复杂，加以存在电离杂质散射和声子散射两种机制，所以迁移率的变化比较复杂。图11是半导体锗电阻温度关系示意图。

温区1为极低温区，几乎没有自由载流子，此时的电导是微弱的“杂质能级电导”，电阻随温度上升而迅速下降。

温区Ⅱ为低温区，本征激发可以忽略，载流子主要由杂质电离产生，其浓度随温度上升而上升。在低温下，声子散射可以忽略，电离杂质散射几率随温度上升而下降，由它决定

的迁移率随温度的升高而增加。所以，电阻率随温度升高而下降，dlp，/dT＜0。温区m为饱和区，温度升高至室温或稍高，本征激发还不十分明显，但杂质已全部电离，即载流子浓度己不再随温度变化。声子散射已开始成为主要的散射机制，有gT32

所以，电阻率随温度升高而增大。

温区IV为本征区，载流子主要由本征激发提供，其浓度随温度升高而迅速增加。载流子增加的作用远远超过由于声子散射而使电阻上升的影响，于是电阻随温度上升而急剧下降，与本征半导体的电阻温度特性相似。半导体在一定温度范围内具有负的电阻温

1=10uA

度系数，根据半导体低温区电阻温度关系，用半导体材料做成的温度计，可以弥补金属电阻温度计在低温区电阻值和灵敏度降低的缺陷。常用的三

砷化镓

半导体温度计有锗电阻温度计、硅电阻温度计、巴1

佳

碳电阻温度计和热敏电阻温度计。

H님

在恒定的电流下，硅和砷化镓二极管pn结

的正向电压随温度的降低而升高，如图12所示，

100200300400

由图可见，在相当宽的温度范围内有较好的线性

T(K)

关系和较高的灵敏度。

图12二极管pn结的正向电压温度关系

实验装置

本实验装置由以下部分组成:(1)低温温度的获得和控制主要包括低温恒温器和不锈钢杜瓦容器:(2)电测量部分主要包括BW2型高温超导材料特性测试装置和PZ158型直流数字电压表;(3)高温超导体的磁悬浮演示装置

1.低温恒温器和不锈钢杜瓦容器

低温恒温器和杜瓦容器的结构如图13所示，其目的是得到从液氮的正常沸点77.3K到室温范围内的任意温度。低温恒温器的核心部件是安装有超导样品和铂电阻温度计、硅二极管温度计、康-铜温差电偶及259锰铜加热器线圈的紫铜恒温块。液氮盛在具有真空夹层的不锈钢杜瓦容器中，借助于手电筒我们可通过有机玻璃盖看到杜瓦容器的内部，拉杆固定螺母(以及与之配套的固定在有机玻璃盖上的螺栓)可用来调节和固定引线拉杆及其下端的低

34

引线插座

温恒温器的位置。此外还包括紫铜圆筒及

引线拉杆

其上盖、上下档板，引线拉杆和19芯引

拉杆固定螺母

线插座等部件

拉杆固定螺栓

原则上，获得高于液氮温度的中间温

有机玻璃盖

度需将低温恒温器放在容器中远离液氮

不锈钢杜瓦容器液面的上方，通过调节电加热器的电流使

之与漏热相平衡。电加热器线圈由温度稳

上挡板

定性较好的锰铜线无电感地双线并绕而

紫铜圆筒上盖成。这时，紫铜圆筒起均温的作用，上、紫铜加热器线圈下档板分别起到阻挡来自室温和液氮的紫铜圆筒

辐射的作用。

紫铜恒温块

本实验的主要工作是测量超导转变

超导样品

曲线，并在液氮正常沸点附近的温度范围

可调式定点液面计内(例如140K到77K)标定温度计。控下挡板

温差电偶和液面计温程序是从高温到低温，液氮的温度为

(参考点)

77.3K，装在杜瓦瓶内，简便易行的方法是

液氮

利用液面以上空间存在的温度梯度来获得所需温度。样品温度及降温速率的控制

图13低温恒温器和杜瓦容器的结构

是靠在测量过程中改变低温恒温器在杜

瓦容器内的位置来实现，只要降温速率足够慢，就可认为在每一时刻都达到了温度的动态平

衡为了使低温恒温器在需要的温度范围内降温速率足够缓慢，又能保证整个实验在规定的

时间内顺利完成，我们在低温恒温器的紫铜圆简底部与下档板间距离的12处安装了可调式定点液面计。在实验过程中只要随时调节低温恒温器的位置以保证液面计指示电压刚好为零，即可保证液氮表面刚好在液面计位置附近。

在超导样品的超导转变曲线附近，如果需要，还可以利用加热器线圈进行细调。由于金属在液氮温度下具有较大的热容，因此当我们在降温过程中使用电加热器时，一定要注意紫铜恒温块温度变化的滞后效应。为使温度计和超导样品具有较好的温度一致性，我们将铂电阻温度计、硅二极管和温差电偶的测温端塞入紫铜恒温块的小孔中，并用低温胶或真空脂将待测超导样品粘贴在紫铜恒温块平台上的长方形凹槽内。超导样品与四根电引线的连接是通过金属铟的压接而成的。此外，温差电偶的参考端从低温恒温器底部的小孔中伸出，使其在整个实验过程中都浸没在液氮内。紫铜恒温块(探头)的结构如图14所示。液面计的原理:温差热电势效应。单一导体两端由于温度不同而在其两端产生的电势为温差热电势，又称汤姆逊电势。这是因为高温端自由电子的动能大于低温端自由电子的动能，高温端自由电子扩散速率高于低温端自由电子的扩散速率，从而在导体两端形成电位差。

液面计的作用:控制样品与液氮表面之间的距离，以达到控制降温速率的目的。

2.电测量原理及测量设备

电测量设备的核心是一台称为“BW2型高温超导材料特性测试装置”的电源盒和台灵敏度为1V的PZ158型直流数字电压表。

BW2型高温超导材料特性测试装置主要由铂电阻、硅二极管和超导样品等三个电阻测量电路构成，每一电路均包含恒流源、标准电阻、待测电阻、数字电压表和转换开关等五个

主要部件。

1)四引线测量法

电阻测量的电路如图15所示。测量电流由恒流源提供，其大小可由标准电阻Rn上的

25Ω锰铜加热器线圈

高温

恒流源

「十超导样

硅二极管温度计

U

铜一康铜

Ux

温差电偶(测量端)

标准电阻R

样品Rx

铂电阻温度计

图14紫铜恒温块(探头)的结构

图15四引线法测量电阻

电压び的测量值得出，即I＝U/Rn。如果测量得到了待测样品上的电压Ux，则待测样品

的电阻R，为

R

(4)

由于低温物理实验装置的原则之一是必须尽可能减小室温漏热，因此测量引线通常是又细又长，其阻值有可能远远超过待测样品(如超导样品)的阻值。为了减小引线和接触电阻对测量的影响，通常采用所谓的“四引线测量法”，即每个电阻元件都采用四根引线，其中两

根为电流引线，另两根为电压引线

四引线测量法的基本原理:如图15，恒流源通过两根电流引线将测量电流提供给待测样品，而数字电压表则是通过两根电压引线来测量电流在样品上所形成的电势差U。

36

四引线测量法的优点:排除了引线电阻以及接触电阻对测量的影响。由于两根电压引线与样品的接点处在两根电流引线的接点之间，因此排除了电流引线与样品之间的接触电阻对测量的影响;又由于数字电压表的输入阻抗很高，电压引线的引线电阻以及它们与样品之间的接触电阻对测量的影响可以忽略不计。因此，四引线测量法减小甚至排除了引线和接触电阻对测量的影响，是国际上通用的标准测量方法。

2)铂电阻和硅二极管测量电路

在铂电阻和硅二极管测量电路中，提供电流的都是只有单一输出的恒流源，它们输出电

流的标称值分别为1mA和100μA.在实际測量中，通过微调我们可以分别在1002和10

kQ的标准电阻上得到

mV和1.

0V的电压

在铂电阻和硅二极管测量电路中，使用两个内置的灵敏度分别为10uV和100uV的

12位数字电压表，通过转换开关分别测量电、压。由此可确定装恒温块的温度。如图16(0)和16(8)所

佳二极管以及相应的标准电阻上的电

恒流源直流数字电压表

9(1m)

恒流源「直流数字电压表

(10uV)

99(100

转换开关

转换开关

Pt电流

Pt电压

D电

우SiD电压

10ko

OO

标准电阻

铂电阻温度计(P)

标准电阻

硅二极管温度计(SiD)

a

恒流源「直流数字电压表

直流稳压电源

P9(-100mA

PZ158(1

(0~5V)

反向开关

转换开关

温差电偶

oos

样品电压

M

02)样品电流rよ

25Q加热器

标准电阻

超导样品

C

图16实验电路图

由于超导样品的正常电阻受到多种因素的影响，因此每次测量所使用的超导样品的正常

超导样品测量电路

的恒流源来提供电

电可能有较大的差别，为此，在超导样品量电路中，采用多的出

流。在本装置中，该内置恒流源共设标称为100uA、1mA、5mA、10mA、50mA100mA的六档电流输出，其实际值由串接在电路中的10요标准电阻上的电压值确定。为了提高测量精度，使用一台外接的灵敏度为1pV的5位半PZ158型直流数字电压表，来測量标准电阻和超导样品上的电压，由此可确定超导样品的电阻。如图16(c)所示。

实际上，即使电路中没有来自外来电源的电动势，只要材料存在不均匀性和温差，就有温差电动势存在，通常称为乱真电动势或寄生电动势。在低温物理实验中，待测样品和传感器往往处在低温下，而测量仪器却处在室温，因此他们之间的连接导线处在温差很大的环境中。而且，沿导线的温度分布还会随低温液体液面的降低、低温恒温器的移动以及内部情况的其他变化而随时间改变。所以在涉及低电势测量的低温物理实验中，特别是在超导样品的测量中，判定和消除乱真电动势的影响是十分重要。

为了消除直流测量电路中固有的乱真电动势的影响，我们在采用四引线测量法的基础上还增设了电流反向开关，用以进一步确定超导体的电阻确已为零。当然，这种确定受到了测量仪器灵敏度的限制。然而，利用超导环所做的持久电流实验表明，超导态即使有电阻也

于102Q。

4)温差电偶及定点液面计的测量电路

利用转换开关和PZ158型直流数字电压表，可以监测铜一康铜温差电偶的电动势以及可

调式定点液面计的指示，如图16(c)所示。

把两种不同的导体连接成闭合的回路，如果将它们的两个接点分别置于温度不同的热源中，则在该回路内就会产生热电动势，这种现象称作热电效应。这个装置就叫热电偶。热电偶所产生的热电势由两部分组成:接触电势和温差电势。温差电势一般比接触电势小得多接触电势:两块不同的金属导体A和B相互接触，由于金属的费米能级不同，相互接触时发生电子交换，达到平衡后，两块金属中产生接触电势差。

5)电加热器电路

BW2型高温超导材料特性测试装置中，一个内置的直流稳压电源和一个指针式电压表构成了一个为安装在探头中的25锰铜加热器线圈供电的电路。利用电压调节旋扭可提供

0-5V的输出电压，从而使低温恒温器获得所需要的加热功率，如图16(d)所示。

6)其他

在BW2型高温超导材料特性测试装置的面板上，后边标有“(探头)”字样的铂电阻、硅

二极管、超导样品和252加热器等四个部件，以及温差电偶和液面计，均安装在低温恒温器中。利用一根两头带有19芯插头的装置连接电缆，可将BW2型高温超导材料特性测试装置与低温恒温器连为一体。在每次实验开始时，学生必须利用所提供的带有香蕉插头的面板连接导线，把面板上用虚线连接起来的两插座全部连接好。只有这样，才能使各部分构成

打开PZ158型直流数字电压表的电源开关(将其电压量程置于200mV档)以及“电

源盒”的总电源开关，并依次打开铂电阻、硅二极管和超导样品等三个分电源开关，调节两支温度计的工作电流，测量并记录其室温的电流和电压数据。

原则上，为了能够测量得到反映超导样品本身性质的超导转变曲线，通过超导样品的电流应该越小越好。然而，为了保证用PZ158型直流数字电压表能够较明显地观测到样品的超导转变过程，通过超导样品的电流就不能太小。对于一般的样品，可按照超导样品上的室

温电压大约为50pV-200uV来选定所通过的电流的大小，但最好不要大于50mA

最后，将转换开关先后旋至“温差电偶”和“液面指示”处，此时PZ158型直流数字电压表的示值应当很低。

液氮的灌注

使用液氮时必须了解其基本性质，并注意安全。在实验开始之前，先检查实验用不锈钢杜瓦容器中是否有剩余液氮或其他杂物，如有则须将其倒出。清理干净后，可将输液管的端插入贮存液氮的杜瓦容器中并拧紧固定螺母，并将输液管的另一端插入实验用不锈钢杜瓦容器中，然后关闭贮存杜瓦容器上的通大气的阀门使其中的氮气压强逐渐升高，于是液氮将通过输液管道注入实验用不锈钢杜瓦容器。液氮加注量可用直尺测量确定，液氮平静下来时

的液面位置距离瓶口30cm左右为宜

3.低温恒温器降温速率的控制

低温测量是否能够在规定的时间内顺利完成，关键在于是否能够调节好低温恒温器的下档板浸入液氮的深度，使紫铜恒温块以适当速率降温。为了确保整个实验工作可在规定时间以内顺利完成，我们在低温恒温器的紫铜圆筒底部与下档板间距离的12处安装了可调式定点液面计。在实验过程中只要随时调节低温恒温器的位置以保证液面计指示电压刚好为零即可保证液氮表面刚好在液面计位置附近具体步骤如下:

(1)确认是否已将转换开关旋至“液面指示”处。

(2)为了避免低温恒温器的紫铜圆筒底部一开始就触及液氮表面而使紫铜恒温块温度骤然降低造成实验失败，可在低温恒温器放进杜瓦容器之前，先用米尺测量液氮面距杜瓦容器口的深度，然后旋松拉杆固定螺母，调节拉杆位置使得低温恒温器下档板至有机玻璃板的距离刚好等于该深度，重新旋紧拉杆固定螺母，并将低温恒温器缓缓放入杜瓦容器中。当低温恒温器的下档板碰到了液氮面时，会发出像烧热的铁块碰到水时的响声，同时用手可感觉到有冷气从有机玻璃板上的小孔喷出，还可用手电筒通过有机玻璃板照射杜瓦容器内部，仔细观察低温恒温器的位置。

(3)当低温恒温器的下档板浸入液氮时，液氮表面将会像沸腾一样翻滚并拌有响声和大量冷气的喷出，大约1分钟后液面逐渐平静下来。这时，可稍许旋松拉杆固定螺母，控

在上述测量过程中，低温恒温器降温速率的控制依然是十分重要的。在发生超导转变之前，即在T＞T，温区，每测完一点都要把转换开关旋至“液面计”档，用PZ158型直流

数字电压表监测液面的变化。在发生超导转变的过程中，即在T。＜T＜7on温区，由于

在液面变化不大的情况下，超导样品的电阻随着温度的降低而迅速减小，因此不必每次再把转换开关旋至“液面计”档，而是应该密切监测超导样品电阻的变化。当超导样品的电阻接近零值时，如果低温恒温器的降温已经非常缓慢甚至停止，这时可以逐渐下移拉杆，使低温恒温器进一步降温，以促使超导转变的完成。最后，在超导样品已达到零电阻之后，可将低温恒温器紫铜圆筒的底部接触液氮表面，使紫铜恒温块的温度尽快降至液氮温度。在此过程中，转换开关应放在“温差电偶”档，以监视温度的变化。

6.高温超导体的磁悬浮演示

本实验主要通过高温超导盘片在磁块上的悬浮现象演示了高温超导体的两个独有的特性:混合态效应和完全抗磁性1)完全抗磁性(迈斯纳效应)

首先要把超导盘片冷却到超导临界温度以下，使其处于超导状态，然后用塑料镊子把磁块慢慢放到高温超导盘片上面。这时，通过观察会发现磁块会悬浮在高温超导盘片的上面，而不是因为重力的作用掉到高温超导盘片的表面，并且此时磁块很难稳定，即磁力线完全被排斥在超导体外，超导体具有完全抗磁性

2)混合态效应

先把磁块放到高温超导盘片上，然后慢慢到入液氮冷却它。当高温超导盘片被冷却到其超导临界温度以下，即高温超导盘片达到超导状态后，很容易会发现磁块会被悬浮起来，并且超导体与磁块之间达到一种自稳定状态。这是因为在磁场下冷却到超导临界温度以下后，高温超导体进入了混合态，部分磁力线被排斥，部分磁力线被钉扎，超导体既具有部分抗磁性出又展现出类永久磁铁性。

注:熔融织构YBCO高温超导体的下临界场约16001800高斯，钕铁硼永磁磁块的表面磁场强度40005000高斯。

7.高温超导体的磁悬浮力测量

本实验主要通过改变高温超导盘片与磁块之间的距离，定量测量高温超导体磁悬浮力的变化，并给出磁悬浮力与超导体-磁体间距的关系曲线

场冷:由于永久磁铁的表面磁场约为3000～5000高斯，而熔融织构YBCO高温超导体的下临界场约10002000高斯，上临界磁场为几万至几十万高斯，所以场冷条件下超导体处于混合态。混合态的超导体具有部分抗磁性，又由于磁通钉扎效应，部分磁通被冻结，其磁场下的行为可视为一永久磁铁。当永久磁铁接近超导体时，由于迈斯纳效应其表现为抗磁性，

具有排斥力:当永久磁铁远离超导体时，其表现为吸引力:排斥力、吸引力、重力达到自平衡时的行为即为超导磁悬浮现象。

零场冷:零场冷条件下，超导体处于迈斯纳态，具有完全抗磁性，无论永久磁铁以何种方式接近超导体，超导体均表现出完全抗磁性，磁铁难以平衡地悬浮于超导体之上。除上述基本的演示和测量外，由于大多数的材料，尤其是塑料，在温度降低时会变的很脆，而容易损坏，学生还可以通过利用实验剩余的液氮来了解在极端低温条件下材料的这些

物理特性，培养学生发现新东西的能力。

五、注意事项

1.所有测量必须在同一次降温过程中完成，应避免紫铜恒温块的温度上下波动。如果实验失败或需要补充不足的数据，必须将低温恒温器从杜瓦容器中取出并用电吹风机加热使其温度接近室温，待低温恒温器温度计示值重新恢复到室温数据附近时，重做本实验，否则所得到的数据点将有可能偏离规则曲线较远。

2.恒流源不可开路，稳压电源不可短路。PZ158直流数字电压表也不宜长时间处在开路状态，必要时可利用随机提供的校零电压引线将输入端短路。

为了达到标称的稳定度，PZ158直流数字电压表和电源盒至少应预热10分钟

4.在电源盒接通交流22V电源之前，一定要检查好所有电路的连接是否正确。特别是，在开启总电源之前，各恒流源和直流稳压电源的分电源开关均应处在断开的状态，电加热器的电压旋钮应处在指零的位置上。

5.低温下，塑料套管又硬又脆，极易折断。在实验结束取出低温恒温器时，一定要避免温差电偶和液面计的参考端与杜瓦容器(特别是出口处)相碰。由于液氮杜瓦容器的内简的深度远小于低温恒温器的引线拉杆的长度，因此在超导特性测量的实验过程中，杜瓦容器内的

液氮不应少于15cm，而且一定不要将拉杆往下移动太多，以免温差电偶和液面计的参考端

与杜瓦容器内筒底部相碰。

6.在旋松固定螺母并下移拉杆时，一定要握紧拉杆，以免拉杆下滑

7.低温恒温器的引线拉杆是厚度仅0.5mm的薄壁德银管，注意一定不要使其受力，以免

变形或损坏。

8.不锈钢金属杜瓦容器的内筒壁厚仅为0.m，应避免硬物的撞击。杜瓦容器底部的真空

封嘴已用一段附加的不锈钢圆管加以保护，切忌磕伤。

9.在通风的地方使用液氮。择发的氯蒸汽可以使周围的氧气稀薄，对人体不利，甚至造成室息。

10.穿戴必要的防护衣物，如防护眼镜，宽松、厚实的手套，长裤等。液氮在使用过程中有可能被溅出，溅出的液氮有可能浸透或流进手套及其它衣物中

11.不要把装液氮的容器密封上来试图减少液氮的挥发(装有减压阀门的大型容器除外)。容器的盖子应该是适当通风绝热的。密封的容器会因为液氮汽化而产生很大的压力，可能会

43

引起剧烈的爆炸。

12.物体在被液氮冷却时，由于温度很低，在其表面和周围有可能聚集浓度很高的氧气，如果聚集的时间比较长，氧气的浓度有可能很高，这时如果遇到周围有易燃物或明火的话，可能发生剧烈燃烧和爆炸，因此做实验时要避免烟火和易燃物。

思考题

1.什么是超导现象?超导体具有什么的特征?近年来，世界上开发了哪些超导材料?第1类超导体与第类超导体对于外磁场的响应有什么区别?

3.在“四引线測量法”中，电流引线和电压引线能否互换?为什么?

4.确定超导样品的零电阻时，测量电流为何必须反向?这种方法所判定的“零电阻”与实验仪器的灵敏度和精度有何关系?

5.在实验中液面计原理和作用?温差热电势是怎么产生的?何解释场冷和零场冷下的超导磁悬浮现象?

参考文献

1]H K. Onnes, Leiden Comm 120b, 122b, 1240(1911)

2] W. Meissner and R Ochsenfeld, Naturwissenschaften 21, 787(1933)

3]张裕恒，超导物理(第3版)合肥:中国科技大学出版社，2009

4]J. Bardeen, L N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175(1957)[5] B. D Josephson, Phys. Let 1, 251(1962)

16] B. D. Josephson, Possible new effects in superconductive tunneling, Phys. Lett. 1(7). 251

(1962)

[7] B. D Josephson, The discovery of tunnelling supercurrents, Rev. Mod. Phys. 46(2), 251

(1974)

[8]G. Aschermann, E. Fridrich, E. Justi, and J Kramer, Z. Phys. 42, 349(1941)9] B. T Matthias, T. H. Geballe, S. Geller, and E. Corenzwit, Phys. Rev. 95, 1435(1954)[10] J. R. Gavaler, Appl. Phys. Let. 23, 480(1973)

[11] C. Michel, L. Er-rakho and B. Raveau, Mater: Res. Bull. 20, 667(1985)[2]J.G. Bednorz and K. A Miller, Z. Phys. B64, 189(1986)

[13]H. Takagi, S. Uchida, K. Kitazawa, and S. Tanaka, /pn. . Appl. Phys. 26, L123(1986)[ J. G. Bednorz, K. A. Miller, and M. Takashige, Science 236, 73(1987); K. A. Miller and J. G.

Bednorz, Science 237, 1133(1987)

[15]M. K. Wu, J. R. Ashburn, C J. Torng, P. H Hor, R L Meng, L. Gao, Z J. Huang, Y Q

Wang, and C W. Chu, Phys. Rev: Lett. 58,908(1987)

[16]Z. X Zhao, et al., Chinese Sci. Bull., 32(6), 412(1987)

[17 ZZ Sheng and A M. Hermann, Nature 332, 138(1988): H Ihara, R. Sugise, M Hirabayashi.

N. Terada, M. Jo, K. Hayashi, A Negishi, M. Tokumoto, Y. Kimura and T

Shimomura, Nature 334, 510(1988)

[18] C W. Chu, L. Gao. F Chen, Z J. Huang, R L Meng, and Y. Y Xue, Nature 365, 56(1993)[19] J. Nagamatsu, N Nakagawa, T Muranaka, Y. Zenitan, J. Akimitsu, Nature A10, 63(2001)120] Y. Kamihara, T Watanabe. M Hirano and H Hosono. / Am. Chem. Soc. 130, 3296(2008)

[21]阎守胜，陆果.低温物理实验原理与方法.北京:科学出版社，198522]吴思诚，王祖铨.近代物理实验(第三版).北京:高等教育出版社，2005[23]林木欣.近代物理实验教程.北京:科学出版社，2000