

文章编号: 1007-4627(2000)02-0117-04

# 一种新的灵敏核探针——慢正电子束流装置\*

魏 龙, 陈红民, 于润升, 王宝义, 张天保

(中国科学院高能物理研究所核分析技术开放实验室, 北京 100080)

郁伟中, 何元金

(清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

王天民

(北京航空航天大学理学院, 北京 100083)

摘 要: 简要介绍了广泛应用于表面科学的灵敏核探针——慢正电子束设备的原理、构造和应用, 阐述了北京慢正电子束流装置的设计原理和性能, 讨论了北京慢正电子束流装置今后的研究前景.

关键词: 慢正电子束流; 正电子湮没; 表面界面

中图分类号: TL503.1, O571.33 文献标识码: A

## 1 引言

1930年狄拉克(P. A. M. Dirac)在解单电子相对论运动方程的过程中,对存在负能量结果进行解释的同时,预言了正电子的存在.赵忠尧在1930年研究能量为2.61 MeV  $\gamma$ 射线在金属Pb上的吸收和散射时,发现除康普顿散射外,还存在一种特殊的各向同性的辐射,但当时并不知道这种辐射即为正电子湮没产生的 $\gamma$ 辐射.1932年,C. D. Anderson在宇宙线实验中首先发现了正电子.从此开辟了一个崭新的基本粒子物理研究领域,并且在基础理论不断完善的同时,在材料科学、固体物理等各个领域开展了应用研究.目前,已建立了比较系统的正电子湮没谱学.

正电子湮没谱学实验方法主要分为寿命谱测量、多普勒展宽谱测量以及一维和二维角关联测量等.所采用的正电子源一般为放射核素 $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ 等.由于放射性核素 $\beta$ 衰变产生的正电子其能量分布是连续的,因而常规正电子湮没谱学实际上反映了正电子在样品内部的体分布信息.随着近年来表面科学以及薄膜材料的不断发展,正电

子湮没谱学作为一种灵敏和有效的研究材料微观结构和微观缺陷的重要核物理方法,也有了长足的进步,并发展成当今低能、单色且能量连续可调的慢正电子束流方法.

1979年, Mills 等<sup>[1]</sup>利用金属W表面正电子的发射现象制成慢正电子束流装置.随着正电子慢化技术和慢正电子束流技术的不断发展,一些新的与电子束流技术相对应的实验方法和技术也相继面世.以物质表面、近表面及界面原子结构的分析手段为例,已有低能正电子衍射(LEPD)、正电子能量损失谱(PELS)、反射型高能正电子衍射(RHEPD)、正电子俄歇能谱<sup>[2]</sup>(PAES)等技术.由于正电子是电子的非全同粒子,在和电子及原子实的散射过程中,会提供与电子探针情况下不同的信息.譬如,电子和物质相互作用会产生携带近表面物质原子结构信息的二次电子,此时无法区分散射出的电子和二次电子,只能将能量较低电子称为二次电子.然而,对于正电子的情况,入射正电子和出射二次电子是完全可以区分的.另外,正电子最重要的特征之一是与电子的湮没现象,低能入射正电子即使没有足够的能量激发出电子,湮没过程

\* 收稿日期: 1999-01-19, 修改日期: 1999-08-15

\* 基金项目: 中国科学院九五重点项目资助(KJ952-s1-416)

作者简介: 魏 龙(1965-),男(汉族),山东济南人,副研究员,从事核分析技术及其在材料科学中应用研究.

也能使原子或离子的电子产生能级跃迁，能级跃迁的能量可以激发电子以及光子的发射。测量这种情况下被激发的粒子能得到信噪比更高的原子结构信息。通过测量湮没产生的511 keV  $\gamma$ 射线的能量、动量及寿命谱，可推知正电子的扩散长度、电子偶素产额等，根据这些测量可以给出物质表面、近表面的缺陷种类与分布。而所有这些应用的基本条件是具有单色性好、强度足够高的慢正电子束流。中国科技大学和清华大学按早期模式分别建成了两台慢正电子束装置，但与国际水平相比差距较大。北京慢正电子束流装置是根据国际近期发展趋势而建成的。慢正电子流强达到 $10^4 \text{ s}^{-1}$ 。慢化体慢化效率达到 $10^{-4}$ ，具有目前国际同类水平。

## 2 慢正电子束装置工作原理及应用

通常慢正电子束装置按快正电子的产生机制可区分为两类，一类是利用放射性核素作快正电子源；另一类是利用电子直线加速器(LINAC)产生的高能电子束打靶(常用的靶材料有 Ta, W 等)产生快正电子。也有人正利用质子回旋加速器提供的束流打靶引起的核反应得到快正电子。利用以上两种方式产生的快正电子需要进一步慢化成慢正电子，方法是让它们射入慢化体(通常采用 W 箔)。对正电子来说，慢化体表面具有负功函数，快正电子在慢化体中损失能量成为低能正电子后将以一定几率垂直于慢化体表面向外发射，发射几率为 $10^{-4}$ 量级。从慢化体表面出射的低能正电子动能约为1 eV且单色性较好，将它们聚焦和加速就成为慢正电子束。图1是利用放射性核素产生慢正电子束的工作原理简图。用约几十 mCi 的放射源产生正电子，放射源前放置金属慢化体，从慢化体出射的低能正电子被偏置栅压拉出，然后在纵向磁场约束下向前输运，之后由加速装置调整能量后输至样品处。因这种装置产生慢正电子的效率一般为 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ ，常规放射源放射强度一般为数十 mCi，所以慢正电子的流强一般为 $10^3 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。图2是利用电子直线加速器提供的高能电子束打靶后由慢化体产生慢正电子装置的示意图，可得到流强为 $10^6 \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的慢正电子束流，它是为适应一些新型的实验技术，如低能正电子衍射、正电子显微镜要求有较强的正电子束流而研究开发的。

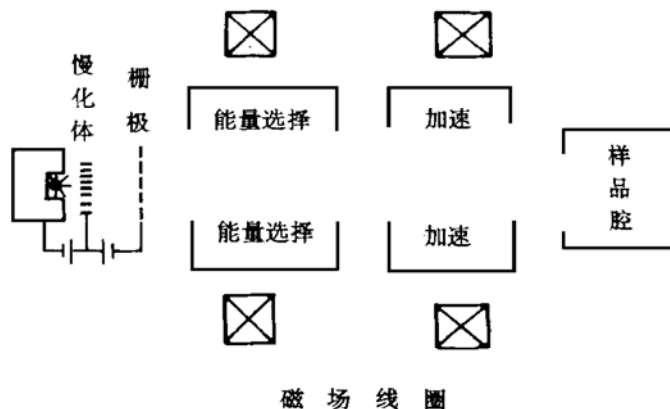


图1 利用放射性同位素产生慢正电子束原理简图

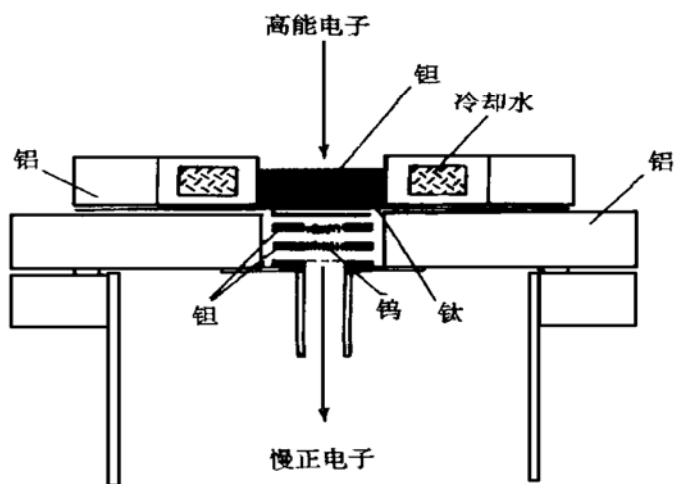


图2 利用电子直线加速器产生慢正电子原理示意图

慢正电子束可用于基础研究和应用研究，广泛应用于物理、化学和材料科学等领域，大致有如下几个方面：

经加速装置使慢正电子束的能量连续可调，从而可以射入从材料表面至深度约为微米量级的区域，是一种研究表面和界面小到原子尺度的缺陷的灵敏核探针，特别适合于研究金属半导体界面场，如 Al/GaAs 界面<sup>[3]</sup>、半导体 Si<sup>[4]</sup>和 Ge<sup>[5]</sup>等的表面及其内部 PN 结性质、SiO<sub>2</sub>/Si 等半导体异质结构<sup>[6]</sup>，以及多层膜结构(如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnS/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Glass<sup>[7]</sup>等)，可用于验证半导体载流子与声子相互作用的理论。利用慢正电子束与样品作用产生的电子偶素(正负电子体系和纯轻子系统)可验证量子电动力学关于偶素衰变参数的理论计算和正反物质世界的对称性。若再在慢正电子束装置上附加束团化设备，可提供时间分辨信息。日本电气技术实验室(ETL)于90年代利用一台小型加速器 LINAC 装置建成一脉冲宽度为 ms 量级和慢正电子计数率约为 $10^7/\text{s}$ 的束团化装置<sup>[8]</sup>。

正电子应用于化学研究早已产生一门新的边缘学科——正电子偶素化学。慢正电子束对物质表面的敏感性可用于研究催化剂表面和腐蚀过程的最初机制, 研究化学反应动力学过程中的中间产物以及聚合物在摩擦磨损情况下表面和内部自由体积的变化与宏观性能的内联联系等。

### 3 北京慢正电子束流装置结构及参数

北京慢正电子束流装置一开始就本着高起点、可技术升级的原则进行立项。图3是北京慢正电子束装置的结构和原理示意图, 实验装置的布局包括: 放射源及屏蔽体、慢化体、能量分析器、加速管、漂移管、样品室、探测器、真空系统、磁场系统和自动控制部分。由放射源  $^{22}\text{Na}$  衰变产生的正电子经过金属 W 慢化器慢化后由偏置电压约为 100 V

的栅极引出, 经 Cosine 磁偏转线圈能量分析器选出的具有单一能量的慢正电子由漂移管型静电加速管进行加速, 加速能量从 30 eV ~ 35 keV 连续可调, 在纵向磁场的约束下最后输运至样品室。整套装置内部的真空度为  $10^{-6}$  ~  $10^{-7}$  Pa。这种设计可保证在不同的加速电压下设备整体及样品都处于地电位, 样品没有电荷积累, 还可以方便地对样品实施在线处理, 各种电源设备直接使用市电, 不需要浮在高压之上, 容易对束流进行调整和控制, 放射性屏蔽也不需要高压隔离等。近期我们已经进行了束流实验, 实验分3个阶段进行, 即空载模拟电子束流实验、实载模拟电子束流实验和  $^{22}\text{Na}$  正电子束流实验。结果表明, 整个系统的正电子转换效率约为  $8 \times 10^{-5}$ , 慢化器的慢化效率约为  $1.7 \times 10^{-4}$ , 达到国际同类装置的慢化水平。

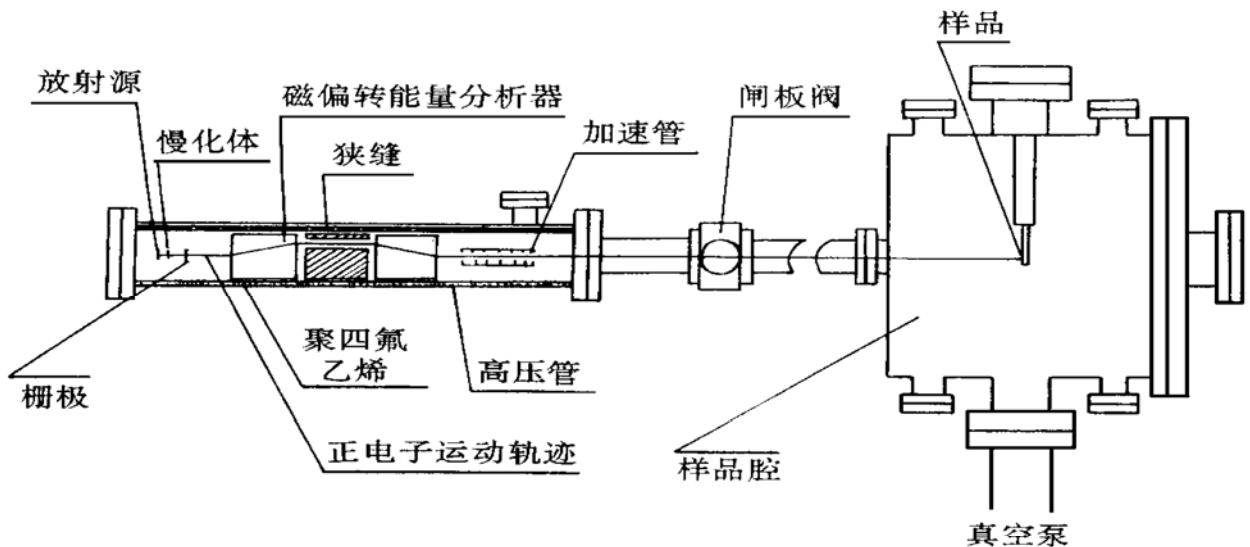


图3 北京慢正电子束流装置原理示意图

### 4 北京慢正电子束流装置研究展望

综上所述, 北京慢正电子束流装置的前期建设工作已基本结束。同时, 在装置的加速管与样品腔之间留有约 1 m 长的漂移管, 为以后建设斩波设备提供了基础。样品腔外表面留有数个同心法兰, 可以建设样品制备室及发展新的实验方法, 从而使今后技术升级成为可能。鉴于通常的慢正电子装置流

强较弱, 实验周期较长, 也不利于延伸技术的发展, 国外许多有条件的实验室都在利用电子直线加速器提供的强电子束流打靶来产生强流强的慢正电子束。北京正负电子对撞机 (BEPC) 电子直线加速器 (LINAC) 作为储存环的注入器在完成每次注入后间隔的剩余时间长达 6 ~ 30 h, 利用其剩余时间建成高亮度的低能单色正电子束流设备, 将对促进我国慢正电子学科的发展起到重要作用。

#### 参 考 文 献:

[1] Mills A P, Platzman Jr P M, Brown B L. Slow Positron

Emission from Metal Surfaces [J]. Phys Rev Lett, 1978, 41:

- 1 076~ 1 079.
- [2] Weiss Alex, Koymen Ali R, David Mehl. Positron Annihilation Induced Auger Electron Spectroscopy and Its Implementation at Accelerator Based Low Energy Positron Factories [J]. Nucl Instr and Meth B, 1991, 56/57: 591~ 594.
- [3] 翁惠民, 周先意, 徐纪华等. Al/GaAs 界面微结构的慢正电子束研究 [J]. 高能物理与核物理, 1993, 17: 775~ 782.
- [4] Nielsen Bent, Lynn K G, Vehanen A. Positron Diffusion in Si [J]. Phys Rev B, 1984, 32: 2 296~ 2 301.
- [5] Jorch H H, Lynn K G. Positron Diffusion in Germanium [J]. Phys Rev B, 1984, 30: 93~ 105.
- [6] Nielsen Bent, Lynn K G, Chen Yen-C. SiO<sub>2</sub>/Si Interface Probed with a Variable-energy Positron Beam [J]. Appl Phys Lett, 1987, 51: 1 022~ 1 023.
- [7] Vehanen A, Saarinen K, Hautajarvi P. Profiling Multilayer Structures with Monoenergetic Positrons [J]. Phys Rev B, 1987, 35: 4 606~ 4 610.
- [8] Akahane T, Ciba T, Shiotani N. Stretching of Slow Positron Pulses Generated with an Electron Linac [J]. Appl Phys A, 1990, 51: 146~ 150.

## A New Type of Acute Nuclear Probe —— Slow Positron Beam Line\*

WEI Long, CHEN Hong-min, YU Run-sheng, WANG Bao-yi, ZHANG Tian-bao

(*Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

YU Wei-zhong, HE Yuan-jin

(*Physics Department of Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

WANG Tian-min

(*Beijing Aeronautics and Astronautics University, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** A novel and compact slow positron beam line——Beijing Slow Positron Beam Line was described. The basic physical concepts of the slow positron beam and its applications were reviewed. Recent experimental results showed the converting efficiency for the total positrons from the radioisotope to slow positrons was  $8 \times 10^{-5}$  and the moderation efficiency was  $1.7 \times 10^{-4}$ . The future development of Beijing Intense Slow Positron Beam, based on the BEPC LINAC, was also briefly discussed.

**Key words:** slow positron beam line; positron annihilation technique; efficiency

\* **Foundation item:** Key-project of the Chinese Academy of Sciences (KJ95-s1-416)