

# 用“持续电流法”测量氧化物超导体的电阻率和临界电流

杨沛然

(中国科学院物理研究所)

氧化物超导体发现后,弄清它的直流电阻率到底是多少成为一个极待解决的问题。我们用“持续电流法”首先测量了钇、钡、铜氧化物超导体的直流电阻率,还用同样的实验装置测量了这种超导体的临界电流及其随温度的变化。本文介绍这种测量方法的原理和实验装置,并给出了我们的主要实验结果。

近几年来,氧化物超导体的研究取得重要进展,它的超导转变温度已从最初的 30 K 左右上升到 100 K 以上。与此同时,探索这种超导电性的物理机制的理论研究和一些应用研究也不断取得新的结果。但是当这种氧化物超导体刚发现时,弄清它的直流电阻率到底是多少,是否真象金属超导体那样小,成为当时人们普遍关注的一个问题。我们实验室于 1987 年 3 月首先用“持续电流法”测量了钇、钡、铜氧化物超导体的直流电阻率,同时还用同样的测量装置测量了这种超导体的临界电流。

对于铜、铁等一些正常金属,人们可以直接利用欧姆定律来测定它们的电阻率,即在一根用这类金属制成的导线两端加一定的直流电压,并同时测量流过此导线的电流,最后求出电压与电流之比,就可得出电阻值。但是,超导体的电阻接近于零,上述方法不适于测量这类氧化物超导体的电阻率。历史上,人们曾采用过“持续电流法”测量金属超导体的电阻率<sup>[1]</sup>。作者于 1986 年也用类似的测量原理测定了氧化物超导体的电阻率,但使用的测量方法与过去不同<sup>[2]</sup>,现介绍如下:

## 一、测量方法与实验装置

利用“持续电流法”测量超导体的电阻率时,必须把这种超导体制成一个圆环,然后设法在此超导环里激发一个环绕圆环流动的电流,通过观察此环绕圆环流动的电流随时间的衰减,最后结合圆环的几何尺寸,就可计算出圆环的电阻及构成这个圆环的超导体的电阻率。

从理论上讲,如果超导体的电阻的确等于零,那末,这个环绕圆环流动的电流就会无衰减地流动下去,因而叫做持续电流。倘若构成这个圆环的超导体尚有极小的电阻,这个环绕圆环流动的电流就会按下列公式衰减:

$$I(t) = I(0)e^{-\frac{Rt}{L}}, \quad (1)$$

式中  $R$  是圆环的电阻,  $L$  是圆环的电感,  $t$  是时间,而  $I(0)$  是在初始时刻  $t = 0$  时的循环电流值,  $I(t)$  是在时刻  $t$  时的电流值。如果测出了一定时间间隔里循环电流的衰减量  $\Delta I(t)$ , 就可以利用 (1) 式求出环电感  $L$ , 进而得出圆环的电阻  $R$  和超导体的电阻率  $\rho$ 。1962 年, D. J. Quinn III 等人用这种办法测出铅在超导态时的电阻率  $\rho$  的上限值为  $3.6 \times 10^{-23} \Omega \cdot \text{cm}$ 。这就是说,即使铅在超导态的电阻率不等于零,但也绝对不会大于上面给出的值<sup>[3]</sup>。他们当时是用冲击电流计来测定铅环中持续电流的衰减量  $\Delta I(t)$ 。我们在测定氧化物超导体的电阻率时是用灵敏磁强计来测定持续电流的衰减量。

大家知道,一不环绕圆环流动的循环电流在圆环里会产生一个磁通量  $\Phi$ , 它等于循环电流与圆环电感  $L$  的乘积,即

$$\Phi = I \cdot L. \quad (2)$$

这样,当我们用灵敏磁强计测出  $\Phi$  随时间的变化,也就测出了持续电流  $I$  随时间的变化,因为在 (2) 式中,比例常数  $L$  是圆环的电感量,它是一个不变的常数。测量出电流的衰减量  $\Delta I(t)$  后,即可利用 (1) 式,通过计算得出环电感  $L$ , 这时就可进一步求出环电阻  $R$  及氧化物

超导体的电阻率。

用灵敏磁强计测量氧化物超导体电阻率的实验装置如图 1 所示。图中 1 是灵敏磁强计的敏感元件；靠近磁强计敏感元件处绕有产生外加磁场的激励线圈 2；3 是用氧化物超导体制成的圆环，它紧贴在磁强计敏感元件的端部；4 是液氮杜瓦瓶，里面存有液氮，温度为 77 K；在杜瓦瓶外面，安装有一个圆筒形四层坡莫合金制成的磁屏蔽筒 5，它可以把杜瓦瓶里面的剩磁地磁场压低到  $10^{-7}$  T 数量级；6 是锗电阻温度计，与超导圆环紧贴在—起，用来测量试样的温度。

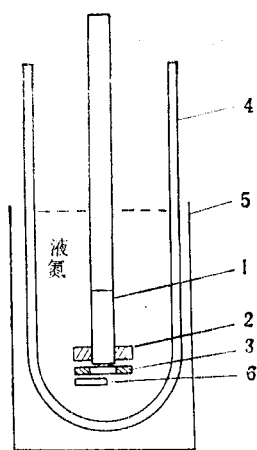


图 1 持续电流法实验装置

## 二、氧化物超导体电阻率的测量

利用上面介绍的测量办法和实验装置测量氧化物超导体的电阻率时，第一步必须在超导环里激发起一个环绕圆环流动的电流。为此，首先把超导环放在液氮杜瓦瓶顶部的室温区，并给产生外加磁场的激励线圈通电流，使之在氧化物超导环所包围的面积内产生一定量的磁通量  $\Phi$ 。此后，把这个氧化物超导环连同灵敏磁强计探头、激励线圈一起缓慢地插入到液氮杜瓦瓶的底部。此处贮存液氮，温度为 77 K。要保证氧化物超导环达到 77 K 低温，使其进入超导态，然后把加到产生外加磁场的激励线圈中去的电流逐渐降到零。由于电磁感应的缘故，在撤掉激励线圈中的电流的同时，在氧化物

超导环里会激发起一个环绕圆环流动的电流，而且在圆环里激发起的这个循环电流的值与在激励线圈中所加的电流成比例。我们在进行氧化物超导体电阻率的测量时，在它制成的超导环中，激发起的循环电流值不能过大。

我们用这种办法测量了钇、钡、铜氧化物超导体的电阻率。测量时，在 77 K 温度下，先用这种超导材料制成的一个超导环里激发一个持续电流。此电流在超导环里产生一个冻结磁通，用灵敏磁强计测得这个冻结磁通的磁场强度为  $1.6 \times 10^{-5}$  T。此后，我们用这个灵敏磁强计连续长时间地观察这个冻结磁场随时间的变化。连续观察了 12 天，在仪器灵敏度范围内未看到可觉察的衰减。我们以此时的仪器分辨率作为冻结磁通和持续电流衰减量的上限，按照 (1) 式，可以求出持续电流的相对变化量的上限值为

$$\begin{aligned} \frac{I(0) - I(t)}{I(0)} &= \frac{\Delta I(t)}{I(0)} \\ &= 1 - e^{-\left(\frac{Rt}{L}\right)} = \frac{2}{160} \quad (3) \end{aligned}$$

实验中所用的氧化物超导环的外径为 1.1 cm，内径为 0.6 cm，高为 0.2 cm。粗略估算得出这个超导环的电感  $L = 5 \times 10^{-9}$  H。时间为 12 天(约  $10^6$  s)。这样，利用 (3) 式就可以求出钇、钡、铜氧化物超导环的电阻  $R = 5 \times 10^{-17}$   $\Omega$ 。

由于这个超导环的周长为 1.3 cm，横截面积为  $0.05 \text{ cm}^2$ ，由此可算出这种氧化物超导体电阻率  $\rho$  的上限值为  $2 \times 10^{-18} \Omega \cdot \text{cm}^{[4]}$ ，与过去文献中报道的第二类超导体的  $\rho$  值相近。

## 三、氧化物超导体的临界电流

上面谈到，用“持续电流法”测量氧化物超导体的电阻率时，在超导环中激发的持续电流不能过大，这是因为每种超导体所能承载的无阻电流都有一个极限，超过这个极限值，超导体就不再是无损耗的导电材料了。超导体所能承载的最大无损耗电流称为它的临界电流。常规金属超导体在绝对零度时的临界电流密度为

$10^7 \text{ A/cm}^2$ 。但是，当这种超导体处在外加磁场中的时候，它的临界电流会降低。例如处于超导态的铅在  $0.1 \text{ T}$  的磁场下的临界电流密度已下降到接近于零，但铌钛合金这种超导体在几个  $\text{T}$  的磁场下，临界电流密度仍然为  $10^5 \text{ A/cm}^2$  数量级。这说明，超导体的临界电流因材料的种类和结构而异。氧化物超导体的临界电流到底有多大，磁场和温度对临界电流有什么影响，这也是人们十分关心的问题。我们在测量氧化物超导体电阻率的同时，还用这种“持续电流法”测量了它的临界电流，因为这是可以精确测量超导体无损耗电流值的唯一方法。

用这种方法测量氧化物超导体的临界电流时，也需要用它制成一个圆环。测量时，和测量电阻率时一样，先在此超导环中激发一个环绕圆环流动的电流，并观察它随时间的变化。当在环中激发起的环流比较小时，它不会随时间衰减。如果我们逐步加大激励磁场，使在超导环里激励的循环电流愈来愈大，当大到一定程度后，无论再怎样加大激励磁场，循环电流最后总是衰减到某一个稳定值，此电流就是这个氧化物超导环所能承载的最大无损耗电流，也就是它的临界电流。测出这个电流值后，再除以氧化物超导环的横截面，就可得出它的临界电流密度。

我们在实验中测量了一个外径为  $1.1 \text{ cm}$ ，内径为  $0.6 \text{ cm}$ ，高为  $0.2 \text{ cm}$  的氧化物超导环，它在  $77 \text{ K}$  温度时能够承载的最大无损耗电流在超导环里产生的磁场为  $2.2 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。按照 (2) 式，此持续电流在圆环里产生的总磁通  $\Phi$  等于环电感  $L$  与持续电流  $I$  的乘积， $\Phi$  又等于磁场  $H$  与环所包围的面积  $S$  的乘积，即

$$\Phi = L \cdot I = H \cdot S. \quad (4)$$

我们实验中所用超导环的面积  $S = 0.28 \text{ cm}^2$ ，电感  $L = 5 \times 10^{-9} \text{ H}$ ，磁场  $H = 2.2 \times 10^{-5} \text{ T}$ ，这样求出  $I = 0.12 \text{ A}$ 。环的截面为  $0.05 \text{ cm}^2$ ，因而，我们实验中使用的这种烧结的钇、钡、铜氧化物超导体在  $77 \text{ K}$  温度的临界电流密度为  $2.4 \text{ A/cm}^2$ 。与金属超导体相比，这种超导体的临界电流密度实在是太低了。文献报道，

最好的烧结样品的临界电流密度为  $1000 \text{ A/cm}^2$  左右，仍然比金属超导体低四个数量级。结晶很好的氧化物超导薄膜的临界电流密度要高得多，但烧结体材的临界电流密度却很难达到薄膜那样高，这是此种材料无法投入工程应用的主要原因。

#### 四、氧化物超导体临界电流密度随温度的变化

用和上节相同的实验程序，在不同的温度下测量氧化物超导环里能够存住的持续电流，即可方便地计算出不同温度下的临界电流密度。

另一个更简便的方法是：首先在  $4.2 \text{ K}$  温度下，在氧化物超导环中激发一个最大无损耗电流，并用灵敏磁强计测量，记录此持续电流在环中产生的磁场，然后让超导环缓慢升温，并同时观察在升温过程中持续电流所产生的磁场的变化，即可方便地记录下一条临界电流随温度的变化曲线。这是因为温度升高时，超导环的临界电流下降，原来在较低温度时在环中存住的持续电流就要衰减到相应于这个较高温度的临界电流值，相应地此电流产生的磁场也要从较大值减小到某个较小值，这样，实际记录的  $H-T$  曲线也就代表了这种氧化物超导体的  $I_c-T$  关系。图 2 就是采用这种方法测出的钇、钡、

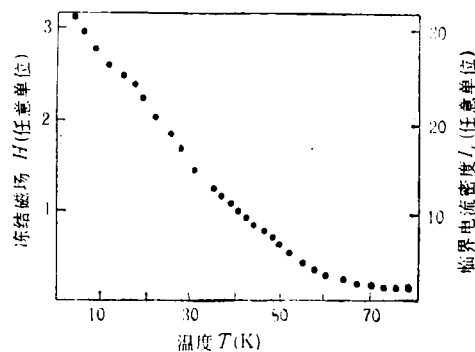


图 2 氧化物超导体的临界电流随温度的变化

铜氧化物超导体的临界电流与温度的关系，图中用任意单位，因为对不同的样品，临界电流的绝对值不同，但临界电流与温度的依赖关系基本相同。  
(下转第 392 页)