

快重离子束的应用研究

侯明东

(中国科学院近代物理研究所)

重离子加速器作为核物理研究工具的同时,也开辟了广阔的新的应用领域。本文扼要地评述了重离子束应用的某些方面。鉴于目前我国第一台大型重离子加速器已经建成出束,开展这些研究已成为可能。

关键词: 重离子束 辐照效应 核径迹技术 粘着力 辐照损伤模拟 惯性约束 放射疗法

随着世界上一系列10—100MeV/amu能区重离子加速器的建造,重离子束的应用研究日益受到重视。重离子束的应用涉及固体物理、材料科学、电子工业、环境科学、能源技术以及生物医学等十分广泛的学科领域。重离子束是指质量大于氦的离子,通过加速器而使它们获得能量。本文仅介绍质量 $A \geq 12$ 、能量至少大于1MeV/amu称之为快重离子的应用。

重离子束应用的物理基础是它与物质的相互作用——电离激发和核碰撞。重离子有高的电离密度,快重离子处在电子能损区,可以提供—个干净的研究电子能损的环境。重离子在物质中有确定的射程,剂量的深度分布具有布拉格峰。重离子与核的碰撞具有很大的截面,并且在一次碰撞中能将较大的能量转移给靶核。正是这些特点提供了广泛应用的可能。

一、核微孔膜的制备

重离子穿过绝缘体薄膜时,沿着它们的路径形成潜在的径迹,借助适当的化学蚀刻,潜在径迹可以形成穿透膜片的通孔。蚀刻过程起着特别灵敏的放大作用,它把所刻记的信息增大到所期望的大小。

核径迹孔具有许多优良的特性。它具有精确而可调的直径,通过控制蚀刻时间可以得到直径0.01—100 μm 的孔。同一膜片上的孔取向平行,孔径和孔长有良好的一致性。核径迹孔有良好的纵向形状,孔长与孔径比可以做到10000:1。孔的面密度可人为地控制,甚至可以制成单孔膜片。核径迹孔的横截面形状,也因材料的不同,可能是菱形、六角形、圆柱或圆锥形。核径迹技术在加工最小孔径、孔深孔径比和生产速率三方面是至今可利用的其他微观加工技术所不能比拟的。在生产过程中,薄膜随滚轴运动,每秒钟可照射几平方米的面积。照射所需要的束流很小,在进行别的实验的同时劈出极小的束流即可,从而降低了成本。

关于核径迹形成已经提出许多机制^[1],但目前尚不完全清楚。实验表明,径迹的形成与初级电离密度有关,并且对各种材料存在不同的阈值。只有重的离子且在1—10MeV/amu的能区才适宜于核微孔膜的制备。与裂变碎片相比,加速器的重离子的种类和能量可以自由地选择,能制备较厚的膜,而且能量上的盈余可允许把束流引到空气中照射。核微孔膜有极其广泛的应用,现在许多实验室已用重离子加速器进行核微孔膜的商业生产^[2-4]。

二、重离子蚀刻制版

1. 掩模投影 人们利用可见光、紫外光、X射线或电子束进行微观加工在实验室的研究

中已经达到其最终极限,因此人们试图用重离子获得更细微的加工。用重离子照射蚀刻之后所得到的浮雕与掩模的面密度有关,这使传统技术的二维制版扩展为三维,而且不局限于用光敏材料作为基体。硅表面的 SiO_2 薄膜是一个直到原子标度都很均匀的材料,用它做径迹灵敏的基体可以获得很高的位置分辨^[5]。

2. 束写技术 束写技术是借助于微束,由单个离子在预定的位置加工出微观结构。这一技术需要精确的束流偏转和控制系统,抑制散射粒子极为重要。Fischer 等人^[6]已用 $1.4\text{MeV}/\text{amu}$ 的 ^{52}Cr 离子在玻璃上制成排列整齐的单离子径迹的蚀刻坑。人们期望束写技术能加工出具有任何入射角的微结构,或通过改变离子能量获得一个可变深度的微结构。

三、材料表面织构加工

(1) 制备超绝缘表面 用重离子辐照并蚀刻的云母片,在蒸溅了一层金之后,也不能使之导电。原因是蚀刻后表面产生的微观迷宫式的结构,非常有效地遮挡了金属的沉着。具有这样织构表面的电阻要比未处理的表面大10个数量级^[7]。表面电阻增加的效果与标称孔隙度 P 有关,当 P 达到70%时样品表面电阻率迅速增大,直到 $P>200\%$ 时才观察到电阻率重新下降的现象。这种表面织构方法为防止高真空中金属蒸气沉积所引起的绝缘表面击穿提供了新的途径。

(2) 制备光学散射片 蚀刻后的粒子径迹提供了一种制备具有给定特性散射片的可能性。散射角是由蚀刻后单径迹的圆锥角和所用材料的折射率确定^[8],可以使它与随后光学元件的接收角很好地适配。散射片的先决条件是波长必须远小于单个径迹圆锥口的直径,以确保经典的光学贡献超过波的衍射。

(3) 光学材料表面的抗反射处理 重离子照射光学材料之后把径迹蚀刻到可见光波长一半的深度,并且圆锥口直径远小于光的波长。这样的表面可以看作是折射率随织构深度从1到基体材料折射率 n_s 平滑变化的薄膜。Fischer 用 $1.4\text{MeV}/\text{amu}$ 的 Ni 离子^[9]从两面照射偏磷酸盐玻璃到 $7\times 10^{11}/\text{cm}^2$ 以及用 Ne 离子^[10]照射到 $1.6\times 10^{11}/\text{cm}^2$ 都取得了明显的效果,测量表明处理后的玻璃透射损失减少。

四、增强薄膜-基体间的粘着力

近年来发现快重离子(MeV/amu)与低能离子(keV/amu)一样能增强金属薄膜与基体间的粘着力。人们尚不清楚这种粘着力的增强是由于原子碰撞在界面所引起的混合过程,还是由于膜和基体间界面的电子效应。因为快重离子是在电子能损的范围,并且这一现象在薄膜-绝缘体^[11]、薄膜-半导体^[12]以及薄膜-金属^[13,14]等系统都已被证实。R. G. Stokstad 等^[15]用 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{28}Si 、 ^{35}Cl 和 ^{58}Ni 在能量 $2.85\text{MeV}/\text{amu}$ 轰击 Au-Ta 和 Au-Si 系统,结果表明,粘着力增强的阈值量与阻止本领之间有一个幂指数关系。这一技术很少引起表面溅射和界面沾污,可以预见在印刷线路板、集成电路、镜面和镀膜光学等方面有重要的应用。

五、重离子模拟中子辐照损伤

核反应堆的结构材料长期处在强辐射场中,中子辐照损伤导致材料的机械性能、电热物理性能和几何尺寸稳定性的恶化倾向。由于现有中子源强的限制,直接的中子辐照实验需要很长的时间,因此重离子或电子辐照等模拟手段,在辐照效应的研究中占有重要位置。重离

子损伤截面比中子大 10^5 — 10^6 倍, 实验周期短。与电子辐照相比, 重离子有长的级联碰撞, 如再配合由离子辐照和预注 He 可更接近于14MeV中子的损伤。快重离子可以提供几十至几百微米厚的损伤层, 允许对样品做机械性能的测试。缺点是损伤浓度沿深度方向分布不均匀, 并且材料内缺陷的产生在时间和空间上都被压缩了。许多实验室用重离子研究了堆材料的辐射肿胀, 积累了大量的数据, 并对抗辐射材料的研制做出了贡献^[16,17]。B. A. Loomis综合了1970年以来关于钽基合金、316不锈钢、Fe-25Ni-15Cr合金、铁素体钢、铜、镍、Nb-1Zr和钼的肿胀实验的结果, 将离子辐照与中子辐照做了详细的比较^[18]。

六、引发可控聚变反应^[19-21]

惯性约束是另一种实现可控聚变的途径。用重离子束从各个方向射击一个冷冻的氘氚混合物制成的靶丸, 使其加热和压缩, 达到“点火”, 所放出的热量又进一步使整个靶丸在飞散之前完成全部聚变反应。重离子束射程短并能精确地限定, 能量沉积在深度方向上高度集中, 有利于从外皮点燃。加速器的能量转换效率高, 重离子又几乎将全部能量交付给靶丸, 有利于整个系统净能增益的提高。但在技术上还存在一系列的困难, 如靶丸的设计、引发重离子强流加速器的设计、聚变容器的设计等。

七、重离子照相

重离子照相属射程末端辐射照相, 它是通过记录穿过样品的离子剩余射程的分布, 从而反映出样品阻止本领的分布。由于重离子和X射线在物质中强度衰减的规律不同, 在射程末端, 物质厚度的微小变化 ΔD , 将使重离子计数产生很大的变化 ΔN_i (远大于X射线的 ΔN_x), 因此重离子照相要比X射线更灵敏地显示出物体密度的变化。照相时所需的剂量也比X射线小25—250倍^[22]。重离子照相的深度分辨与离子的初始能量和射程歧离有关。横向分辨与多次散射作用造成重离子的偏转有关。重离子照相的深度分辨和横向分辨均优于质子和 α 粒子, 横向分辨不及X射线照相。实际常用的是原子序数为6—10的离子, 能量要大于几百 MeV/amu, 可以测出生物组织密度小至0.2%的差别^[23]。

八、重离子在生物医学方面的应用

在生物医学领域内可用重离子对恶性肿瘤进行研究和治疗。重离子束具有良好的物理特性, 在组织中剂量的深度分布有布拉格峰, 在射程之后剂量骤然下降, 有利于减少表皮和病灶周围正常组织的伤害。成功地控制肿瘤所要求的剂量, 常常超过邻近正常组织的耐受程度, 而用重离子治疗可允许高20—30%的肿瘤剂量^[24], 增加了局部控制的机会。在生物学特性方面, 重离子属于高LET射线, 它的相对生物效应RBE大, 氧增比OER低, 对缺氧的细胞亦有强的杀伤能力, 对处于不同细胞周期的细胞敏感性差异小, 放射损伤的修复少, 减少了肿瘤复发的可能。对于肿瘤的治疗需要有能提供20—30cm射程的大型重离子加速器, 它的结构复杂, 造价昂贵。因此, 目前大多数实验室仍处在细胞级的研究水平上, 唯有美国劳伦斯贝克莱实验室已经用于临床, 用氦束治疗了靠近脊髓、脑底、肾和肠等关键器官的肿瘤^[25]。

重离子还可以用于在半导体中制备SOI结构; 研究宇宙射线所引起的“软件错误”即单个事件扰乱等。重离子也使核技术得到新的发展, 如注入探针核的扰动角关联方法和穆斯堡尔方法。

参 考 文 献

- [1] R. L. Fleischer et al., Nuclear tracks in solids, University of California Press, Berkeley, 1975.
- [2] B. E. Fischer and R. Spohr, *Rev. Mod. phys.* 55 (1983), 4:907.
- [3] G. N. Flerov and V. S. Barachenkov, *Ouspeki. phys. Naouk*, 114 (1974), 351.
- [4] C. Bieth et al., GANIL A88-04.
- [5] K. Moriwaki et al., Proc. conf. on microcircuit engineering: microstructure fabrication, Aachen, 1979, p.153.
- [6] B. E. Fischer et al., Scientific Report GSI, 1989, p.251.
- [7] B. E. Fischer et al., *Radiat. Eff.*, 65 (1982), 143.
- [8] D. Bürckner et al., Scientific Report GSI, 1986, p.268.
- [9] B. E. Fischer and K. D. Hummel, Scientific Report GSI, 1983, p.216.
- [10] B. E. Fischer, Scientific Report, 1982, p.207.
- [11] J. E. Griffith et al., *Nucl. Instru. Meth.*, 198 (1982), 607.
- [12] A. E. Berkowitz et al., *Nucl. Instr. Meth.*, B7/8 (1985), 877.
- [13] M. H. Mendenhall, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1983.
- [14] T. A. Tombrello, *Mat. Rev. Rymp. proc.*, 25 (1984), 173.
- [15] R. G. Stokstad et al., *J. Mater. Res.*, 1 (1986), 2:231.
- [16] F. L. Wook et al., *Reviews of Modern physics*, 47 (1975), Supplement 3:S1.
- [17] E. E. Bloom et al., *Scripta Metallurgica*, 10 (1976), 303.
- [18] B. A. Loomis, *J. Nucl. Mater.*, 141-143 (1986), 690.
- [19] W. D. Metz, *Science*, 194 (1976), 4262:307.
- [20] *CERN Courier*, 16 (1976), 9:291.
- [21] R. L. Martin and R. C. Arnold, *Nucl. Instr. Methods*, 155 (1978), 337.
- [22] E. V. Benton et al., Contribution to the 10th int. conf. on SSNTD, Lyon (1978).
- [23] C. A. Tobias et al., LBL, Report, 1980, No.11220.
- [24] R. Joseph and M. D. Castro, Third workshop on heavy charged particles in biology and medicine; GSI, 1987, 1-5.

Applied research of heavy ion beams

Hou Mingdong

(Institute of Modern physics, Academia Sinica)

Abstract

The heavy ion accelerator is not only a powerful tool for nuclear physics, but opens many new application fields of heavy ions. This paper gives a brief review on some aspects of the applied research with heavy ion beams. In view of the fact that Lanzhou Heavy Ion Research Facility, the first heavy ion accelerator in China, has been constructed to produce the beams, it is possible to do the research work in these fields.

Keywords: Heavy ion beam Radiation effect Nuclear track technique
 Adhesion Radiation damage simulation Inertial confinement
 Radiotherapy