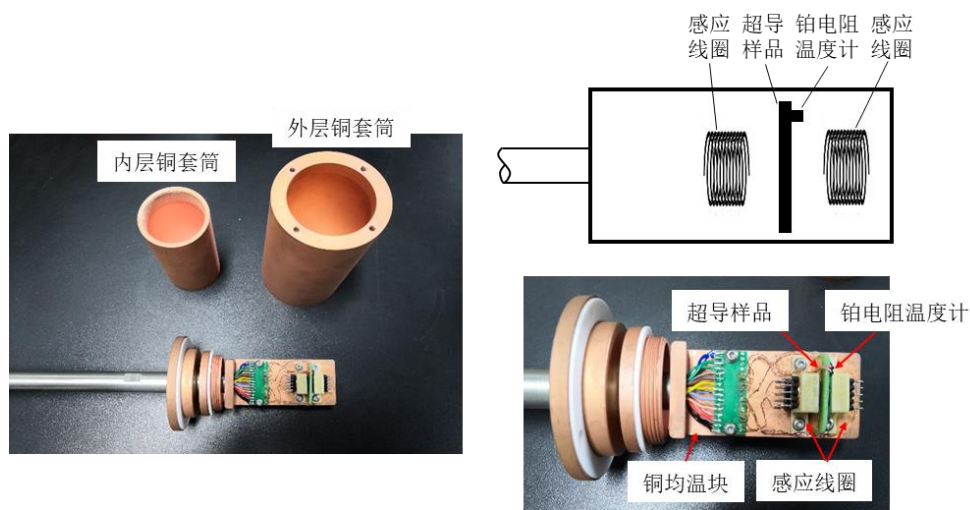


图 8 测试探头内部结构

**测试头**内部包括超导样品、感应线圈、铂电阻温度计，它们都安装在铜质均温块上（见图 8）。超导样品置于两个感应线圈之间。温度计和超导样品与铜质均温块热接触良好，以保证样品和铂电阻温度计的温度一致性和均匀性。均温块外有双层导热性好的铜质套筒，使样品与外部环境有所隔离，减少均温块的温度波动和温度不均匀性。测量引线经由不锈钢管接至测试头接线盒，利用不锈钢热导率低的特点可减少超导样品与外界的热传导。

**实验仪器设置说明：****※ IT6333A/B 直流稳压稳流电源**

实验室使用的 IT6333A/B 型电源为三路输出直流稳压稳流电源。每一路都可以单独工作在恒压模式或恒流模式。在使用前必须设置每一路的（最大）工作电压和（最大）工作电流。在设置好每路的工作电压和工作电流后，实际工作在恒压模式还是恒流模式，以及实际输出的电压值和电流值是多少与外接负载电阻有关的。例如：将某一路的工作电压/电流设置为 1 V/1 A 后，如果外接负载电阻为  $0.2\ \Omega$ ，则其工作于恒流模式，实际输出为 0.2V、1A（此时电源不可能工作于 1 V 恒压模式，否则输出电流将达到 5 A，超过电流设置值 1 A）。实验中要求将 CH1 输出设置为 10 V/0.005 A，将 CH3 输出设置为 1 V/1 A：

- (1) 按 **Power** 键开机；
- (2) 将 CH1 设置为 10 V，0.005 A：按 **Local/CH** 键，使三角形光标切换到 CH1。按 **V-SET** 键，下标切换到 CH1 电压，按 10、**ENTER** 键；按 **I-SET**，下标切换到 CH1 电流，按 0.005、**ENTER** 键；
- (3) 将 CH3 设置为 1 V，1 A：按 **Local/CH** 键，使三角形光标切换到 CH3。按 **V-SET** 键，下标切换到 CH3 电压，按 1、**ENTER** 键；按 **I-SET**，下标切换到 CH3 电流，按 1、**ENTER** 键；
- (4) 按 **Meter** 键，使该指示灯变暗，此时屏幕显示上述设置值（非实际输出值！）。确认设置值正确。注：该键默认常亮，此时屏幕显示电源输出的电压、电流值。电源未输出时（**On/Off** 键未点亮时）显示 0.000V，0.000A；
- (5) 按 **On/Off** 键，指示灯亮，电源开始输出。屏幕上会显示各通道的工作状态。在每个通道的电流值前面如显示字母 V，表明该通道工作于恒压模式，显示字母 C 为恒流模式。

**※ Victor 8145B/C 型 4 位半数字万用表，用于测量铂电阻 PT100 电压：**

按 **电源键** 开机，按 **DC V** 键测量直流电压，按 Range 下方的 ▼ 按钮，将量程变为 300 mV 或 200 mV。香蕉头导线已插在 V $\Omega$  和 COM 插孔。

**※ Fluke 8808A 型五位半数字万用表，用于测量超导样品电压：**

打开电源开关（在设备背后）；按 **DC V** 键，测量直流电压，量程默认为 200 mV；香蕉头导线已插在 INPUT HI / LO 插孔。

**※ AFG1062 信号发生器，将 CH1 设置为 700 Hz、2 V<sub>pp</sub> 正弦信号，用于为初级线圈提供交流信号：**

按电源键开机。选择 CH1，按 **Sine** 键，指示灯亮；按 **Freq** 或 **频率** 键，按 700、Hz 键；按 **Ampl** 或 **幅度** 键，按 2、V<sub>pp</sub> 键；按 **On/Off** 键，指示灯亮，输出。

**※ Victor VC9806+手持四位半数字万用表，用于测量次级线圈感应电压：**

按 **Power** 开机（该表为了节电，会定时发出蜂鸣声并自动关机。关机后请及时开机），挡位拨到 **交流 200 mV** 量程；香蕉插头插在 V $\Omega$  和 COM 插孔。

#### 4. 实验内容、方法和步骤

##### A. 用四引线法测量超导样品电阻

四引线法适用于待测电阻很小、需要排除导线电阻和接触电阻的影响的情况。由于低温实验装置的设计原则之一是尽可能减小漏热，从测试探头接线盒上的红色插孔到超导样品的引线通常又细又长(约 1 m 长)，引线电阻  $R_{\text{wire}}$  可能远大于待测超导样品的电阻  $R_{\text{Super}}$ 。此外，电路的接触电阻在  $10^{-2}\Omega$  量级。为了减小引线电阻和接触电阻的影响，实验中采用四引线法测量样品电阻  $R_{\text{Super}}$ 。

四引线法测量样品电阻  $R_{\text{Super}}$  测试电路如图 9 所示。从测试探头接线盒红色插孔到超导样品共有 4 根引线。外侧的两根引线为电流引线，与直流电源 CH3 连接，为超导样品提供  $I=1\text{ A}$  的恒流源（电流示值不确定度为：读数 $\times 0.1\%$  + 5 mA）。内侧的两根引线为电压引线，与五位半数字万用表连接，用于测试超导样品电压  $U_{\text{super}}$ 。对于同一电压的测量，五位半数字万用表比其他两个四位半数字万用表能够多显示一位有效数字，可更精确地测量样品电压。由于数字万用表的内阻很大 ( $> 10\text{ G}\Omega$ )，流过数字表和电压引线的电流值与流经被测样品的电流值 1 A 相比，小到近似可以忽略。因此，在电压引线电阻及其与样品之间的接触电阻上的分压极小，对样品电压测量的影响可忽略不计。则待测样品的电阻值为  $R_{\text{Super}} = U_{\text{Super}}/I$ 。图中的双刀双掷换向开关的作用是使电路中的电流换向。

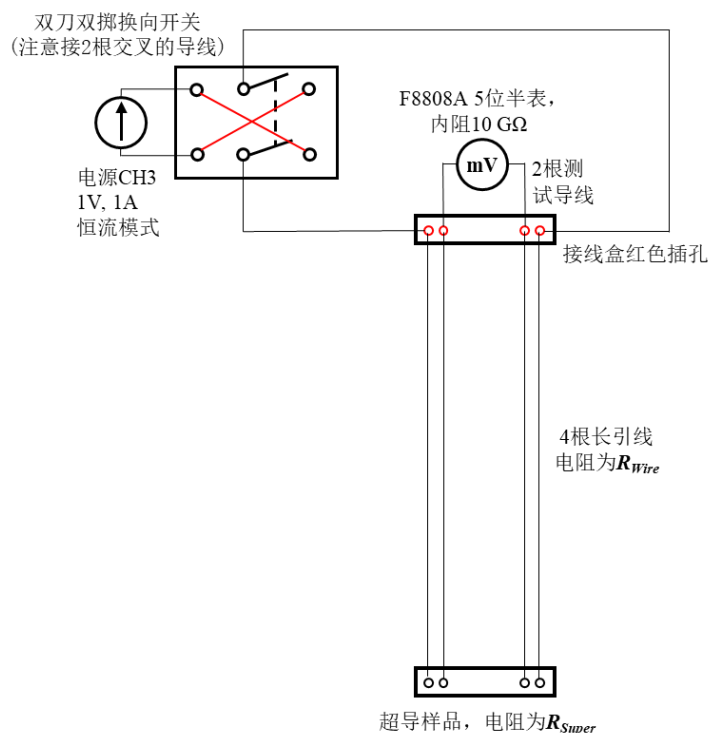


图 9 超导样品电阻四线法测试电路

首先用万用表的电阻档直接测试导线电阻和引线电阻的数量级。



### A.1 测试连接在五位半数字万用表上的两根测试导线的电阻 $R_{\text{testwire}}$ 的数量级

按 F8808A 五位半数字电压表的  $\Omega$  键，切换到电阻测量功能。将连接在数字万用表上的两根测试导线的另一端叠插在一起以保证良好的接触，如图 10 所示。测试并记录两根测试导线的电阻  $R_{\text{testwire}}$ 。



图 10 可叠插香蕉插头

### A.2 测试从探头接线盒至超导样品之间的引线电阻 $R_{\text{wire}}$ 的数量级

用五位半数字万用表测试探头接线盒上中间两个红色插孔之间的电阻，再减去与数字表相连的两根测试导线的电阻，即为引线电阻  $R_{\text{wire}}$ （实际还包括了接触电阻以及超导样品电阻）。

### A.3 用四引线法测量室温下的超导样品电阻

按 F8808A 五位半数字电压表的  $\text{DC V}$  键，将其切换至电压测量功能。按照图 9 连接电路，将电源 CH3 经过换向开关接至超导样品，为样品提供 1 A 的恒定电流。测量并计算超导样品电阻。

比较超导样品电阻、引线电阻、测试导线电阻的数量级，说明用四引线法测试超导样品电阻的必要性。

观察此时电源 CH3 是工作在恒流模式还是恒压模式？输出电压和电流分别是多少？电源 CH3 的总负载电阻是多少？与你的测试结果的数量级（导线电阻、引线电阻及样品电阻之和）是否相符？

### A.4 说明四引线法测微小电阻时，电流引线与电压引线能否互换？为什么？

**注意：**图 9 测试电路接好后**不要拆掉**，将用于 E 部分实验测试超导样品的电阻随温度的变化情况。

## B. 用电流换向法消除乱真电势的影响

在低温实验中，测量直流微小电压时，克服乱真电势  $U_{\text{Spur}}$  的影响十分重要。特别是在判断超导样品是否达到了零电阻（零样品电压）的超导态时，必须排除乱真电势的影响。

实验中待测样品和温度传感器处在低温下，而测量仪器却处在室温。它们之间通过导线连接，导线两端处于温差很大的环境中。当导线存在温差时，通常有温差电动势存在，也称为乱真电势或寄生电势。在本实验中，沿导线的温度分布还会随液氮液面的降低、探头温度的变化等变化，即乱真电势在实验过程中可能是变化的。因此，判定和消除乱真电势十分重要。

乱真电势不受流过导线的电流的影响，因此可以用电流换向法测量和消除。在图 9 所示测量电路中，数字万用表测得的电压是超导样品电阻上产生的压降  $U_{\text{Super}}$  与乱真电势  $U_{\text{Spur}}$  之和。假设万用表在通过样品的电流改变流向（利用换向开关）前后测得的电压分别为  $U_{\text{Meas1}}$  和  $U_{\text{Meas2}}$ ，则根据乱真电势  $U_{\text{Spur}}$  与电流方向无关的特点，通过计算可得到超导样品上的电压  $U_{\text{Super}}$  与乱真电势  $U_{\text{Spur}}$ 。

B.1 写出电流换向前后数字万用表所测电压与电流  $I$ （换向前为  $1\text{A}$ 、换向后  $-1\text{A}$ ）、超导样品电阻  $R_{\text{Super}}$  以及乱真电势  $U_{\text{Spur}}$  的关系表达式，并进一步写出超导样品电阻  $R_{\text{Super}}$  计算表达式。

B.2 测量并计算室温时的超导样品电阻  $R_{\text{Super}}$  和乱真电势  $U_{\text{Spur}}$ 。比较乱真电势与样品电压的数量级。

### C. 用铂电阻温度计测量温度

低温物理实验离不开对温度的测量。利用材料电阻率随温度改变而变化的特性，可制成电阻温度传感器。铂电阻温度计具有材料稳定性好、测温范围广、响应时间较短、准确度高优点，因而被广泛使用。其准确度可达  $0.0002^\circ\text{C}$  或更高。铂电阻的工作电流通常设定为  $1\text{mA}$ ， $0^\circ\text{C}$  时其电阻值  $R_{t=0} \approx 100.00\Omega$ 。在测温范围为  $-200^\circ\text{C}$  至  $0^\circ\text{C}$  时，铂电阻随温度变化的关系式为

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

式中  $A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ， $B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ ， $C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$ 。忽略  $R_0 Ct^3(t-100)$  项后，可得温度的近似计算公式

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

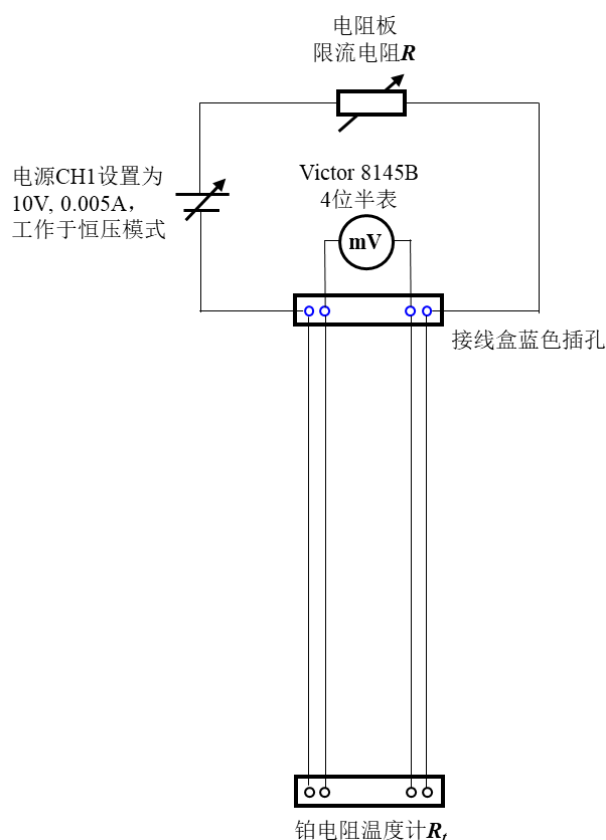


图 11 铂电阻测温电路

实验中用四引线法测试铂电阻的阻值  $R_t$  (测试电路如图 11 所示)，然后利用式(4)通过计算即可得到温度  $t$  值。图 11 测试电路中使用了 10 V 恒压电源为铂电阻提供 1 mA 的恒定电流。其原因在于：由于直流稳压稳流电源的电流设定分辨率为 1 mA，其工作在 1 mA 恒流模式时的准确度低、稳定性差。解决方法是使电源 CH1 工作于 10V 恒压模式，通过在电路中串联一个阻值相对较大的限流电阻  $R$  来近似获得 1 mA 的恒定工作电流。

实验过程中请注意：通过铂电阻温度计的工作电流**勿超过 5mA**，以避免损坏温度计。**禁止**用万用表欧姆档直接测量铂电阻的阻值。

#### C.1 计算限流电阻阻值 $R$

为了确保图 11 所示电路中铂电阻的工作电流为 1 mA，限流电阻  $R$  应满足  $10V/(R+R_t)=1\text{ mA}$ ，可得  $(R+R_t)=10\text{ k}\Omega$ 。由于铂电阻  $R_t$  阻值及其变化相对较小（实验过程中随温度变化约几十欧姆），因此可近似将限流电阻阻值  $R$  取为 10 k $\Omega$ 。

估算温度从 77 K 至室温 23°C 范围内铂电阻实际工作电流与预设值 1 mA 的最大偏差。

#### C.2 计算铂电阻温度计在室温（约 23°C）时，铂电阻上的电压值。

C.3 选定限流电阻板上的电阻  $R$ ，按照图 11 连接电路，将电源 CH1 经**限流电阻  $R$**  后接至铂电阻，为其提供 1 mA 的恒流。**一定要确认是否选择了 10 k $\Omega$  的限流电阻并且与铂电阻串联连接！**检查数字电压表的示值是否与 C.2 问的计算结果接近。如示值与计算值差别较大，应立即断开电路（直接拔掉电源 CH1 输出端口的连接导线）并检查。

C.4 如数字电压表示值正确，观察此时电源 CH1 工作在恒流模式还是恒压模式？输出电压和电流分别是多少？注意：电源电流值如显示 0.000 A 为正常现象。因为电源此时实际输出电流为 1 mA，而电源电流示值不确定度为读数 $\times 0.1\%$  + 5 mA，因此显示 0 mA 在误差范围内。

注意：图 11 所示电路接好之后也不要拆掉！

### D. 用电磁感应法测超导样品对感应电压的影响

用四引线法测超导样品电阻时要求超导样品有一定尺寸、能连接测量引线。当样品材料内含有转变温度不同的超导相时，只能测出其中能形成超导通路的转变温度最高的一个超导相的转变温度  $T_c$ 。

用电磁感应法也能确定样品的转变温度  $T_c$ 。这一方法不需要在超导样品上额外连接引线，还可以弥补电阻法的不足，并把不同超导相的  $T_c$  一并测出。

根据电磁感应原理，对于两个相邻螺旋线圈，在一个线圈（初级线圈）内通以频率为  $f$  的交流电流，则另一线圈（次级线圈）可感生出同频电动势  $\varepsilon$ 。 $\varepsilon$  的大小与频率  $f$  以及两线圈之间的互感有关。线圈结构一定时，互感还与线圈之间充填物的相对磁导率  $\mu_r$  有关。将高温超导材料样品放置在两个线圈之间，如图 12 所示。样品在发生超导转变之前、处于正常态时可认为是顺磁物质， $\mu_r \approx 1$ ；当转变至超导态后，由于完全抗磁

性，等效于  $\mu_r \approx 0$ ，当样品温度降至转变温度附近从正常态向超导态转变时，磁导率的突变将导致线圈互感以及感应电压显著改变。因此，测量次级线圈输出电压的变化也可得到样品转变温度  $T_c$ 。

D.1 将初级线圈与信号发生器相连，次级线圈与手持数字万用表相连。选择信号发生器输出正弦波，设置输出信号频率  $f=700\text{Hz}$ ，调整输出信号的幅度  $V_{pp}$ ，使数字万用表显示的感应电压  $U_m$  为 20 mV 左右。

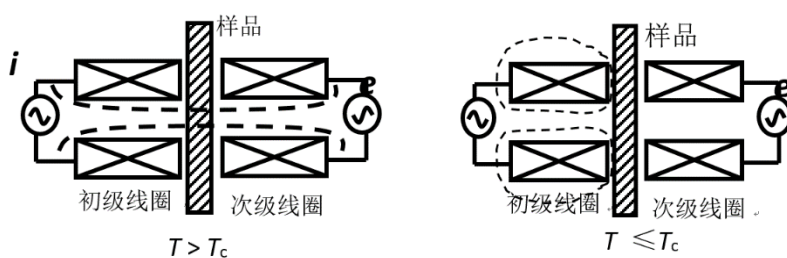


图 12 电磁感应法测试超导转变温度原理（图中虚线为“磁力线”）

### E. 超导转变温度测量

实验中利用液氮来获得低温。使用液氮一定要注意安全：

- i. 不要让液氮接触皮肤，以免造成冻伤，也不要让液氮溅到仪器上；
- ii. 液氮气化时体积会急剧膨胀，禁止将液氮放置在密闭容器内，切勿将液氮罐出气口封死；
- iii. 氮气是窒息性气体，应保持实验室通风良好。

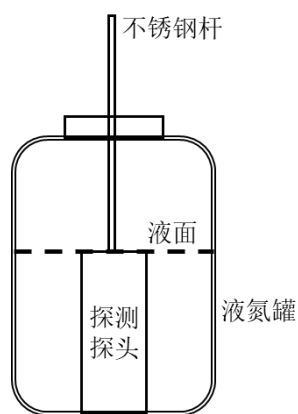


图 13 将液氮加注至液面与测试探头上平面平齐示意图



E.1 利用附表 1 铂电阻温度计  $t$ - $R$  关系表, 根据电路设置的参数估算温度间隔  $\Delta t$  分别约为  $2^{\circ}\text{C}$ 、 $0.1^{\circ}\text{C}$  所对应的铂电阻电压  $\Delta U_t$ 。

## E.2 降温测量

用手拿稳测试探头的上端, 将探头缓慢放入液氮罐底部(液氮罐中如果已有液氮, 则液氮会沸腾一段时间)。然后往液氮罐中加注液氮(**注意安全操作!**), 使液面与测试探头套筒的上平面齐平, 参见图 13 所示。

注入液氮后即刻开始降温。注意观察温度过程中的铂电阻电压  $U_t$ 、超导样品电压  $U_{\text{Super}}$  及线圈感应电压  $U_m$  的变化情况。等降温过程随着时间变得较为缓慢以后, 选择适当时机(想想怎么选择?)开始记录  $U_t$ 、 $U_{\text{Super}}$  及  $U_m$ 。在  $U_{\text{Super}}$  随  $U_t$  变化较为缓慢的阶段, 温度每隔  $\Delta t \approx 2^{\circ}\text{C}$  记录一组数据; 在  $U_{\text{Super}}$  随  $U_t$  变化较快的阶段, 温度每隔  $\Delta t \approx 0.1^{\circ}\text{C}$  记录一组数据。

**提醒:** 实验只允许进行一次降温测量过程。因实际的降温过程较快, 可用手机拍摄同时记录相应仪表显示的  $U_t$ 、 $U_{\text{Super}}$  及  $U_m$ , 然后通过慢放从中读取所需读数。当样品完全进入超导态后(如何判断?)再延续拍摄记录几分钟。

整个降温过程约需 25 分钟时间。样品完全进入超导态后, 利用双刀双掷开关转换样品电流的方向, 测量此时电路中的乱真电势  $U_{\text{Spur}}$ 。比较乱真电势  $U_{\text{Spur}}$  与超导转变后的样品电压  $U_{\text{Super}}$  的数量级大小。

**说明:** 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(见图 8 探头内部照片), 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。

## E.3 升温测量

由于降温时超导探头整个浸没在液氮中, 降温速率较快, 使用降温过程的数据难以精细描绘样品的超导转变过程。此外, 在室温到液氮温度的范围内, 一般材料的导热性较差、比热较大, 低温实验装置的各个部件具有明显的热惰性, 温度计与超导样品之间可能存在温差。而升温过程相对较为缓慢, 可在一定程度上减小温度计与超导样品之间的温差。

将探头从液氮罐中缓慢取出, 轻轻放在实验桌上的海绵垫上(由于低温下探头内各个部件的脆性较大, 探头应轻拿轻放, 避免磕碰), 使探头及其内部部件自然升温。测量记录升温过程中样品超导转变(参考降温测量数据)过程中同一时刻的铂电阻电压  $U_t$ 、超导样品电压  $U_{\text{Super}}$  及线圈感应电压  $U_m$ 。

提示: 参考升温过程采用手机拍摄记录后读取数据的方式, 温度间隔自行确定。

## F. 数据处理要求

F.1 选取在超导转变温度附近约  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  范围内的铂电阻电压  $U_t$ 、超导样品电压  $U_{\text{Super}}$ 、线圈感应电压  $U_m$  的数据, 计算相不同温度  $t$  下的铂电阻阻值  $R_t$ 、及超导样品电阻  $R_{\text{Super}}$  (利用进入超导态后的乱真电势  $U_{\text{Spur}}$  修正  $U_{\text{Super}}$ )。设计表格展示数据及结果。注意用铂电阻  $R_t$  根据式(4)计算样品温度  $t$  时式末  $t$  的 3 次方和 4 次方项, 计算的温度有误差, 但影响不大。

F.2 分别画出在降温、升温过程中的超导样品电阻以及线圈感应电压随温度的变化关系  $R_{\text{Super}}-t$  曲线、 $U_m-t$  曲线。利用升温曲线确定样品的超导转变温度  $T_c$  和转变宽度  $\Delta T_c$ 。要求用计算机作图(或坐标纸作图)。

## 参考文献

1. MIT 物理系超导实验讲义 (Superconductivity: The Meissner Effect, Persistent Currents and the Josephson Effects. MIT Department of Physics. 2011. <http://web.mit.edu/8.13/www/JLEperiments/JLExp39.pdf>)
2. 张裕恒、李玉芝。超导物理，中国科学技术大学出版社。
3. 张礼主编，近代物理学进展，清华大学出版社。
4. 维基百科：超导材料、高温超导、超导现象、BCS 理论、迈斯纳效应、铁基超导体、液氮词条。
5. 朱鹤年，新概念基础物理实验讲义，清华大学出版社。
6. 吕斯骅，段家祗，张朝晖。新编基础物理实验，高等教育出版社。
7. 陆果，陈凯旋，薛立新。高温超导材料特性测量装置。物理实验，21(5)，7-12 页，2001 年。
8. <https://www.slideshare.net/AminulIslam38/ch-8-m-a-islamsuperconductors>
9. <http://10.107.0.68/~jgcche/>

附录 1

铂电阻温度计  $t$ - $R$  表

°C	$\Omega$	°C	$\Omega$	°C	$\Omega$	°C	$\Omega$	°C	$\Omega$	°C	$\Omega$
40	115.54	0	100.00	-40	84.27	-80	68.36	-120	52.27	-160	35.99
39	115.15	-1	99.61	-41	83.88	-81	67.96	-121	51.86	-161	35.58
38	114.77	-2	99.22	-42	83.48	-82	67.56	-122	51.46	-162	35.17
37	114.38	-3	98.83	-43	83.09	-83	67.16	-123	51.05	-163	34.76
36	114.00	-4	98.44	-44	82.69	-84	66.77	-124	50.65	-164	34.35
35	113.61	-5	98.04	-45	82.30	-85	66.36	-125	50.24	-165	33.94
34	113.22	-6	97.65	-46	81.90	-86	65.96	-126	49.84	-166	33.53
33	112.84	-7	97.26	-47	81.50	-87	65.56	-127	49.43	-167	33.12
32	112.45	-8	96.87	-48	81.11	-88	65.16	-128	49.03	-168	32.71
31	112.06	-9	96.48	-49	80.71	-89	64.76	-129	48.63	-169	32.30
30	111.67	-10	96.09	-50	80.31	-90	64.36	-130	48.21	-170	31.89
29	111.29	-11	95.69	-51	79.92	-91	63.96	-131	47.81	-171	31.48
28	110.90	-12	95.30	-52	79.52	-92	63.55	-132	47.40	-172	31.07
27	110.51	-13	94.91	-53	79.12	-93	63.15	-133	47.00	-173	30.66
26	110.12	-14	94.52	-54	78.73	-94	62.75	-134	46.60	-174	30.24
25	109.74	-15	94.12	-55	78.33	-95	62.35	-135	46.18	-175	29.84
24	109.35	-16	93.73	-56	77.93	-96	61.95	-136	45.78	-176	29.43
23	108.96	-17	93.34	-57	77.54	-97	61.55	-137	45.37	-177	29.01
22	108.57	-18	92.95	-58	77.14	-98	61.15	-138	44.96	-178	28.60
21	108.18	-19	92.55	-59	76.74	-99	60.74	-139	44.56	-179	28.19
20	107.79	-20	92.16	-60	76.34	-100	60.34	-140	44.15	-180	27.78
19	107.41	-21	91.77	-61	75.94	-101	59.94	-141	43.74	-181	27.37
18	107.02	-22	91.37	-62	75.55	-102	59.53	-142	43.34	-182	26.95
17	106.63	-23	90.98	-63	75.15	-103	59.13	-143	42.93	-183	26.54
16	106.24	-24	90.59	-64	74.75	-104	58.73	-144	42.52	-184	26.13
15	105.85	-25	90.19	-65	74.35	-105	58.33	-145	42.11	-185	25.72
14	105.46	-26	89.80	-66	73.95	-106	57.92	-146	41.71	-186	25.31
13	105.07	-27	89.40	-67	73.56	-107	57.52	-147	41.30	-187	24.90
12	104.68	-28	89.01	-68	73.16	-108	57.12	-148	40.90	-188	24.48
11	104.29	-29	88.62	-69	72.76	-109	56.71	-149	40.48	-189	24.07
10	103.90	-30	88.22	-70	72.36	-110	56.31	-150	40.07	-190	23.66
9	103.51	-31	87.83	-71	71.96	-111	55.91	-151	39.67	-191	23.25
8	103.12	-32	87.43	-72	71.56	-112	55.50	-152	39.26	-192	22.83
7	102.73	-33	87.04	-73	71.16	-113	55.10	-153	38.85	-193	22.42
6	102.34	-34	86.64	-74	70.76	-114	54.69	-154	38.44	-194	22.01
5	101.95	-35	86.25	-75	70.36	-115	54.29	-155	38.04	-195	21.59
4	101.56	-36	85.85	-76	69.96	-116	53.89	-156	37.63	-196	21.18
3	101.17	-37	85.46	-77	69.56	-117	53.48	-157	37.22	-197	20.77
2	100.78	-38	85.06	-78	69.16	-118	53.08	-158	36.81	-198	20.35
1	100.39	-39	84.67	-79	68.76	-119	52.67	-159	36.40	-199	19.94

## 附录 2 实验测量数据记录参考表格

实验题目: \_\_\_\_\_

姓名: \_\_\_\_\_, 学号 \_\_\_\_\_, 实验组号: \_\_\_\_\_, 实验台号: \_\_\_\_\_, 实验日期 \_\_\_\_\_

电源输出设置: CH1: \_\_\_\_\_ V/\_\_\_\_\_ A; CH3: \_\_\_\_\_ V/\_\_\_\_\_ A

## A、万用表测量导线/引线电阻及超导样品电阻

1. 数字万用表两条测试导线电阻:  $R_{\text{testwire}} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ 2. 超导盒与样品间的引线电阻:  $R_{\text{wire}} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ 3. 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 \_\_\_\_\_ (恒压或恒流), 输出电压  $U_{\text{CH3}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ , 输出电流  $I_{\text{CH3}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mA}$ 超导样品上的电压  $U_{\text{Super}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ , 样品电阻  $R_{\text{Super}} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ 

4. 思考: 测试导线电阻、引线电阻、超导样品电阻量级比较!

## B、电流换向法消除乱真电势的影响

1. 测量电压  $U_{\text{Meas1}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ ,  $U_{\text{Meas2}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ , 电流  $I = \underline{\hspace{2cm}} \text{mA}$  (电源屏幕显示值)乱真电势  $U_{\text{Spur}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ , 样品电压  $U_{\text{Super}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ , 样品电阻  $R_{\text{Super}} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ 

2. 思考: 乱真电势与样品上电压的数量级比较!

## C、铂电阻温度计测量温度

1. 限流电阻  $R = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ , 在 77K~室温范围铂电阻工作电流的变化 \_\_\_\_\_ mA2. 计算室温 (23℃) 时铂电阻上的电压:  $U_{t\text{-calc}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ 3. 室温下铂电阻两端的电压测量值:  $U_{t\text{-real}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ 4. 电源 CH1: 工作模式 \_\_\_\_\_ (恒压或恒流), 输出电压  $U_{\text{CH1}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{V}$ , 输出电流  $I_{\text{CH1}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mA}$ 

## 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 \_\_\_\_\_, 频率  $f = \underline{\hspace{2cm}} \text{Hz}$ , 幅度  $V_{\text{pp}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ 线圈感应电压:  $U_{\text{m}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ 

## E、样品超导转变温度测量

1. 查附表 1 预估: 铂电阻电压  $U_{t=150^\circ\text{C}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ ,  $U_{t=170^\circ\text{C}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{mV}$ 

2. 降温测量

参考: 在  $U_{t \approx 150^\circ\text{C}}$  附近开始记录数据。在  $U_{\text{Super}}$  相对  $U_t$  变化较缓慢的阶段记录数据间隔取  $\Delta t \approx 2^\circ\text{C}$ , 在变化较快的阶段记录数据间隔取  $\Delta t \approx 0.1^\circ\text{C}$

$U_t / \text{mV}$										
$U_{\text{Super}} / \text{mV}$										
$U_{\text{m}} / \text{mV}$										



$U_t/\text{mV}$										
$U_{\text{Super}}/\text{mV}$										
$U_m/\text{mV}$										

$U_t/\text{mV}$										
$U_{\text{Super}}/\text{mV}$										
$U_m/\text{mV}$										

## 3. 进入超导态后的乱真电势

电压  $U_{\text{Meas1}} = \underline{\hspace{2cm}}$  mV,  $U_{\text{Meas2}} = \underline{\hspace{2cm}}$  mV, 电流  $I = \underline{\hspace{2cm}}$  mA (电源屏幕显示值)

乱真电势  $U_{\text{Spur}} = \underline{\hspace{2cm}}$  mV, 样品电压  $U_{\text{Super}} = \underline{\hspace{2cm}}$  mV, 样品电阻  $R_{\text{Super}} = \underline{\hspace{2cm}}$   $\Omega$

## 4. 升温测量

$U_t/\text{mV}$										
$U_{\text{Super}}/\text{mV}$										
$U_m/\text{mV}$										

$U_t/\text{mV}$										
$U_{\text{Super}}/\text{mV}$										
$U_m/\text{mV}$										

$U_t/\text{mV}$										
$U_{\text{Super}}/\text{mV}$										
$U_m/\text{mV}$										