

等。但是迄今的有关实验主要是在常温下进行的,而分子静力学的模拟也未计入温度因素。最近的某些分子动力学模拟结果似乎表明,晶界的严格周期性结构在金属单晶熔点以下的某个温度开始出现“相变”,并有结构被破坏的迹象。可以看出,人们对晶界结构的认识随着实验分析的深入,是从完全无序→部分有序→低温或常温下的严格有序→高温“无序”这样不断深化发展的。

那么晶界在高温下是否完全无序呢?这显然是界面科学中的一个重要基本问题。在高纯铝晶界的实验中,即使晶界出现宏观滑移(平均位移量达 $2\mu\text{m}$ 左右)晶界的“结构”受到破坏,但晶界内耗峰却能重复出现。这一实验事实揭示了晶界的确存在一定的无序性。另一方面,竹节晶界和双晶晶界即使不存在起弹性回复作用的晶角,也出现线性或非线性滞弹性内耗峰,这就说明晶界同时还存在一定的“有序”性。实际上,葛庭燧教授早期工作中关于“薄晶层”的分析也说明了晶界不可能是完全无序的。近来,葛庭燧教授所领导的研究组以大量的实验事实证明了晶界结构的有序无序的二重性,并提出了晶界力学弛豫的模型,把晶界的结构与晶界弛豫有机地联系起来,合理地解释了晶界的有关现象。

四

对晶界力学弛豫基本问题的深入认识也促

进了人们更加广泛地利用这种方法来研究一系列与晶界相关的问题。例如,根据晶界内耗峰探测所得的有关参量如弛豫强度、弛豫时间及其分布,可以推知晶界的特征分布及杂质原子在晶界的偏聚或沉淀过程和状态。这样就有可能择优地设计某些特定晶界实现材料改性。再比如,在大规模集成电路制造工艺的敷金属过程中,金属多晶膜中电子迁移诱导的原子沿晶界扩散是个重要的有实际意义的问题。近来采用晶界力学弛豫方法的有关研究表明,尤其是在铝金属膜中,倾侧晶界是原子进行快扩散的主要途径。根据进一步细致的研究,人们就可能选择地生长半导体器件中金属膜晶界的类型,从而提高器件的可靠性。

五

总之,自1947年葛庭燧教授发明葛氏摆并发现晶界内耗峰以来,科学家们建立和发展了完整的线性滞弹性理论和实验分析方法。在葛庭燧教授的领导下,我国的科学工作者近10多年来在这方面进行了大量系统的工作,在晶界力学弛豫的基本理论问题以及若干应用问题上作出了突出的贡献,赢得了很高的国际声誉。最近,葛庭燧教授领导的中国科学院固体物理研究所内耗与固体缺陷开放研究实验室,在非线性和滞弹性方面又做出了一系列创造性的工作,再一次为建立和发展这一新的学科领域作出了重要贡献。

高温超导体中氧行为的内耗研究

陈 廷 国

(中国科学院上海冶金研究所,上海 200050)

迄今发现的高 T_c 氧化物超导体都是一些含有氧缺陷的化合物,其超导电性和结构(包括微结构)与氧含量密切相关。由于内耗对晶体结构极为敏感,因此它在研究高 T_c 超导体中氧缺陷的形态及其运动等方面占有特殊的地位。

物理

本文主要就钇系和铋系超导体的氧行为的低频内耗研究作一简述。

一、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)超导体

图1中的曲线 a 和 b 分别表示空气中 400°C

(正交相)和 920°C (四角相) 淬火的 YBCO 试样的内耗 (Q^{-1}) 与温度关系曲线。两相各存在一个峰温为 200°C 和 170°C 的内耗峰, 分别称为 P_O 和 P_T 峰。目前人们的共识是 P_O 和 P_T 均为弛豫型, 由氧原子的应力感生有序所引起。据文献[1]报道, P_O 峰随氧含量减小而增高, 峰温上移, 而 P_T 峰在四角相区随氧含量减小而降低, 峰温下移。两者的弛豫强度(Δ)和弛豫时间(τ)符合以下关系:

$$\Delta_O = AC_A C_B / (C_A + C_B),$$

$$\tau_O^{-1} = \nu_0 e^{-H_A/kT},$$

$$\Delta_T = \frac{1}{2} A \cdot C (C - C_A - C_B),$$

$$\tau_T^{-1} = 2\nu_0 e^{-H/kT} (H = H_A = H_B),$$

式中 A 为比例常数, ν_0 为指前因子, C_A 和 C_B 分别为 O(1) ($\frac{1}{2}, 0, 0$) 和 O(5) ($0, \frac{1}{2}, 0$) 位氧占有率, H_A 和 H_B 分别为 O(1) 和 O(5) 位的势垒。

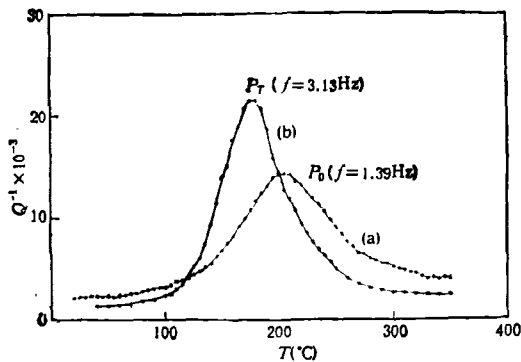


图1 YBCO 的内耗与温度关系曲线

根据晶体对称性, P_O 峰应属反应型 (O(1) \rightleftharpoons O(5)) 弛豫内耗峰, 而 P_T 峰为 Snoek 峰, 因为在四角相区, O(1) 位和 O(5) 位是等价的。在正交相区, 若 $C_B \gg C_A$, P_O 峰高正比于 O(1) 位氧占有率 (C_A), 它随氧含量降低而增大; 在四角相区, P_T 峰随氧含量减小而线性下降。因此, 根据 YBCO 材料的内耗行为随氧含量的变化, 可以得到如下一些重要信息: (1) 给出氧扩散机制并求得氧扩散系数, (2) 确定 O(1) 和 O(5) 位的势垒, (3) 给出

O(1) 和 O(5) 位氧占有率, (4) 判别正交—四角相变的级次, 详见文献[1, 2]。

二、Bi_{1-x}Pb_xSr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} (BPSCCO 2223 相) 超导体

已知铋系 2223 相超导体中多余氧含量(δ)的变化范围比钇系小得多, 但其对超导电性的影响仍极明显。中子衍射分析^[3]和隧道扫描电镜观察^[4]表明, 在 Bi₂-O₂ 双层存在多余的沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的氧链。除此以外, 是否还存在其他的氧缺陷, 它们是如何影响超导电性, 目前尚不得而知。

图 2 为空气炉冷的 BPSCCO 试样经不同温区 (以 T_{max} 表示每一温区的最高温度) 连续原位真空 (10Pa) 热循环后, 升温时测得的内耗与温度关系曲线。随着真空循环, 即氧的逸出, 内耗行为呈现复杂的变化。经 $T_{max} = 300^\circ\text{C}$ 循环后, 峰高下降, 峰温上移, 但经 $T_{max} \geq 400^\circ\text{C}$ 循环, 峰高增高, 峰温略上升。值得注意的是, 图 2 所有内耗 (扣除背景后) 曲线均比德拜峰宽化且不对称。经拟合所有曲线均可分解为峰温 ($f = 5.8\text{Hz}$) 分别为 127°C 和 170°C 的两个子峰 P_1 和 P_2 。 P_1 和 P_2 峰对应的激

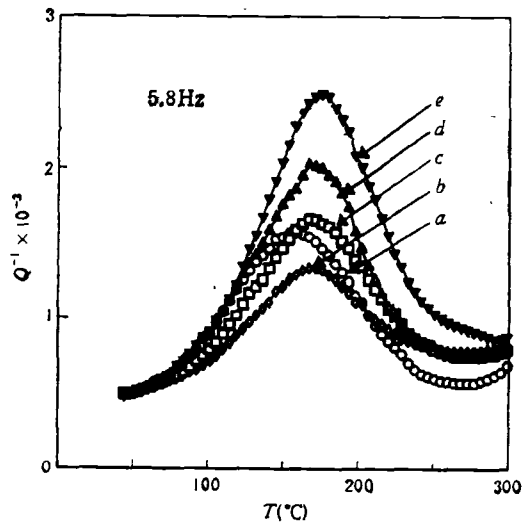


图2 BPSCCO 的内耗随真空热循环处理的变化 (曲线 a: 空气炉冷; 曲线 b: $T_{max} = 300^\circ\text{C}$; 曲线 c: 400°C ; 曲线 d: 400°C 再循环; 曲线 e: 450°C)

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