

文章编号: 1007- 4627(2000)03-0127-02

中科院近物所的 SHIM 物理研究*

靳根明, 金运范

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 简要介绍了 SHIM 物理及其近 10 年来国际研究的最新进展, 重点介绍了中国科学院近代物理研究所在该学科研究中所获得的部分最新研究结果, 展望了 SHIM 物理的发展趋势。

关键词: 强电子激发效应; 高离化态原子物理; SHIM 物理

中图分类号: O571 文献标识码: A

SHIM 物理 (Swift Heavy Ion in Matter-Physics) 是研究快重离子与物质相互作用的物理学, 主要研究快重离子-原子相互作用的微观过程和快重离子辐照引起固体的宏观变化, 包括与原子物理相关的离子-原子(电子)之间的单次或多次碰撞的基本过程, 与凝聚态物理和材料科学相关的固体结构的变化和动力学, 及其宏观性能的变化。因此, SHIM 物理是一门与快重离子相关的交叉学科, 它借用核物理的研究装置——重离子加速器为研究工具, 研究原子物理、凝聚态物理和材料科学所包容的物理问题。

快重离子是指离子的速度在 $Z_1^{1/3}u_0 - Z_1u_0$ 之间 (u_0 为玻尔速度), 或能量在 0.1—300 MeV/u 之间, 质量大于 α 粒子质量的离子。快重离子在物质中引起效应的研究, 是近 10 年来 SHIM 物理研究的重点和前沿。已经发现的快重离子效应包括缺陷的产生和退火、潜径迹的形成和相变(晶体 \leftrightarrow 非晶体), 以及塑性形变(生长和蠕变)。

快重离子在固体材料中, 主要是通过与靶电子相互作用而损失它们的能量, 具有很高的电子能损 ($\text{keV}/\text{\AA}$), 而且在除核阻止区以外的离子路径上, 电子能损起主导作用, 电子能损与核能损之比为 10^3 量级。因此, 快重离子在固体材料中引起的效应本质上是电子能损效应或强电子激发效应。

近 10 年来, 在强电子激发效应研究中, 发现了一系列新现象和新效应, 例如非晶合金中各向异性的生长, 金属、合金和高分子材料中潜径迹的形成

等。这些发现动摇了电子能损不能在电导体中引起原子位移的传统观念, 迫使人们必须重新认识辐照效应的基本机制。快重离子在固体材料中的潜径迹区形成了新的凝聚态, 预计用嫁接等手段, 可将其他单体或元素移入径迹区得到通常方法不能生成的、具有特殊光电性能的新型凝聚态物质, 这在材料科学上将是一个革命性的前进。因此, 固体材料的快重离子强电子激发效应的研究既有重要的学科意义, 又有重要的应用前景。

目前, 国际上现有的几台较高能量的重离子加速器(如法国的 GANIL、德国 GSI 的 Unilac、日本 RIKEN 的 RRC 和中国兰州的 HIRFL) 都在开展这方面的工作。从 1989 年开始, 以快重离子强电子激发效应研究为重点的 SHIM 物理国际会议至今已开过 4 次, 材料中快重离子效应研究已成为当前国际重离子跨学科最前沿的研究领域之一。

到目前为止, 已经取得的研究结果还远不够系统, 更没有触及到快重离子效应的基本动力学过程, 也还没有一个合适的物理模型定量解释这一损伤过程。更还没有看到一些很有前途的新型材料, 如纳米和团簇材料中电子能损效应的系统例证。可见 SHIM 物理是一门年轻的正在发展中的科学。

近 10 年来, 我们与国际该学科的发展相同步, 研究了从 He 到 Xe 的多种快重离子在固体材料中的强电子激发效应。研究的材料包括磁绝缘体材料 YIG, 半导体材料单晶 Si 和 SiO_2 , 高分子材料 PC, PS, PI 和 PET, 非晶态材料 $\text{Fe}_{77.2}\text{Mn}_{0.8}\text{Si}_{19}\text{B}_{13}$,

* 收稿日期: 2000-05-17

* 基金项目: 中国科学院“九五”基础性研究重点项目(KJ952-S1-423)

作者简介: 靳根明(1943-), 男(汉族), 河南许昌人, 研究员, 博士生导师, 从事核物理及其相关交叉学科研究。

Fe₄₇Ni₂₉V₂Si₆B₁₆和 Pd₈₀Si₂₀等, 以及团簇材料 C₆₀. 首次确定了多晶 YIG 非晶化的阈电子能损值和临界辐照量, 并用与国外完全不同的方法(缺陷光谱学), 几乎与国外同时确定了在电子阻止本领起主导作用的快重离子-YIG 辐照系统中, 损伤建立的阈电子能损值和临界辐照量; 在 1 GeV Ar 离子低温辐照的 FeNiSiB, FeMnSiB 和 FeNiVSiB 等 7 种不同成分的非晶态合金中, 均观察到了辐照引起的各向异性的塑性形变; 在能量为 35 MeV/u 的 Ar 和 25 MeV/u Kr 离子辐照 PS, PC, PI 和 PET 膜的实验研究中, 首次确定了 PC 和 PS 膜中形成炔基(C≡C)的能损阈值; 在系统分析实验数据的基础上, 提出“随机原子热跃迁过程模型”, 通过数值模拟计算, 解释了纯金属 Fe 中辐照缺陷的产生与演化, 并对离子在该材料表面可能产生的潜径迹形貌作了预测.

在高离化态原子物理研究中, 我们进行了离子光谱和能级寿命的测量, 以及离子-原子(电子)碰撞过程中的多重电离和多电子转移研究. 利用 47 MeV 的 Ne 和 Ar, 170 MeV 的 S 离子束, 测量了类氢、类氦和类锂离子的束箔光谱和能级寿命; 用非全裸 Li^{q+}, C^{q+}, O^{q+}, F^{q+}, Na^{q+}, Cl^{q+} 和 K^{q+} 等重离子束(q= 1- 4)轰击氦、氖和氩原子, 系统地研究了碰撞过程中的多重电离, 在 ECR 源上进行了 Ar⁸⁺, Ar⁹⁺, Ar¹¹⁺ 和 Ar¹²⁺ 与 He, Ne 及 Ar 气体靶中多电荷转移部分截面的测量, 研究了反应中各个子过程截面的相对关系, 用分子过垒与统计分布模型的结合, 解释了分子过垒模型无法解释的现象.

在快重离子效应的应用研究中, 我们进行了宇

航半导体器件和聚变反应堆结构材料中某些特殊问题的快重离子模拟, 以及新型材料的快重离子研制和加工. 从未来聚变堆第一壁和结构材料的实际需要出发, 研究了 MeV 级能量的 He 离子在 316L 奥氏体不锈钢中引起的辐照效应, 在 He 泡的数密度和尺寸随辐照温度的变化曲线上, 发现在 300-400°C 之间存在一个明显的转变点, 这与两个完全不同的氦泡形核模式相对应, 该结果弥补了这个温区高剂量 He 注入实验数据的不足. 与航天工业总公司和中国科学院有关单位合作, 对“风云一号”和“实践 4 号”卫星中星用大规模集成芯片的单粒子效应进行了地面快重离子模拟测试. 最近首次用低能离子预注入掺杂+ 快重离子辐照的方法使 SiO₂ 成为光致发兰紫光材料.

如果说过去的 10 年是 SHIM 物理逐步形成的 10 年, 未来的 10 年必将是其飞速发展的时期. 在这个时期, 快重离子束将从现在的稳定、单元束向放射性、团簇离子束扩展, 面临的问题将更为复杂. 研究工作将集中在高电荷离子结构、碰撞相互作用和低维材料强电子激发效应的研究上. 研究重点是宏观参数、阻止本领等与快重离子-物质相互作用相关基本参数的精确确定, 和在更深的层次上研究潜径迹的微结构和动力学, 由此揭示强电子激发效应的基本机制. 在此基础上将‘效应’的可能应用变为现实.

本期“原子核物理评论”集中发表一些 SHIM 物理研究的论文, 较系统地介绍近 10 年来国际 SHIM 物理研究的最新进展, 重点介绍中国科学院近代物理研究所利用 HIRFL 所提供的快重离子束在上述学科和领域研究中所取得的部分最新研究成果.

SHIM-physics Study at IMP^{*}

JIN Gen-ming, JIN Yun-fan

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

Abstract: Swift Heavy Ion in Matter (SHIM) -physics and its new progresses of research in the world in recent ten years were briefly introduced. The results obtained on SHIM -physics including strong electronic excitation effect in solid materials and its applications, as well as highly charged state atomic physics, obtained by Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences were mainly introduced. The tendency of the discipline in future was presented.

Key words: strong electronic excitation effect; highly charged atomic physics; SHIM -physics

* **Foundation item:** 95 Key project of the Chinese Academy of Sciences (KJ95-S1-423)