

# 100keV 同位素分离和离子注入装置及其应用

陈 森 邹志宜 黄建鸣 叶伯年 钱文国 路钦雯

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘 要** 本文介绍了一台通用性低能离子束装置、主要性能、利用它开展的一些新的离子束应用及实验结果。

**关键词** 同位素分离, 离子注入, 材料改性, 铁-57, 碳-60.

1991 年底, 我所建成了一台多用途低能离子束装置, 它既可作为一台同位素分离器, 也可作为一台通用离子注入装置. 图 1 为整体光路布置图. 物理设计中, 考虑上述多用途的特点, 如宽广的离子能量范围、众多的离子种类(包括化合物分子离子或原子团离子)、足够大的质量分辨本领和良好的束流品质. 本装置的头部供电电源可供几种重离子源使用(包括多电荷和毫安级强流源). 包括静电四极透镜对(作为后传输投影镜)、离子束导向器和扫描系统等在内的完整的束后传输系统, 满足通用离子注入应用要求. 需要时, 靶端尾部匹配后减速或后加速系统, 以进一步扩大能区范围.

BPM)、可调狭缝和 516P 型束质谱探针等, 以对离子束剖面形状、束流和质谱等进行精确测量和诊断. 用一台基于微处理机的多通道光纤型遥控装置, 实现了对处于高压端的离子源众多参数的遥控和遥测. 用两根 1 米长的光纤实现高压隔离, 并对 16 个参数(8 对)实现互不干扰的遥控和遥测. 高精度( $\pm 0.02\%$ )、抗干扰、数字显示和  $B^2/V$  质量计功能是本遥控装置的突出特点.

本装置的主要技术性能指标如下. (1) 离子能量范围:  $0.5 \sim 100 \text{keV}$  (对单电荷态离子); (2) 离子流强度:  $10 \sim 200 \mu\text{A}$  (与质量和同位素丰度有关); (3) 焦平面的质量分离度:  $D_{m\perp} = 1500 \text{mm} \times \Delta M/M$ ; 质量分辨率 R. P:  $1000 \sim 1500$ ; (4) 焦平面离子束位移:  $\Delta D_{\perp m} \leq 0.5 \text{mm}$ ; (5) 通用和完整的离子注入后传输束线.

本装置建成后已提供 2500 小时以上运行时间, 在核物理、应用核物理、原子物理和材料科学等应用基础领域中发挥了重要作用. 下面介绍在该装置上进行的四种新的离子束的应用及其主要成果.

## 1 离子溅射基础研究

离子溅射是重离子与物质相互作用的重要现象之一, 离子溅射基础研究已涉及到天体物理、材料科学及生物学等许多学科领域. 有关课题组已利用几十 keV 的  $\text{Ar}^+$ 、 $\text{Kr}^+$  等离子, 对元素或合金, 如  $\text{Cu}$ 、 $\text{Al}$ 、 $\text{Pa}$ 、 $\text{Sn}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Fe}$  及  $\text{Au-Cu}$ 、 $\text{Al-Sn}$ 、 $\text{Si-Cr}$  等研究了溅射原子角分布、择优溅射及同位素分馏等现象. 尤其在在

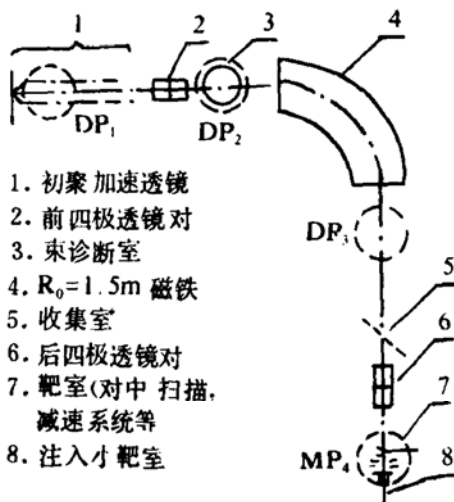


图 1 EMIS 系统原理布置图

本装置配备了较完整的离子束诊断装置, 如前后法拉第筒、多丝式束流剖面仪(MW-

微量掺杂的稀合金、共晶二元的两相合金和单相合金样品的靶点表面形貌特征和溅射原子空间择优发射之间的关系方面,作了较系统的研究,并发现了离子轰击诱发表面元素局域富集现象.如,Al-50wt%Sn 合金样品在30keV Ar<sup>+</sup> 离子溅射后(剂量  $1 \times 10^{18}$  Ar<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup>),靶点表面形貌凸起的岛状区为 Al 富集(99.57 wt%),而岛周围的凹陷区则为 Sn 富集(81.98wt%).在这一发现的基础上,提出了“离子轰击诱发表面元素区域偏析(富集)概念”和“离子溅射微区叠加原理”,对原来建立在靶点表面为平滑表面假设基础上的溅射理论作了修正,这是对溅射理论的深化和发展,在基础理论和实际应用方面都有重要意义.

## 2 聚合物和合金的离子注入材料改性

近年来,采用离子注入技术进行聚合物掺杂改变其结构、电学或光学性能的研究不断取得进展.有关课题曾用 15~30keV 的 <sup>40</sup>Ar<sup>+</sup>、<sup>58</sup>Fe<sup>+</sup>、<sup>35</sup>Cl<sup>+</sup>、<sup>127</sup>I<sup>+</sup>、<sup>7</sup>Li<sup>+</sup>、<sup>23</sup>Na<sup>+</sup> 或 <sup>39</sup>K<sup>+</sup> 等离子束注入顺式、反式或已经化学掺杂的聚乙炔膜(PA),并用红外光谱、RBS 或四探针等测试了离子注入前后聚乙炔表面结构及电性能的变化.实验结果表明:离子注入法可对聚乙炔膜进行电子受体或给体掺杂,并在许多实验中观测到 PN 结的整流特性,制成所谓塑料二极管.所用剂量范围为  $1 \times 10^{13} \sim 3 \times 10^{17}$ /cm<sup>2</sup>.为避免膜在注入时发热,采用低于  $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  束流密度的 X、Y 方向扫描,扫描面积达  $\phi 60\text{mm}$  (一次辐照 12 个样品).从聚乙炔膜电阻与离子注入剂量(24keV 的 <sup>127</sup>I<sup>+</sup>、<sup>89</sup>K<sup>+</sup>)的关系,可知电阻率降低约 5 个数量级.图 2 为经化学掺杂 FeCl<sub>3</sub> 的聚乙炔膜,经 30keV 的 <sup>39</sup>K<sup>+</sup> 注入后形成的二极管特性曲线,而未经注入的聚乙炔膜呈导体特性.在此基础上,继续对聚乙炔和聚乙苯胺(PAn)的导电机理进行研究,并利用离子注入掺杂获得了 N 型的聚苯胺,而化学掺杂只能得到 P 型.利用 Cr<sup>+</sup>Y<sup>+</sup> 等离子对合金的抗氧化、抗腐蚀的离子注入材料改性工作正在进行中.

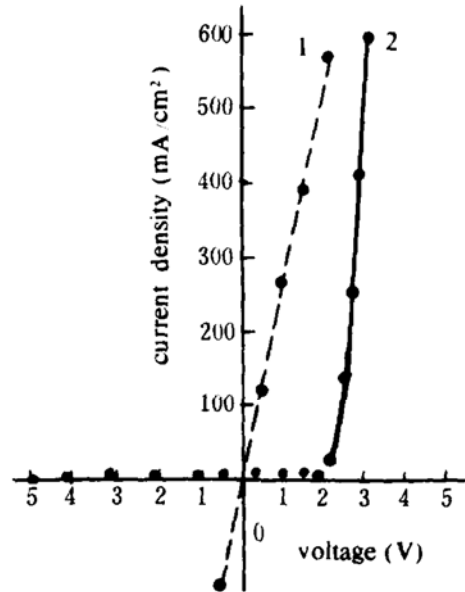


图 2 PA 膜的二极管特性曲线  $I-V$ . 1. 化学掺杂 FeCl<sub>3</sub>, 1.5mol%, 未经注入. 2. 化学掺杂 FeCl<sub>3</sub>, 1.51mol%, 注入剂量  $2.5 \times 10^{17}$  K<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup>

## 3 制备 <sup>57</sup>Fe 穆斯堡尔样品和纳米材料

<sup>57</sup>Fe 是在常温下就能测量穆斯堡尔谱的最常用和方便的同位素之一.应用同位素分离器把 <sup>57</sup>Fe 同位素注入待测样品,然后测量样品中 <sup>57</sup>Fe 受激发后的内转换电子(或 X、γ 射线)的穆斯堡尔谱,这是近年来已发展起来的一种新的穆斯堡尔实验技术.由于它可以对不含有穆斯堡尔核素的样品进行所需穆斯堡尔核素的离子注入,并可对样品进行非破坏性测量,从而扩大了穆斯堡尔效应的应用范围.

由于本装置在焦平面上具有较大的质量分离度,如对 <sup>56</sup>Fe<sup>+</sup>、<sup>57</sup>Fe<sup>+</sup> 其  $D_{m\perp} = 2.7\text{cm}$ ,因此很容易从 Fe 的各种同位素中把 <sup>57</sup>Fe 分离出来,并注入到 Cu、Si 或 SiO<sub>2</sub> 等基底中制备成穆斯堡尔样品.在制备中,我们没有用较贵的预先富集的 <sup>57</sup>Fe 同位素原料,而采用了容易得到的天然铁化合物 FeCl<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O. 由于氯化物中含有结晶水,因此分离前需要在合适的温度下去出结晶水.当离子源炉子温度控制在 530~540℃ 时,经过分析到达收集靶上的 <sup>57</sup>Fe<sup>+</sup> (天然丰度为 2.19%) 离子流可达  $1 \mu\text{A}$  以上.

一般注入剂量为  $5 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{17} \text{ } ^{57}\text{Fe}^+/\text{cm}^2$ , 一个样品制备时间约 3 小时即刻完成. 为避免碳原子污染, 在收集靶前应用了 LN 冷阱, 取得了较好效果. 为使注入剂量均匀, 采用了电扫描. 实验应用结果表明:  $^{57}\text{Fe}$  的分离效率较高, 注入均匀性良好. 上述方法制备的穆斯堡尔样品, 应用于穆斯堡尔谱研究中, 发现了一些有趣的现象, 如特定条件下,  $^{57}\text{Fe}$  离子注入某些金属膜中能形成性质特异的金属间化合物; 经过一定的退火处理,  $^{57}\text{Fe}$  离子在基体中沉淀析出. 在  $27 \sim 60\text{keV}$  能量范围内,  $^{57}\text{Fe}^+$  注入深度约为几十纳米 (nm). 因此, 用这种方法制备的纳米结构材料, 结合我所建立的内转换电子穆斯堡尔谱研究, 取得了一批有趣的研究成果, 并形成了自己的研究特色. 下面为一典型的例子:  $^{57}\text{Fe}^+$  注入  $\text{SiO}_2$  后, 在  $\text{Fe}-\text{SiO}_2$  系统测得的磁滞回线 (见图 3), 其矫顽力比通常  $\alpha\text{-Fe}$  高两个量级, 而且还具有温度反常现象.

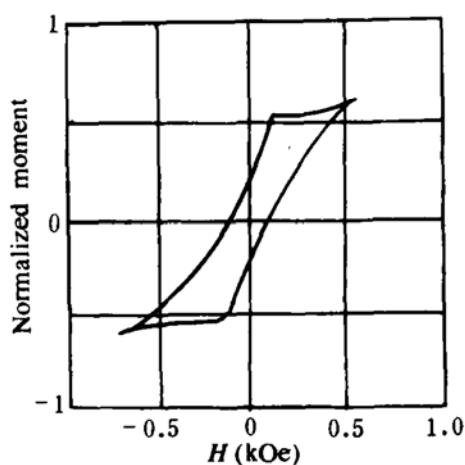


图 3  $\text{Fe}-\text{SiO}_2$  样品测得的磁滞回线

#### 4 $\text{C}_{60}$ 系列的质谱分析

$\text{C}_{60}$  是除石墨、金刚石外, 近年来发现的碳的第三种同素异构体, 即球状碳分子 (布基球).  $\text{C}_{60}$  系列分子无论在超导材料、电子学和新型化合物合成中均有不可估量的应用前景.

由于本所 EMIS 装置有大的质量分辨本领和分析磁铁较大的质能乘积 ( $ME = 39.0$

$\text{Amu} \cdot \text{MeV}$ ), 因而可对这种大质量 ( $M = 720$  以上) 的分子系列进行质量分析, 如配备后减速系统, 有可能进行  $\text{C}_{60}$  膜制备或  $\text{C}_{60}^+$  离子注入制备电子或光学特种器件等.

应用高分辨本领的同位素分离器和高灵敏 MCP (微通道板二次电子倍增器) 探测器, 我们第一次测得了  $\text{C}_{60}$  系列谱, 并随后在  $\sim 400^\circ\text{C}$  离子源温度下, 得到了  $\sim 2.0 \times 10^{-12}\text{A}$  的纯  $\text{C}_{60}^+$  离子束流强度. 所用  $\text{C}_{60}$ 、 $\text{C}_{70}$  混合样品预先经过化学提纯. 在注入剂量  $\sim 1.05 \times 10^{19}\text{C}_{60}^+/\text{cm}^2$  下, 用 SEM 观测到了光学玻璃表面  $\text{C}_{60}$  分子球状排列. 相应某一质量数获得的最佳产额和离子源放电温度以及电离电位等参数有很大关系, 尚需进行大量的研究. 这是一种比较直接的  $\text{C}_{60}$  系列的质谱分析方法.

上述实验研究所需的条件各不相同, 有的对束点的聚焦和准直要求相当高, 在  $\Phi 2 \sim 3\text{mm}$  的准直孔下有足够大的流强; 有的则需  $\Phi 7\text{cm}$  的大面积均匀辐照; 有的要求相当高的质量分辨本领. 大量的实验运行表明: 机器的整体性能良好, 各种运行参数、实验条件的稳定性和重复性相当好, 保证了大量实验的顺利进行. 其它如金属合金等离子注入材料改性, 核径迹探测器制备, 离子注入育种, 同位素核靶制备, 适量短寿命放射性同位素的分离和注入以及离子和同位素的其它应用, 直至 keV 以下的甚低能离子束应用 (如特种功能膜制备) 等, 本装置都将有用武之地.

在日常运行中, 我们获得了不少经验和有价值的实验数据, 性能测试和常规运行表明: 在束流光学物理设计基础上确定的整体光路布置是合理的, 各离子光学部件及其整体性能良好, 计算和实测结果相当一致.

#### 参 考 文 献

- 1 陈 鑫等. 中科院上海原子核所年报, 1985, 5: 130, 核技术, 1987, 5: 37
- 2 傅建国等. 中科院上海原子核所年报, 1991, 11: 63

## Ion Beam Applications on a 100keV EMIS and Ion Implanter

Chen Miao Zou Zhiyi Huang Jianming Ye Bonian Qian Wenguo Li Qinwen  
(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** A versatile low energy ion facility and its main specifications are described. Some new ion beam applications and experimental results are given.

**Key Words** isotope separation, ion implantation, material modification,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $\text{C}_{60}$ .

### WHO 认为辐照食品无害

1960 年以来,世界卫生组织(WHO),联合国粮农组织(FAO)和国际原子能机构(IAEA),已主办了几次有关辐照食品研究工作的国际会议.1970 年 19 个国家建立了旨在发起和监督辐照食品研究的国际食品辐照计划.与此同时,WHO、FAO 和 IAEA 组织了一个食品辐照联合专家委员会(JECFI),以评价研究成果.经 10 年研究之后,JECFI 于 1980 年发表了它的结论:辐照食品“没有任何毒物学问题和特殊的营养学或微生物学问题”。

1983 年,联合国建立了一个涉及 24 国家的国际食品辐照咨询组,每年在维也纳举行年会,经常发表关于食品辐照各个方面的报告.1988 年,在日内瓦举行了一次有 57 个国家的代表参加的国际会议,所有这些活动都促进了食品辐照技术的发展。

认为食品辐照是安全的并建议采用这种技术的世界组织很多.有些组织有他们独特的见解.例如,美国医学协会认为食品辐照是替代杀虫剂的一种重要的安全方法,还能控制细菌污染;美国食品和药物管理局认为辐照是一种“食品添加剂”,而不是一种“食品加工方法”。

根据 IAEA 1990 年公布的数字,已有 38 个国家批准了食品辐照.根据 1988 年 6 月的统计结果,前苏联每年用辐照方法加工粮食 40 万吨,南非用辐照方法加工水果、香料、马铃薯、洋葱 2.2 万吨,日本加工的香料为 1.8 万吨,荷兰加工的香料、家禽、冷冻脱水食品为 1.8 万吨,比利时加工的香料、家禽、冷冻脱水食品为 9000 吨,前民主德国加工的洋葱

为 6000 吨,美国加工的香料为 3300 吨。

美国食品和药物管理局于 1963 年批准用低剂量辐照的方法处理小麦和面粉以灭虫.1964 年它批准用辐照方法抑制马铃薯发芽.1985 年批准对猪肉进行 10 万 Rad 的辐照.1990 年批准对家禽肉进行 30 万 Rad 的辐照.对海产品的辐照批准问题也正在考虑.1992 年 9 月美国农业部批准辐照技术用于控制家禽中的病菌,主要是沙门氏菌.农业部估计约有 40% 的家禽产品受沙门氏菌感染,这种病菌会导致疾病甚至死亡.小剂量的辐照能消灭细菌,对消费者无害,对食品的营养价值也没有不良影响。

中国台湾省也正在加速发展食品辐照.1992 年初,台湾省农民协会与食品工业研究所签订了一项协议,将优质大蒜辐照处理后加以储存,在淡季供应市场.辐照的目的是抑制大蒜发芽.一个商业规模的辐照工厂正在建造中,预计 1993 年可建成.台湾省气候炎热而潮湿,农产品在储存期间常因气候条件造成严重损失,食品辐照将是避免这种损失的好办法.1985 年该省的卫生部门已批准辐照的食品包括大蒜、土豆、洋葱等.现正大力研究动物肉和海产品的辐照问题。

1992 年 5 月,WHO 再次肯定辐照食品无害,并称辐照食品可延长食品的保存期,战胜世界的饥荒.建议制定用  $\gamma$  射线处理食品的法规依据.现约 40 个国家同意采用此方法.WHO 也承认,辐照处理可能损坏食物的维生素,然而能杀死蛆、昆虫和细菌,使水果蔬菜久藏不变质。

(兰州大学 洪忠悌供稿)