

文章编号: 1007-4627(2000)02-0100-06

纯金属中电子能损效应的实验研究*

王志光, 金运范, 侯明东

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 简要评述了快重离子辐照在纯金属中引起的电子能损效应的实验研究结果, 特别是强电子能损在金属中引起的辐照缺陷的部分退火, 新缺陷的产生, 离子潜径迹的形成和辐照相变等。

关键词: 快重离子; 纯金属; 电子能损效应

中图分类号: O571.33 **文献标识码:** A

1 引言

荷能离子穿过物质时, 主要通过核阻止和电子阻止两种几乎独立的过程损失其所携带的能量。核阻止过程中的能量损失为核能损 $(dE/dX)_n$, 主要引起靶原子移位; 电子阻止过程中的能量损失为电子能损 $(dE/dX)_e$, 主要引起靶原子的电离和激发。事实上, 能量高于 0.1 MeV/u (速度高于 Bohr 速度 $e^2/\hbar = 2.19 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 的快重离子在物质中主要通过电子阻止损失能量, 其电子能损与核能损之比 $(dE/dX)_e / (dE/dX)_n$ 可达 10^3 量级。

自50年代末在绝缘体材料中发现电子能损引起的损伤^[1]以来, 人们已经开展了大量电子能损效应的研究工作^[2~6], 对电子能损在绝缘体材料的缺陷产生过程中所扮演的角色已达共识, 并对效应产生的机理作了探讨^[2,4,6,7]。直到80年代初, 电子能损在金属中引起损伤仍是不可思议的。因为传导电子在金属中的快速运动, 会将沉积于电子系统中的能量快速散失, 从电子系统向点阵原子的能量转移可以忽略, 即电子能损不可能在金属中产生损伤。但进入80年代, 随着中高能重离子加速器建成并投入运行, 电子能损效应的研究进入了一个新的时期。80年代中期, 人们利用 GeV 级的快重离子束流(在材料中的电子能损值可达几十 keV/nm)进行实验, 在金属材料靶中观测到了一系列由电子能损引起的新现象, 如塑性形变^[8~11]、金属中缺陷的辐照退

火^[12~14]与产生^[15~22]、潜径迹形成^[23~25]、相变^[18,19,26]以及金属中辐照损伤产生的入射离子速度效应^[27]等, 获得了一批比较系统的实验结果^[28~30]。这些实验现象和结果, 完全改变了人们对电子能损效应机理和产生条件的认识, 为电子能损效应的基本动力学过程研究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。下面将对近十年来得到的纯金属中电子能损效应的主要实验结果和现象作一简要评述。

2 主要实验结果

2.1 电子能损引起部分缺陷的退火

长期以来普遍认为, 在金属中辐照引起的原子位移和缺陷的退火可能仅由荷能粒子与靶原子的弹性碰撞引起, 而沉积到电子系统的能量不会影响辐照损伤和退火过程。Iwase 等人用能量不小于 100 MeV 的重离子低温辐照 Ni 靶引起缺陷辐照退火的实验^[12], 改变了人们的传统看法。通常, 在液氮温度下辐照, 大多数金属产生的缺陷将被冻结, 在随后的退火过程中, 由于缺陷的热激活运动, 在几个温区发生缺陷的复合。在 Stage-I 缺陷复合温区, 只有单个的间隙子可以迁移运动并与空位复合, 因此 Stage-I 缺陷复合的百分数可以用来监测辐照产生的间隙子的退火。Iwase 等人通过研究辐照 Ni 靶中缺陷的退火, 发现用相对低能的 ^1H , ^3He , ^4He ,

修改日期: 1999-01-20, 收修改稿日期: 1999-09-13

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19875069, 19875054); 中科院重点基金资助项目(KJ952-S1-423); 中科院留学回国择优支持基金资助; 中科院兰州分院基金资助

作者简介: 王志光(1963-)男(汉族), 山东青州市人, 博士, 副研究员, 从事快重离子与凝聚态物质相互作用研究。

^{14}N , ^{40}Ar 离子(约1 MeV, $(dE/dX)_e$ 较小)辐照后, 样品退火中缺陷的 Stage-I 恢复量随初级击出原子能量中值 $T_{1/2}$ 的增加近似线性减少; 而用相对高能 ^{12}C , ^{19}F , ^{28}Si , ^{35}Cl , ^{81}Br , ^{127}I 离子(能量约100 MeV, $(dE/dX)_e$ 较大)辐照后, 样品退火中缺陷的 Stage-I 恢复量随 $T_{1/2}$ 的增加非线性快速减少. 还发现对于所有离子辐照, Ni 中缺陷的 Stage-I 恢复量随着 $(dE/dX)_e$ 的增加而单调下降. 这些结果表明, 从激发电子系统到点阵原子的能量转移, 导致了约100 MeV 离子辐照过程中单个间隙子的湮灭, 即电子能损引起了缺陷的辐照退火.

为了更准确地检测电子能损效应, Iwase 等又进行了如下实验^[13]: 首先通过84 MeV 的 ^{12}C 离子辐照(约 5×10^{15} ions/cm²) 在 Ni 箔样品中掺入一定浓度的简单缺陷, 紧接着用100 MeV 的 ^{127}I 离子(在 Ni 中, $(dE/dX)_e \approx 30$ keV/nm) 进行辐照, 在 ^{12}C 和 ^{127}I 离子辐照过程中, 保持样品温度低于10 K, 检测样品电阻率的改变 $\Delta\rho$, 从而观测缺陷变化情况. 实验结果显示, 大约一半由 ^{12}C 离子辐照掺入的缺陷被低剂量(约 2×10^{12} cm⁻²) 的 ^{127}I 离子辐照所湮灭, 退火实验中 Stage-I 缺陷几乎完全消失. 这明确表明, 高密度的电子激发或强电子能损引起了辐照缺陷的退火(单个间隙子的湮灭). 同时对 Cu 样品所做的对比实验^[13], 却没有观测到电子能损引起的 Stage-I 缺陷复合的强烈衰减或辐照退火.

Dunlop 等^[14]利用自离子辐照实验, 在 Fe 中也观测到了强电子能损引起的预先掺入的缺陷退火. 在周期表中, Fe, Ni 和 Cu 是近邻元素, 其 Stage-I 缺陷恢复的差异来自电子-原子点阵的相互作用^[14]. 在 Fe 和 Ni 中, 电子-原子点阵的相互作用强度要远大于在 Cu 中的电子-原子点阵的相互作用强度, 从激发电子到点阵原子的能量传输效率高, 随着电子能损的增强, 点阵原子振动增强, 从而引发单个间隙子的湮灭. 而在 Cu 中则不然, 核碰撞在 Stage-I 缺陷的恢复中起主导作用.

上面实验证明, 强的电子能损可引起纯金属中预先存在的缺陷复合.

2.2 电子能损引起的缺陷产生

用在线电阻率测量方法检测辐照损伤, 是基于样品温度在 Stage-I 缺陷的复合温度以下, 缺陷是

稳定的, 辐照引起的样品初始电阻率的增长速率 $\Delta\dot{\rho}_0 = d(\Delta\rho)/d\Phi|_{\Phi=0}$ 正比于原子的位移截面 $\sigma = \Delta\dot{\rho}_0/\rho_{\text{Frenkel}}$, Φ 为离子辐照剂量, ρ_{Frenkel} 为 Frenkel 对缺陷的电阻率. 由于理论计算可以求得核弹性碰撞引起缺陷产生的截面 σ_n , 因此实验确定的损伤效率为 $\xi = \sigma/\sigma_n$, ξ 与靶中电子能损的强度有关.

Dunlop, Dammak, Paumier, Dufour 等^[15~22]对电子能损在纯金属中引起损伤的研究做出了重要贡献, 他们先后在 Fe, Ti, Co, Zr, Bi 和 Be 中观测到了电子能损引起的效应. 在 Fe^[17]和 Bi^[22]中, 系统地观测到了辐照损伤效率 ξ 与电子能损有关的结果, 显示出存在两类电子能损效应: (1)自小电子能损(≈ 0)起, 随 $(dE/dX)_e$ 的增加, ξ 值逐渐减小, 确认了前面所述的辐照退火效应, 而且 ξ 值的下降, 相应于 Stage-I 缺陷复合量的下降^[15,17]; (2)随着 $(dE/dX)_e$ 的进一步增加, ξ 值强烈地增加, 标志着新的损伤产生. 图1给出了 Be^[19], Ti^[16], Fe^[17]和 Bi^[22]等纯金属中损伤效率 ξ 随 $(dE/dX)_e$ 的变化. 在较大 $(dE/dX)_e$ 值的情况下, ξ 都出现增大, 且在 Be, Ti 和 Bi 中, ξ 还可以达到很高值. Bi 的实验结果还显示, 利用能量为 GeV 量级的质量较轻(如 ^8O , 0.189 GeV, $(dE/dX)_e \approx 1.2$ keV/nm) 和较重(如 ^{208}Pb , 3.99 GeV, $(dE/dX)_e \approx 44$ keV/nm) 的离子辐照时, 其电阻率出现两组饱和值, 较重离

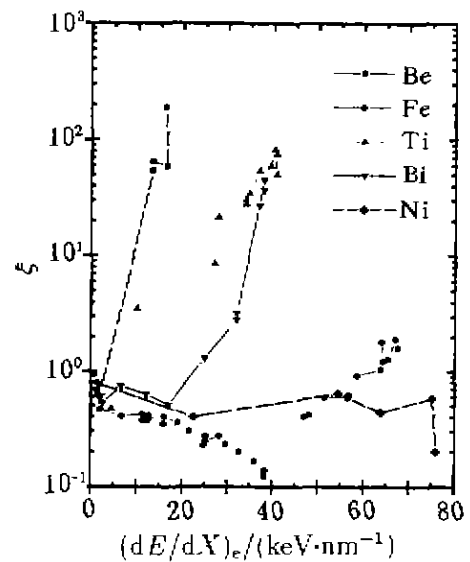


图1 几种晶态纯金属的辐照损伤效率 ξ 随 $(dE/dX)_e$ 的变化 (实验数据引自文献^[17~19,22])

子辐照(dE/dX 。值较大)导致了 Bi 中高阻相的形成^[22]。辐照 Bi 样品的退火实验,也验证了大值电子能损在 Bi 中引起了大量的复杂缺陷的产生,使得样品中 Stage-I 缺陷的退火复合量为零^[22]。作为对比,图 1 中也给出了 GeV 能量的快重离子辐照下 Ni 中 ξ 随 (dE/dX) 的变化^[18]。可以看出, Ni 中 $\xi < 1$, 表明在图中所给出的 (dE/dX) 范围内,电子能损在 Ni 样品中只引起缺陷的退火。其它一系列实验研究还表明,电子能损也可以在 Ga 中产生损伤^[20,21],而在 Ag, Cu, Pd, Pt, W, Nb^[19]和 Sn^[31]等纯金属中电子能损效应不明显, ξ 值或者基本保持为常数,或者略有下降(只有退火效应)。从以上实验结果可知,不同纯金属材料中电子能损引起损伤的敏感程度或阈值是不同的,即不同金属对电子

能损具有不同的响应灵敏度。样品在 20 K 以下进行快重离子辐照时, Fe 中电子能损引起损伤的阈值约为 40 keV/nm^[17],而在 Bi, Be, Ti, Co 和 Zr 中则分别约为 24^[22], 3^[19], 6, 33 和 30^[18] keV/nm。

2.3 相同电子能损下缺陷产生的离子速度效应

Mefrah 等^[32]用一系列 GeV 能量的快重离子辐照,比较系统地研究了电子能损在磁性绝缘体钇铁石榴石中引起损伤的截面。在对数据的分析中发现,具有几乎相同电子能损值而单核子能量不同(速度不同)的离子辐照,单核子能量大者,入射离子引起的损伤截面较小,表明辐照损伤的产生,不仅与电子能损有关,而且与入射离子的速度有关。

表 1 100 K 温度下, Bi 样品离子辐照实验结果^[27]

Sample	Ion	$E/(MeV \cdot u^{-1})$	$(dE/dX)_e/(keV \cdot nm^{-1})$	σ_n/cm^2	σ/cm^2	ξ
Bi791	¹²⁹ Xe	42.9	16.8	4.6×10^{-17}	1.3×10^{-17}	0.28
Bi792	¹²⁹ Xe	42.9	17.7	4.9×10^{-17}	3.5×10^{-17}	0.72
Bi13712	⁸⁶ Kr	4.0	17.0	2.4×10^{-16}	3.3×10^{-16}	1.4
Bi871	⁸⁶ Kr	4.0	17.0	3.6×10^{-16}	5.5×10^{-16}	1.5
Bi1372	⁸⁶ Kr	4.0	17.0	2.4×10^{-16}	3.3×10^{-16}	1.4

为了证明电子能损引起辐照损伤的入射离子速度效应,王志光等^[27]利用 GANIL 提供的能量 E 为 4 MeV/u ⁸⁶Kr 和 42.9 MeV/u ¹²⁹Xe 离子分别辐照

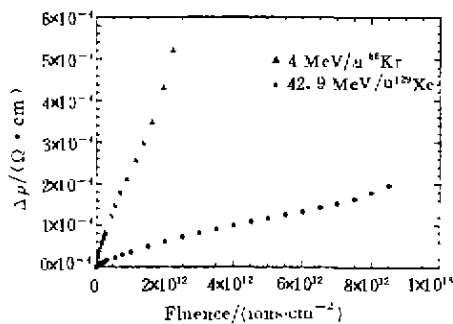


图 2 具有相同电子能损(约 17 keV/nm)不同速度的离子辐照下,试样 Bi 的电阻率增量 $\Delta\rho$ 随离子辐照剂量的变化^[27] 辐照温度为 100 K。

处于 100 K 的 Bi 试样,用在线电阻率测量方法检测试样电阻率随离子辐照剂量的变化,表 1 和图 2 给出了实验测得的 Bi 样品辐照实验结果,其中 σ_n 为理论计算的弹性碰撞引起损伤的截面, σ 为实验测量

的损伤截面。

可以看出, Kr 离子辐照下 Bi 样品电阻率的增加速率远高于 Xe 离子辐照的情况, Kr 离子辐照的损伤效率为 Xe 离子辐照损伤效率的 2~4 倍。还有,在 Kr 离子辐照的样品中,电子能损引起了损伤的产生,而在 Xe 离子辐照的样品中,电子能损引起了缺陷退火。20 K 温度下, GeV 能量的 ¹⁸¹Ta、²⁰⁸Pb 和 ²³⁸U 离子辐照 Bi 的实验结果^[27]也表明,相同电子能损值下,入射离子速度大时在样品中产生的潜径迹尺寸较小。这两组实验,第一次明确证明了纯金属 Bi 中电子能损引起辐照损伤的入射离子速度效应。

理论分析^[27]说明,电子能损引起辐照损伤的入射离子速度效应,实际上是从激发电子系统向点阵原子系统进行能量转移的能量沉积密度效应。有效能量沉积密度,才是真正决定辐照损伤强弱的关键因素,这是因为入射离子与靶物质原子发生非弹性碰撞,使靶原子电离发射的次级电子的最大能量随入射离子能量的增大而增大。对于相同电子能损的情况,入射离子速度越小,次级电子在靶物质中被

慢化吸收所需的空间就越小,沉积在入射离子路径附近的能量密度越大;反之,沉积在入射离子路径附近的能量密度越小. Dammak 等^[24]用单原子离子和 C₆₀团簇离子辐照纯金属 Ti 和 Zr 靶所得到的结果也表明,入射离子在穿过凝聚态物质时的慢化过程中,沉积的能量密度越大,引起损伤的程度就更高.

2.4 电子能损引起潜径迹的形成

在凝聚态物质中,单个重离子沿其路径产生的缺陷(如点缺陷和缺陷集团、晶体中的非晶化等)的痕迹称为潜径迹. 近几年的实验研究结果表明,快重离子通过凝聚态物质时,强电子能损引起潜径迹的形成似乎具有普遍性^[23~25,33],凝聚态物质的原子堆积(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.

由于纯金属和合金中离子潜径迹形成的阈电子能损值比较高,所以直到1991年,Barbu 等^[22]用高能 Pb 和 U 离子辐照合金靶时,才第一次在实验中观察到了金属材料中离子潜径迹形成的确凿证据. 他们用法国 GANIL 提供的 0.7 GeV 的 Pb 离子和德国 GSI 提供的 2.8 GeV 的 U 离子,在 80 K 温度下辐照晶态 Ni-Zr 合金,两种离子在 Ni-Zr 合金中的电子能损值各为 48 和 57 keV/nm,辐照后的样品在高分辨透射电镜下进行观测,发现沿着离子入射方向,有间断的潜径迹形成. 潜径迹的面密度,在实验误差范围内与入射离子的辐照剂量一致,即一条潜径迹对应于一个入射离子.

纯金属中离子潜径迹的形成首先是由 Dammak 等^[18,24]在实验中观测到的. 他们用 GeV 级的单原子离子和 MeV 级的 C₆₀团簇离子分别在室温下辐照纯 Ti 样品,然后在透射电镜下进行观测,对不同种类离子辐照所产生的潜径迹的形貌尺寸进行了对比研究. 在 300 K 温度下,845 MeV 的 Pb 离子在 Ti 中产生的潜径迹呈点状结构,直径约为 5 nm,而 18 MeV 的 C₆₀离子在 Ti 中产生的径迹为类连续潜径迹,直径达到 15~25 nm. 尽管两种离子在 Ti 中的电子能损值相差不大,潜径迹的尺寸却差异明显. 同时进行的 5.55 GeV 的 U 和 18 MeV 的 C₆₀离子辐照纯金属 Zr (电子能损值分别为 40 和 41 keV/nm) 的实验^[18,24]还显示, U 离子在 Zr 中未产生可观测的损伤,而 C₆₀离子在纯 Zr 中产生的潜径迹直径为 10~

20 nm. 这是由于 C₆₀离子的速度比单原子离子的速度低一个数量级,在穿过金属时的慢化过程中,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. 这也再一次证明了电子能损效应中的入射离子速度效应.

另外, Furuno 等^[25]在厚度小于 100 nm 的纯半金属 Ge 薄膜中也观察到了能量为 100~200 MeV、电子能损值为 5.3~26 keV/nm 的单原子离子的潜径迹. 需要指出的是,直到用 GeV 能量的 U 离子辐照(电子能损值可达几十 keV/nm)纯金属 Ge 样品(厚度大于 1 μm 的条带),也未观察到潜径迹的形成. 这表明,材料中电子能损效应的强弱,也可能与样品尺寸的大小有关.

2.5 电子能损引起的相变

广义地讲,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,因此电子能损引起晶态材料的非晶化相变的确是比较普遍的现象. 在纯金属 Ti 和 Zr 中的潜径迹形成已在透射电镜下清晰地观测到^[24],这说明强电子能损可以在纯金属中引起相变.

在纯金属中,除了已观测到的晶态-非晶态相变外,最引人瞩目的实验结果是在 Ti 中观察到直接的不同晶相之间的相变. Dammak 等^[18,19,26]用能量为 GeV 的 U 离子辐照纯 Ti 样品,然后在透射电镜下进行观测,发现辐照后的 Ti 样品发生了从 α 相(密排六方结构)到 ω 相(六方结构)的相变. 厚度 11 μm 的纯 Ti 条带,先在 3×10^{-4} Pa 真空下 820 °C 退火 17 小时后,再缓慢冷却至室温. X 射线衍射和电子衍射图样(见图 3(a)和(b))表明样品具有完美的 α 相结构,且具有良好的晶化度. 用 X 射线衍射和电子衍射分析辐照样品,衍射图样如图(a)和图(c)所示,从图可以看出,辐照后的样品的 X 射线衍射图样中,α 相峰明显下降,而相应于六方 ω 相的新峰出现,得到的 ω 相的点阵常数分别为 $a_{\omega} = (0.462 \pm 0.001)$ nm 和 $c_{\omega} = (0.283 \pm 0.001)$ nm. 电子衍射图样则显示,辐照后的样品中 α 相和 ω 相共存,遵从取向关系 $\begin{cases} (001)_{\alpha} \parallel (2\bar{1}0)_{\omega} \\ [100]_{\alpha} \parallel [001]_{\omega} \end{cases}$, 且剩余 α 相和新生成的 ω 相均由平均尺寸 10 nm 的小区域组成.

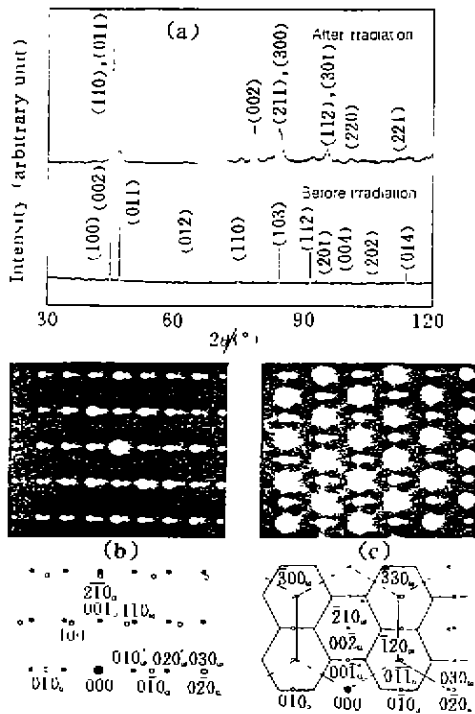


图3 20 K 温度下, 2.2 GeV 的 U 离子辐照 Ti 试样至剂量 $6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 后, 室温下观测得到的 X 射线衍射图样(a)和电子衍射图样(c), (b)为辐照前样品的电子衍射图样

对 Fe 和 Be 样品辐照实验结果的分析研究^[10]还表明, 在强电子能损(如 GeV 能量的 U 离子辐照)情况下, Fe 可以发生从 α 相(体心立方结构) \rightarrow ϵ 相(密排六方结构) \rightarrow α 相的转变, 这种双向相变导致了 Fe 附加缺陷的产生. 在 Be 中, 则可能发生了从密排六方结构到正斜方结构的转变, 相变所需要的阈电子能损值约为 16.5 keV/nm.

3 结论

大量的实验结果证明, 电子能损可以在纯金属中引起缺陷的产生和退火、潜径迹的形成和相变现象等. 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和靶物质的特性有关. 虽然纯金属中电子能损效应的实验研究已经取得了相当大的进展, 但仍然有许多问题尚不清楚, 如单个离子与金属靶作用过程中缺陷的产生与演化过程、初生态缺陷的结构及其与宏观辐照效应的关系、辐照温度对初生态缺陷的产生及结构的影响等, 都是进行深入实验研究的课题. 这对弄清沉积到电子系统的能量如何转化为靶原子运动能的微观机制具有重要意义.

参 考 文 献:

[1] Silk E C H, Barnes R S. Examination of Fission Fragment Tracks with an Electron Microscope [J]. Phil Mag, 1959, 4, 970~972.

[2] Chadderton L T, Montagu-Pollock H M. Fission Fragment Damage to Crystal Lattices; Heat-sensitive crystals [J]. Proc Roy Soc, 1963, A274, 239~252.

[3] Fleisher R L, Price P B, Walker R M. Tracks of Charged Particles in Solids [J]. Science, 1965, 149, 383~393.

[4] Fleisher R L, Price P B, Walker R M. Nuclear Tracks in Solids; Principle and applications [M]. Berkeley, California University Press, 1975.

[5] Andersen H H, Knudsen H, Moller Petersen P. Degradation of Discontinuous Films Under MeV Heavy Ion Bombardment [J]. J Appl Phys, 1978, 49, 5 638~5 647.

[6] Dartyge E, Duraud J P, Langevin Y. New Model of Nuclear Particle Tracks in Dielectric minerals [J]. Phys Rev, 1981, B23, 5 213~5 229.

[7] Ritchie R H, Claussen C. A Core Plasma Model of Charged Particle Track Formation in Insulators [J]. Nucl Instr and Meth, 1982, 198, 133~138.

[8] Klaumunzer S, Schumacher G. Dramatic Growth of Glassy Pd₄₀Si₆₀ during Heavy Ion Irradiation [J]. Phys Rev Lett, 1983, 51, 1 987~1 990.

[9] Hou Ming-dong, Klaumunzer S, Schumacher G. Dimensional Changes of Metallic Glasses during Bombardment with Fast Heavy Ions [J]. Phys Rev, 1990, B41, 1 144~1 157.

[10] Klaumunzer S. Plastic Flow of Amorphous Materials Induced by Swift Heavy Ions [J]. Mat Sci Forum, 1992, 97-99, 623~630.

[11] Audaud 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]. J Phys: Condens Matter, 1993, 5, 995~1 018.

[12] Iwase A, Sasaki S, Iwata T et al. Anomalous Reduction of Stage-I Recovery in Nickel Irradiated with Heavy Ions [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58, 2 450~2 453.

[13] Iwase A, Iwata T, Sasaki S et al. Radiation Annealing in Nickel and Copper by 100 MeV Iodine Ions [J]. J Phys Soc Jpn, 1990, 59, 1 451~1 457.

[14] Dunlop A, Lesueur D, Jaskieronic G et al. Influence of very High Electronic Energy Losses on Defect Configurations in Self-ion Irradiated Iron [J]. Nucl Instr and Meth, 1989, B36, 412~419.

- [15] Dunlop A, Lesueur D, Morillo J *et al.* High Electronic Excitations and Damage Production in GeV Ion-irradiated Metals [J]. Nucl Instr and Meth, 1990, B48: 419~424.
- [16] Dunlop A, Lesueur D. Damage Creation via Electronic Excitations in Metallic Targets Part 1; Experimental Results [J]. Rad Eff Def in Sol, 1993, 126: 123~128.
- [17] Dunlop A, Lesueur D, Legrand P *et al.* Effects Induced by High Electronic Excitations in Pure Metals; A detailed study in iron [J]. Nucl Instr and Meth, 1994, B90: 330~338.
- [18] Dammak H. Changement de Phase Crystalline Induit par Irradiation aux Ions Lourds Rapides dans un Metal Pur [D]. CEA Saclay, 1994, Rapport CEA-R-5 668.
- [19] Dammak H, Dunlop A, Lesueur D. Phase Transformation Induced by Swift Heavy Ion Irradiation of Pure Metal [J]. Nucl Instr and Meth, 1996, B107: 204~211.
- [20] Paumier E, Toulemonde M, Dural J *et al.* Anomalous Enhancement in Defect Production in Gallium Irradiated by High Energy Xenon Ions [J]. Euro Phys Lett, 1989, 10: 555~561.
- [21] Paumier E, Toulemonde M, Dural J *et al.* High-energy Heavy Ion Irradiation of Pure Gallium [J]. Mater Sci Forum, 1992, 97-99: 599~604.
- [22] Dufour C, Audouard A, Beuneu F *et al.* A High-resistivity Phase Induced by Swift Heavy-ion Irradiation of Bi: A probe for thermal spike damage [J]? J Phys: Condens Matter, 1993, 5: 4 573~4 584.
- [23] Barbu A, Dunlop A, Lesueur D *et al.* Latent Tracks do Exist in Metallic Materials [J]. Euro Phys Lett, 1991, 15: 37~42.
- [24] Dammak H, Dunlop A, Lesueur D *et al.* Tracks in Metals by MeV Fullerenes [J]. Phys Rev Lett, 1995, 74: 1 135~1 138.
- [25] Furuno S, Otsu H, Hojou K *et al.* Tracks of High Energy Heavy Ions in Solids [J]. Nucl Instr and Meth, 1996, B107: 223~228.
- [26] Dammak H, Barbu A, Dunlop A *et al.* $\alpha \rightarrow \omega$ Phase Transformation Induced in Titanium during Ion Irradiations in the Electronic Slowing-down Regime [J]. Philo Mag Lett, 1993, 67: 253~259.
- [27] Wang Z G, Dufour C, Cabeau B *et al.* Velocity Effect on the Damage Creation in Metals in the Electronic Stopping Power Regime [J]. Nucl Instr and Meth, 1996, B107: 175~179.
- [28] Dunlop A, Lesueur D. Irradiation of Metallic Targets with High-energy Heavy Ions; High electronic excitation induced effects [J]. Mat Sci Forum, 1992, 97-99: 553~576.
- [29] Barbu A, Dunlop A, Henry J *et al.* Phase Transformations in Metallic Targets Submitted to very High Electronic Excitations [J]. Mat Sci Forum, 1992, 97-99: 577~586.
- [30] Iwase A, Iwata T. Effect of Electron Excitation on Radiation Damage in fcc Metals [J]. Nucl Instr and Meth, 1994, B90: 322~329.
- [31] Dufour C, Wang Z G, Levalois M *et al.* Sensitivity of Metallic Materials under Irradiation with Swift Heavy Ions [J]. Nucl Instr and Meth, 1996, B107: 218~222.
- [32] Meftah A, Brisard F, Costantini J M *et al.* Swift Heavy Ions in Magnetic Insulators: A damage-cross-section velocity effect [J]. Phys Rev, 1993, B48: 920~925.
- [33] Toulemonde M, Bouffard S, Studer F. Swift Heavy Ions in Insulating and Conducting Oxides; Tracks and physical properties [J]. Nucl Instr and Meth, 1994, B91: 108~123.

Experimental Study of Electronic Energy Loss Effects in Pure Metals*

WANG Zhi-guang, JIN Yun-fan, HOU Ming-dong

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

Abstract: As swift heavy ions are available for irradiation damage study, it has been tried to evidence whether electronic energy loss might play a role in the damage processes of metallic targets. Experimental investigations showed that, as increase of electronic energy loss, large amount of electronic energy loss can result in radiation annealing of part of defects produced by elastic collisions, defect creation, latent track formation, as well as phase transition, and so on. Pure metals did not show the same sensitivity to the electronic energy loss. The main characteristics of typical experimental results available in pure metals with swift heavy ion irradiations were briefly reviewed.

Key words: swift heavy ion; pure metal; electronic energy loss effect

* Foundation item: NSFC (19875069, 19675054); the Chinese Academy of Sciences (KJ952-S1-423); the Scientific Foundation of Lanzhou Branch of CAS