



快重离子在凝聚态物质中引起的效应——电子能损效应*

金运范 王志光

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 简述了快重离子在凝聚态物质中引起的效应——电子能损效应, 主要包括缺陷的产生和潜径迹的形成、各向异性的塑性形变、由弹性碰撞产生的缺陷的部分退火、相变(非晶化), 以及尝试性的理论解释.

关键词 电子能损效应 快重离子 凝聚态物质

分类号 O571.33

1 引 言

荷能重离子穿过凝聚态物质时, 主要通过两种几乎独立的过程损失其所携带的能量: (1)与靶原子核的弹性碰撞, 引起靶原子移位[核阻止本领 $(dE/dX)_n$]; (2)与靶原子电子的非弹性碰撞, 引起靶原子电子的电离和激发[电子阻止本领 $(dE/dX)_e$]. 能量为 0.1~300 MeV/amu 的快重离子在凝聚态物质中, 主要是通过后一种过程损失其能量. 在离子射程末端核阻止区以外的离子路径上, 电子能损起主导作用[$(dE/dX)_e$ 值可以达到几十 keV/nm], 电子能损与核能损之比 $(dE/dX)_e / (dE/dX)_n$ 达 10^3 量级. 因此, 快重离子在凝聚态物质中引起的效应, 本质上就是电子能损效应.

对凝聚态物质中电子能损效应的研究可以追溯到 1959 年 Silk 和 Barnes^[1]的工作, 他们用透射电镜(TEM)观测到了铀裂变碎片在云母中形成的损伤, 当时将这种损伤称为核径迹或裂变径迹. 在此后的十几年里, 人们在多种物质, 包括绝缘体^[2]和金属薄膜^[3~5]中观察到了核径迹, 这段时间对核径迹研究的主要都集中在蚀刻径迹的研究. 70 年代到

80 年代初, Dartyge 等人^[6~8]和 Albrecht 等人^[9]在非蚀刻径迹, 即潜径迹的研究中做出了重要贡献. 他们分别利用法国 Orsay 的 Alice 和德国 Darmstadt 的 Unilac 加速器提供的快重离子束, 通过小角度中子散射和 X 射线散射, 研究了快重离子在绝缘体材料(主要指云母)中潜径迹的大小和形貌. 从这些实验结果的分析中得出的普遍性结论为: 电子能损只能在大部分绝缘体和某些层状结构的半导体中产生效应, 生成潜径迹, 不能在金属或电导体中产生潜径迹. 在潜径迹形成机制的理论解释中, 大多采用了由凝聚态物质的电导率起关键性作用的库仑爆炸模型和热峰模型.

凝聚态物质中, 对电子能损效应的系统研究始于 80 年代初期. 国际上几台中高能量重离子加速器(如德国 GSI 的 Unilac、法国 Caen 的 GANIL、日本 RIKEN 的 RRC 和中国兰州的 HIRFL)的相继建成, 为该领域的研究提供了最基本的实验条件, 随之获得了一批较系统的实验结果^[10~35]. 80 年代中期以来, 电导体中几个未曾预想到的实验结果和随后的系统研究工作, 完全改变了人们对电子能损效应机理和产生条件的认识. 这

* 1997 - 10 - 15 收稿, 1998 - 03 - 16 收到修改稿.

* 国家自然科学基金(项目号 19675054)、中科院重点项目基金(项目号 KJ952-S1-423)、甘肃省自然科学基金、中科院留学回国择优支持基金和中科院兰州分院基金资助.

些实验结果和工作主要包括：电子能损引起的非晶态合金各向异性的塑性形变(生长和蠕变)^[26,29]、金属镍中弹性碰撞产生缺陷的退火^[17]、金属-非金属合金^[31]和金属-金属合金^[18]的非晶化、纯金属钛的相变^[23]、纯金属钛、锆和铁中缺陷的产生^[19,21]。这些结果不仅为理解电子能损效应的基本动力学过程提出了新的理论问题，同时也为电子能损效应的应用提供了新的可能。现将主要的实验结果(现象)和理论模型作一简要的评述。

2 实验结果

2.1 缺陷产生和潜径迹形成

近几年的实验结果证明，快重离子通过凝聚态物质时，将强电子激发能量转移给靶原子，并引起靶原子的位移而产生潜径迹。这似乎具有普遍性，即不仅在大部分绝缘体和部分层状结构的半导体中产生潜径迹，而且在金属、合金和超导体中也能产生潜径迹。凝聚态物质的原子堆垛(晶态和非晶态)和电子结构(绝缘体、半导体和金属)影响其潜径迹形成的阈电子能损值。

强电子激发引起缺陷产生和潜径迹形成的系统研究，是以快重离子在钇铁石榴石

(YIG)中引起的效应最为典型。Hansen 等人^[10]用 1.4 MeV/u 的 Xe 和 U 离子辐照 YIG 试样，是首例开展损伤和潜径迹形成机制研究的实验工作。他们由内转换电子的穆斯堡尔谱(CEMS)演绎出了损伤截面 A ，在假定生成缺陷为柱型的前提下，计算出潜径迹的半径 R_e 在 5~8.7 nm 之间。他们也用沟道背散射(CRBS)、TEM 和法拉第旋转等分析手段研究了损伤特征。几年后，Toulemonde 和 Studer 等人^[11~15]分别利用多种快重离子束(Ar、Kr、Mo、Xe、Pb 和 U, $E > 5$ MeV/u)，在很宽的电子能损范围(2~47 keV/nm)，用透射穆斯堡尔谱、高分辨电镜(HREM)、CRBS、饱和磁化强度测量和化学蚀刻等方法研究了损伤截面和损伤形貌随电子能损的演变规律，提出了一个表征强电子激发损伤水平的参数，即损伤效率 $\epsilon = A / (dE/dX)_e$ ，并将损伤效率与损伤形貌相联系。在此基础上，Meftah 等人^[16]又系统研究了低速范围($E \leq 3.6$ MeV/u)强电子激发在 YIG 中引起的损伤。他们用 15 MeV ¹⁹F、50 MeV ³²S、650 MeV ¹⁸²Ta、750 MeV ²⁰⁸Pb 和 666 MeV ²³⁸U 辐照了外延生长在 [111]-Gd₃Ga₅O₁₂ 衬底上的 YIG 膜，从 CRBS 谱上

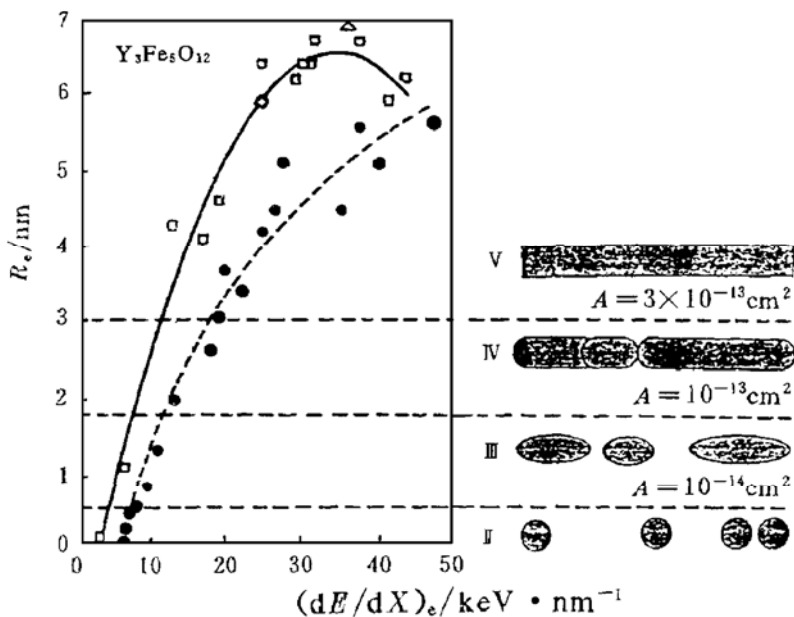


图 1 快重离子辐照 YIG 产生潜径迹的有效半径 R_e 随 $(dE/dX)_e$ 的变化和对应的损伤形貌^[16]

求得了损伤截面 A ，并与 Toulemonde 和 Studer 等人的快重离子辐照的实验结果进行了比较(见图 1). 图中黑点和方框分别为高速和低速离子辐照的情况. 区域 II: 电子能损超过了核能损, 潜径迹半径 $R_e < 0.56$ nm, 扩展缺陷为球形; 区域 III: 0.56 nm $< R_e < 1.8$ nm, 球形缺陷重叠, 柱状缺陷出现; 区域 IV: 1.8 nm $< R_e < 3.1$ nm, 柱形缺陷重叠, 潜径迹的化学蚀刻开始有效; 区域 V: $R_e > 3.1$ nm, 缺陷为长柱形, 在柱内损伤均匀. 区域 I 未标出, 损伤是由核碰撞引起的. 所有实验结果表明, 在很大的 $(dE/dX)_e$ 范围内, 对于一个给定的 $(dE/dX)_e$ 值, 低速离子的损伤截面大于高速离子的损伤截面, 而且离子速度的差别愈大, 损伤截面的差别也愈大. 他们用离子能量沉积效应解释了这种差

异, 即低速离子比高速离子的能量沉积更集中于入射粒子的路径周围. 这种差异称之为损伤截面的速度效应.

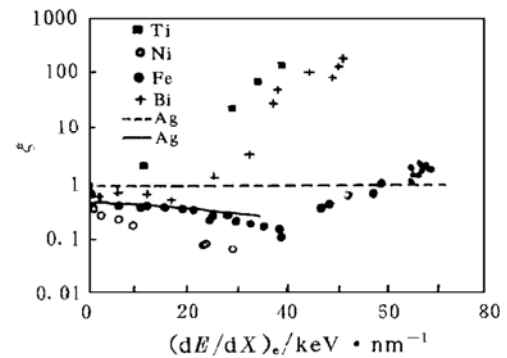


图 2 损伤效率 ξ 随 $(dE/dX)_e$ 的变化^[24]

表 快速 Pb 和 U 离子与 C₆₀团簇离子辐照 Ti、Zr 靶产生潜径迹形貌的比较^[22]

| 靶 | 离子 | 能量(MeV) | 速度(cm · ns ⁻¹) | $(dE/dX)_e/\text{keV} \cdot \text{nm}^{-1}$ | 观察结果 |
|----|-----------------|---------|----------------------------|---|---------------------------|
| Ti | Pb | 845 | 2.8 | 36 | 点状径迹 R_e 约为 2.5 nm |
| | C ₆₀ | 18 | 0.22 | 43 | 近连续径迹 R_e 为 7.5~12.5 nm |
| Zr | U | 5 550 | 6.7 | 41 | 未观测损伤 |
| | C ₆₀ | 18 | 0.22 | 44 | 点状径迹 R_e 为 5~10 nm |

Dunlop 和 Dammak 等人^[18~23]对纯金属电子能损效应的研究做出了重要贡献, 他们先后在 Fe、Ti、Co、Zr 和 Be 中观测了强电子激发引起的效应, 用多种 GeV 能量的快重离子辐照这些金属靶, 用低温在线电阻测量和 TEM 观测研究了辐照产生的缺陷和潜径迹的形成. Dufour 等人^[24,25]也对低熔点金属中电子能损效应进行了系统地研究. 图 2 给出了 Ni、Ti、Fe、Ag 和 Bi 的损伤效率 $\xi = \Delta\rho/\sigma_n\rho_f$ 随 $dE/dX)_e$ 的变化关系, 其中 $\Delta\rho$ 为与产生缺陷的数目成正比的电阻率增量, σ_n 为核损伤截面, ρ_f 为 Frenkel 缺陷对的电阻率. 从图中可看出, Ag 是一种对电子能损不敏感的材料, 对应 Ag 的两条曲线是两种速度下核弹性碰撞的结果. 在 Ni 中, 电子能损

引起缺陷的退火 [$(dE/dX)_e > 10$ keV/nm]; 而在 Fe 中, 当 $(dE/dX)_e > 20$ keV/nm 时才引起缺陷的退火, 在 $(dE/dX)_e > 40$ keV/nm 时引起了缺陷的产生. 在 Ti 和 Bi 中有大的损伤截面. Dunlop 和 Dammak 等人^[22]还用 18 MeV 的 C₆₀团簇离子辐照了纯金属 Ti 和 Zr 靶, 研究了单原子离子和团簇离子在金属材料中引起效应的差异(见表). 从表可看出, 尽管 C₆₀与单原子离子有着非常接近的电子能损值, 但其速度却比后者低一个数量级, 因此 C₆₀在穿过凝聚态物质时的慢化过程中, 沉积的能量比快单原子离子更集中, 引起损伤的程度就更高. 另外, 王志光等人^[25]用 4 MeV/u Kr 和 42.9 MeV/u Xe 离子分别辐照处于 100 K 的 Bi 试样(两种离子在 Bi 中的

$(dE/dX)_e$ 均约为 17 keV/nm), 在线测量试样电阻率随辐照剂量的变化, 得出低速离子辐照引起的损伤效率是高速离子辐照的 2~4 倍, 由此建立了金属中电子能损引起损伤的入射离子速度效应的概念.

2.2 各向异性塑性形变(生长和蠕变)

快重离子电子能损效应的典型首例, 是 Klaumunzer 等人^[26,27]用扫描电镜和光学显微镜在 285 MeV Kr 离子辐照 Pd₈₀Si₂₀合金中观察到的各向异性的生长现象, 即在材料密度变化很小($\leq 0.2\%$)的情况下, 辐照试样沿垂直离子束方向增大, 而沿平行离子束方向收缩. 他们将潜伏剂量以下缺陷的产生或自由体积的建立归结为核碰撞效应, 而将潜伏剂量以上的生长现象归结为电子能损的影响. Auduard 等人^[29~31]用能量为 GeV 量级的 Ar、Kr、Mo、Xe 在 77 K 和 200 K 下辐照了非晶 Fe₈₅B₁₅(或 Pd₈₀Si₂₀)试样, 入射粒子束与试样表面法线之间的夹角在 0°~60°之间变化. 通过在线电阻测量, 证明电子能损可在非晶合金中产生缺陷, 辐照产生的所有现象(潜伏剂量以下缺陷的建立和潜伏剂量以上的各向异性生长)都是电子能损引起的. 他们用一个解析公式将电阻的相对变化 $\Delta R/R_0$

与缺陷产生引起电阻率的相对变化 $\Delta\rho/\rho$ 和各向异性生长 $\Delta_{\perp} = \Delta L(\theta=0)/L$ 联系起来, 可将其表示为

$$\Delta R/R_0 = \Delta\rho/\rho + 2\Delta_{\perp} (1 - \sin 2\theta). \quad (1)$$

式中, $\Delta\rho/\rho$ 正比于缺陷的浓度, 在高剂量下达到饱和, 即在潜伏剂量以下 $\Delta R/R_0$ 的变化是由 $\Delta\rho/\rho$ 引起的, 即由缺陷的产生引起; 右边第二项是试样相对尺度的变化, 是各向异性生长的贡献, 显然它与离子束的入射方向有关(θ 为入射束流与试样表面法线之间的夹角). 图 3 是 3 GeV Xe 离子以不同入射方向辐照处于 77 K 低温时的非晶合金 Fe₈₅B₁₅ 的实验结果. 从图中看出, 在低剂量区($< 2 \times 10^{12}$ Xe/cm²)所有曲线几乎重合, 与离子入射方向无关; 在高剂量区($> 2 \times 10^{12}$ Xe/cm²), 由于各向异性的生长现象与离子的入射方向直接相关, 因此使得几条曲线分离甚远. 他们认为各向异性的生长是离子辐照产生的局域应力弛豫的结果, 并验证出在外加应力条件下(0~600 MPa)离子束穿过试样时, 在剂量超过同样的潜伏剂量后便产生蠕变, 而且认为蠕变现象来源于极化应力.

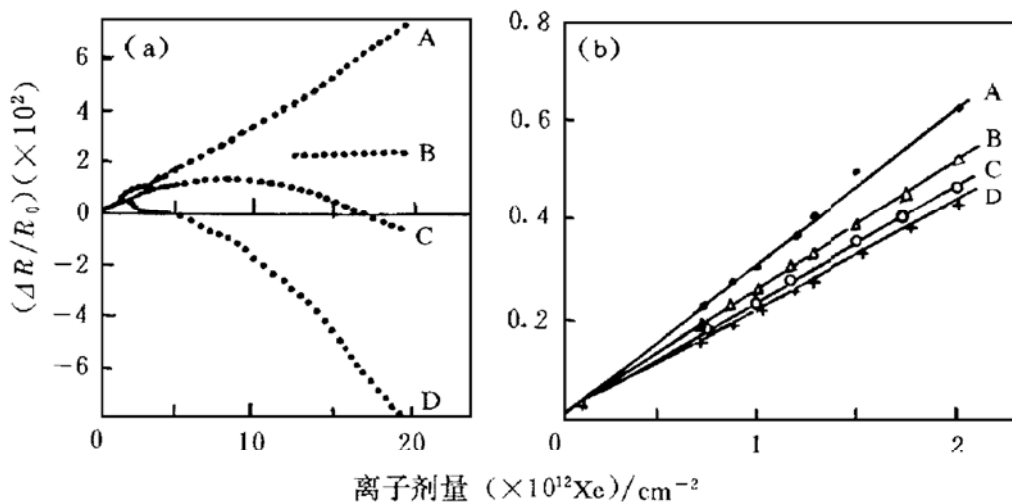


图 3 3 GeV Xe 离子辐照 77 K 非晶合金 Fe₈₅B₁₅ 试样的相对电阻 $\Delta R/R_0$ 随辐照剂量的变化^[29]

A、B、C、D 分别对应于不同的束流入射角: ~0°, ~30°, ~45°, ~60°; (b)低剂量, (a)高剂量.

实验结果表明,各向异性生长现象是非晶态材料的特殊行为,它依赖于电子能损,同时也与辐照温度有关.在阈电子阻止本领以上,非晶态材料都将对强电子激发敏感,发生宏观可见的各向异性生长现象;用同一种离子辐照时,各向异性生长随辐照温度的增加而降低.

2.3 弹性碰撞所建立的缺陷的部分退火

强电子激发在纯金属靶中引起效应的第一个实验,是 Iwase 等人^[17]用能量不小于 100 MeV 的重离子低温辐照 Ni 靶,观察到 Stage-I 缺陷恢复的反常减小.他们用能量分别约为 1 MeV(低能)和 100 MeV(高能)的多种离子辐照了蒸发沉积在 Al₂O₃ 衬底上、厚度为 0.25 μm 的 Ni 试样,样品厚度远小于离子的投影射程,以保证离子完全穿过,辐照期间样品温度保持在约 10 K.各种离子的辐照剂量有所不同,以保证每个样品

中具有几乎相同的缺陷浓度,因而具有几乎相同的电阻率增量(≈0.5 μΩ·cm).退火实验是在一个恒定加热率条件下进行的,退火温度范围 10~300 K,测量记录了相应的电阻率值.在同一温度点,辐照前后两组测量结果之差就是该温度点剩余缺陷的电阻率.对于低能离子和 84 MeV 的 ¹²C 离子辐照,Stage-I 缺陷的恢复量随 PKA 能量中值 $T_{1/2}$ 的增加有规律地变化,而高能离子辐照下,Stage-I 缺陷的恢复行为与低能离子辐照时相比,差别很大,既使在同一 $T_{1/2}$,其恢复量也比低能离子辐照时小得多(见图 4a).高能 Si、Cl、Br 和 I 离子辐照 Stage-I 缺陷恢复的反常减小与 $T_{1/2}$ 无关,但强烈地依赖于电子能损(见图 4b).这个现象不能在核碰撞引起缺陷产生和退火的框架下进行解释.因此,引入了电子能损将增强 Stage-I 间隙子与点阵空位结合的机制.

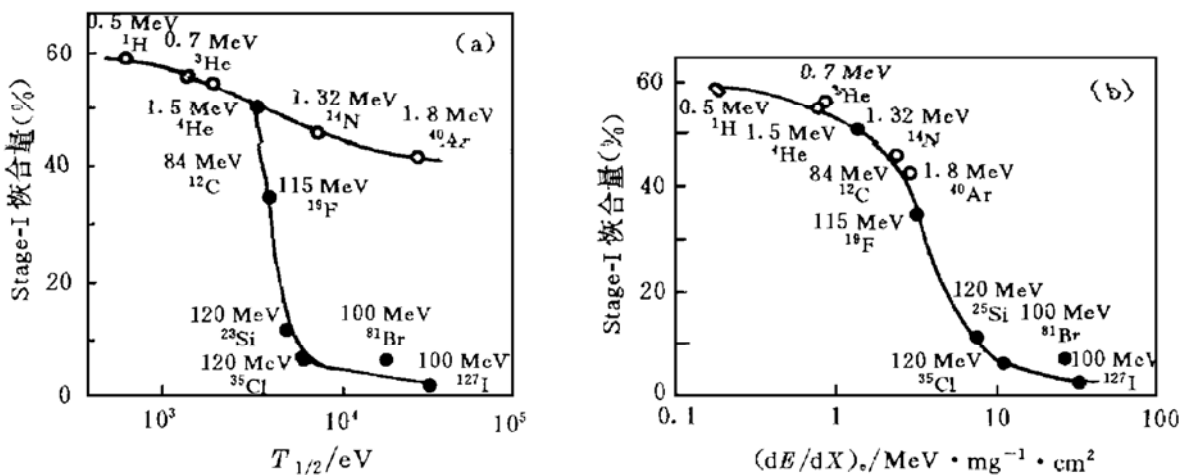


图 4 辐照 Ni 试样中 Stage-I 的恢复量随 PKA 能量中值(a)和电子能损(b)的变化^[17]
空心点 低能, 实心点 高能.

Iwase 等人认为电子的激发能通过电子-声子相互作用转移给点阵原子,这种能量的转移引起点阵扰动,从而导致沿离子路径局域温度的升高.低能离子辐照时,转移给电子、而后转移给点阵原子的能量相对小,沿离子路径局域温升也小,因此电子激发对 Stage-I 缺陷恢复的影响很小,此时核碰撞主宰了 Stage-I 缺陷的恢复行为.在 高能离子辐照下,离子转移给电子的能量大,电子-声子

相互作用强,当沿离子路径局域温升达到或超过 Stage-I 温区时,Stage-I 间隙子与点阵空位复合,导致 Stage-I 恢复的反常减小.

但是,在周期表紧靠 Ni 的 Cu 中,观察到的 Stage-I 缺陷恢复的幅度比 Ni 的要小得多,很难确定这种减小是电子能损引起的还是核能损引起的.

Dunlop 等人^[32]在 Fe 靶中观察到了与 Ni 靶中类似的结果.他们首先用 10~170 MeV

Fe 离子在 5 K 温度下辐照厚度为 11 μm 的 Fe 靶, 通过核碰撞对 Fe 靶进行缺陷掺杂, 使产生的缺陷均匀分布于整个 Fe 靶中(平均缺陷浓度为 4×10^{-4}), 接着在相同温度下用 500 MeV Fe 离子辐照, 离子穿过 Fe 靶后的能量为 360 MeV, 第二次辐照引起了电阻率和 Fe 靶长度的减小, 表明电子能损使预先引入的缺陷发生了退火.

2.4 相变(晶态→非晶态转变)

截止目前, 还没有看到电子能损引起非晶态材料体相晶化的实验例证, 但晶态材料的非晶化的确是比较普遍的现象. 广义地讲,

倾斜角为 3° 时, 分析深度约为 0.5 μm . 因此, 借助于 STD 谱可给出堆叠样品组中快重离子引起损伤的深度分布和在特定 $(dE/dX)_e$ 值的损伤程度. 图 5 给出了兰州重离子研究装置(HIRFL)提供的 1 GeV Ar 离子在 YIG 中引起的损伤随电子能损的演变关系. 由图可见, 只有在一定的电子能损值(阈电子能损)和辐照剂量(临界辐照量)下, 几乎完全的非晶化才能发生, 而这种晶态→非晶态转变完全是由电子能损引起的, 因为弹性碰撞引起的原子位移的数目为 0.002 dpa, 与弹性碰撞使 YIG 非晶化的临界值 1 dpa 相差甚远.

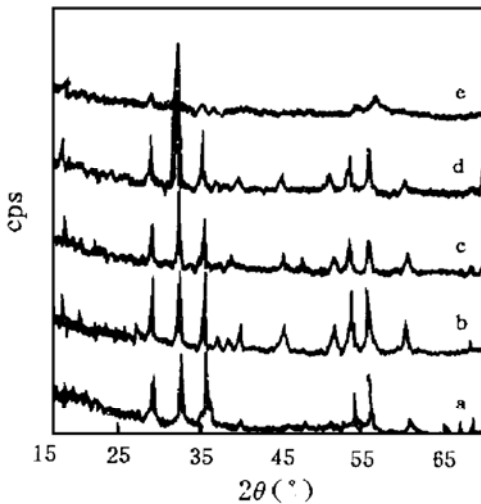


图 5 1 GeV Ar 离子在 195 K 下辐照 YIG 试样至 1.0×10^{14} Ar/cm² 的 STD 谱形随不同 $(dE/dX)_e$ 的变化^[33]

a 未辐照, b 2.5 MeV/ μm , c 3.0 MeV/ μm ,
d 4.1 MeV/ μm , e 8.3 MeV/ μm .

观察到了快重离子在凝聚态物质中的潜径迹就等于观察到了电子能损引起的物质晶态→非晶态转变. 潜径迹形貌最详细的研究是在磁氧化物中完成的. 研究表明, 随电子能损的增加潜径迹的形貌演变形式为: 球形→不连续柱形→连续柱形(如图 1 所示). 磁氧化物中潜径迹的研究使用了背散射(RBS)、穆斯堡尔谱和 HREM 等多种分析方法^[33~35], 得到了比较一致的结果. 倾斜样品的 X 射线衍射分析(STD), 随样品倾斜角的变化, 分析深度有较大的变化, 如 YIG 样品

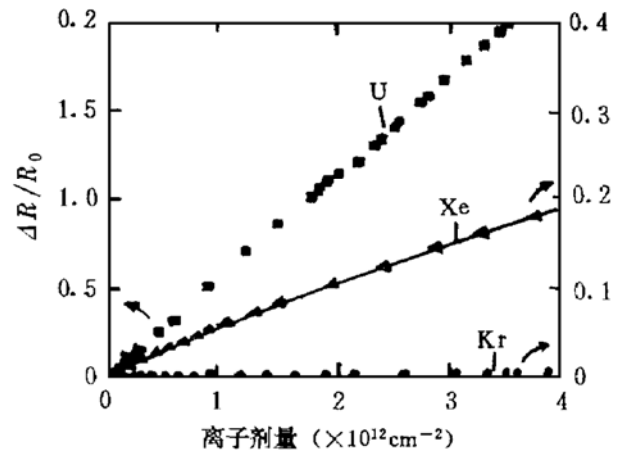


图 6 在低温(10 K)下辐照晶态 Ni₃B 试样相对电阻的改变随辐照剂量的变化^[30]

在金属晶态合金中, 最引人注目的电子能损效应是非晶化. 现已在几种快速淬火能够非晶化的合金中观察到了高电子激发引起的晶态→非晶态转变. 代表性的工作是 Auduard 等人^[31]在合金 Ni₃B 中观察到的非晶化现象. 他们用 GeV 能量的 Kr、Xe、U 离子在低温(10 K 或 80 K)下辐照了厚度为 20 μm 的晶态 Ni₃B 样品, 样品堆积的总厚度远小于离子的射程, 以便有利于调节每个样品中的 $(dE/dX)_e$ 值(12~72 keV/nm), 用四探针在线电阻测量和电子衍射分析了高电子激发引起的效应(如图 6 所示). 分析结果表明, U 离子辐照样品 $\Delta R/R$ 的变化很大, 当辐照量为 4×10^{12} ions/cm² 时, $\Delta R/R > 2$, 辐照结束时电阻率为 44 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$, 而且随剂量的增加电阻率仍在线性增加, 这与非晶态 Ni₃B 的电

阻率 $80 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 相差不远, 从而说明发生了晶态 \rightarrow 非晶态转变. 另外, 对样品电阻率温度系数测量和用 TEM 观测也得到了同样的结论. Ni_3B 中发生的非晶化现象显然也起因于电子能损, 因为此时弹性碰撞引起每个原子的平均位移数 (dpa) 仅为 2×10^{-4} , 这与已证明的弹性碰撞引起非晶化的最低原子位移数 0.1 dpa 相差甚远.

金属合金的非晶化只能发生在很高电子激发的情况下, 而且也只使损伤径迹的核心区被非晶化, 核心区以外虽然也已无序, 但仍保留一定的晶体相^[36]. 在电子能损引起凝聚态物质晶态 \rightarrow 非晶态转变过程中, 存在一个阈电子能损值, 当电子能损超过这个阈值时, 连续的柱形径迹形成, 非晶化发生. 通常在绝缘体中这个阈值小于 10 keV/nm , 而在金属靶中则为 $30 \sim 50 \text{ keV/nm}$. 这就是在 GeV 能量重离子加速器建成之前, 人们没有观察到电子能损在金属体相材料中引起效应的真正原因.

3 理论模型

为了理解快重离子在凝聚态物质中电子能损效应产生的基本动力学过程, 首先要理解能量转移机制, 即电子的激发能如何转移到靶原子上, 使靶原子产生移位. 为此援引了两种基本机制: 离子爆炸峰和热峰.

3.1 离子爆炸模型

离子爆炸模型是为解释带电粒子通过绝缘体材料时强损伤区 (径迹) 的形成而提出的一个近似模型^[37]. 离子爆炸机制用直接的、突然的且在时空上相关的能量转移表征: 高速运动的带电粒子通过物质后, 10^{-15} s 内在带电粒子路径周围的原子被爆炸式电离, 沿入射粒子路径径向发射的电子引起邻近原子次电离, 电离后的近邻原子受库仑静电力的排斥而离开原来的位置, 形成间隙子和点阵空位; 此后通过弹性弛豫使强烈应力分散到更大的范围, 形成潜径迹. 这种模型比较直

观, 适合于低机械强度、低介电常数和密堆积结构物质辐照效应的估算.

Dunlop 等人^[38]为了解释其它非辐射分解物质中损伤的建立, 提出了改进的离子爆炸模型. 他们已经测定, 在阻止本领的 Bethe 区, 离子爆炸期间原子接受的动能粗略地随 $(dE/dX)_e^4 \equiv \eta^4 \propto (Z_1^* V_0/V)^4$ 变化, Z_1^* 为入射离子的有效电荷, V 为离子的速度, V_0 为玻尔速度. 实验已经证明, 电子引起损伤的截面随 η^8 变化, 即潜径迹半径 R_e 应跟随 $(dE/dX)_e^2$ 变化. 用 $(dE/dX)_e^n$ 关系拟合现有的 R_e 数据, 发现不能得到唯一的 n 值; 在 $R_e < 2 \text{ nm}$ 时, 有 $n=3$; 而当 $R_e > 2 \text{ nm}$ 时, 则有 $n=0.5$. 因此, 改进模型也并不能标度新的实验结果.

3.2 热峰模型

热峰模型也是目前应用较为广泛的模型^[39], 它是基于高速重离子穿过凝聚态物质时, 靶原子被高度电离和激发, 电离和激发电子通过电子-电子相互作用形成热电子气, 然后通过电子-声子相互作用使离子路径周围的小柱体内短时间局域温度升至熔点, 接着以 $10^{13} \sim 10^{15} \text{ K/s}$ 的速度冷淬下来 (一般在非晶态材料制备过程中的冷却速度为 10^6 K/s), 导致永久性损伤. 在该模型中, 假定激发电子气的温度 T_e 可以确定 (激发电子开始被限定在离子路径周围很小的柱体内, 热电子通过电子-声子相互作用与点阵原子相互作用), 点阵的温度 T_l 也可以确定, T_l 增加的持续时间高于几个声子振动的特征时间 (10^{-13} s). 如果这个判据满足, 根据电子和点阵之间的能量转换率, 点阵温度 T_l 可达到足够高的值, 允许永久损伤发生, 如相变和熔化. 粗略估计, $T_e \approx 10^5 \text{ K}$, $T_l \approx 10^3 \text{ K}$. 对于 d 层或 f 层电子, T_l 会更高.

利用此模型时, 除了要知道入射离子速度、电子能损和靶材料之外, 还需知道靶材料的热扩散系数、热传导系数、比热、电子气密度、德拜 (Debye) 温度和电导率等. 对于

多数材料而言, 这是难以做到的。

4 结 论

大量的实验结果证明, 高电子激发可以在凝聚态物质中引起种种效应, 如缺陷的产生和退火、非晶合金中各向异性的塑性形变以及引人注目的某些合金中潜径迹的产生和非晶化现象等。引起效应的种类和程度的差异除了与电子能损的大小直接相关外, 还与入射离子的速度、靶物质的原子堆垛、电子结构和其它性质有关。快重离子在凝聚态物质中电子能损效应基本动力学过程的核心问题, 是电子的高激发能向靶原子转移的微观机制, 为此提出了两个相近似的理论模型。其一是热峰模型, 在此模型中激发电子通过电子-声子耦合, 把自身所携带的能量转移给点阵原子; 其二是离子爆炸模型, 在该模型中激发电子的部分能量立即直接地转移给点阵原子。这两个模型只能在一定条件下解释电子能损效应的某些特征和性质, 但还有一些最基本的问题仍然不很清楚, 有待于进一步的探讨和解决, 如电子的激发能如何转化为原子的运动能仍没有一个较为普遍的、有说服力的解释; 损伤效率、损伤水平到底与哪些因素有关? 诸如此类的问题无疑是今后研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Silk E C H, Barnes R S. Examination of Fission Fragment Tracks with an Electron Microscope. *Phil Mag*, 1959, 4: 970~972
- 2 Fleisher R L, Price P B, Walker R M. Tracks of Charged Particles in Solids. *Science*, 1965, 149: 383~393
- 3 Merkle K L. Fission-fragment Tracks in Metal and Oxide Films. *Phys Rev Lett*, 1962, 9: 150~153
- 4 Noggle T S, Stiegler J O. Fission Fragment Tracks in Metal Films. *J Appl Phys*, 1962, 33: 1726~1729
- 5 Andersen H H, Knudsen H, Moller Petersen P. Degradation of Discontinuous Films under MeV Heavy ion Bombardment. *J Appl Phys*, 1978, 49: 5638~5647
- 6 Dartyge E, Lamber M. Formation De Defaults Dans Des Echantillons de Mica Muscovite Irradies Par des Ions de Grande Energie. *Rad Effects*, 1974, 21: 71~79
- 7 Dartyge E, Duraud J P, Langevin Y. New Model of Nuclear Particle Tracks in Dielectricminerals. *Phys Rev*, 1981, B23: 5213~5229
- 8 Dartyge E, Sigmund P. Tracks of Heavy Ions in Muscovite Mica: Analysis of the Rate of Production of Radiation Defects. *Phys Rev*, 1985, B32: 5429~5431
- 9 Albrecht D, Armbruster P, Roth M et al. Small Angle Neutron Scattering from Oriented Latent Nuclear Tracks. *Rad Effects*, 1982, 65: 145~148
- 10 Hansen P, Heitmann H, Smit P H. Nuclear Tracks in Iron Garnet Films. *Phys Rev*, 1982, B26: 3539~3546
- 11 Toulemonde M, Fuchs G, Nguyen N et al. Damage Processes and Magnetic Field Orientation in Ferrimagnetic Oxides $Y_3Fe_5O_{12}$ and $BaFe_{12}O_{19}$ Irradiated by High-energy Heavy Ions: A Mössbauer Study. *Phys Rev*, 1987, B35: 6560~6569
- 12 Toulemonde M, Enault N, Jin Y F et al. Does Continuous Trail of Damage Appear at the Electronic Stopping Power Damage Rate. *J Appl Phys*, 1990, 68: 1545~1549
- 13 Houpert C, Studer F, Pascard H et al. Influence of the Substrate Temperature on the Latent Track Damage Cross Section in Magnetic Insulators. *Nucl Tracks Radiat Meas*, 1991, 19: 85~90
- 14 Studer F, Houpert C, Pascard H. Saturation in the Damage Efficiency in Magnetic Insulators Irradiated by High Energy Heavy Ions. *Rad Eff Def in Sol*, 1991, 116: 59~70
- 15 Studer F, Toulemonde M. Irradiation Damage in Magnetic Insulators. *Nucl Instr and Meth*, 1992, B65: 560~567
- 16 Meftah A, Brisard F, Costantini J M. Swift Heavy Ions in Magnetic Insulators: A Damage-cross-section Velocity Effect. *Phys Rev*, 1993, B48: 920~925
- 17 Iwase A, Sasaki S, Iwata T et al. Anomalous Reduction of Stage-I Recovery in Nickel Irradiated with Heavy Ions. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 2450~2453
- 18 Barbu A, Dunlop A, Lesueur D et al. Latent Tracks Do Exist in Metallic Materials. *Europhys Lett*, 1991, 15: 37~42
- 19 Dunlop A, Lesueur D. Damage Creation via Electronic Excitations in Metallic Targets Part I: Experimental Results. *Rad Eff Def in Sol*, 1993, 126: 123~128
- 20 Dunlop A, Lesueur D. Irradiation of Metallic Targets with High-energy Heavy Ions: High Electronic Excitation Induced Effects. *Mat Sci Forum*, 1992, 97~99: 553~576
- 21 Dunlop A, Lesueur D, Legrand P et al. Effects Induced by High Electronic Excitations in Pure Metals: a De-

- tailed Study in Iron. Nucl Instr and Meth, 1994, B90: 330~338
- 22 Dammak H, Dunlop A, Lesueur D et al. Tracks in Metals by MeV Fullerenes. Phys Rev Lett, 1995, 74: 1135~1138
- 23 Dammak H, Dunlop A, Lesueur D et al. Phase Transformation Induced by Swift Heavy Ion Irradiation of Pure Metal. Nucl Instr and Meth, 1996, B107: 204~211
- 24 Dufour C, Wang Z G, Levalois M et al. Sensitivity of Metallic Materials under Irradiation with Swift Heavy Ions. Nucl Instr and Meth, 1996, B107: 218~222
- 25 Wang Z G, Dufour C, Cabeau B et al. Velocity Effect on the Damage Creation in Metals in the Electronic Stopping Power Regime. Nucl Instr and Meth, 1996, B107: 175~179
- 26 Klaumunzer S, Schumacher G. Dramatic Growth of Glassy Pd₈₀Si₂₀ during Heavy Ion Irradiation. Phys Rev Lett, 1983, 51: 1987~1990
- 27 Hou Ming-dong, Klaumunzer S, Schumacher G. Dimensional Changes of Metallic Glasses During Bombardment with Fast Heavy Ions. Phys Rev, 1990, B41: 1144~1157
- 28 Klaumunzer S. Plastic Flow of Amorphous Materials Induced by Swift Heavy Ions. Mat Sci Forum, 1992, 97~99: 623~630
- 29 Auduard A, Balanzat E, Fuchs G et al. Radiation Damage Induced by Electronic Energy Loss in Amorphous Metallic Alloys. Europhys Lett, 1988, 5: 241~245
- 30 Auduard A, Balanzat E, Jousset J C et al. Evidence for Amorphization of a Metallic Alloy by Ion Electronic Energy Loss. Phys Rev Lett, 1990, 65: 875~880
- 31 Auduard A, Balanzat E, Jousset J C et al. Atomic Displacements and Atomic Motion Induced by Electronic Excitation in Heavy-ion-irradiated Amorphous Metallic Alloys. J Phys: Condens Matter, 1993, 5: 995~1018
- 32 Dunlop A, Lesueur D, Jaskieronic G et al. Influence of very High Electronic Energy Losses on Defect Configurations in Self-ion Irradiated Iron. Nucl Instr and Meth, 1989, B36: 412~419
- 33 Jin Y F, Xu R H, Quan J M et al. 1 GeV Ar Ions Induced Amorphization in Garnet. Nucl Instr and Meth, 1996, B107: 227~231
- 34 金运范, 权晶明, 徐荣辉等. 高能氩离子在钇铁石榴石中引起的非晶化研究. 核技术, 1996, 19: 1~4
- 35 Jin Y F, Han J, Meng Q H et al. Investigation of the Dependence of Fraction of Damage Phase in Garnet Irradiated by 1 GeV Ar Ions on Electronic Energy Loss and Irradiation Dose. Nucl Instr and Meth, 1998, B135: 190~195
- 36 Barbu A, Dunlop A, Henry J et al. Phase Transformations in Metallic Targets Submitted to Very High Electronic Excitations. Mat Sci Forum, 1992, 97~99: 577~586
- 37 Fleischer R L, Price P B, Walker R M. Ion Explosion Spike Mechanism for Formation of Charge-particle Tracks in Solids. J Appl Phys, 1965, 36: 3645~3652
- 38 Lesueur D, Dunlop A. Damage Creation Via Electronic Excitations in Metallic Targets, Part II: A Theoretical Model. Rad Eff Def in Sol, 1992, 126: 163~172
- 39 Toulemonde M, Dufour C, Paumier E. Transient Thermal Process after a High-energy Heavy-ion Irradiation of Amorphous Metals and Semiconductors. Phys Rev, 1992, 46: 14362~14369

Swift Heavy Ion Induced Effects in Condensed Matter—— Electronic Energy loss Effects

Jin Yunfan Wang Zhiguang

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract Swift heavy ion induced effects in condensed matter, the electronic energy loss effects, which mainly include defect creation and latent track formation, anisotropic deformation, partial annealing of defects created by nuclear collisions and phase transformation (amorphization) as well as tentative models; the ion explosion spike model and the thermal spike model, are reviewed.

Key Words electronic energy loss effect swift heavy ion condensed matter