

活能分别为 0.66eV 和 1.10eV。拟合结果还表明,在热循环前期 ($T_{\max} = 300^{\circ}\text{C}$), P_i 峰首先下降,而 P_v 峰不变;在后期 ($T_{\max} \geq 400^{\circ}\text{C}$), P_v 峰不断增高, P_i 峰保持恒定。

根据以上实验结果,我们判定在 $\text{Bi}_2\text{-O}_2$ 双层存在着与 P_i 和 P_v 峰相对应的两种氧缺陷,即孤立的间隙氧原子和一维氧链中的氧缺位。容易理解,在循环前期, P_i 峰下降是因为间隙氧原子扩散激活能较低最先逸出体外,而后期随着氧含量进一步减小,在氧链中形成空位,导致 P_v 峰不断升高。 P_i 和 P_v 峰都属 Snoek 弛豫型,是间隙氧原子和氧空位的应力

感生有序所致。最近,我们的霍耳测试结果^[1]还表明, BPSCCO 超导电性主要依赖于多余的孤立间隙氧含量。

欣闻内耗研究的先驱葛庭燧教授 80 大寿,谨以此文表示祝贺。

- [1] X. M. Xie et al., *Phys. Rev. B*, **40** (1989), 4549.
- [2] 谢晓明、陈廷国, *物理学报*, **41**(1992), 1830.
- [3] G. Miehe et al., *Physica C*, **171**(1990), 339.
- [4] S. B. Samanta et al., *Physica C*, **178**, (1991), 171.
- [5] X. M. Xie and T. G. Chen, *Physica C*, to be published.

高温超导体磁通钉扎内耗的研究

文 亦 汀

(中国科学技术大学内耗与固体缺陷开放研究实验室,合肥 230026)

介绍了在葛庭燧教授的指导下进行的高温超导体磁通钉扎内耗研究所取得的成果。简述了实验的基本原理,磁通钉扎内耗的温度谱、磁场谱以及振幅效应和滞后效应。

1947 年,葛庭燧教授发明了用于低频内耗测量的扭摆(葛氏摆),并用于铝的晶粒间界弛豫机制的研究,取得了重要的结果。据此,美国著名科学家 Zener 进一步完善了滞弹性弛豫的理论。自那时以来,内耗测量技术得到不断发展,并被应用于许多研究领域。例如,点缺陷弛豫、位错弛豫、界面弛豫以及各种过程弛豫(如马氏体相变过程的结构弛豫等)。

内耗方法是一种极灵敏的测试方法。对于结构上的微小变化,都能从内耗的测量中探测出来。早在 1972 年,葛庭燧教授就进行了多方调研,准备应用内耗方法研究超导体的有关特性。鉴于当时客观环境的影响,这项工作未能开展。1986 年,高温超导体的发现促进了内耗方法应用于超导领域。超导体中磁通钉扎的强弱直接关系到超导体的临界电流密度的大小,关系到超导体的强电应用。葛庭燧教授果断地提出,应用内耗方法进行超导体的磁通钉扎研

究。在葛庭燧教授的指导下,我们进行了大量的高温超导体磁通钉扎内耗的工作,研究了大块烧结材料和外延薄膜的磁通钉扎内耗与温度、磁场和振幅等的相互关系,得出了较多的重要结果。

实验所用仪器为静电激发的振动簧内耗仪,采用调频方法检测试样振动,同时在振动簧的长度方向施加一外磁场。采用直接测量试样在自由衰减振动过程中的振幅变化和自由振动频率来计算试样的内耗 Q^{-1} 和频率变化 df/f 。实验所用试样为 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 固相反应的大块样品和外延生长的样品。

图 1 为大块试样的内耗和频率在不同外加磁场下的温度谱。在 $T > T_c$ 时,试样处于正常态,曲线与外加磁场无关。当 $T < T_c$ 时,试样由正常态转变为超导态。当存在外加磁场时,磁通线进入超导试样,并与钉扎中心产生相互作用,进而产生能量损耗。曲线在 $T < T_c$ 时

产生分离。外加磁场越大，曲线的分离程度也越大。随着温度的下降， Q^{-1} 出现一个峰值，而后下降，此后， Q^{-1} 随温度的进一步下降而不断上升。频率曲线随温度的下降一直是上升的。从实验曲线中，可以得出一些试样的超导参数，如转变点、抗磁变化速率等。

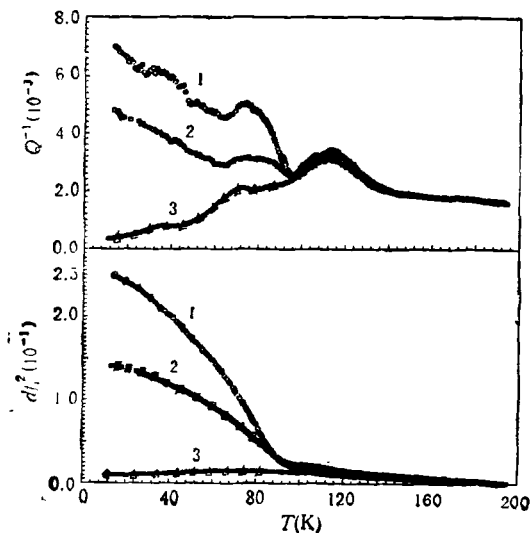


图1 烧结 YBCO 试样内耗和频率的温度谱
(B_s 值: Δ 为 0GS; \square 为 10kGs; \circ 为 15kGs)

德国科学家 Brandt 从理论上计算了 Q^{-1} 和 f_r 随 B_s 的变化关系。在这个理论中，包括了表征磁通线在超导体内运动的钉扎参量 Labusch 参数 $\alpha^{(1,2)}$ 。图2是由实验得出的在固定温度下，内耗和频率随外加磁场 B_s 的变化关系。随着 B_s 的增加， Q^{-1} 和 f_r 都是单调上升的。大量实验表明， $Q^{-1} \sim B_s$ 和 $f_r \sim B_s$ 曲线的变化形式，与试样的钉扎强度有关。可以由 Brandt 理论与实验曲线的对比中得出磁通钉扎强度的信息。

磁通线进入超导试样后，将要受到钉扎中心的作用，被钉扎在钉扎中心上。当温度升高、磁场增强或振动加大时，磁通线将会产生脱钉。内耗方法是一种机械振动方法，研究超导体的内耗振幅效应可以得到有关钉扎和脱钉的信息^[3]。图3为内耗的振动振幅效应。在小振幅区， Q^{-1} 随 A_m 的增加而减小，称为反常振幅效应；而在大振幅区， Q^{-1} 则随 A_m 的增加而

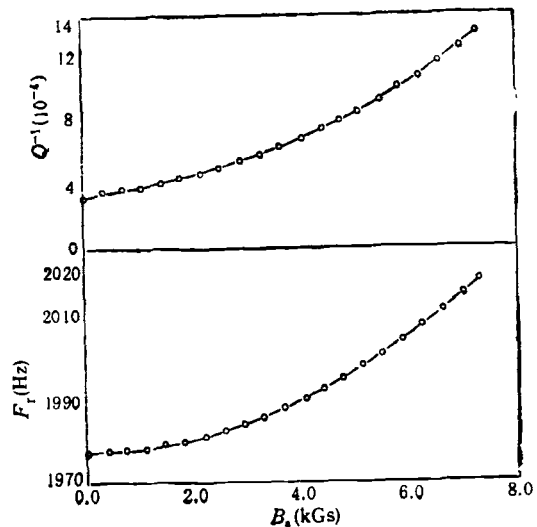


图2 烧结 YBCO 试样 Q^{-1} 和 f_r 的磁场 (B_s) 变化曲线

上升，称为正常振幅效应。一系列实验表明，在低温、弱磁场和小振幅时， Q^{-1} 均呈现反常振幅效应；而在高温、强磁场和大振幅时， Q^{-1} 呈现为正常振幅效应。反常振幅效应到正常振幅效应的振幅转变点是与温度和磁场有关的^[3]。这种关系反映了磁通线的钉扎到脱钉转变随温度和磁场的变化。在 YBCO 薄膜试样中观察到反常振幅效应，表明薄膜试样具有更强的钉扎强度^[3]。

人们通常测量超导试样的磁感应强度在循

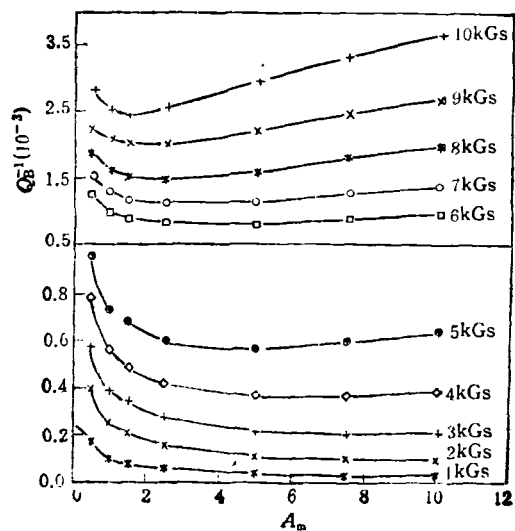


图3 烧结 YBCO 试样的内耗振幅效应

环磁场中的滞后现象，用以进行钉扎和临界电流密度等的研究。在内耗测量中，同样观察到 Q^{-1} 和 f_r 的磁循环滞后效应^[4]。图 4 和图 5 分别表示大块试样和薄膜试样的磁滞回线。磁滞回线的大小与钉扎强度和试样的尺寸直接有关。

当温度升高(对应钉扎强度减小)时，滞后就会变小。实验表明，内耗滞后曲线还可用来计算临界电流密度。

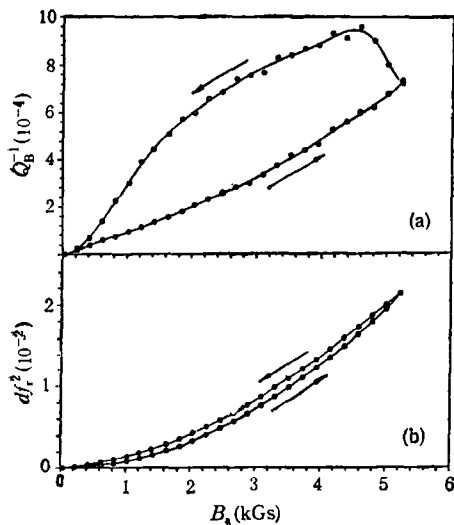


图 4 烧结 YBCO 试样的内耗和频率的磁滞回线

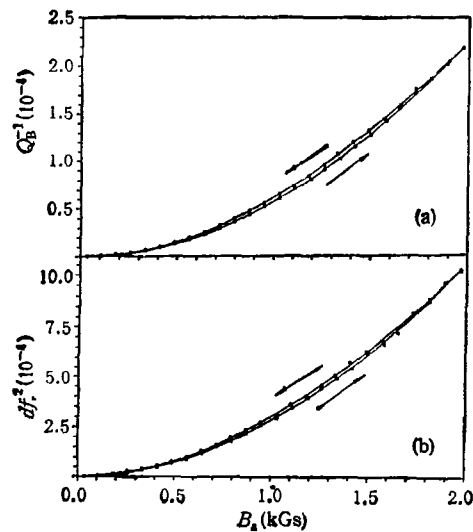


图 5 薄膜 YBCO 试样的内耗和频率的磁滞回线

从以上结果可以看出，应用灵敏的内耗技术研究超导体的磁通钉扎是非常有效的，可为磁通钉扎的研究提供重要信息。

- [1] E. H. Brandt et al., *J. Low Temp. Phys.*, **63** (1986), 187.
- [2] P. Esquinazi, et al., *J. Low Temp. Phys.*, **64** (1986), 1.
- [3] Y. T. Wen, et al., *Physica C*, **193** (1992), 99.
- [4] Y. T. Wen, et al., *J. Phys.: Condens. Matter*, **4**(1992), 4519.

1993 年第 5 期《物理》内容预告

知识和进展

- 纪念中国物理学会成立 60 周年邀请报告选登 (II) 半导体物理学发展简况(黄昆);
- 纪念中国物理学会成立 60 周年邀请报告选登 (III) BEPC 的现状与未来(方守贤);
- 显微镜的最新突破(王家祺);
- X 射线激光全息术(彭惠民);
- 最小作用量原理与物理学的发展 (I)——最小作用量原理的产生与发展(许良);
- 激光腔外的脉冲压缩(翟华金等);
- 物理思想与军事谋略(陈心中)。

物理学和经济建设

- 我国快淬金属产业的形成与发展(王新林);
- 平板显示器评论(周连祥)。

实验技术

- 分形生长的实验(郁伯铭等);
- 低温高压金刚石对顶砧显微光谱系统(崔宏滨)。

讲座

- 超微粒的分形聚焦特性(王前)。

物理学史和物理学家

- 相衬显微镜与泽尔尼克(周汉民);
- 开普勒第一和第二定律的发现(曾宪明);
- 关于伦琴传的一点补充(袁翰清)。

前沿和动态

- 首次观察到弯曲晶体中沟道粒子磁矩的进动(Richard Chrrigan, 赵文衡等);
- 二极管激光泵浦固体激光器的新发展和新应用(朱振和)。