

# 电导体中电子能损引起的效应

E. BALANZAI (CIRIL, 法国)

## 一、前言

在大部分绝缘材料中,用不同类型的粒子辐照时,引起靶原子电子的激发和电离,从而导致了绝缘材料中原子的永久性位移。尽管如此,还仍然存在一些例外的情况,例如,在  $MgO$  和  $Al_2O_3$  中,电子阻止本领对于产生永久性的损伤是无能为力的。但在考虑电导体时,则有相反的情况。在多数情况下,电子的慢化对损伤过程是没有贡献的。但是,现在有一组实验数据证明了在一些系统中,电子阻止本领对辐照缺陷的产生具有明显的效应。

有机金属就是这些系统中的一个,从辐照效应的角度来看,业已证明,有机金属的特性更类似于常态的绝缘分子晶体。

现在,已在几种电导体中证明了,仅在很高的激发和电离密度下,也就是在电子阻止本领 ( $dE/dX$ ) 很大时,电子能损对辐照损伤的贡献。

最近几年,使用高能重离子加速器提供的离子束得到了大量新的、有意义的实验结果。这些结果是在不同的系统中得到的,例如:1. 有机金属和高  $T_c$  铜氧化物,它们是具有部分非金属键的电导体系统;2. 非晶态金属合金、准晶体金属合金、晶体金属合金和原子结构差别很大的纯金属等。

采用各种处理方法,尽管已得到了许多实验结果,但在电导体中,对高电子阻止效应的描述,仍然是不完全的。

## 二、结果

在探索电子阻止本领对辐照损伤效应的贡献时,必须考虑原子的弹性碰撞所引起的原子位移。使用通常的程序计算了每个原子的位移总数 (dpa) 和初级碰撞原子 (PKA) 谱,并估计了它们对所观察效应的贡献。我们现在评论在电导体中所获得的主要结果。

### 1. 有机金属

有机导体是由很容易极化的大分子构成的分子晶体,这种导电晶体是由两种类型的分子分离堆积在线性键中而成。其中一种是好的电子施主,另一种则是电子受主。在横向,其导体性比沿着堆积方向的电导性至少低 100 倍。辐照引起缺陷产生足够大的势扰动,以便使无限长的导体链分离为断裂的新断链。经一瞬变状态以后,纵向电阻率随产生缺陷的浓度而指数地增加。当用 X 射线或电子辐照时,损伤分子的份数是用吸收的总能量标度的。从 77K 温度下测量的 TTF TC-NQ 的电阻率随吸收能量的变化关系中,可以看出,高能重离子  $3.48\text{GeV Xe}$  ( $dE/dX \sim 8.7\text{MeV}/\mu\text{m}$ ) 的曲线斜率比  $2.5\text{MeV}$  电子 ( $dE/dX \sim 3.2 \times 10^{-4}\text{MeV}/\mu\text{m}$ ) 的大;高电子阻止本领的 Xe 离子的效率(产生一个分子缺陷所需要的能量)比 X 射线或者电子约大 50 倍。

### 2. 高 $T_c$ 的铜氧化物

高  $T_c$  超导体 ( $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ) 的辐照特征表现为临界温度  $T_c$  随所计算原子位移数 (dpa) 的减小而降低。值得注意的是考虑低的

电子阻止本领 ( $dE/dX < 2\text{MeV}/\mu\text{m}$ ) 的辐照时, 可用 dpa 来标度  $T_e$ 。但对高电子阻止本领的辐照 (Xe 或者 Kr) 已观察到快了一个数量级。显然高密度的电子激发明显地增强了  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  的损伤。这个结果得到最近高分辨电子显微镜研究结果的支持, 而且已经观察到了类似于磁绝缘体中显现的点状的潜径迹。

### 3. 非晶态金属合金

电导体中高电子阻止本领辐照引起的较强烈的效应, 是在低温辐照非晶态金属合金中观察到的。自早期 Lesueur 使用 U 裂变碎片实验以来, 已经知道电子能损在非晶态金属合金中引起了重要的改性。Klamunze 等人以对试样尺寸和灵敏度的测量, 清楚地证明了用快重离子辐照, 经过一个潜伏剂量之后, 使试样发生较大的各向异性地畸变 (假定无体积变化), 即样品的尺寸在垂直离子束方向增加, 而在平行离子束方向收缩。这种生长现象, 已在许多非晶态金属合金和氧化物玻璃中观测到了。Audouard 等人用测量电阻的方法和通过变化束流相对于试样入射角, 同时测量了生长现象和重离子辐照引起电阻率的变化。他们认为, 在超过潜伏剂量和一个电子阻止本领阈值以上, 电子阻止本领在短程有序的非晶合金中产生缺陷。初始损伤率是电子阻止本领的函数。电子阻止本领在  $\text{Fe}_{85}\text{B}_{15}$  合金中引起的效应比弹性碰撞引起的效应高两个数量级。

引起生长效应的各向异性的原子位移, 一定是受到入射离子通过样品时所建立的局域应力的作用。但这个局域应力的强度究竟有多大呢? 回答这个问题的一个途径是研究外加应力对生长率的影响。Audouard 等人的研究表明, 外加单轴应力可引起巨大的附加的原子位移, 垂直离子束辐照样品时, 当外加单轴应力是 600MPa 时, 其电阻斜率增加了 8.5 倍。因此推论出与生长效应 (没有外加应力时) 有关的局域应力的数量级为几

百个 MPa, 但未见非晶金属的晶化现象。

### 4. 晶体金属合金

用低温电阻测量、透射电镜 (TEM) 观测和应变测量研究了在 GANIL 用能量为 GeV 的 Xe 离子 ( $10\text{MeV}/\mu\text{m} < dE/dX < 40\text{MeV}/\mu\text{m}$ ) 辐照的几种不同晶体合金。所选合金在电性能和结构特性上有大的差异, 它们是: 处于长程有序和无序态的  $\text{Cu}_3\text{Au}$  和  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ; 电阻率与典型的非晶合金可比较的一种奥氏体  $\text{Fe}_{81}\text{Ni}_{18}\text{Co}_{27}$ ; 很容易通过核碰撞非晶化的三个系统  $\text{Ni}_3\text{B}$ 、 $\text{Zr}_2\text{Al}$  和  $\text{NiZr}$ ; 其中  $\text{Ni}_3\text{B}$  是少数几个具有非晶相配对的金属合金之一。

与非晶态金属合金的情况相反, 在晶体金属合金中, 没有观察到样品形状的变化。 $\text{NiZr}$ 、 $\text{Zr}_2\text{Al}$  和  $\text{Ni}_3\text{B}$  的 TEM 观测中, 没有发现有任何连续的径迹, 也没有观察到非晶化的信号, 但看到了一些位移链, 这可以归结为原子碰撞的结果。从归一化到位移原子数目的电阻率增加的分析得到了以下的结论:  $\text{Cu}_3\text{Au}$  的缺陷产额不依赖于电子阻止本领的大小;  $\text{Ni}_3\text{B}$  的缺陷产额随电子阻止本领的增加而稍有增加; 对于奥氏体和  $\text{Ni}_3\text{Fe}$  的缺陷产额则稍有减少。要肯定这些结论, 在较低和较高的电子阻止本领时, 补充数据点是十分必要的。

### 5. 纯金属

电子阻止本领影响纯金属损伤率的第一批结果是在 60 年代获得的。用裂变碎片辐照很薄的膜, 用 TEM 观察到了细小的潜径迹。最近, 在纯金属块中观测到了一些不大引人注目的效应。Iwase 等人指出: 在 Ni 中损伤效率、复合体积和阶段 I 恢复的百分率不是用 PKA 的中间能量来度量, 而是用入射离子的电子阻止本领来标度的。高电子阻止本领伴随随损伤效率的减少、阶段 I 恢复百分率的减少和复合体积增加。A. Dunlop 等人在 Fe 靶上得到了类似的结果。先用低温 (10~170MeV) 的 Fe 离子辐照 Fe 样品, 通过原子碰撞, 使 Fe 样品进行缺陷掺杂, 接着在没有

任何中间升温下,再用 500MeV 的 Fe 离子继续辐照,结果是使样品的电阻率和长度均减少。这个精彩的过程表明,电子阻止本领使先前建立的链得到退火。

Ga (镓)是唯一有稳定非晶相的纯金属(当基体温度低于 16K 时)。这个非晶态可以用快速淬火或者低能离子辐照获得。但是, E. Paumier 等人在 10K 辐照温度下,用 3 和 5GeV 的 Xe 离子辐照 Ga,辐照剂量从  $1 \times 10^{12}$  直到  $4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ ,没有发现电子阻止本领引起材料非晶化的迹象。

### 三、讨 论

上述的结果表明,在电导体中,电子阻止可以引起辐照损伤或原子位移。电阻率的确不是确定材料对电子阻止本领灵敏度的唯一有关参数。显然,原子结合的性质和原子结构的特性也对其有至关重要的影响。可以通过试验区别具有非金属键的电导体与金属系统。

我们发现,在有机金属和高  $T_c$  铜氧化物中,尽管自由电子的密度高,但在高电子阻

止本领辐照下,这些材料的特性与类似的绝缘材料的特性没有明显的差别。例如,超导体“123”类似于在绝缘材料石榴石 (granets) 中观测到的那些特性。然而,要证实自由电子对于缺陷产生机制没有影响是困难的。有关电阻率对损伤效率的影响,更为定量的研究工作仍在进行。

在金属系统中,原子的堆垛和表面对其性质似乎具有决定性的影响。到现在为止,仅仅在非晶合金和很薄的薄膜中观测到电子阻止本领的最强效应。电阻率(或电子-声子耦合)在电子阻止本领对辐照损伤贡献方面的作用,仍然是一个谜,有待今后进一步的探索。

在电导体中,一系列电子能损对原子位移贡献的实验现象,将吸引人们去开拓包括原子的和电子的机制在内的一些新概念。因为,通常所采用的模型,如热峰或库仑爆炸模型,在金属材料系统的应用中遇到了困难。

(程洁编译自 SWIFT HEAVY Ion In MATTER—89 (SHIM—89), H 部分 107—111;)

(上接第 53 页)

见。11 月 17 日至 22 日,代表团访问了兰州中科院近代物理所。苏联代表团这次来访是根据今年 8 月杜布纳联合核子研究所和近代物理所签定的科学合作意向书安排的,也是对今年 7 月以近物所所长魏宝文为首的 4 人代表团访苏的回访。

在当期间,苏联代表团与近代物理所就重离子核反应,核化学及加速器技术进行了深入的学术交流。Volkov 教授作了题为“在重离子反应中复合核生成的新方法”的报告。代表团成员 G. G. Gulbekian 教授介绍了杜布纳联合核研究所的重离子加速器;S. N. Dmitriev 教授介绍了“对 104 号、

105 号元素化学性质的研究”;V. B. Kutner 教授介绍了该所加速器的重离子源 (ECR 源)。近代物理所各主要研究室也介绍了本室的重离子核反应研究及 HIRFL 加速器的运行和改进情况,双方就共同感兴趣的问题进行了热烈的讨论,并在相互加深了解的基础上,具体讨论了今后 2~3 年的科学合作项目,包括:合作研究、情报资料交流、人员交流和共同培养研究生以及在实验设备加工方面的技术合作等。

杜布纳核研究所这次访问是富有成果的,增进了中、苏二国在核物理领域的合作与交流。

(中科院近代物理研究所 刘嘉玫供稿)