

高温超导薄膜中的涨落超导电性及其维度

闻海虎

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031

戚振中

中国科学院固体物理研究所, 合肥, 230031

李宏成

中国科学院物理研究所, 北京, 100080

曹效文

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031

1990 年 5 月 7 月收到

对 $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ($R = \text{Y}, \text{Gd}$) 超导薄膜电阻温度关系的仔细测量, 观察到在 T_c 附近有相当强的超导涨落现象. 研究发现, 多晶和外延的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 薄膜在 T_c 以上均呈现出 2D 涨落超导电性; 而当温度趋向于 T_c 时, 有一 2D 向 3D 的转变发生. 这与 Lawrence-Doniach 理论很好地相符. 实验中还发现, 一个平行于 Cu-O 面的微弱外磁场 (1.5G) 即可导致 3D 向 2D 的转变; 但是当外磁场垂直于 Cu-O 面时, 情况却不同. 这说明 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 膜的 Cu-O 面间有着弱耦合. 对 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 外延膜的分析表明, 在 T_c 以上呈 2D 涨落超导电性, 但当 T 向 T_c 趋近时, 并未向 3D 转变, 这与 Gd 离子的自身磁矩有关.

PACC: 7400; 7440

一、引言

经典的超导涨落理论预言, 在略高于 T_c 温度, 由于热涨落的影响, 会产生一些寿命极短的 Cooper 对, 这些 Cooper 对在外电场中得到加速, 使得样品的总电导率有一明显增加. 增加的电导率为

$$\sigma' = \frac{1}{\rho(T)} - \frac{1}{a + bT}. \quad (1)$$

这里 $\rho(T)$ 为实测电阻率, 而 $a + bT$ 是根据在高温区电阻的线性关系而得出的线性电阻率. Aslamazov 和 Larkin^[1] 预言 3D 系统中的涨落电导率应为

$$\sigma'(3D) = \frac{e^2 \varepsilon^{-1/2}}{32 \hbar \xi_0}. \quad (2)$$

这里 $\varepsilon = [T/T_c(\text{mf}) - 1]$, $T_c(\text{mf})$ 为平均场超导转变温度, ξ_0 为 0K 时的相干长度.

对于低维系统, 例如薄膜(准 2D)或超导细丝(准 1D)^[2], 则 σ' 分别为

$$\sigma'(2D) = \frac{e^2 \varepsilon^{-1}}{16 \hbar d}. \quad (3)$$

$$\text{这里 } d \text{ 为薄膜厚度.} \quad \sigma'(1D) = \frac{e^2 \varepsilon^{-3/2}}{16 \hbar S \xi_0^{-1}}. \quad (4)$$

这里 S 为超导细丝的横截面积.

对于 2D 多层系统, Lawrence-Doniach(简称 LD)理论^[3]预言, $T > T_c$ 时, $\sigma' \propto \varepsilon^{-1}$, 呈 2D 性质;但是当 T 向 T_c 趋近时, $\sigma' \propto \varepsilon^{-1/2}$, 呈 3D 性质, 有一 2D 到 3D 的转变发生. 此转变发生在 $T_0 = T_c(\text{mf}) \cdot \{1 + [2\xi_c(0)/s]^2\}$, 这里 s 为多层系统的周长. 因此超导样品的涨落电导率与温度的关系将反映出超导电性维度的信息.

在常规超导体中, 因为相干长度一般都比电子的平均自由程大, 所以超导涨落现象不明显. 在高温超导体中, 情况正好相反, 极小且具各向异性的相干长度不仅使得涨落电导率大得易于测量, 而且也引起了人们在这方面的极大兴趣^[4,5], 因为它能反映出超导电性维度的有关信息. 文献[4]中对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 块材进行了研究, 认为它具有有一种 3D 特征, 而没有 2D 超导电性存在的迹象. Oh 等人^[6]利用高度取向的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 薄膜和 $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 外延膜进行研究发现有一 3D 到 2D 转变, 并求出 $\xi_c(0) = 1.8 \text{ \AA}$, 从而推论在温度较低时, Cu-O 面之间存在着弱耦合. 此外, Balestrino^[7]和 Kim^[8]等人的小组在 Bi-Sr-Ca-Cu-O 块材和 Tl-Ba-Ca-Cu-O 的外延膜上均发现只有 2D 特征, 而无 3D 特征, 他们的结果从一个侧面证明了 Bi 系和 Tl 系比 Y 系有更严重的各向异性. 我们利用 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 取向多晶膜和外延膜, 以及 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 外延膜进行了这方面的实验研究, 得出一些新的结果.

二、实 验

样品是采用直流磁控溅射法制备的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 取向多晶膜 ($J_c(77\text{K}) = 10^3 \text{ A/cm}^2$) 和外延膜 (10^4 A/cm^2), 以及 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 外延膜 (10^4 A/cm^2), 厚度约为 $5000 \text{ \AA}$. 电阻率用标准的四引线法测量. 磁场由一个液氮冷却的铜螺线管产生, 在 20mm 范围内不均匀性小于 0.5% . 温度由定过标的铜-康铜热电偶测量. X 射线衍射结果表明, 样品的 c 轴垂直于膜面.

三、结果与讨论

图 1 中给出 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 多晶膜和外延膜的 $\lg \sigma'$ 与 $\lg \varepsilon$ 之间的关系. 从图 1 中可以明显看出, 在 $T \gg T_c$ 时, 其线性的斜率为 1, 这表示其超导电性是 2D 的. 随着温度的降低, 在一温度处, 其线性斜率变为 $1/2$, 这对应的是 3D 特征. 取其转变点的温度, 利用 $T_0/T_c(\text{mf}) = 1 + [2\xi_c(0)/s]^2$, 得出 $\xi_c(0)$ 分别为 $1.3 \text{ \AA}$, 和 $1.8 \text{ \AA}$, 这与文献[5,6]的结果相近. 这也说明沿 c 轴方向的相干长度非常小. 在 $T > 1.1T_c(\text{mf})$ 时, 由于 $\xi_c(T)$ 非常小, 故超导的 Cu-O 层之间不会耦合, 这样就呈现 2D 特征; 但当 $T \leq 1.1T_c(\text{mf})$ 时, Cu-O 层之间开始出现耦合, 形成 3D 超导电性.

为了验证以上推论, 利用外磁场进行了一些研究. 图 2 中给出 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 外延膜当 H 垂直 Cu-O 面时的涨落电导率 σ' 与约化温度 ε 的关系. 从图 2 中可以看出, 当外磁场较低时, 实验数据能很好地与 LD 理论相符, 即存在一个由 3D 到 2D 的转变. 但是, 当外磁场达到 150G 后, 曲线与 LD 理论发生偏离. 在较低外磁场时, 由于 $H < H_c(\perp)$, 故涨落电导行为未被破坏, 有 2D 到 3D 转变出现; 当 $H > H_c(\perp)$ 后, 磁通开始进入膜,

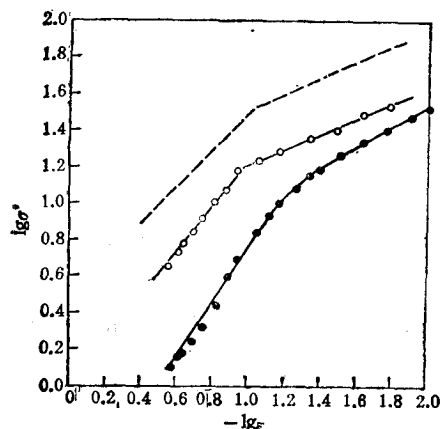


图1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 多晶膜(○)和外延膜(●)的 $\lg\sigma'$ 与 $\lg\varepsilon$ 关系 虚线为 LD 理论

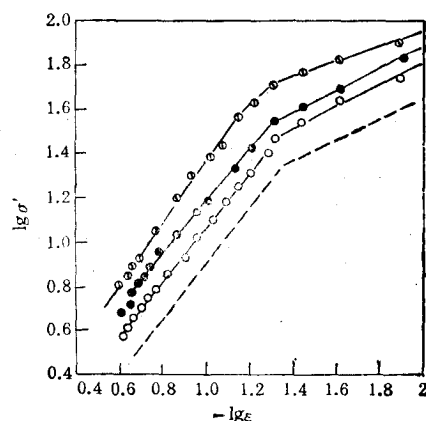


图2 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 外延膜当 H 垂直 Cu-O 面时 σ' 与 ε 关系
○为 0G; ●为 6G; ⊙为 150G;
---为 LD 理论

分布于 $a-b$ 面上,这就使得系统偏离 LD 理论模型. 图 3 给出 H 平行膜面 (Cu-O 面) 时的情况. 当 $H = 0$ 时,存在明显的 $2D$ 到 $3D$ 转变,但是只要加上一个微弱的外磁场 (1.5G) 即可使得 $3D$ 特征消失,在较宽的温区内,均只呈现 $2D$ 特征. 这表明 H 平行 Cu-O 面时,一个很弱的外磁场即可破坏 Cu-O 层之间的耦合,这样只有 $2D$ 特征. 以上结果与我们通过对电阻载流态的研究结果一致^[9].

图 4 给出 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 外延膜 ($10^6\text{A}/\text{cm}^2$, 77K) 的 σ' 结果. 从图 4 中可以看出,

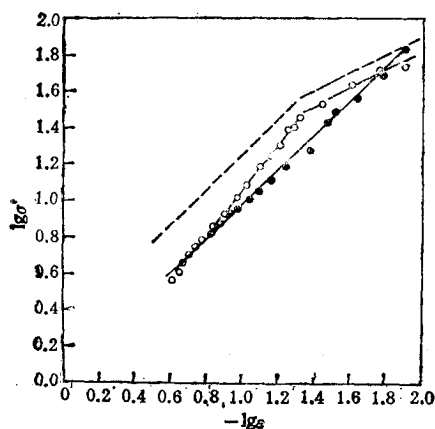


图3 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 外延膜 H 平行 Cu-O 面时 σ' 与 ε 关系 ○为 0G; ●为 1.5G;
---为 LD 理论

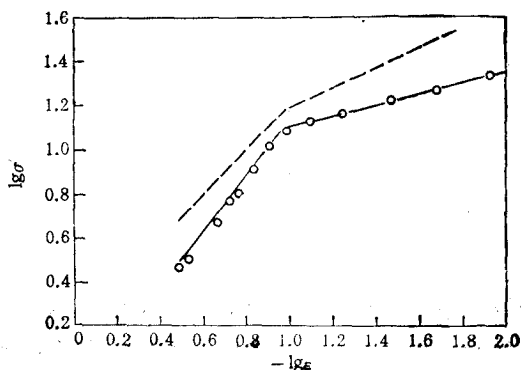


图4 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 外延膜(●)在零场中的 σ' 与 ε 关系 虚线为 LD 理论

在较高温度, $\lg\sigma'$ 与 $-\lg\varepsilon$ 的线性斜率接近 1, 这与 LD 理论的 $2D$ 特征一致; 但是在较低温度时, 其斜率变为 $1/4$, 这说明在这个温度区域内并不能用 $3D$ 模型很好地解释. 作者认为这与 Gd 离子的自身磁矩有关. 在两层 Cu-O 面之间, 有一层 Gd 离子, 由于它自身具有磁矩, 这就在一定程度上破坏了 Cu-O 面之间的耦合, 因此只会呈现出 $2D$ 特征.

- [1] J. G. Aslamazov and A. I. Larkin, *Phys. Lett.*, **26A**(1968), 238.
- [2] W. J. Skocpol and M. Tinkham, *Rep. Prog. Phys.*, **38**(1975), 1409.
- [3] W. E. Lawrence and Doniach, in *Proceedings of the Twelfth International Conference on Low Temperature Physics*, Kyoto, (1970), edited by Eizo Kanda, Keigaku, Tokyo, (1971), p. 361.
- [4] P. P. Freitas, C. C. Tsuei and T. S. Plaskett, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 833.
- [5] T. K. Worthington, W. J. Gallagher and T. R. Dinger, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 1160.
- [6] B. Oh, K. Char, A. D. Kent, M. Naito, M. R. Beasley, T. H. Geballe, R. H. Hammond and A. Kapi-tulnik, *Phys. Rev.*, **B37**(1988), 7861.
- [7] G. Balestrino, A. Nigro and R. Vaglio, M. Marinell, *Phys. Rev.*, **B39**(1989), 12264.
- [8] D. H. Kim, A. M. Goldman, J. H. Kang, K. E. Gray and R. T. Kampwirth, *Phys. Rev.*, **B39**(1989), 12275.
- [9] Wen Hai-hu, Cao Xiao-wen *et al.*, *Mod. Phys. Lett. B*, **4**(1990), in press. Accepted for recent publication.

FLUCTUATION AND DIMENSIONALITY OF SUPERCON- DUCTIVITY IN HIGH T_c THIN FILMS

WEN HAI-HU

Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei, 230031

LI HONG-CHENG

Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080

QI ZHEN-ZHONG

Institute of Solid State Physics, Academia Sinica, Hefei, 230031

CAO XIAO-WEN

Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei, 230031

(Received 7 May 1990)

ABSTRACT

Strong signal of fluctuation superconductivity has been found in $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{R} = \text{Y, Gd}$) superconducting thin films near T_c through careful investigation on resistance transitions. Detailed analyses show that, for both polycrystalline and epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films, it tends to be of 2D characteristic when $T \gg T_c$, but a crossover from 2D to 3D will occur when T approaches T_c , which is consistent with the prediction of Lawrence-Doniach theory. The 3D-2D crossover can also take place when a rather weak field (1.5G) is applied parallel to Cu-O planes, but it is not the case when H is perpendicular to Cu-O planes, this indicates that there is a weak coupling between Cu-O planes in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. The same study on a $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ epitaxial thin films shows that the 2D feature also appears when $T \gg T_c$, but no evidence of 3D has been found when T approaches T_c , this we think is related to the self-moment of Gd ions.

PACC: 7400; 7440