

北京大学 6MV 串列静电加速器的运行及其应用

陈佳洱 于金祥 韦伦存 李认兴 巩玲华

(北京大学重离子物理研究所, 北京, 100871)

李 坤 卢希庭 江栋兴 刘洪涛

(北京大学技术物理系, 北京, 100871)

北京大学 6MV 串列静电加速器上建成 4 条束流输运线, 加速 ^1H , ^{12}C , ^{16}O , ^{19}F , ^{35}Cl , ^{79}Br 等离子, 并开展物理实验研究。首次利用 $\text{D}(^{12}\text{C}, \text{p})^{13}\text{C}$ 核反应建立起高灵敏度的氘分析法; 利用共振核反应 $^1\text{H}(^{19}\text{F}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 分析材料中氢的深度分布; 用重离子背散射分析超导材料 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$; 用 35 MeV ^{35}Cl 和 45 MeV ^{79}Br 的弹性前冲分析不同材料中的轻元素及测定低能重离子的阻止本领等。

关键词 加速器 加速器质谱 材料科学 离子束应用

北京大学 6MV 串列静电加速器的主体由英国牛津大学提供。经 22 个月的主体安装及配套设备的设计研制, 于 1989 年 8 月调试出束。

在该加速器上研制并建立起加速器质谱计^[1,2]。该系统经 ^{14}C 断代研究, 对马王堆、大汶口和南庄头等考古遗址样品和澳大利亚蔗糖标准样品的测试, 其测量精度已达 1.7%; ^{14}C 同位素测量灵敏度达 3×10^{-4} , 证实系统性能指标达到设计要求, 已通过国家自然科学基金委员会组织的专家测试^[3]。加速器质谱计主要应用领域有: (1) 对中国古人类化石及甲骨样品的 ^{14}C 年代测定; (2) 为研究我国干旱、半干旱地区几万年来环境演变的动态过程和发展趋势, 从而建立古气候时间序列, 需利用 ^{14}C 断代技术; (3) 对深海沉积物与金属锰结核的 ^{10}Be 年代测定; (4) 为研究铝致脑痴呆等生物医学问题而进行 ^{26}Al 的示踪测定。

本文还将描述相关系统的研制与改进, 以及应用核物理分析方法进行材料科学的研究和低能重离子的阻止本领的测定。

1 北京大学 6MV 串列静电加速器的改进

1.1 配置控制系统

采用程控技术, 实现对真空系统的程序控制及自动保护。程控机根据输入信号及内部程序实现各项功能。当真空进入 $2.7 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 时, 真空测量仪会自动输送“真空好”信号给程控

机,收到信号后,程控机自动打开高、低能端的气阀,以便进行调束。若当真空度低于 2.7×10^{-4} Pa 时,程控机将根据测量仪给出的“真空坏”信号自动关闭气阀及电动阀门,并发出警报信号。当需停机时,程控机可按时序切断各种电源。我们还利用光纤传输技术检测高电位下负离子源的工作参量。由于负离子源及预分析器均处于 -60 kV 预加速电压下,近 10 个临测参量需采用遥控及遥测技术,将离子源有关参量送入幅频变换和电流放大后,由光纤传至解调器,在现场和控制室实现负离子源工作参量的监测。还利用计算机计算和监测加速器运行时的部分工作参量,并制成加速器运行动态显示器,从而使这台加速器的运行操作方便可靠。

1.2 建立两器共同的气体处理系统及真空系统的改进

加速器钢筒内用 1:4 的 CO_2 和 N_2 作为绝缘气体,最高气压约 1.6 MPa。气体处理系统是由我校自己设计的,与 4.5 MV 静电加速器共用。它包括氧压机、过滤器、干燥器、油水分离器和循环干燥系统、储气罐、滑阀式真空泵及管路系统等。该系统可对绝缘气体进行循环干燥、净化处理和回收利用,经循环干燥处理的绝缘气体的湿度降到 10×10^{-6} 以下。该系统几年来的运行情况表明,其性能稳定可靠。

主机和全部束流输运线、物理实验线的真空系统均配以国产分子泵。整个系统真空度高 (10^{-4} — 10^{-5} Pa 范围)。由于实现了真空的程序控制及保护,运行安全可靠,并解决了在牛津大学长期未解决的钢筒充气体时加速管真空下降的问题。

1.3 离子源改进

目前该器装有三台负离子源,分别为 Middleton 型源、上海原子核所研制的 860 型源及双等离子体电荷交换源。前面两台源分别装有 12 和 20 个靶位,可在不破坏真空的情况下,更换靶位,产生各种不同的离子。860 型源专用于 AMS,用于物理工作的是经我们改进后的 Middleton 型源,一般流强 0.1—20 μA ,经 3 年多运行证明该源稳定可靠、寿命长,可满足大部分物理实验的要求。

1.4 四条实验线的建立

我们建立的四条束流输运线分别是:用于测定宇宙成因核素 ^{14}C , ^{10}Be 及 ^{26}Al 等的加速器质谱线(AMS);三束共靶的在线注入及在线分析线;另两条是用于核反应分析(NRA)、背散射分析(RBS)、弹性前冲分析(ERDA)等的通用线。

该器从 1989 年出束以来,经过一年多的试运行,于 1991 年 5 月通过由国家教委组织的验收,现已正常运行使用,端电压 6 MV,端电压稳定度 $\leq \pm 2\text{kV}$,达到在牛津大学时的水平。到目前为止,已经加速了 H, C, O, F, Cl 和 Br 等离子,表 1 是有关的性能参数。如 ^{12}C , ^{79}Br 等离子的束流强度均高于在牛津大学时的水平,高能端到分析磁铁像缝处的束流传输效率达 80%,分析磁铁后到各实验靶室的传输效率均达到 100%,束斑可达 ≤ 3 mm。

表 1 6MV 串列静电加速器的性能参数

Table 1 Typical parameters of the 6MV Tandem

离子	端电压/MV	能量/MeV	靶束流/nA
C^{5+}	5.5	33.07	75
C^{4+}	5.5	27.57	1200
Cl^{6+}	5.5	38.69	70
Br^{6+}	5.0	35.07	120
Br^{9+}	5.7	57.07	23

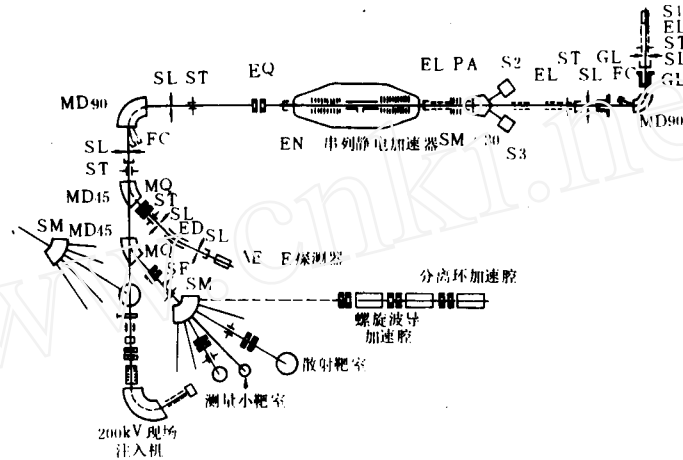


图 1 6MV 串联静电加速器及束流管线的分布图

Fig. 1 Layout of the 6 MV Tandem at Peking University

S1: 溅射离子源; EL: 单透镜; ST: 导向器; SL: 缝隙仪; GL: 间隙透镜; S2: 溅射离子源; S3: 电荷交换离子源; PA: 预加速; EQ: 静电四极透镜; FC: 法拉第筒; MQ: 磁四极透镜; ED: 静电能量分析器; SM: 开头磁铁。

2 材料科学的研究

6MV 串联静电加速器运行两年来, 主要集中于材料科学的研究和低能重离子的阻止本领的测定。在材料科学的研究中, 主要利用了核反应分析、弹性前冲分析、重离子背散射等核物理分析方法。

2.1 核反应分析法

利用 $D(^{12}\text{C}, p)^{13}\text{C}$ 核反应, 我们建立了一个高灵敏度氘的分析方法^[4]。该方法是国内首次采用。这个核反应有很大的反应截面 ($\sim 2 \times 10^{-29} \text{m}^2$) 并且当 ^{12}C 的能量在 6.8 MeV 到 8.2 MeV 时其反应截面的变化很小 ($\pm 10\%$)。分析氘的灵敏度和 $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ 的核反应分析的灵敏度相当, 达到 1×10^{14} 原子/cm²。如果对于实验条件加以优化, 其分析灵敏度可以超过 $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ 分析氘的灵敏度。该反应对于 Si 中的氘的分析深度可以达到 1.2 μm 。由于使用了非常容易得到的 ^{12}C 离子, 而不是使用价格昂贵的 ^3He 气体, 因此, 成本较低。利用氘作为氢的示踪同位素, 研究了在 SiH_4 和 D_2 气氛中由弧光放电法制备的作为太阳能电池材料的含氢无定型硅的成长机理。分析结果表明: 由此法制备的含氢无定型硅中的氢大部分来自于 SiH_4 ($>90\%$)^[4]。

我们还利用 $^1\text{H}(^{19}\text{F}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 核反应分析了作为太阳能电池材料的 a-Si(H) 中的氢的深度分布和含量, 以及作为核反应堆材料的 ZrO_2/Zr 中的 ZrO_2 及其界面处的氢的分布和含量, 分析结果表明在 ZrO_2/Zr 的界面处氢的含量比 ZrO_2 中氢的含量要高。

2.2 弹性前冲分析法

利用 35 MeV 的 ^{35}Cl 离子束的弹性前冲分析了从氢到氧的多种轻元素。用金硅面垒探测器, 在其前加有密勒吸收膜 (Mylar)^[5]。这是国内首次采用此法, 该方法可以同时分析 H, D,

He, C 和 O, 或者同时分析 H, C, N 和 O 元素。分析的深度分辨率一般好于 20 nm。对于 C, N 和 O 的分析最小检测限为 $(1-2) \times 10^{14}$ 原子/cm², 而对 H, D 和 He 的分析为 $(4-8) \times 10^{14}$ 原子/cm²。做了在氮气中不同的快速热退火条件下对 Co (480 nm)/Si 膜中的 H, C, N 和 O 的含量分析, 结果表明在未退火及较低温度 (< 500°C) 下退火的样品中含有约 $(1-2) \times 10^{14}$ 原子/cm² 的 N, 而当退火温度升高时, N 的含量降至方法的最小检测限以下。还用该方法研究了单晶硅中注入 He 的深度分布, 实验测定的深度分布与 TRIM 计算的结果有明显的差异^[5]。

另外还建立了用 45 MeV ⁷⁹Br 和 ΔE-E 探测系统的弹性前冲分析方法^[6]。

2.3 重离子背散射(HIRBS)法

重离子背散射比起常规的 α 背散射具有其独特的优点。由于重离子背散射利用较重的离子, 对于比入射粒子重的元素分析的质量分辨率好于 α 背散射, 而且重离子有较大的阻止本领, 因此具有较好的深度分辨率^[7]。

我们建立了一个以 ¹²C 离子作为入射粒子、用普通的金硅面垒探测器的重离子背散射方法, 对 YBa₂Cu₃O_{7-x} 高温超导材料与衬底 SrTiO₃ 之间的扩散行为进行了研究。

磁控溅射法制备的高温超导样品 YBa₂Cu₃O_{7-x}/SrTiO₃ 的 ¹²C 的重离子背散射谱示于图 2。为了从实验谱中提取元素的浓度分布的信息, 我们编写了一个计算机模拟重离子背散射的程序(HIRBS)。同时考虑了入射束流的不稳定性、入射束的有限束斑及探测器的有限立体角引起的能量几何展宽、离子在靶中的能量歧离以及探测器的能量分辨率因素。通过模拟从 ¹²C 实验谱而得到了样品中的 Y, Ba, Cu, Ti 和 Sr 的浓度分布示于图 3。从图 3 可以清楚地看出: Ti 向 YBa₂Cu₃O_{7-x} 有明显的扩散(扩散深度约为 30 nm)^[7]。

该方法还被用于 Co/Si 多层膜的真空热退火的反应动力学的研究。结果表明对于 Co/Si 多层膜反应动力学而言, 它和 Co/Si 单层膜的钴硅化合物的生成相序是一致的, 即: Co₂Si-CoSi-CoSi₂。

3 低能重离子的阻止本领测定

通过利用弹性前冲法测定样品表面及界面的氢, 建立了一个新的阻止本领的测量方法^[10]。该法可用来测量能量在 0.2—1.0 MeV 能区的重离子的阻止本领。这很有意义, 因为在这一能区阻止本领的数据很有限。测量的 ¹²C, ¹⁹F, ¹⁶O 和 ³⁵Cl 在 Ag, Si 和 Al 中的阻止本领示于图 4。有些数据与 TRIM-90 的计算值有明显的差别^[8]。

4 未来的工作

从上面介绍的工作可以看出, 6MV 串列静电加速器无论是对于材料科学的研究, 还是对

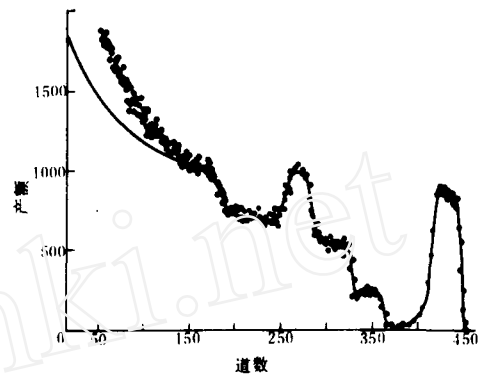


图 2 ¹²C 重离子背散射的 YBa₂Cu₃O_{7-x}/SrTiO₃ 谱

Fig. 2 ¹²C heavy ion rutherford backscattering spectrum of YBa₂Cu₃O_{7-x}/SrTiO₃ sample

.....实验谱; ——模拟谱; E (¹²C) = 8.13 MeV.

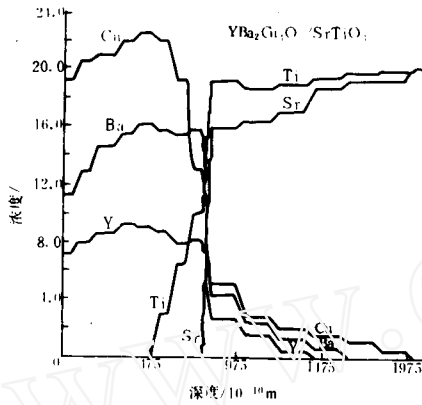


图 3 由 HIRBS 模拟程序计算的 $YBa_2Cu_3O_{7-x}/SrTiO_3$ 样品中的 Y, Ba, Cu, Sr 和 Ti 的浓度分布图

Fig. 3 Concentration profiles of Y, Ba, Cu, Sr and Ti in $YBa_2Cu_3O_{7-x}/SrTiO_3$ by HIRBS simulation program

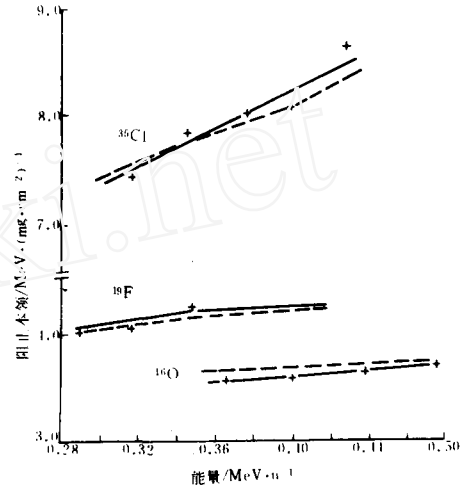


图 4 ^{12}C 离子在 Al, Ag 和 Au 中的阻止本领与 TRIM-90 计算结果的比较

Fig. 4 Comparison stopping powers of ^{12}C in Si, Ag, Au, with the calculated by TRIM-90
+ ——实验点; ——实验点拟合; ----模拟计算。

于地球、考古或生物医学等其它领域的研究都是非常有意义的。我们将进一步提高加速器质谱计的性能,并充分发挥它的效益。另外,近十年来,在国外的一些实验室里在线注入及辐照对于材料科学及微电子学方面的研究有了长足的进展^[9-11]。一般的在线注入系统包括一台静电加速器(单级或串列)和一台低能离子注入机。我们已有一台 4.5 MV 的单级静电加速器和一台 6 MV 串列静电加速器,这两台器的束流被引入同一靶室,再将一台 200 kV 的中流强离子注入机的束流引入该靶室,这样就可以做从几十 keV 到几十 MeV 能区的离子注入及辐照的研究和在线分析。另还有广泛的离子种类的选择。现正在加工一个多功能的包括三维转角仪及从液氮温度到 600℃ 的温度控制系统的新靶室。主要工作将集中于离子注入的材料改性、新功能材料和微电子器件的研究。

我们还将利用飞行时间谱仪来作弹性前冲分析(ERDA)和重离子背散射分析(HIRBS),从而提高分析的深度分辨率、质量分辨率及分析灵敏度。并利用所建立的一系列核分析方法进行半导体和超导体材料的研究,其重点将侧重于材料的表面和界面行为的研究,以及注入改性的研究。另外也计划开展有关利用重离子来激发原子的原子物理研究工作(例如重离子激发 X 光的研究)。目前 6 MV 串列静电加速器向国内外开放,欢迎国内外同行前来工作和合作。

作者借此机会向参加 6 MV 串列静电加速器实验工作的张征芳、金瑞鑫、张桂筠、沈毅雄、王兆江和任晓棠等同志表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Chen Chiaerh, Guo Zhiyu, Yan Shengqing, et al. Status of the Tandem Accelerator Mass Spectrometry Facility at Peking University. Nucl Instrum Methods, 1990, B52:306.
- 2 Chen Chiaerh, Guo Zhiyu, Yan Shengqing, et al. The Test Run of AMS System at Peking University. Conf Rec of the 1991 Particle Accelerator Conf, May 6-9, 1991, San Francisco, Vol.4: 2616.
- 3 国家基金委测试组. 北京大学加速器质谱计及(C-14 断代)测试报告, 北京大学资料, 1992.
- 4 Wei Luncun, Yang Xihong, Liang Bin, et al. A New High Sensitivity Analysis Method for Deuterium by D ($^{12}\text{C}, p$) ^{13}C and Its Application, Nucl Instrum Methods, 1991, B53:332.
- 5 Yang Xihong, Wei Luncun, Li Renxing, et al. Elastic Recoil Detection Analysis of Light Elements in Thin Films Using 35 MeV $^{35}\text{Cl}^{6+}$ Beam. Nucl Science and Techniques, 1992, 3(3):175.
- 6 刘洪涛等. 利用 ΔE -E 探测系统的弹性前冲分析方法. 核技术, 1993. (在排印中.)
- 7 韦伦存, 杨熙宏, 梁斌, 等. ^{12}C 重离子背散射方法及其对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超导膜界面扩散行为的研究. 核技术, 1992, 15(10):583.
- 8 Lu Xiting, Xia Zonghuang, Zhou Kungang, et al. A New Method for Measuring Stopping Power by ERD, Nucl Instrum Methods. 1991, B58:280.
- 9 Allen CW, Funk LL, Ryan EA, et al. In Situ Ion Irradiation/Implantation Studies in the HVEM-TANDEM Facility. Nucl Instrum Methods, 1989, B40/41:553.
- 10 Was GS, Rotberg VH. Michigan Ion Beam Laboratory for Surface Modification and Analysis. Nucl Instrum Methods. 1989, B40/41:722.
- 11 Cottureau E, Camplan J, Chaumont J, et al. ARAMIS: An Accelerator for Research on Astrophysics, Microanalysis and Implantation Solids. Materials Science and Engineering, 1989, B2:217.

OPERATION AND APPLICATION OF 6 MV TANDEM ACCELERATOR AT PEKING UNIVERSITY

CHEN CHIAERH YU JINXIANG WEI LUNCUN LI RENXING GONG LINGHUA

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing, 100871)

LI QUN LU XITING JIANG DONGXING LIU HONGTAO

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing, 100871)

ABSTRACT

Four beam lines are constructed for the 6MV Tandem Accelerator of Peking University. Various ions such as ^1H , ^{12}C , ^{16}O , ^{19}F , ^{35}Cl , ^{79}Br , etc. are accelerated. Some experiments are

made, such as deuterium determination for the first time by the $D(^{12}\text{C}, p)^{13}\text{C}$ nuclear reaction, hydrogen profiling using the resonance reaction $^1\text{H}(^{19}\text{F}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$, backscattering analysis for high T_c superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, ERDA induced by 35 MeV of ^{35}Cl and 45 MeV of ^{79}Br ions for analyzing of light elements in various materials and stopping power measurements of low energy heavy ions and other experiments.

Key words Accelerator AMS Material science Ion beam application

www.cnki.net