

# YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 超导体的磁穿透深度 及相对能隙

A. Jabbar\* 周世平 鲍家善

(上海科技大学物理系, 上海, 201800)

**摘要:** 根据测得的表面电阻  $R_s(T)$ , 通过在 BCS 理论框架中引入一个修正电导率, 计算出 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) 超导材料的磁穿透深度和简约能隙与温度的相关性. 引入修正电导率主要是根据 YBCO 超导体中电子结构表示 Cu—O 链对微波表面电阻的贡献. 计算得到的磁穿透深度和相对能隙与实验结果符合得相当好.

**关键词:** 磁穿透深度, 相对能隙, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 超导体.

## 引言

鉴于高温超导体具有工作温度达到或高于液氮温度 (77K) 的潜在实用性, 世界各国科学家都加强了对高  $T_c$  超导体物理性质的研究. 在这些铜—氧化合物材料体系中, 人们对 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) 进行了大量的理论和实验研究, 但对它的配对机制仍知之甚少. 而通过研究 YBCO 超导体的特征量穿透深度和简约能隙, 有可能更深入地了解其微观现象.

为了扩大我们的研究范围, 本文继续了我们以前的工作<sup>[1]</sup>, 通过引入一个修正电导率, 从理论上发展了一种测定穿透深度和相对能隙以进一步研究 YBCO 材料微观行为的有效的方法.

本文第 1 节详细介绍磁穿透深度的计算, 第 2 节讨论相对能隙.

## 1 磁穿透深度的温度相关性

磁穿透深度  $\lambda_L$  是超导体的基本参数之一, 它是磁场在超导体表面附近的衰减长度. 现已有若干种方法可用于测定 YBCO 超导材料的磁穿透深度对温度的相关性, 其中包括

本文 1991 年 10 月 18 日收到, 最后修改稿 1992 年 3 月 23 日收到. 来稿为英文, 由汪艺桦译成中文.

\* 上海科技大学物理系博士生.

介子自旋旋转<sup>[2~8]</sup>、磁化实验<sup>[9~13]</sup>、动态电感应<sup>[14]</sup>及微波吸收<sup>[15]</sup>等技术,但由于诸多因素的影响,例如不同制备条件、各向异性性质取平均、局部磁化因子不定性、表面和晶界缺陷等等,人们对这些实验数据的解释是有争议的。

在理论上,用下述 London 双流模型经验公式能很好地描述常规超导体的磁穿透深度与温度的关系,即

$$\lambda_L(T) = \lambda_L(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

依据 BCS 态密度,  $\lambda_L$  可表示为

$$\lambda_L^{-2}(T) = \lambda_L^{-2}(0) \left( 1 - 2 \int_0^\infty -\frac{\partial f(E)}{\partial E} N_s(E) dE \right), \quad (2)$$

式(2)中  $f(E)$  是费密函数,  $N_s(E)$  是 BCS 态密度。

周世平<sup>[16]</sup>曾用以下态密度的修正公式计算了烧结块状 YBCO 超导体的穿透深度  $\lambda_L$ , 即

$$N_s(E, \Gamma) = \text{Re} \left( \frac{E - i\Gamma}{[(E - i\Gamma)^2 - \Delta^2]^{1/2}} \right). \quad (3)$$

式(3)中  $\Gamma$  为修正参数,代表能隙中存在的能态.我们发现:即使对强耦合 YBCO 材料考虑了修正参数,  $T^2$  仍不能得到.因此,我们在本工作中,通过引入一个可调整的修正电导率,并根据测量得到的表面电阻  $R_s(T)$  计算  $\lambda_L$ .

可由复合电导率  $\sigma = \sigma_1 - i\sigma_2$  从理论上描述超导体的表面阻抗  $Z_s$ , 表示为

$$Z_s = R_s + iX_s = (i\omega\mu/\sigma)^{1/2}. \quad (4)$$

对于 BCS 一类超导体,当温度低于  $T_c$  时,有  $\sigma_1 \ll \sigma_2$  (典型情况是  $\hbar\omega \ll 2\Delta$ ,  $K_B T \ll 2\Delta$ ). 这样,式(4)可简化成

$$Z_s = \frac{1}{2} \omega^2 \mu_0^2 \sigma_1 \lambda_L^2 + i\omega\mu_0 \lambda_L. \quad (5)$$

式(5)中,  $\sigma_1 \propto \ln(\Delta/\hbar\omega) \exp(-\Delta/K_B T)$  对常规超导体是成立的,但对氧化物超导体则不能成立,因为氧化物超导体有不同于常规超导体的行为,这已被许多实验所证实。

为了用式(5)研究 YBCO 高  $T_c$  氧化物超导体的电磁行为,我们必须考虑 Cu—O 链作用,并引入一个修正的电导率,其形式为

$$\tilde{\sigma}_n = \ln \left( \frac{\Delta}{\hbar\omega} \right) \left[ C_1 \exp \left( \frac{-\Delta}{K_B T} \right) + (1 - C_1) \frac{\Delta}{K_B T} \right]. \quad (6)$$

式(6)中  $C_1$  为拟合参数,我们选择  $\Delta(T) = \Delta_0 \cos \left( \frac{\pi}{2} t^2 \right)$  (这里  $2\Delta_0 = 4.9K_B T_c$ ) 作为能隙.式(6)中右边第二部分是为了说明 YBCO 材料中 Cu—O 链对微波表面电阻的贡献而引入的(根据 Allender 的金属-半导体-金属模型<sup>[1]</sup>),这一电导率不是任意的,但可以通过测定 YBCO 单晶中沿  $c$  轴方向的电导率特性所证实.我们认为它从根本上支持了高  $T_c$  超导体中存在着准粒子的认定.用式(5)和(6)拟合实验测得的  $R_s(T)$ , 磁穿透深度的温度相关性可估算为

取极小值为

$$\left\{ \sum_{i=1}^N W_i [R_s^{\text{Cal}}(T_i, \lambda_i) - R_s^{\text{Mea}}]^2 \right\}, \quad (7)$$

约束条件为  $\lambda_L(T) = \lambda_L(0) / (1 - t^\alpha)^{1/2}$ . 式 (7) 中引入权重因子  $W_i = (0.1 R_{si})^{-1}$  是为了避免  $R_s$  幅度影响到极值偏差,  $t = T / T_c$  为相对温度,  $R_s^{\text{Cal}}$  和  $R_s^{\text{Mea}}$  分别为表面电阻的计算值和测量值.  $R_s(T)$  的实验数据取自文献<sup>[18~23]</sup>.

实验观察到, 为了得到很陡的电阻随温度的转变和低的表面电阻, 要求材料具有良好的高纯相微结构. 我们的计算结果已表明: 品质优良的 YBCO 薄膜具有较小的  $\lambda_L(0)$  值和较大的  $\alpha$  值, 这与双流模型经验公式完全一致, 即  $\lambda_L(T) = \lambda_L(0) / [1 - (T / T_c)^\alpha]^{1/2}$ , 这里  $\alpha = 4$ .

表 1 和图 1 给出了我们估算的  $\lambda_L$  结果, 与实验结果相比, 两者符合得相当好.

表 1 不同实验方法得到的 YBCO 磁穿透深度与温度相关性 (表中  $\lambda(T)$  与 London 双流经验公式 (TF) 符合得很好, SC 表示单晶, OP 为定向多晶体, OF 为  $c$  轴趋向薄膜)

Table 1 The temperature-dependence magnetic penetration depth for YBCO measured by various experimental techniques

测量方法	样品	$\lambda(T)$	参考文献
理论计算	OF	TF	本工作
介子自旋旋转	OP	TF	[29]
介子自旋旋转	OP	TF	[5]
介子自旋旋转	SC	TF	[6]
磁化实验	SC	TF	[9]
动态电感应	OF	TF	[30]

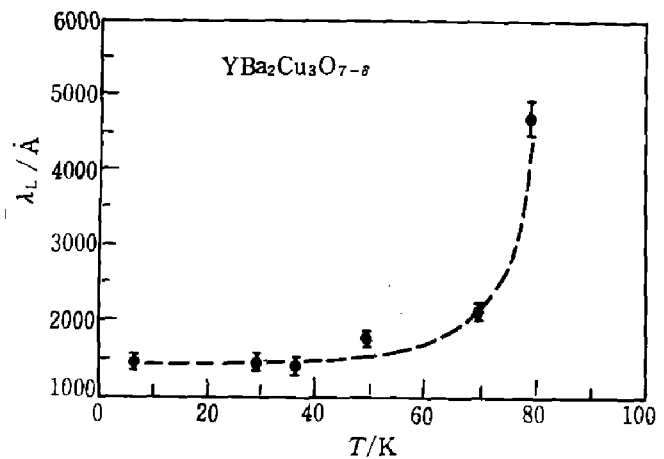


图 1 YBCO 单晶的磁穿透深度与温度的相关性 (图中虚线是拟合经验 London 双流模型公式假设数据结果, 黑实验点取自文献[6]中的实验结果)  
Fig. 1 The temperature dependence of magnetic penetration depth of YBCO (1:2:3) single crystal

## 2 能隙探讨

高  $T_c$  氧化物超导体的短相干长度使观察其能隙的各向异性和多隙结构成为可能, 这些特征是这种材料中存在异常费密面的必然结果. 至于在  $T = 0$  时, 是否仅有单一能隙值或是在不同的费密面局域上存在着多个能态甚至无能隙, 仍无定论. 所以, 对高  $T_c$  材料的能隙尚需作进一步深入的工作.

对 LSCO 和 YBCO 超导体能隙的各种测量已有报道<sup>[24]</sup>, 这些实验测得的比率  $2\Delta / K_B T_c$  值在 3.53 (弱耦合限) 到 8 之间摆动, 在这些材料的能隙中存在着能态和费密面异常可能是造成实验测量值摆动的原因.

本文通过考虑 Cu—O 链的贡献拟合测得的  $R_s$  数据, 计算了相对能隙, 为我们提供了有关 YBCO 材料简约能隙的很有价值的信息.

由式(5)和(6)得出的计算结果与文献[8, 9]中有关能隙和参数  $C_1$  的实验结果符合得极好, 这就证实了我们用于测定 YBCO 超导体能隙值的方法是行之有效的. 图 2 表明我们计算的 YBCO 薄膜的  $R_s$  曲线在整个测量温度范围内均与实验值符合得极好. 表 2 列出计算中使用的参数, 由表 2 可估算出简约能隙值为  $4.90 \pm 0.10$ . 实验值<sup>[25~28]</sup>与计算值的比较参见表 3.

表 2 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 超导膜表面电阻的计算机拟合值

Table 2 Computer fitting of surface resistance for YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> superconducting films

样品 1 (Sample 1)

简约温度 $t = T/T_c$	平均自由程 $L(\text{Å})$	能隙 $2\Delta(0)/K_B T_c$	$A_R$	$C_1$	Var.
0.200-0.9800	15.00	4.90	1.214	0.067	0.0500
0.200-0.9800	18.00	4.92	1.136	0.071	0.0458
0.200-0.9800	20.50	4.94	1.058	0.064	0.0880

计算参数取值为:  $\lambda_L(0) = 1130 \text{ Å}$ ,  $v_p = 9.5 \times 10^6 \text{ cm/s}$ ,  $T_c = 92.0 \text{ K}$ ,  $f = 8.6 \text{ GHz}$ ,

$$\text{Var} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N W_i (A_R R^{\text{cal}}(T_i, X; \omega) + R_0 - R^{\text{Mea}})^2,$$

$$\sigma_n = \ln(\Delta/\hbar\omega) [C_1 \exp(-\Delta/K_B T) + (1-C_1)(K_B T/\Delta)]$$

样品 2 (Sample 2)

简约温度 $t = T/T_c$	平均自由程 $L(\text{Å})$	能隙 $2\Delta(0)/K_B T_c$	$A_R$	$C_1$	Var.
0.200-0.9800	15.00	4.86	1.164	0.080	0.0612
0.200-0.9800	18.00	4.89	1.116	0.082	0.0505
0.200-0.9800	22.00	4.92	1.037	0.075	0.0574

计算参数取值为:  $\lambda_L(0) = 1130 \text{ Å}$ ,  $v_p = 9.5 \times 10^6 \text{ cm/s}$ ,  $T_c = 92.0 \text{ K}$ ,  $f = 9.8 \text{ GHz}$

表 3 计算得到的 YBCO 超导体的简约能隙与实验数据的比较

Table 3 Comparison of the calculated values of reduced energy gap with the experimental data for YBCO superconductors.

材料 (YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> )	$T_c$ (K)	$2\Delta/K_B T_c$	测量方法	参考文献
薄膜	90	$4.9 \pm 0.1$	计算	现工作
外延膜	90	$4.7 \pm 1.2$	红外	[25]
外延膜	90	$4.5 \pm 0.6$	隧道	[26]
单晶	89	4.95	隧道	[27]
c 轴趋向薄膜	92.4	4.8	隧道	[28]

### 参考文献

- 1 Zhou Shiping, Jabbar A et al. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(6): 1
- 2 Harshman D R et al. *Phys. Rev.*, 1989, **B36**: 2386
- 3 Kiefl R F et al. *Physica C*, 1988, **153~155**: 757
- 4 Uemura Y J et al. *Phys. Rev.*, 1988, **B39**: 909
- 5 Uemura Y J et al. *J. Phys. (Paris) Collq.*, 1988, **49**(C8): 2087

- 6 Harshman D R. *Phys. Rev.*, 1989, **B39**: 85
- 7 Pumpin B et al. *Physica C*, 1989, **162~164**: 151
- 8 Keller H. in earlier and recent Aspects of Superconductivity. Vol.90 of *Springer Series in Solid State Sciences*, edited J G Bednorz, K A Muller, Berlin: Springer-Verlag, 1990, 222
- 9 Krusin-Elbaum L et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**: 217
- 10 Hebard A F et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**: 2885
- 11 Krusin-Elbaum L et al. *Phys. Rev.*, 1989, **B38**: 2936
- 12 Mitra S et al. *Phys. Rev.*, 1989, **B40**: 2674
- 13 Scheidt E W et al. *Solid State Commun.*, 1989, **71**: 505
- 14 Fiory A T et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **61**: 1419
- 15 Blazey K W. *Phys. Scr.*, 1989, **T29**: 92
- 16 周世平. 上海科技大学博士论文, 1989
- 17 Allender D. *Phys. Rev.*, 1982, **B7**: 1020
- 18 Anlage S M et al. *J. of Superconductivity*, 1990, **3(3)**: 311
- 19 Inam A, Wu X D et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56(12)**: 1173
- 20 Drebeck L et al. *J. of Superconductivity*, 1990, **3(3)**: 317
- 21 Miranda F A et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57(10)**: 1058
- 22 Char K et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57(4)**: 409
- 23 Anlage M S et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **54(26)**: 2710
- 24 Hirata T, Asada Y. *J. of Superconductivity*, 1991, **4(2)**: 171
- 25 Collins R T et al. *Phys. Rev.*, 1987, **B59**: 704
- 26 Chaudhari P et al. *Phys. Rev.*, 1987, **B36**: 8903
- 27 Gurvitch M et al. *Phys. Rev.*, 1989, **63**: 1008
- 28 Barone A et al. *Phys. Rev.*, 1987, **B36**: 712
- 29 Pumpin B et al. *Phys. Rev.*, 1990, **B42(13)**: 8019
- 30 Oates D E et al. *IEEE Trans. on Magn.*, 1991, **27(2)**: 867

## MAGNETIC PENETRATION DEPTH AND REDUCED ENERGY GAP OF HIGH $T_c$ SUPERCONDUCTORS $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

A. Jabbar\*, Zhou Shiping, Bao Jiashan

(*Department of Physics, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800, China*)

**Abstract:** The temperature dependent magnetic penetration depth and the reduced energy gap have been calculated from the measured  $R_s(T)$  of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) materials in the frame work of BCS theory by introducing a modified conductivity, which is mainly based on the electronic structure of YBCO superconductors to express the contribution of Cu—O chain to the microwave surface resistance. The calculated results for magnetic penetration depth and the reduced energy gap agree very well with the experimental data.

**Key words:** magnetic penetration depth, reduced energy gap,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  superconductors.

---

\* Ph. D. Student of Shanghai University of Science and Technology.