

实验十六 高温超导材料特性测量

1911年，荷兰莱顿大学的卡茂林-昂尼斯意外地发现，将汞冷却到 -268.98°C 时，汞的电阻突然消失；后来他又发现许多金属和合金都具有与上述汞相类似的低温下失去电阻的特性，由于它的特殊导电性能，卡茂林-昂尼斯称之为超导态。卡茂林由于他的这一发现获得了1913年诺贝尔奖。

1933年，荷兰的迈斯纳和奥森菲尔德共同发现了超导体的另一个极为重要的性质，当金属处在超导状态时，这时超导体内的磁感应强度为零，在对单晶锡球进行实验发现：锡球过渡到超导态时，锡球周围的磁场突然发生变化，磁力线似乎一下子被排斥到超导体之外去了，人们将这种现象称之为“迈斯纳效应”。

为了寻找更适于应用的超导材料，几十年来，物理学家广泛搜查各种元素的低温特性。除了汞、锡和铅以外，又发现铟、铊和镓也有超导特性，这些材料都是金属，而且具有柔软易熔的共同性质，后来迈斯纳把试验扩展到坚硬难熔的金属元素，又发现了钽、铌、钛和钍等金属具有超导特性。当磁冷却法应用于低温后，在极低温区（1 K 以下）又找到了许多金属元素和合金有超导迹象。如今甚至已经知道上千种物质的超导特性，可是，它们的转变温度都在液氮温度附近或在1 K 以下。

高临界温度超导电性的探索是凝聚态物理学的一个重要课题。自从发现超导电性以来，人们逐渐认识到超导技术有广泛应用的潜在价值，世界各国花了很大力气开展这方面的工作。但是超导转变温度太低，离不开昂贵的液氮设备。所以，从卡茂林-昂尼斯的时代起，人们就努力探索提高超导转变临界温度 T_c 的途径。

1986年夏，当时在瑞士工作的物理学家瑞士物理学家缪勒和德国物理学柏诺兹发现，一类特殊的铜氧化物超导转变温度高达近40 K。

1987年初，在美国工作的华裔科学家吴茂昆、朱经武等发现了超导转变温度高达90 K的超导体，几天后，中国科学院物理研究所赵忠贤、陈立泉等以及日本的科学家也分别独立地发现了超导转变温度为100 K以上的超导体。超导体不能在液氮温区（78 K）工作的禁区终于被打破了。氮的液化是一种广泛应用的技术。

1987年诺贝尔物理奖授予柏诺兹和缪勒，以表彰他们在发现陶瓷材料中的超导电性所作的重大突破。

低温物理已成为物理学科的一个重要分支。低温技术在其它领域也获得了重要的应用，如空间技术使用低温技术来获得火箭燃料液氢、液氧，用低温技术模拟宇宙空间的真空和低温环境，以便进行太空模拟试验。用低温技术可较长时间保存人体或生物的活组织，为医学、生物等领域的研究开辟了新的途径。

本实验的温度范围从液氮温度（77 K）变化到室温。

【实验目的】

1. 了解高临界温度超导材料的基本电特性和测量方法；
2. 了解低温下半导体PN结的伏安特性与温度的关系；
3. 了解低温实验的测量方法。

【实验原理】

1. 高温超导材料电性

1911年，卡末林-昂内斯发现，将汞冷却到 $-268.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，汞的电阻突然消失。后来他又发现许多金属和合金都具有与上述汞相类似的低温下失去电阻的特性，通常把具有这种特性的材料称为超导体。超导现象是超导材料的主要性质之一。把超导体电阻突然变为零时温度称为超导转变温度。

转变温度并不是只由温度决定，只有保持在外磁场、流经电流和应力等值足够低时，超导样品的转变温度被称为超导临界转变温度 T_c 。由于一般上述条件不能完全满足（比如地磁场），而且超导转变往往有一个区域，因此引入起始转变温度 T_c^{onset} ，零电阻温度 T_c^0 ，和中点转变温度 T_c^m 来表示，一般所说的转变温度 T_c 指的是 T_c^m 。

高温超导体样品超导特性的测量采用如图2所示的四端接法，外两根导线为电流端，内两根导线为电压端，这样可以避免引线电阻和接触电阻带来的测量误差。

2. PN结伏安特性与温度的关系

在半导体理论中可导出PN结的电压 V 和电流密度 J 关系

$$J = AT^{3+\frac{r}{2}} \exp\left[\frac{q(V-V_g)}{k_B T}\right] \quad (1)$$

其中常数 $r \approx 1$ ， A 是比例因子， $qV_g = E_g$ ， E_g 是禁带宽度，

V_g 称能隙电压。 J - V 关系曲线如图3所示。

对上式两边取对数，整理后得到

$$V = \frac{k_B}{q} \left\{ \ln \frac{J}{A} - \left(3 + \frac{r}{2}\right) \ln T \right\} T + V_g \quad (2)$$

在正常情况下， $V < V_g$ ，可见

$$\frac{k_B}{q} \left\{ \ln \frac{J}{A} - \left(3 + \frac{r}{2}\right) \ln T \right\} < 0 \quad (3)$$

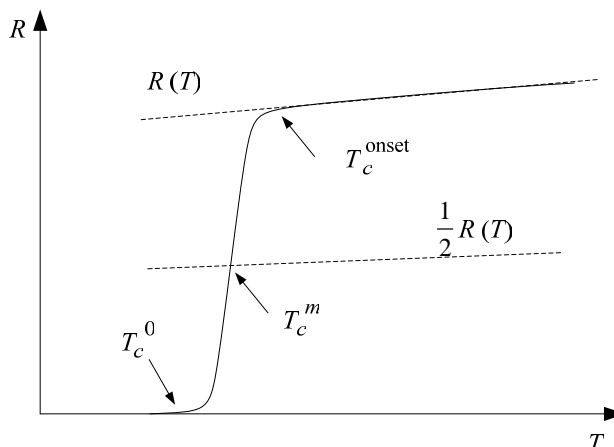


图1 超导材料的电阻转变曲线

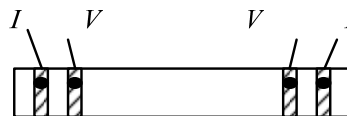


图2 四端接线法

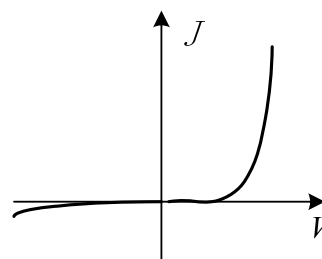


图3 J - V 曲线

即 V 将随着 T 的升高而减小，在流过电流不变的情况下，近似一条直线。图4给出了PN结在不同电流下两端电压与温度的关系，从图中可看出：当电流不同时，曲线的斜率也不同，若外延到 $T = 0\text{ K}$ ，它们相交与一点，对应的电压就是 V_g 。由图可知，二极管PN结能在很宽的范围测量温度，但由于制造工艺关系，其一致性不是很好，斜率不能唯一确定。

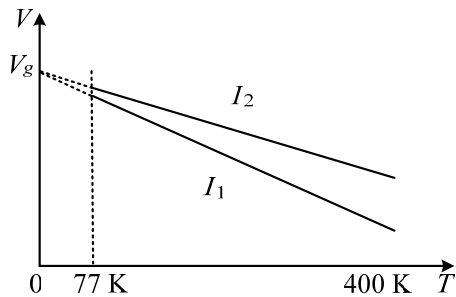


图4 PN结电压与温度的关系

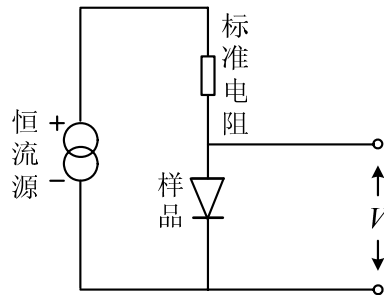


图5 PN结测量原理图

3. 热电偶

1821年塞贝克发现由两种不同金属组成的封闭回路，当两个接点的温度不同时，电路中会出现电动势，这个现象称为塞贝克效应。其产生的电动势称为热电势或温差电势。热电偶温度计的基本原理就是物理中的塞贝克效应。

热电偶基本结构如图6所示。它由两种金属导线A、B组成，导线A的一端与导线B的一端焊接，形成热电偶的工作端，用它与被测物体保持热接触，焊点的温度为 T_1 。用来连接测量仪表的两根导线C是同样的材料，与热电偶的自由端连接，自由端的温度 T_2 稳定不变，所以又称为参考端。参考温度可以是水的三相点(273.16 K)，液氮(LN)的沸点(77.35 K)，或液氦(LHe)的沸点(4.2 K)等。如果热电偶工作端与参考端的温度不等，则有温差电动势产生。温差电势的大小只与工作端与参考端的温差及电极材料有关，与电极的长度，直径无关。

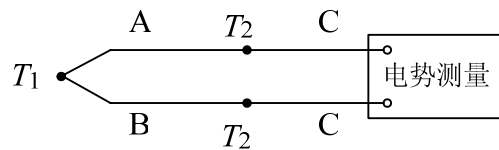


图6 热电偶

热电偶制作简单，测温端体积小、热容小、响应快，故得到广泛应用。但灵敏度不够高，一般不用于作高精度测量。在液氮至室温温区常用铜-铜镍热电偶，在液氦温度至室温温区可使用镍铬-金铁热电偶。

铜-铜镍热电偶被人们广泛用来测量77 K至273 K的温度。这种热电偶材料容易做得均匀，且热电势稳定，有良好的复现性，在一般的实验室条件下即可制作。本实验就用铜-铜镍热电偶产生热电势，通过查表法求得温度（实验室提供）。

4. 金属电阻

不同的材料，电阻率随温度的变化有很大的差别，它反映了物质的内部属性，是研究物质性质的基本方法之一。在金属中，电子的定向运动受到晶格的散射而呈现出电阻。研究表明，当 $(T/\theta) > 0.5$ 时，金属的电阻正比于温度 T ，其中 θ 是德拜温度

$$\theta = \frac{h\nu_{\max}}{k_B} \quad (4)$$

式中 h 是普朗克常数, k_B 是玻尔兹曼常数, ν_{\max} 是晶格极大频率.

上述结论是对纯金属而言, 而实际上金属存在杂质、缺陷、位错等, 它们会对金属造成附加电阻, 这部分电阻近似地与温度无关. 在金属的纯度很高时, 金属的总电阻率可表示为

$$\rho = \rho_i(T) + \rho_0 \quad (5)$$

在液氮温度以上时, $\rho_i(T) \gg \rho_0$, 因此有 $\rho \approx \rho_i(T)$. 在液氮温度到室温的范围内, 其电阻近似与绝对温度 T 成正比.

铂的性能稳定, 电阻的温度系数较高, 不易氧化, 线性好, 复现性好, 常被用作温度的精密测量, 其测量范围的低温端可达 13.81 K.

【实验仪器】

实验系统包括漏热式恒温器, 杜瓦瓶, 恒流电源, 控温器, 和微伏电压表等.

【实验内容】

1. 测量高温超导体的转变温度 T_C .
2. 测量PN结与温度的关系, 做 $V-T$ 的关系曲线. 对每一温度点, 恒流电流分别取 $1 \mu\text{A}$ 和 $50 \mu\text{A}$, 可做出两条斜率不同的曲线, 其反向延长交于 $T = 0 \text{ K}$ 位置, 即可求出能隙电压 V_g .

【注意事项】

1. 所有盛放低温液体的容器不能盖严, 必须留有供蒸汽逸出的孔道.
2. 灌入低温液体时, 开始要慢, 实验装置不要壁.
3. 注意避免低温液体触及人体, 以免冻伤.
4. 注意保护杜瓦容器.

【思考题】

1. 在测量时, 如何判断铜块已处在恒温状态?
2. 降温和升温时测试的曲线可能不重合, 是什么原因?

【参考文献】

- [1] 阎守胜, 陆果. 低温物理实验的原理与方法
- [2] 田诏静一. 低温
- [3] 低温技术. 南京大学低温物理教研室
- [4] 赵忠贤. 1999 科学发展报告. 科学出版社
- [5] 蔡明忠. 低温测温和量热技术. 机械工业出版社