

# $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 超导单晶中的电阻反常行为

王文虎 周玉琴 郑 萍 陈兆甲 王楠林 王玉鹏

(中国科学院物理研究所凝聚态物理中心, 北京 100080)

(2000 年 5 月 10 日收到, 2000 年 6 月 5 日收到修改稿)

测量了  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  单晶的  $ab$  面和  $c$  轴方向电阻, 在其超导转变温度附近发现了反常的电阻峰出现. 其随外磁场 ( $>100$  Gs) 和电流的增加而逐渐消失. 文章认为这个反常的电阻峰是由于单晶中超导相的不均匀分布而导致的准再进入行为.

关键词:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  单晶, 反常电阻峰, 准再入行为

PACC: 7430F, 7470V

## 1 引 言

超导体的电阻反常行为最早是在某些金属态玻璃中发现的<sup>[1]</sup>. 在超导涨落区电阻出现反常, 形成一个较明显的尖峰. 最近一些相似的实验结果在薄膜<sup>[2]</sup>以及一些高温超导体<sup>[3]</sup>中发现. 人们不禁要问: 这些现象有没有一个共同的本质? Francavilla 和 Heir<sup>[2]</sup>讨论这种现象的可能性时指出, 有可能是涡流运动造成的. 正如 Glazman<sup>[4]</sup>所指出的, 在薄膜中自发产生的涡流-反涡流对的湮没有可能导致电压反常. 这种反常现象的产生必须在一定的驱动电流范围之内, 超出了这个范围就观察不到电阻反常, 它的一些特征与理论预测能很好地吻合, 但理论估计的外场比实验观察的外场范围整整小了两个量级. 本文报道了  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  单晶的电阻测量, 尤其关注电阻-温度曲线上在超导转变区时样品所表现的电阻反常现象并仔细研究了反常电阻峰与驱动电流和外场之间的关系. 本文讨论了这种电阻反常现象的本质, 并且认为它是高温超导体内禀颗粒性的反映.

## 2 实验结果

样品是由自助熔剂融化法制备的  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  单晶. 其中 2# 样品为 Zn 掺杂的  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}(\text{Cu}_{2-x}\text{Zn}_x)\text{O}_8$  单晶, Zn 的名义掺杂浓度为  $x=0.06$ , 同一批样品大部分都显示了正常的超导转变, 但有些样品表现了反常的输运性质. 1# 样品

$ab$  面电阻-温度曲线见图 1(a), 测量电流为 1 mA, 样品的超导起偏温度为 92 K, 随着温度进一步降低, 电阻快速下降, 当温度下降到 87 K (此时的电阻定义为  $R_{\text{bot}}$ ) 后, 随着温度的进一步降低电阻反而上升, 当温度下降到 86.25 K 时, 电阻达到最大值 (我们把此处的电阻定义为  $R_{\text{peak}}$ ), 继而电阻快速下降

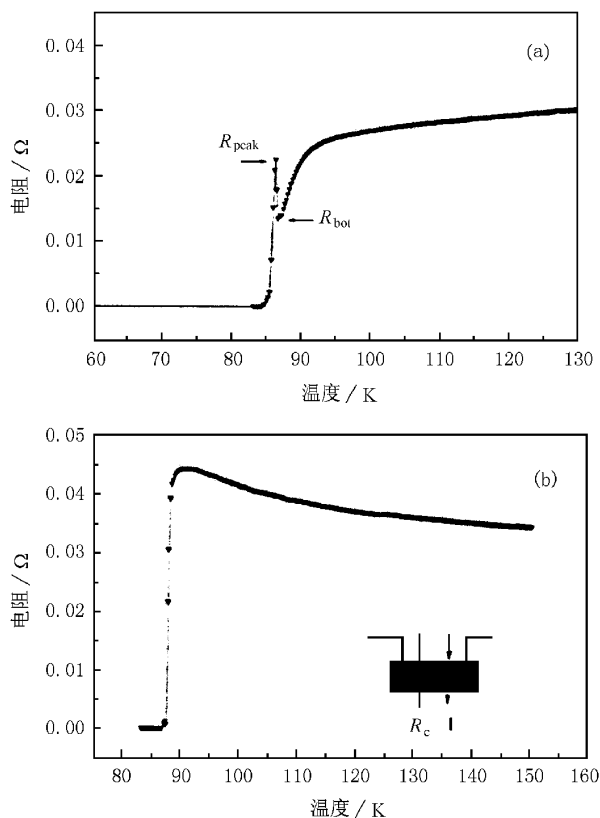


图 1 (a) 1# 样品  $ab$  面电阻温度曲线 (测量电流为 1 mA, 在超导转变区有一个尖锐的反常电阻峰存在); (b)  $c$  轴方向电阻-温度曲线 (插图显示电极配置)

到零.与其他样品不同的是在超导转变过程中有一个反常的尖峰出现.对此我们提出:这是一个偶然的 现象还是在超导样品中普遍存在的?这个反常的 电阻峰与驱动电流和外场的关系如何?

图 1(b)所示为 1# 样品  $c$  轴方向电阻,没有发现反常的电阻峰存在,电阻-温度曲线形状显示样品为缺氧的样品.这与 Crusellas 等<sup>[5]</sup>在  $L_{2-x}Ge_xCuO_4$  单晶中观察到的同时在  $ab$  面和  $c$  轴方向看到电阻反常有一些不同.样品在干燥器中密闭保存 10 天后取出重新测量发现在零场下其电阻发生了一些改变,反常的电阻峰明显地变小,见图 2.影响其电阻发生改变的因素可能是氧的重新分布,表明所用的  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$  单晶是内禀不均匀的.图 3 给出了不同磁场下样品的电阻变化情况,测量电流为 1 mA.我们发现在 100 Gs 到 1000 Gs 的外场情况下,样品的电阻-温度曲线都可以发现反常电阻峰的痕迹,只是随外场的增加,这个痕迹向低温段移动,并且越来

越不明显.外场对这个反常电阻峰有非常强的抑制作用.

2# 样品电极配置见图 4,电流引线(1,4)(2,3)引线测量上表面电阻(6,7)引线测量下表面电阻.我们把(1,4)电极的一面称为正面,另一面称为反面.测量电流为 1 mA.  $ab$  电阻-温度曲线见图 5.样品超导转变起始温度为 92 K,上下表面均发现了反常的电阻峰.与 1# 样品比较发现其反常电阻峰显得更圆滑一些,但都是发生在超导转变区.改变电流引线(6,7)作引线时,测得反面的温度-电阻曲线见图 6.我们发现在这一面通电流时上表面没有发

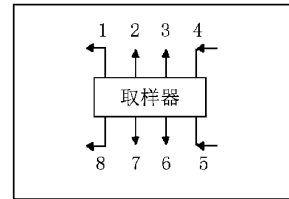


图 4 2# 样品的电极配置

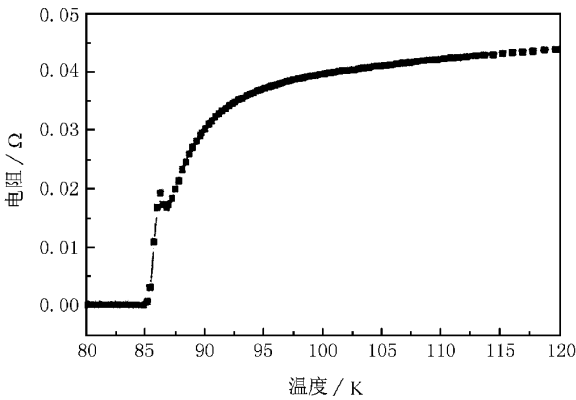


图 2 1# 样品密闭放置 10 天后电阻-温度曲线 (测量电流为 1 mA,反常电阻峰开始变小)

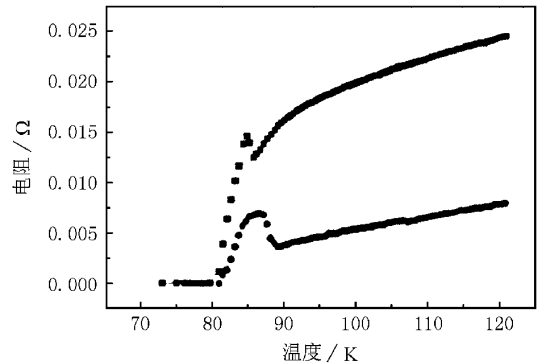


图 5 (1,4)作电流引线时 2# 样品电阻-温度曲线 上下表面都观察到反常的电阻峰存在 (■  $R_{上}$ , ●  $R_{下}$ )

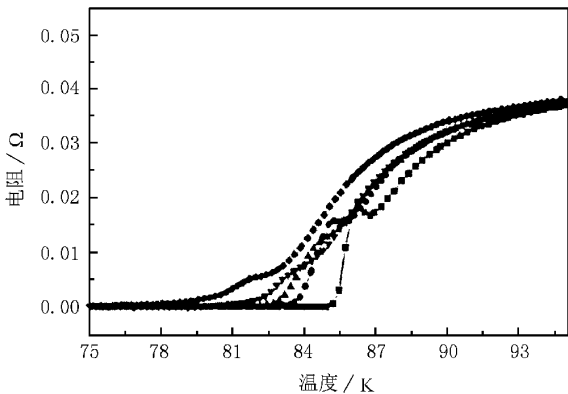


图 3 1# 样品外加不同磁场时的电阻-温度曲线 (■ 0 Gs, ● 100 Gs, ▲ 200 Gs, ▼ 500 Gs, ◆ 1000 Gs)

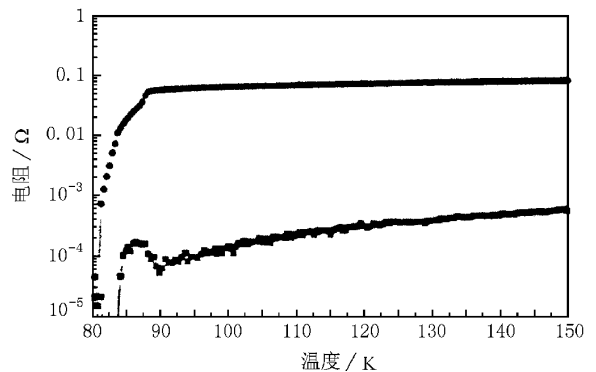


图 6 (5,8)作电流引线时 2# 样品电阻-温度曲线 上表面反常峰消失,下表面反常的电阻峰存在

现反常电阻峰,而下表面的反常峰依然存在,反映了反面对电流比正面敏感,表明样品并不是严格均匀的,同时这是否表明大电流能抑制反常电阻峰?

零场下,对 2# 样品施加不同的电流测得的上表面的电阻-温度曲线见图 7. 由图 7 可见,当外加电流小于 20 mA 时,反常电阻峰幅度随电流增大而减小;当外加电流大于 20 mA 时反常电阻峰消失,只在曲线图上留下反常峰的痕迹.

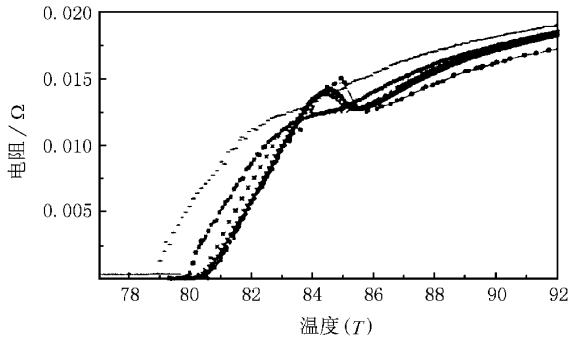


图 7 2# 样品外加不同驱动电流时上表面的电阻-温度曲线  
电流引线为(1 A) ▲0.2 mA, ▼0.6 mA, ■1 mA, ●2 mA, ◆  
10 mA, ×20 mA, \* 30 mA, --- 45 mA

图 8 显示 2# 样品在低场下的电阻-温度曲线,外加磁场即使为 0.01 T,上下表面的反常电阻峰均已消失,表明外场对它有很强的抑制作用.把 2# 样品在 650℃ 氧气下退火 150 h 后重新测量其电阻,见图 9.在退火之后反常峰向下移动,发生在出现零电阻之后,并且其高度也明显地发生了变化.这个实验现象至少有两点可以说明,首先,它排除了  $\Delta_c(R)$  与由于 BSCCO 单晶的各向异性而导致的  $\rho_c$  与  $\rho_{ab}$  混合电阻有关的可能;其次,它进一步支持了反常电阻现象受缺陷分布影响而排除了由于电极的制备所造成

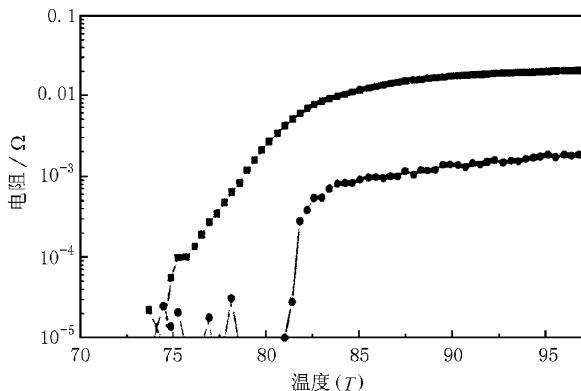


图 8 2# 样品上下表面电阻-温度曲线 测量电流为 1 mA,外场为 0.01 T,反常电阻峰消失

的一些人为现象.高温退火使样品内部结构有序化,使缺陷减少,这也表明电阻再进入现象与晶体的缺陷密切相关.

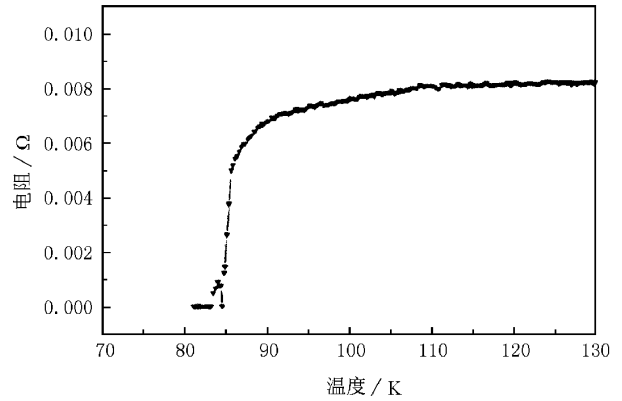


图 9 2# 样品退火后电阻-温度曲线 测量电流为 1 mA,反常峰发生在出现零电阻之后

### 3 讨 论

为解释反常电阻峰的出现我们必须提到 BSCCO 单晶沿  $c$  轴方向的  $\text{CuO}_2$  双层面之间的 Josephson 耦合效应.在 BSCCO 单晶中,由于  $T_c$  与氧缺陷、元素替代效应等有很密切的关系,因而不均匀性是很有可能的.由于退火不充分,氧分布不均匀导致了在单晶内部存在一些高  $T_c$  部分和低  $T_c$  部分,这些高  $T_c$  部分被低  $T_c$  部分所包围,在一定的温度下, $ab$  面方向难以形成完整的超导通路,由于高温超导体很短的相干长度,Josephson 耦合有可能发生在  $\text{CuO}_2$  面之间.我们定义  $E_c$  为临近面之间的平均耦合能,则有<sup>[6]</sup>

$$E_c(T) = \hbar I_c^c / 2e = (\hbar \pi / 2e^2) [\Delta_c(T) / R_n] \cdot \tanh[\Delta_c(T) / 2k_B T] \quad (1)$$

其中  $R_n$  为正常态时结电阻,  $\Delta_c(T)$  为  $c$  轴方向结的边界能隙.根据 Deutscher 和 Müller<sup>[7]</sup> 的分析,由于高温超导体有很短的相干长度,因此  $\Delta_c(T)$  由  $\Delta_c(T) = \Delta_{c0}(T) \tanh[b/2^{1/2} \zeta(T)]$  给出,其中  $\zeta(T)$  为 Ginzburg-Landau 相干长度,  $b$  为抑制能隙变量,  $\Delta_{c0}(T)$  为远离结的体能隙,正常态时结电阻  $R_n$  与  $\rho_c$  有同样的行为,则  $R_n = R_{n0} \exp(-E_g/k_B T)$ ,当  $T$  接近  $T_c$  时有  $\zeta(T) = \zeta(0) (1 - T/T_c)^{-1/2}$ ,  $\Delta_{c0}(T) \approx \Delta_{c0}(0) (1 - T/T_c)^{1/2}$ ,则方程(1)可以写成

$$E_c(T) = E_{c0} (1 - T/T_c)^{1/2} \exp(-2E_g/k_B T), \quad (2)$$

其中  $E_{c0} = (\hbar\pi/16e^2) [\Delta_c(0)^2 b^2 / \zeta(0)^2 R_{n0} k_B T_c]$ , 如果耦合足够强, 而驱动电流小于临界电流, 则有<sup>[8]</sup>

$$I_c(T) = 2eE_c(T) \mathcal{V} / \hbar = I_c(0) (1 - T/T_c)^2 \cdot \exp(-2E_g/k_B T), \quad (3)$$

其中  $I_c(0) = 2eE_{c0}/\hbar$ , 则通过超导部分  $c$  轴方向的耦合, 样品中的长程超导序得以形成, 样品将进入零电阻态, 见图 9. 随着温度的降低, 方程 3 中的两个因素互相竞争,  $(1 - T/T_c)^2$  使耦合增强, 而  $\exp(-2E_g/k_B T)$  项减小耦合作用, 热激活项  $\exp(-2E_g/k_B T)$  对系统有更大的影响, 结果临界电流  $I_c(T)$  比驱动电流小, Josephson 结进入到有阻态, 因而样品电阻随温度降低反而上升. 对 1# 和 2# 样品来说因为样品中虽然有耦合作用, 但并没有在整个样品中形成完整的超导通路, 因此我们观察到的是在发生超导转变的中途就形成了反常的尖峰. 当晶体经退火、吸氧等处理后反常峰出现在零电阻态形成之后, 反映了样品内部不均匀性得到了改善, 一条完整的超导通路得以形成.

### 3 结 论

在 BSCCO 单晶样品的  $R-T$  曲线测量中, 我们

发现了很有意思的电阻反常峰. 反常的电阻峰随氧的重新分布而发生改变, 其随外加电流的增大而减小, 磁场对其有很强的抑制作用. 我们证实反常电阻峰的出现是样品不均匀性的表现, 经过退火吸氧处理后的样品其反常峰趋向消失. 我们认为这种电阻再入行为与高温超导体的层间 Josephson 耦合有关.

- [1] P. Lindqvist, A. Norovstron, Ö. Rapp, *Phys. Rev. Lett.*, **64** (1990) 2941.
- [2] T. L. Francavilla, R. A. Hein, *IEEE Trans. Magn. MAG* **27** (1991) 1039.
- [3] L. Fabrega, M. A. Crusellas, J. Fontculerta, A. Obrados, S. Piral, C. L. Van der Beek, P. H. Kes, T. Greet, J. Beilla, *Physica*, **C185** (1991), 1913.
- [4] L. I. Glazman, *Sov. Phys. Low. Temp. Phys.*, **12** (1986), 389.
- [5] M. A. Crusellas, J. Fantauberta, S. Pinol, *Phys. Rev.*, **B46** (1992), 14089.
- [6] V. Deutscher, A. Baratoff, *Phys. Rev. Lett.*, **10** (1963) 486.
- [7] G. Deutscher, K. A. Muller, *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987), 1745.
- [8] Y. Zhao, G. D. Gu, G. J. Russell, N. Nakamura, S. Tajima, J. G. Wen, K. Uehara, N. Koshizuka, *Phys. Rev.*, **B51** (1995), 3134.

## RESISTANCE ANOMALY IN SUPERCONDUCTING $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ SINGLE CRYSTALS

WANG WEN-HU ZHOU YU-QIN ZHENG PING CHEN ZHAO-JIA WANG NAN-LIN WANG YU-PENG  
(Institute of Physics & Center for Condensed Matter Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Received 10 May 2000; revised manuscript received 5 June 2000)

### ABSTRACT

We have measured the resistance of some  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  superconducting single crystals along  $ab$  plane and the  $c$  axis. In some single crystals, a remarkable resistivity anomaly near the superconducting transition temperature is observed in the  $ab$  plane. The peak is suppressed and vanishes gradually with increasing applied magnetic field ( $>100$  Gs) or transport current. We proposed that the resistance peak is a quasi-reentrant behavior due to the inhomogeneous distribution of the superconducting phase.

**Keywords:**  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ , resistivity anomaly, quasi-reentrant behavior

**PACC:** 7430F, 7470V