

高剂量与高能量离子注入研究进展*

赵渭江 王宇钢 颜 莎 薛建明 康一秀 虞福春
(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘 要 综述了离子束材料实验室在高剂量与高能量离子注入研究方面的新进展. 包括高剂量离子注入动态靶的模拟计算 MACA 程序、多能离子注入深度分布计算、MeV 离子引起的 HOPG 表面损伤、MeV 离子诱导右旋糖酐生产菌种、高剂量离子注入在 45 号钢表面形成耐腐蚀的保护层以及在高速工具钢上形成含有大量超细碳化物的耐磨层.

关键词 离子注入 动态靶 离子辐照损伤 材料表面改性

1 引言

以离子注入为中心的离子辐射效应研究, 已成为从离子源到 MeV 离子加速器开发离子束应用的最基本、最广泛、最活跃的研究领域. 近几年来主要围绕高剂量与高能量离子注入中的物理问题与相关的技术, 结合探索新的应用, 开展了基础性研究和培养研究生工作.

2 离子注入深度分布模拟计算

2.1 高剂量离子注入动态靶的模拟程序

对于高剂量离子注入, 当注入靶内的离子密度与靶原子密度可比时, 特别需要考虑离子注入后由于原子间的相互作用而引起的靶成分分布的变化^[1]. 动态靶模拟程序 MACA 的主要思想是: 每当一定量的离子注入后, 需要计算这些离子与靶原子进行级联碰撞后靶的成分分布变化, 然后以此为基础构成下一批离子注入时的新靶; 依此类推, 最后可以得到包括注入原子的靶原子. 其中计算两体碰撞采用数据库方法, 大大提高了计算速度^[2], 以适应 PC 机使用.

利用 MACA 程序, 对高剂量注入动态靶效应的初步分析表明, 由于体积膨胀效应, 离子注入深度与注入剂量有着强烈的关系. 这时对通常意义下的射程也需要进行修正. 图 1

给出了 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^2 \text{C}^+$ 注入高速工具钢后 C、Fe 元素分布的 MACA 程序计算结果与 RBS 测量结果, 两者符合的非常好.

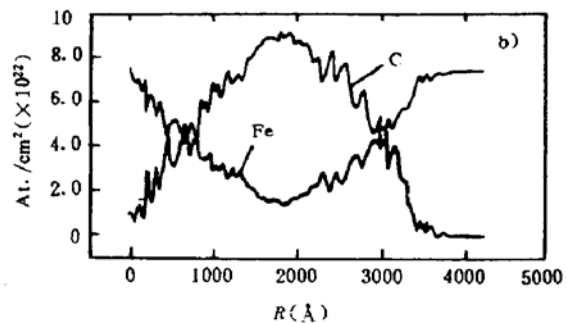
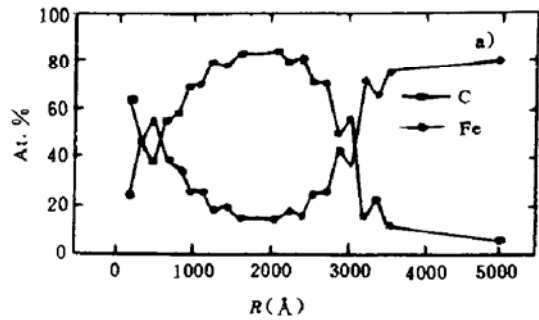


图 1 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^2 \text{C}^+$ 注入高速工具钢后 C 与 Fe 的深度分布. (a) RBS 测量结果, (b) MACA 计算结果

2.2 多能 MeV 离子注入深度分布计算

离子注入半导体器件以及材料表面改性要求注入离子形成特殊形状分布时, 通常采用多能离子注入的方法来实现, 因此研究选择能量与剂量的组合设计计算方法关键在于

* 国家自然科学基金和国家高校博士学科点科研基金资助课题.

计算的精度. 以 N 型单晶硅表面 $1.3\mu\text{m}$ 内实现理想平台载流子为例, 要求其不平整度不超过 20%. 实验表明, 单能硼离子注入硅的载流子分布更接近 Pearson 分布, 并求得其分布函数与能量的关系, 发展了多能 MeV 离子注入形成特殊深度分布的 Pearson 函数拟合叠加的计算方法^[3].

3 MeV 离子辐照损伤研究

3.1 离子轰击 HOPG 引起的表面损伤

用 STM 研究了 $530\text{keV} \sim 4.5\text{MeV}$ 的 Au、C、B、He 与 H 离子轰击 HOPG (高定向石墨) 的表面损伤. 所有这些离子轰击后的 HOPG 表面, 均可由 STM 观测到被完整的石墨表面所分隔的小丘状凸起的表面损伤, 损伤的线度为几埃到几十埃, 高度为几埃到十几埃. 统计分析表明, Au 离子轰击 HOPG 表面, 损伤的平均线度及平均高度随表面层核能损的增加而呈增大的趋势, 损伤数密度与轰击离子的剂量之比可以偏离 1 很多, 且表现为随表面层核能损的增加而增大, 如图 2 所示. 运用级联碰撞理论分析, 认为 Au 离子轰击 HOPG 的损伤是由非线性级联碰撞效应引起的, 而 C、B、He 和 H 离子轰击 HOPG 表面形成的损伤是由于近距离的小参数碰撞造成的. 在 STM 实验中, 还在表面损伤附近观察到了多种局域的 $\sqrt{3X}\sqrt{3R30^\circ}$ 超结构, 并运用局域电子态密度调制的观点对这种结构进行了定性分析.

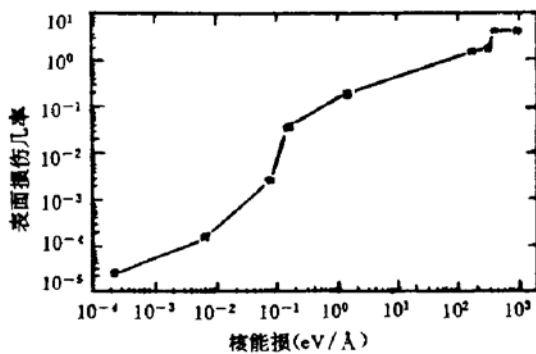


图 2 形成表面损伤的几率与表面核能损之间的关系

3.2 离子诱变微生物菌种

离子注入生物材料, 以及离子诱变作为一种新的生物技术手段, 近年来引起了国内外学者的极大关注. 本所利用 4.5MV 静电加速器的竖直线, 设计安装了一个特殊靶室, 实现了活细胞溶液状态下的 H^+ 辐照.

实验中所选用的活细胞样品是右旋糖酐生产菌, 离子能量为 2.4MeV , 使其完全穿过含菌溶液层, 剂量范围为 $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2 \sim 1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$. 实验结果表明, 受照菌种的存活率随离子剂量的增大而逐渐降低, 对离子辐照后的一百多个存活下来的菌株进行摇瓶发酵初筛; 以对照组为准, 90% 以上菌株的产量低于对照, 10% 的菌株产量高于对照. 从 20 株中复筛, 选出了两株较对照高出 30% 和 10% 的突变株. 在初筛过程中, 发现大部分个体由于离子辐照损伤, 菌株生长期后移. 这是反应突变的一个重要指标.

4 高剂量离子注入研究

4.1 反应离子束混合形成金属防腐涂层

离子束混合通常都是应用惰性离子束, 如 Xe^+ 、 Ar^+ 等. 在用离子束混合 45 号钢上不同厚度的铝膜形成 Al/Fe 金属防腐系统的研究中, 证实了用 N_2^+ 混合比 Ar^+ 好, 实现了兼有离子合成与混合效应的反应离子束混合. 研究了不同条件下的腐蚀行为和具有最佳耐水蚀性能膜层的设计方法. 电化学极化测量表明, 在醋酸缓冲液 ($\text{pH} = 5.6$) 中, 经过剂量为 $1 \times 10^{17} 1/\text{cm}^2$ 的氮分子离子束混合后, 铝膜厚度为 150nm 的 Al/Fe 体系的致钝电流密度达到 $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 的时间比未注入延长至少 20 倍. 样品的耐腐蚀性能与膜层厚度关系密切. 相同混合条件下, 150nm 铝膜样品与 110nm 铝膜样品相比, 其耐腐蚀性能提高了 14 倍. 反应离子束混合 (N_2^+) 的剂量存在一个最佳值. 对于 110nm 的铝膜层, 氮分子离子混合的剂量为 $1 \times 10^{17} 1/\text{cm}^2$ 时, 样品的耐腐蚀性能较好. XPS 和 NRA 的测量结果表明,

离子束轰击确实对 Al/Fe 体系的界面具有混合的作用;铝和铁在界面处发生了相互扩散,氮分子离子束混合时形成了 Al-Fe-N 的混合过渡层.此外经过大剂量氮分子离子注入 [N_2^+ : $1 \times 10^{17} 1/cm^2$ (190keV) + $6 \times 10^{17} 1/cm^2$ (80keV)],在样品的铝膜层中形成了 Al 与 N 原子比接近 1:1 的连续的 AlN 层.

4.2 离子注入改善工具钢表面的摩擦性能

M2 钢是一种被广泛应用的高速工具钢,具有很高的硬度,但是表面摩擦系数较高.从不同角度选择了 Y^{++} 、 Hf^{++} 、 Ti^+ 、 Cr^+ 、 N^+ 及 C^+ 六组不同类型的离子及它们的组合注入.从摩擦系数和磨损量的减少来看,高剂量 C^+ 效果最好,摩擦系数由原来的 1.0 左右降至 0.2 左右,磨损量降至原来的十分之一.

CEMS、EDX、XPS、RBS、SEM 等微观结构分析的结果表明,大剂量 C^+ 注入 M2 钢后,形成了非晶化基体上镶嵌着大量纳米金属碳化物颗粒和纯碳沉淀物的、韧性较好的新的表面层结构,这种弥散型结构减小了原马氏体中的晶粒边界的应力场突变,韧性的增加提高了裂纹生成及扩展所需的能量,有效地减小了磨损量;纯碳沉淀物的存在提供了固体润滑剂的来源,大大减小了摩擦系数.绝大部分的金属原子与碳结合形成了碳化物,维

持了一定的表面硬度,并降低了表面化学活性,因此摩擦过程中产生的碎屑不易粘着成块附着于表面,样品表面也不易与空气中的氧及水发生反应而导致锈蚀,从而提高了耐粘着型磨损及腐蚀型磨损的能力.

几年来,该研究室围绕高剂量与高能量离子注入应用中的有关物理问题进行研究,包括动态靶模拟计算、特殊浓度分布计算、STM 实验方法、活细胞注入、反应离子束混合 Al/Fe 体系及离子注入形成纳米相材料等,从理论计算、实验方法到新的应用方向与方法的角度开展工作,在不同层次与程度上取得了有意义的进展,为进一步研究打下了基础.

借此对唐孝威、杨威生、谢有畅先生、张利春先生和罗大珍先生等以及他们的实验室同事们表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 1 Yuan Bo, Yu Fuchun. Nuclear Science and Techniques, 1990, 1(1~2): 82
- 2 Yuan Bo, Yu Fuchun, Tange S M. NIM, 1993, B83: 413
- 3 康一秀,赵渭江,王宇钢等. 半导体学报, 1995

Development of High-dose and High-energy Ion Implantation

Zhao Weijiang Wang Yugang Yan Sha Xue Jianming Kang Yixiu Yu Fuchun
(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The development of high-dose ion implantation and high-energy ion implantation at the Ion Beam Application Group of IHIP in recent years is reviewed.

Key Words ion implantation dynamic targets ionradiation damage surface modification of materials