

中国物理学会固体内耗与超声衰减专业委员会祝贺
学部委员葛庭燧教授诞辰 80 周年

专 稿



中国科学院学部委员葛庭燧教授
(Professor T. S. Ké)

晶界力学弛豫研究的新成就

张立德 朱爱武

(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,合肥 230031)

概括地介绍了近 10 年来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晶界力学弛豫方面所做的大量的创造性工作,其中包括确证了晶界力学弛豫的来源,发现了低频高温范围若干新的力学弛豫现象和非线性效应,在晶界弛豫与晶界结构的联系上得到一些极有价值的实验结果。这是继 1947 年葛庭燧教授发现晶界内耗峰以来我国科学工作者对线性和非线性内耗研究领域发展作出的新的重大贡献。

1947 年,葛庭燧教授用自己发明的测量低频内耗的装置——扭摆(在以后的教科书和物理学词典中称为“葛氏摆”),测量了多晶纯铝和单晶纯铝的内耗,发现了金属晶粒间界弛豫引起的内耗峰(近来国际上称为“葛峰”),并据此

物理

提出了晶界“无序原子群”的结构模型。葛庭燧教授的一系列实验,奠定了金属线性滞弹性理论的实验基础,并且这还是第一次在物理分析的层次上把晶界与单晶基体区分开而真正探测了晶界本征的性质,为研究晶界的结构和有关的动力学过程(如晶界滑动、再结晶和晶粒长大、晶界扩散、晶界偏析和沉淀以及晶界熔化

等)提供了灵敏而有效的实验分析手段。因此葛庭燧教授被国际上誉为滞弹性(内耗)这个学科领域的开创人之一。

二

多年以来,葛庭燧教授的上述具有创造性的实验研究结果,一直被国际公认为关于线性滞弹性理论以及金属晶界问题研究的经典性工作。然而,70年代中期意大利的 Gondi 及其合作者和法国的 Woïrgard 等分别报道他们在铝单晶试样中都观察到内耗峰,峰的位置与晶粒间界内耗峰(即葛峰)相近,因此他们对1947年葛庭燧教授把所观察到内耗峰归因于晶粒间界过程表示怀疑,由此引起了关于葛峰来源的争论。葛庭燧教授等仔细分析了他们的实验结果,并提出了其中可能存在的问题。

为了彻底澄清这一问题,自1982年开始,葛庭燧教授带领中国科学院固体物理研究所的科研人员,分别用高纯铝多晶试样及同样纯度以三种方式(动态退火、静态退火和区熔生长法)生成的铝单晶试样进行了大量判断性实验。结果表明,传统的晶粒间界内耗峰(葛峰)在多晶试样中必然产生,却不在单晶中出现。这就确切无疑地证实了葛峰只能归因于晶界过程,而不是晶粒内部位错过程。因此,澄清了近10年来关于葛峰来源的重要争论。

除此之外,葛庭燧教授等人还在高纯铝试样低频高温(100—600℃)范围发现了一系列新的力学弛豫现象。其中竹节晶界内耗峰是一个与传统的晶粒间界内耗峰(葛峰)不同的新的内耗峰,它位于葛峰的低温侧,其行为特征是:

(1) 随着退火温度的升高而移向低温,而葛峰却移向高温;

(2) 峰高与晶粒度有关,即与试样内含有的竹节晶界数目成正比关系,而葛峰的峰高基本不变。

详细的实验分析表明,竹节晶界内耗峰与传统的晶粒间界内耗峰的弹性回复机制不同,后者是细晶试样中晶粒三叉角,前者则可能是

与晶界相联系的某种位错组态。

单晶内耗峰是在高纯铝单晶试样经过适当处理后发现的。它位于葛峰的高温侧。后来通过扭转加工方式也观察到同样的现象,故又称为扭转内耗峰。详细的实验表明,这个内耗峰与适当处理或扭转加工引入试样中的均匀位错空间网络有关。其弛豫强度取决于可动结点(钉扎点)之间位错的滑移,弛豫时间则与结点的扩散攀移有关,因此表现了一定的非线性反常效应。

出现在葛峰高温侧的另一个峰是在试样经过淬火之后发现的。它表现了更加明显的非线性反常效应。实验表明,它与晶界密切相关。初步的分析表明,它可能是由竹节晶界附近的位错做攀移运动引起的。

葛庭燧教授等人的这些系统而深入的实验研究结果,为我们勾画了金属晶体中缺陷在高温下的微观形态和各种交互作用,从而大大深化了人们对它们动力学性质及其对晶体宏观力学性质的影响等问题的认识。

三

近来关于晶界力学弛豫的研究在深度和广度上都达到相当水平,成为材料科学研究的热点。在葛庭燧教授的指导下,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这一问题上有新的突破。在晶界弛豫现象与晶界结构的联系方面取得了一些重要的进展,迈上了一个新台阶。

关于晶界的“结构”,最早人们认为晶界具有非晶结构,但晶界的各向异性性质又表明晶界是有结构的。葛庭燧教授出色的工作证实了晶界“非晶”结构模型的不适用性,提出了既含有一定结构又具有一定无序性的“无序原子群”模型。Mott 教授也赞同葛的看法,提出了“小岛”模型。后来,晶界的场离子显微镜、X射线衍射和高分辨电子显微镜的观察以及分子静力学电子计算机模拟的结果确认了晶界具有周期性结构,提出了晶界重位点阵和结构单元模型

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