

固体材料中快重离子辐照损伤建立过程中的 离子速度效应*

金运范¹⁾ 王志光

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 快重离子辐照损伤建立过程中的离子速度效应是近年来才发现的, 离子速度效应是指快重离子在固体材料中引起辐照损伤的损伤截面, 损伤效率和损伤形貌的离子速度相关性, 简要介绍了固体材料中快重离子辐照损伤建立过程中离子速度效应的发现、研究现状和主要实验结果, 并进行了尝试性评价.

关键词 离子速度效应 损伤建立过程 快重离子 固体材料

1 引言

能量为 0.1—300MeV/u 的快重离子穿过固体材料时, 主要是通过和靶原子电子之间的非弹性碰撞或通过靶材料中高密度电子激发损失其能量(通常称之为电子能损 $(dE/dx)_e$, 有时也用材料对离子的电子阻止本领 S_e 表示), 电子能损在除离子射程末端核阻止区以外的整个离子路径上起主导作用. 由此可见, 快重离子在固体材料中引起的效应本质上是高密度电子激发效应或电子能损效应^[1—4]. 因此, 长期以来人们在快重离子高密度电子激发效应研究中, 一直将电子能损作为唯一的关键参数. 然而, 在最近的一些强电子激发效应研究的实验工作中, 发现在相同电子能损条件下, 比较慢的离子的损伤截面较之比较快的离子的损伤截面大, 在这种情况下, 电子能损不再是研究快重离子高密度电子激发效应的唯一关键参数, 还必须考虑离子速度的影响, 这种高密度电子激发效应中的离子速度相关性被称之为离子速度效应^[5—11].

快重离子在固体材料损伤建立过程中的离子速度效应是 J. M. Costantini 等人研究快重离子在磁绝缘体材料钽铁石榴石 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) 中的辐照损伤时发现的^[5, 6], 接着, A. Meftah 等人系统地研究了快重离子在 YIG 中损伤截面的速度效应^[7]. 随后在金

属^[8, 9]、半导体^[10, 11]、团簇^[12—14]和超导体^[15, 16]材料中均发现了高密度电子激发引起损伤的离子速度效应. 然而, 到目前为止, 人们还不知道离子速度如何影响快重离子损伤的建立, 或者说人们还不知道离子速度效应的起源或本质. 某些研究者通过辐照剂量的径向分布或 δ 电子能量的径向分布的计算, 在热峰模型的框架下, 对快重离子在固体材料中损伤建立的离子速度效应的实验结果进行了定性的或半定量的解释^[7, 17]. 有人将电子能损转换为热峰的效率 g 因子作为描述离子速度效应的唯一参数, 粗略地解释了部分有关速度效应的实验结果^[18]. 也有人尝试将离子速度效应与初始电离率相联系, 在离子爆炸模型的框架下定性解释了损伤建立过程中的离子速度效应^[15, 16]. 所有这些解释还是非常初步的, 大量的有关离子速度效应的实验现象有待于进一步揭示, 相应的理论有待于建立.

本文简要概括了有关离子速度效应的研究现状和最近的研究结果, 并进行了尝试性评价.

2 主要实验结果

2.1 磁绝缘体材料中离子速度效应的实验例证

快重离子在固体材料损伤建立过程中的离子速度

2004 - 12 - 31 收稿, 2005 - 04 - 05 收修改稿

* 国家自然科学基金(10175084, 10125522, 10475102) 资助

1) E-mail: yfjin@impcas.ac.cn

效应首先是在磁绝缘体材料中发现的, J. M. Costantini 等人^[5, 6] 用几十至几百 MeV 的 ^{32}S , ^{63}Cu , ^{84}Kr 和 ^{132}Xe 等多种快重离子束辐照了钇铁石榴石 YIG, 用 X 射线衍射、饱和磁化强度和沟道背散射 (CRBS) 分析演绎出损伤截面 σ_d 及其有效半径 R_e , 并与 F. Studer^[17] 等人用 GeV 能量的多种快重离子辐照 YIG 的实验结果进行了比较. 发现在相同电子能损下, 低速离子 ($v/c \leq 0.1$) 辐照比高速离子 ($0.15 \leq v/c \leq 0.3$) 辐照的损伤截面大, 如能量为 1.5 MeV/u 的 ^{32}S 离子和能量为 35 MeV/u 的 ^{84}Kr 离子具有相同的电子能损 (7 MeV/ μm), 但其损伤截面相差十几倍, 分别为 $1.1 \times 10^{-13} \text{cm}^2$ (^{32}S 离子辐照) 和 $0.08 \times 10^{-13} \text{cm}^2$ (^{84}Kr 离子辐照), 他们认为这种差异是由低速区沉积能量的局域化效应引起的.

A. Meftah 等人用一组处于低速 (离子束能量 $E \leq 3.6 \text{MeV/u}$) 区的快重离子 15 MeV ^{19}F , 50 MeV ^{32}S , 650 MeV ^{181}Ta , 750 MeV ^{208}Pb 和 666 MeV ^{238}U 辐照了衬底为 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 的外延 YIG 膜, 用 C-RBS 分析了这些低速区的快重离子在 YIG 中引起的损伤^[7]. 并收集了当时几乎所有的快重离子辐照 YIG 的实验数据, 系统地比较了在电子能损 (dE/dx)_e 相同的情况下, 由于入射离子的速度 (或能量) 不同而引起损伤程度的差异. 图 1 给出了高速区 (● 数据来自参考文献 [1, 19—22]) 和低速区 (□ 数据来自参考文献 [5, 7], △ 和 ◇ 数据来自参考文献 [23—25]) 的损伤效率 $\varepsilon = A/dE/dx$ 随 dE/dx 的变化关系. 表 1 给出了高速和低速区多种快重离子辐照 YIG 实验数据, 表中的参

数 A , R_e 和 R_d 分别为损伤截面、有效半径和径迹芯半径 (66% 的能损沉积在其中的柱形区的半径), 同时也给出了相关数据的出处. 从图 1 看出在相同电子能损下, 高速区的损伤效率 ε 比低速区的损伤效率几乎降低了一半, 如在 25—43.5 keV/nm 电子能损区间, 损伤效率 ε 从 0.44 降低到 $0.23 (\text{eV/atom})^{-1}$, 说明了损伤效率和离子速度相关性. 从表 1 看出在相同和接近的电子能损下, 低速区重离子引起辐照损伤的 A 和 R_e 比高速区离子的相应参数大得多, 而能量沉积的主要区域即径迹芯半径 R_d 则小的多, 说明低速离子的损伤截面更大, 能量沉积更局域化. 这些实验结果表明, 在径迹建立过程中, 电子能损不再是唯一的关键参数, 损伤截面还依赖于与离子速度相关的能量沉积的横向分布.

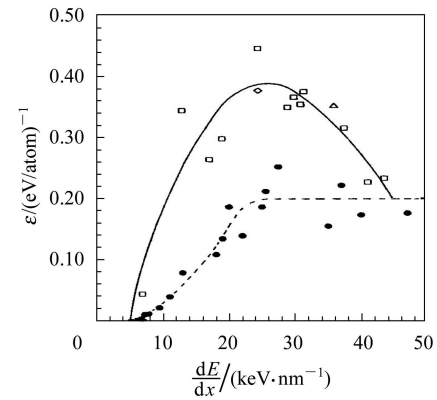


图 1 高速区 (●) 和低速区 (□, △ 和 ◇) 的损伤效率 $\varepsilon = A/dE/dx$ 随 dE/dx 的变化关系

表 1 高速和低速区快重离子辐照 YIG 实验数据的比较

| 样品序号 | 离子 | $dE/dx/$ (keV·nm ⁻¹) | $\bar{E}/(\text{MeV} \cdot \text{u}^{-1})$ | $v/(\times 10^9 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ | A/cm^2 | R_e/nm | R_d/nm | 参考文献 |
|------|----|-------------------------------------|--|---|---------------------------------|-----------------|-----------------|---------|
| 1 | Kr | 7.2 | 33.3 | 8.1 | $(8.1 \pm 1.6) \times 10^{-15}$ | 0.51 ± 0.05 | 9.3 | [19] |
| 2 | S | 6.9 | 1.56 | 1.7 | $(3.5 \pm 0.4) \times 10^{-14}$ | 1.1 ± 0.1 | 3.3 | [7] |
| 3 | K | 13 | 10.7 | 4.5 | $(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-13}$ | 2.0 ± 0.4 | 6.3 | [19] |
| 4 | Cu | 13 | 0.8 | 1.3 | $(5.3 \pm 0.9) \times 10^{-13}$ | 4.3 ± 0.4 | 2.4 | [5] |
| 5 | Mo | 18 | 8.0 | 3.9 | $(2.3 \pm 0.7) \times 10^{-13}$ | 2.7 ± 0.4 | 5.6 | [20] |
| 6 | Kr | 17 | 2.8 | 2.3 | $(5.3 \pm 0.8) \times 10^{-13}$ | 4.1 ± 0.4 | 4.0 | [5] |
| 7 | Xe | 19 | 19.6 | 6.3 | $(3.0 \pm 0.6) \times 10^{-13}$ | 3.1 ± 0.3 | 7.7 | [21] |
| 8 | Xe | 19 | 0.42 | 0.9 | $(6.7 \pm 1.0) \times 10^{-13}$ | 4.6 ± 0.4 | 1.8 | [5] |
| 9 | Xe | 25 | 8.3 | 3.9 | $(5.5 \pm 0.5) \times 10^{-13}$ | 4.2 ± 0.2 | 5.6 | [5,20] |
| 10 | Xe | 24.6 | 1.4 | 1.7 | $(1.3 \pm 0.2) \times 10^{-12}$ | 6.4 ± 0.5 | 3.2 | [5] |
| 11 | Pb | 37 | 16.5 | 5.7 | $(9.7 \pm 0.9) \times 10^{-13}$ | 5.6 ± 0.3 | 7.2 | [22] |
| 12 | U | 36 | 1.4 | 1.7 | $(1.5 \pm 0.4) \times 10^{-12}$ | 6.9 ± 0.5 | 3.2 | [23,24] |
| 13 | Pb | 40 | 12.0 | 4.8 | $(8.2 \pm 1.5) \times 10^{-13}$ | 5.1 ± 0.5 | 6.5 | [22] |
| 14 | Ta | 37.5 | 3.6 | 2.6 | $(1.4 \pm 0.3) \times 10^{-12}$ | 6.7 ± 0.8 | 4.3 | [7] |
| 15 | U | 47 | 10.5 | 4.5 | $(9.8 \pm 1.4) \times 10^{-13}$ | 5.6 ± 0.4 | 6.2 | [19] |
| 16 | U | 43.5 | 2.8 | 2.3 | $(1.2 \pm 0.3) \times 10^{-12}$ | 6.2 ± 0.8 | 4.0 | [7] |

2.2 金属材料中损伤建立的离子速度效应

由于实验条件的局限, 在相当长的一段时间内, 人们普遍认为电子能损不可能在金属材料中引起损伤. 但随着高原子序数高能重离子和团簇 C_{60} 离子的出现, 电子能损同样也能在金属材料中产生缺陷、引起损伤得以证实. 但与绝缘体材料相比, 快重离子在金属或电导体中引起损伤的电子能损阈值更高. 稍后也观察到了快重离子在金属材料中引起损伤的离子速度效应.

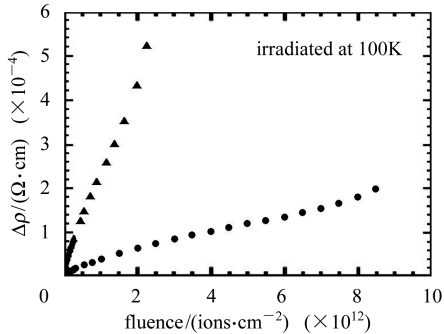


图 2 4MeV/u 的 Kr(▲)和 42.9MeV/u 的 Xe(●)离子辐照金属 Bi 靶的电阻率增量 $\Delta\rho$ 随辐照量的变化

王志光等人^[8]在 100K 低温下, 用具有约 17keV/nm 相同电子能损的两种快重离子, 即能量为 42.9MeV/u 的 Xe 离子和能量为 4MeV/u 的 Kr 离子辐照了金属 Bi 样品, 在线测量了辐照引起 Bi 样品电阻率的变化. 图 2 给出了辐照引起电阻率的增量 $\Delta\rho$ 随辐照量 Φt 的变化规律, 显然在相同的辐照量下 4MeV/u 的 Kr 离子引起 Bi 样品电阻率的变化量比 42.9MeV/u 的 Xe 离子引起电阻率的变化量大 2—4 倍, 即在相同的

电子能损下, 低速 Kr 离子比高速 Xe 离子在金属 Bi 中引起的损伤程度大 2—4 倍. 同时他们也完成了用能量分别为 2, 10 和 20MeV/u 的 Pb 离子在 20K 温度下辐照 Bi 样品的实验, 并与其他人在相同电子能损下的实验结果进行了比较^[26], 同样发现低速离子比高速离子产生潜径迹的半径大. 说明电子能损在金属 Bi 中产生的损伤不仅依赖于电子能损, 也依赖于离子速度.

H. Dammak^[9]等人用能量为 18MeV 的 C_{60} 团簇离子辐照了金属 Ti 和 Zr 靶, 用 TEM 观测了团簇离子在纯金属靶中引起的辐照损伤, 并与 GeV 能量的 Pb 和 U 离子辐照的结果进行了比较(见表 2). 显然, 能量为 MeV 量级的团簇离子在纯金属靶中引起的辐照损伤较之能量为 GeV 量级的 Pb 和 U 离子严重得多. 如在 Zr 靶的情况下, 用目前可以加速的最重的单原子离子 U 离子仍然没有观察到任何损伤, 原因很可能是在 Zr 靶中损伤建立的电子能损阈值很高. 但用能量为 18MeV 的团簇离子辐照时却观察到了直径为 10—20nm 的点状潜径迹. 两者的电子能损值相差无几, 但在 Zr 靶中造成的损伤水平差别如此之大是不能只用电子能损一个参数解释的, 还必须考虑离子速度的因素. MeV 能量的团簇离子与 GeV 能量的 U 离子具有接近的电子能损, 但其速度仅仅为 U 离子的 1/30, 其产生的次级 δ 电子的能量 (E_m) 也仅仅为 U 离子的 1/1000; GeV 能量的 U 离子产生 δ 电子的径向射程为几千 nm, 而能量为 MeV 量级的 C_{60} 离子产生 δ 电子的径向射程仅仅为几个原子大小, 因此, 在 C_{60} 离子辐照情况下, 其能量沉积密度比 U 离子辐照高得多, 可达 $10\text{eV}/\text{\AA}^3$ (或 $100\text{eV}/\text{atom}$), 如此高能量密度的弛豫引起了可观察到的 Zr 靶微观结构的变化或损伤的建立.

表 2 高能单原子离子与团簇离子在金属靶中引起损伤的比较

| 靶材料 | 入射离子 | E/MeV | $V/(\text{cm}\cdot\text{ns}^{-1})$ | $(dE/dx)_n/(\text{keV}\cdot\text{nm}^{-1})$ | $(dE/dx)_e/(\text{keV}\cdot\text{nm}^{-1})$ | E_m/eV | 损伤描述 |
|-----|----------|----------------|------------------------------------|---|---|-----------------|-------------------|
| Ti | Pb | 845 | 2.80 | 0.08 | 36 | 8800 | 直径约为 5nm 的点状径迹 |
| | C_{60} | 18 | 0.22 | 1.8 | 43 | 50 | 直径为 15—25nm 的连续径迹 |
| Zr | U | 5550 | 6.71 | 0.03 | 41 | 49000 | 没有观察到损伤 |
| | C_{60} | 18 | 0.22 | 1.8 | 44 | 50 | 直径为 10—20nm 的点状径迹 |

注: E_m 为 δ 电子的最大能量

2.3 超导体中离子速度效应的实验结果

现已发现的超导体中的电子能损效应主要包括点阵常数和转变温度的变化, 而损伤建立过程中的离子速度效应是最近几年前才发现的^[15, 16, 27].

N. Ishikawa 等人用 80MeV—3.84GeV 的快重离子 (^{35}Cl — ^{238}U) 辐照了超导薄膜 $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, 测量了由于电子激发引起 $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 点阵参数的变化.

测量结果表明, 在高速离子区 ($v \geq 2.6 \times 10^9 \text{cm/s}$), 即图 3(a) 中位于各 S_e -离子速度曲线上 S_e 最大值右边离子的电子激发效应, 即每单位离子流由电子激发引起 C 轴点阵常数的相对变化 $((\Delta C/C_0)/\phi)$ 随电子能损 S_e^4 变化(见图 3(b)). 但在低速离子区 ($v \leq 1.7 \times 10^9 \text{cm/s}$), 即图 3(a) 中位于各 S_e - V 曲线上 S_e 最大值左边离子的 C 轴点阵常数的相对变化 $((\Delta C/C_0)/\phi)$ 偏离 S_e^4 变化, 而随初始电离率 $(dJ/dx)^4$ 变化(见图 3(b)), 说明在低

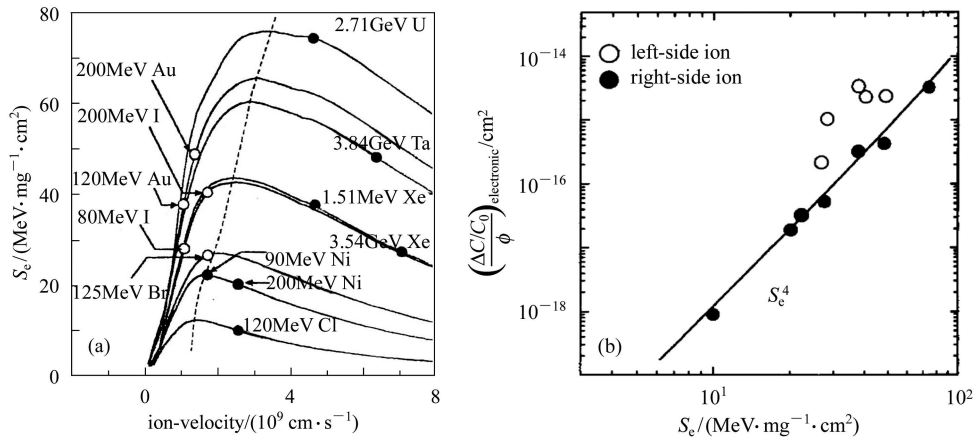


图 3 (a) 电子能损 S_e 随离子速度的变化, (b) 电子激发效应随 S_e 的变化

曲线最大值左边的离子用空心圆圈表示, 右边的离子用实心圆圈表示; 图 (b) 中实线表示右边离子辐照的电子激发效应与 S_e^4 成正比.

速区电子能损不是描述损伤建立的唯一参数, 还必须考虑离子速度的因素. 在整个离子速度范围 (包括高速区和低速区), $((\Delta C/C_0)/\phi)_e$ 均随初始电离率 $(dJ/dx)^4$ 变化 (见图 4).

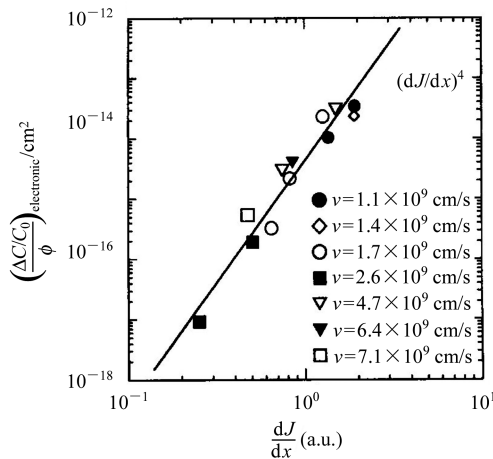


图 4 电子激发效应随初始电离率 dJ/dx 的变化
实线表示“效应”与 $(dJ/dx)^4$ 成正比.

2.4 团簇材料中的离子速度效应

团簇材料 C_{60} 的笼状分子结构和常温下面心立方 (fcc) 的晶体结构或许涵盖了高分子材料和完整晶体的某些基本特点, 加之其潜在的应用前景, 快重离子在团簇材料中电子能损效应的研究引起了人们的广

泛关注. 业已发现的电子能损效应主要包括 C_{60} 分子的聚合、高温高压相的形成和晶态 \rightarrow 非晶态转变. 同时也观察到了损伤建立过程中的离子速度效应^[12-14, 28].

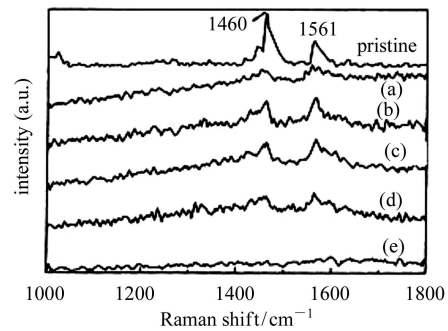


图 5 2.0 GeV Xe 离子辐照 C_{60} 薄膜至 1×10^{11} ions/cm² 时不同电子能损下的 Raman 谱
(a) $S_e = 12.81$ keV/nm, (b) $S_e = 13.50$ keV/nm,
(c) $S_e = 15.44$ keV/nm, (d) $S_e = 15.46$ keV/nm,
(e) $S_e = 18.05$ keV/nm.

本课题组^[12-14]用兰州重离子加速器 (HIRFL) 提供的能量为 2.0 GeV 的 Xe 离子辐照了多层堆叠的衬底为 Al 箔 C_{60} 薄膜, 进入堆积各层 C_{60} 薄膜的离子能量 E 、离子速度 V 、核能损 S_n 、电子能损 S_e 和 S_e/S_n 的值如表 3 所示. 图 5 给出了辐照 C_{60} 样品的 Raman 谱. 由表 3 可见, 处于电子能损最大 ($S_e = 18.05$ keV/nm)

表 3 ^{136}Xe 离子辐照 C_{60} 薄膜的相关参数

| 样品编号 | ions | E/GeV | $V/(\text{cm}\cdot\text{ns}^{-1})$ | $S_n/(\text{eV}\cdot\text{nm}^{-1})$ | $S_e/(\text{keV}\cdot\text{nm}^{-1})$ | S_e/S_n |
|------|------|----------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| (b) | Xe | 1.628 | 4.81 | 8.9 | 13.50 | 1.52 ± 10^3 |
| (c) | Xe | 1.068 | 3.89 | 12.8 | 15.44 | 1.21 ± 10^3 |
| (e) | Xe | 0.425 | 2.46 | 28.4 | 18.05 | 6.36 ± 10^2 |
| (d) | Xe | 0.107 | 1.23 | 89.6 | 15.46 | 1.73 ± 10^2 |
| (a) | Xe | 0.037 | 0.72 | 208.4 | 12.81 | 61.46 |

注: S_e 和 S_n 的值由 TRIM 程序计算^[14].

处样品 (e) 两边的 C_{60} 样品 (a) 和 (b), (d) 和 (c) 具有几乎相同或非常接近的电子能损值, 但它们之间的离子速度差异较大, 由图 5 所见处于低速区的样品 (a) 和 (d) 显然比处于高速区的 (b) 和 (c) 样品遭受到更大的损伤, 其处于 1460cm^{-1} 处的 C_{60} 的 $A_g(2)$ 振动膜的强度明显下降, 峰形展宽或劈裂的程度更为严重, 说明电子能损在团簇材料 C_{60} 样的损伤建立过程中, 同样存在离子速度效应。

3 讨论

从上述实验结果看出, 快重离子在固体材料中由强电子激发引起损伤的过程中, 离子速度是一个很重要的参数, 尽管到目前为止, 人们还不知道离子速度影响快重离子损伤建立的基本机制, 但仍有人对离子速度影响损伤截面的实验数据进行了尝试性解释。目前主要有两种关于离子速度影响损伤建立的基本机制, 一种是基于热峰模型, 直接与局域能量沉积密度相关的机制^[29-32], 而另一种是基于离子爆炸模型与初始电离率相关的机制^[15, 16, 27]。

基于热峰模型的解释中, 主要考虑了由于沉积在固体点阵中的能量空间分布是与离子速度相关的, 因此, 损伤的建立或离子径迹的形成就不能仅仅用电子能损 S_e 描述, 还必须考虑离子速度的影响, 即要考虑发射次级 δ 电子能量的空间分布。运用 Waligorski 等人提出的计算沉积能量径向分布 $D(r)$ 的分析公式^[17], 得到了在相同 S_e 的情况下, 离子速度越高, 沉积能量的分布范围 (或体积) 越大, 沉积在径迹芯中的能量密度越小, 由此, 可定性或半定量地解释在快重离子损伤建立过程中离子速度的影响。

王志光等人^[31]考虑了金属的热力学参数、电子-声子耦合系数以及入射离子在单位时间内提供给电子系统的能量密度等参数, 通过对电子能损的热传导方程进行数值求解, 得到了电子能损引起的热峰过程中点阵温度随时间和空间的变化, 从而可定量地给出潜径迹的尺寸。他们在国际上第一次将电子能损、材料物性与辐照效应具体地联系在一起考虑, 初步提出纯金属中从离子沉积于电子系统的能量转化为靶原子位移能并引起辐照效应的可能方式。其研究结果表明, 对于给定的金属, 潜径迹的尺寸不仅与电子能损值的大小有关, 还与入射离子速度和辐照温度等有关。

A. Dunlop 等人^[32] 提出用体能量密度 $P(=$

$S_e/\pi R_e^2)$ 描述强电子激发形成的潜径迹, 潜径迹的有效直径 R_e 与 δ 电子的射程有关, 而 δ 电子的射程直接与入射离子的速度或能量有关, 因此, 用 P 代替 S_e 描述强电子激发引起的潜径迹包含了离子速度的贡献。但是, 快重离子在靶物质中的径向能量分布不局限于径迹的尺度, 原因在于径迹的形成在径向也要达到或高于能损阈值。事实上, 径向能量分布大于径迹的尺寸范围, 因此, P 还不完全是一个描述强电子激发形成潜径迹的好参数。

G. Szenes^[18] 提出用其建立的热峰模型中的效率因子 g 表征速度效应, g 的物理意义是电子能损 S_e 转换为热能的比分, 只有 S_e 沉积在热峰中的能量比分增加或减少时, 效率因子 g 才有变化, 例如, 在相同电子能损不同离子速度的实验中, 低速离子比高速离子的 g 因子大。

但是, 在上述解释中均有不足之处, 就在前人基础上最晚出现的 G. Szenes 的解释中也存在明显的问题, 在他的模型中仅仅界定了在两个速度差异非常大的区域 ($E < 0.2\text{MeV/u}$, 和 $E > 7.6\text{MeV/u}$) 的 g 值 (0.36 和 0.17), 并没有给出 g 随离子速度变化的解析关系, 也没有说明为什么在不同能区, 电子能损转换为热峰的效率有所不同, 因此, 其模型与离子速度效应的准确表达还有相当大的距离。

基于离子爆炸模型的离子速度效应的解释是 N. Ishikawa 等人^[15] 在分析 $80\text{MeV}-3.84\text{GeV}$ 的快重离子 ($^{35}\text{Cl}-^{238}\text{U}$) 在超导薄膜 $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 中引起点阵参数的变化过程中提出的。他们发现只有在高速区, 每单位离子流由电子激发引起 C 轴点阵常数的相对变化 $((\Delta C/C_0)/\phi)$ 随电子能损 S_e^4 变化, 而在低速区, 由于离子速度效应的存在, $((\Delta C/C_0)/\phi)$ 则随初始电离率 $(dJ/dx)^4$ 变化, 而且, 在整个能区 $((\Delta C/C_0)/\phi)$ 均随初始电离率 $(dJ/dx)^4$ 变化, 这个变化规律符合离子爆炸模型的分析。但还未看到与此相同或类似的实验结果。

综上所述, 快重离子在固体材料中损伤建立过程中的离子速度效应是普遍存在的, 因此, 在快重离子高密度电子激发效应研究中, 除电子能损外, 离子速度是又一个关键参数。尽管人们已运用不同的物理模型定性或半定量地解释了现有的部分实验结果, 但到目前为止, 人们还不知道离子速度如何影响快重离子损伤的建立, 或者说人们还不知道离子速度效应的起源或本质。因此, 大量的有关离子速度效应的实验现象有待于进一步揭示, 相应的理论有待于建立。

参考文献(References)

- 1 Groult D, Hervieu M, Nguyen N et al. Defect and Diffusion Forum, 1988, **57-58**: 391
- 2 Klaumunzer S, Schumacher G. Phys. Rev. Lett., 1983, **51**: 1987
- 3 Audouard A, Balanzat E, Bouffard S et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **65**(7): 875
- 4 Dunlop A, Lesueur D, Legrand P et al. Nucl. Instrum. Methods, 1994, **B90**: 330
- 5 Costantini J M, Brisard F, Flament J L et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B65**: 568
- 6 Costantini J M, Rave F I, Brisard F et al. Nucl. Instrum. Methods, 1993, **B80/81**: 1249
- 7 Meftah A, Brisard F, Costantini J M et al. Phys. Rev., 1993, **B48**: 920
- 8 WANG Z G, Dufour Ch, Cabeau B et al. Nucl. Instrum. Methods, 1996, **B107**: 175
- 9 Dammak H, Dunlop A, Lesueur D et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**(7): 1135
- 10 Gaiduk P I, Larsen A N, Hansen J L. Appl. Phys. Lett., 2003, **83**: 1746
- 11 Kucheyev S O, Timmers H, Zou J J. Appl. Phys., 2004, **95**: 5360
- 12 JIN Y F, TIAN H X, XIE E Q et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **B193**: 288
- 13 JIN Y F, TIAN H X, LIU J et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**: 781 (in Chinese)
(金运范, 田惠贤, 刘杰等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 781)
- 14 JIN Yun-Fan, YAO Cun-Feng, WANG Zhi-Guang et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **B230**: 567
- 15 Ishikawa N, Iwase A, Chimi Y et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **B193**: 278
- 16 Ishikawa N, Chimi Y, Michikami O et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **B230**: 136
- 17 Waligoriski M P R, Hamm R N, Katz R. Nucl. Tracks Radiat. Meas., 1986, **11**: 309
- 18 Szenes G. Phys. Rev., 1999, **B60**: 3140
- 19 Studer F, Houpert Ch, Pascard H et al. Radiat. Eff. and Def. in Solids, 1991, **116**: 59
- 20 Toulemonde M, Studer F. Philos. Mag., 1988, **A58**: 799
- 21 Toulemonde M, Fuchs G, Nguyen N et al. Phys. Rev., 1987, **B35**: 6560
- 22 Meftah A, Merrien N, Nguyen N et al. Nucl. Instrum. Methods, 1991, **B59**: 605
- 23 Hansen P, Heitmann H, Smit P M. Phys. Rev., 1982, **26**: 3539
- 24 Timm A, Strocka B. Nucl. Instrum. Methods, 1985, **B12**: 479
- 25 Vieggers M P A. J. Electro. Microsc., 1982, **2**: 187
- 26 Durfour Ch, Audouard A, Beuneu F et al. J. Phys. Condens. Matter, 1993, **5**: 4573
- 27 Ishikawa N, Chimi Y, Iwase A et al. Nucl. Instrum. Methods, 1998, **B135**: 184
- 28 Yogo A, Majima T, Itoh A. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **B193**: 299
- 29 Szenes G. Phys. Rev., 1995, **52**: 6154
- 30 Szenes G. Nucl. Instrum. Methods, 1998, **B146**: 420
- 31 Wang Z G, Dofour C, Paumier E et al. J Phys: Condens Matter, 1994, **6**: 6733
- 32 Denlop A, Jaskierowicz G, Jensen J et al. Nucl. Instrum. Methods, 1997, **B132**: 93

Ion Velocity Effect in the Process of the Damage Creation in Solid Materials Induced by Swift Heavy Ion Irradiations^{*}

JIN Yun-Fan¹⁾ WANG Zhi-Guang

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

Abstract In recent years, the velocity dependence of the damage cross section, the damage efficiency and the damage morphology of solid materials induced by swift heavy ions, named ion velocity effect, is observed. But the mechanism or origin of the ion velocity effect is not clear up to now. In this paper, the discovery, current researching situation and some typical experimental results of ion velocity effect in the process of the damage creation in solids induced by swift heavy ion irradiations were briefly described, and the main theoretical explanation of ion velocity effect was also reviewed and discussed in short words.

Key words ion velocity effect, process of damage creation, swift heavy ion, solid material

Received 31 December 2004, Revised 5 April 2005

^{*}Supported by National Natural Science Foundation of China(10175084, 10125522, 10475102)

1) E-mail: yfjin@impcas.ac.cn