

低能单色正电子束装置的原理、研制及应用^{*}

王天民¹⁾

(北京航空航天大学理学院 北京 100083)

王宝义 陈红民 于润升 魏 龙 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¹⁾ 何元金¹⁾

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

摘 要 简要介绍了一种新的灵敏核探针——低能单色正电子(慢正电子)束流装置的原理及应用,同时介绍了北京慢正电子束流装置的建设进展情况。

关键词 正电子湮没,慢正电子束流,基于加速器慢正电子束

PRINCIPLE, FABRICATION AND APPLICATION OF THE SLOW POSITRON BEAM LINE

Wang Tianmin

(School of Science, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Wang Baoyi Chen Hongmin Yu Runsheng Wei Long Zhang Tianbao

(Laboratory of Nuclear Analysis Technology, Institute of High Energy Physics,

The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Yu Weizhong He Yuanjin

(Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A novel and compact mono - energetic positron beam line ——the Beijing Slow Positron Beam Line, is described. The basic physical concepts of the mono - energetic positron beam and its applications are reviewed.

Key words positron annihilation, mono - energetic positron, LINAC - based slow positron beam

1 引言

1930年,赵忠尧在研究硬 γ 射线在重金属中的散射现象时,发现伴随着反常吸收,存在着一种特殊的辐射现象.他还进一步测得,这种特殊辐射的能量约为0.5MeV,大约等于一个电子的静止能量,辐射角分布为各向同性.赵忠尧

的研究结果引起了物理学界的重视.1932年,赵忠尧在美国加州理工学院的同学安德森(C. D. Anderson)受此启发而在宇宙线的云雾室照片上首次观察到了正电子的轨迹,安德森

^{*} 国家自然科学基金资助项目,中国科学院“九五”重点项目
1998 - 11 - 17 收到初稿,1999 - 01 - 12 修回

1) 中国科学院高能物理研究所核分析技术开放实验室客座人员

因此获得了 1936 年的诺贝尔物理学奖. 其实, 赵忠尧是发现正负电子湮没现象的第一人^[1].

现在, 正负电子湮没技术已经形成一门学科, 而且在材料科学中发挥了越来越独特的作用. 原因有二: 一是它对样品的种类几乎没有什么限制, 凡是涉及材料的电子密度及电子动量有关的问题, 原则上都可以用正电子湮没技术来研究; 二是它对样品中原子尺度的缺陷极端敏感. 常规正电子谱学方法主要有寿命谱测量与分析、多普勒展宽谱测量与分析和一维、二维角关联等. 因正电子是利用放射性核素 (^{22}Na , ^{58}Co , ^{64}Cu , ^{68}Ge 等) 衰变产生, 放射性核素发生 β^+ 衰变时产生的快正电子由于中微子的存在而具有连续的能量分布, 例如, 由 ^{22}Na 放出的正电子最大能量约为 0.54 MeV. 直接用这样的正电子源分析样品时, 人们得到的是正电子在样品内的体分布信息. 近年来, 随着表面科学的发展, 常规正电子湮没技术已不能适应要求, 只有当正电子具有单色能量、在样品内穿透深度小并且能量可调(一般指零到几十 keV, 即慢正电子)时, 才适合于进行表面、近表面及界面实验.

1979 年, Mills 利用钨表面正电子的发射现象制成第一台慢正电子束流装置^[2]. 慢正电子束以及慢化技术出现后, 一批新的实验方法和技术应运而生, 例如, 以物质表面、近表面及界面原子结构的分析手段为例, 低能正电子衍射 (LEPD) 对应于低能电子衍射 (LEED); 正电子能量损失谱 (PELS) 对应于电子能量损失谱 (EELS); 反射型高能正电子衍射 (RHEPD) 对应于反射型高能电子衍射 (RHEED); 正电子俄歇能谱 (PAES) 对应于电子俄歇能谱 (EAES) 等. 由于正电子携带正的电荷, 是电子的非全同粒子, 在和电子及原子实的散射过程中, 会提供与电子情况下不同的信息. 电子和物质相互作用, 会产生二次电子, 二次电子携带近表面物质的原子结构信息, 在这种情况下, 无法区分入射电子和出射电子, 只是将能量低的出射电子称为二次电子. 正电子和物质相互作用, 同样会产生二次电子, 在这种情况下, 入射正电子和出射

二次电子是完全可以区分的. 另外, 作为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过程. 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. 当然, 如上述常规正电子湮没技术一样, 测量 511 keV 射线的能量、动量以及正电子寿命, 利用慢正电子束可以定量地测量正电子的扩散长度、电子偶素产额等, 根据这些测量给出物质表面、近表面的缺陷种类与分布. 而所有这些应用的基本条件是单色好、强度及亮度足够高的慢正电子束流. 国内正电子学界按早期模式先后在清华大学和中国科学技术大学建成了两台慢正电子束装置, 但国内整体水平远远落后于国际的发展. 中国科学院高能物理研究所、清华大学慢正电子束流装置(后面称北京慢正电子束流装置)就是在这种情况下酝酿建成的, 目的是追踪国际趋势, 加速发展国内慢正电子束流技术, 同时为国内材料科学工作者提供慢正电子实验的基本条件.

2 慢正电子束流装置的工作原理及应用

通常, 慢正电子束装置按快正电子的产生机制区分主要有两类, 一类是利用放射性核素作快正电子源; 另一类是利用高能电子直线加速器 (LINAC) 产生的高能电子束打靶, 由韧致辐射产生正负电子对效应, 并伴随级联簇射, 产生较大份额的快正电子, 常用的靶材料有 Ta, W 等(也有人利用质子回旋加速器打靶产生核反应得到正电子). 第一类装置的特点是设备小, 原理简单; 难点是需要固体密封放射源以及超高真空设备; 缺点是受放射源强度的限制, 难以得到较高流强的慢正电子束流. 一般用数十毫居里的放射源, 利用 β^+ 衰变产生的快正电子射向慢化体, 考虑到慢化体的慢化效率及传输过程中的损失, 每秒到达样品腔的正电子数目约为 $10^3\text{--}10^4$. 第二类装置的特点是必须基于

电子直线加速器,难点是靶的制备及冷却技术,因为一般都是利用数十 MeV 的高能电子打靶,靶的冷却及布置至关重要,它的好坏直接影响正电子的产额.从靶射出的正电子主要是快正电子,能量连续分布但有较集中的能量值,能量的大小由入射高能电子的能量决定.目前,国外许多有条件的实验室都已有此类装置,最后产生的慢正电子数目每秒约为 $10^5 \sim 10^9$,日本 KEK 的慢束装置能达到 $2 \times 10^9 e^+ / s$.

慢正电子都是利用慢化体产生的,原理大致如下,利用放射性核素衰变或加速器打靶产生具有连续能量分布的快正电子.快正电子射入某种固体内,因与固体内的原子和分子发生非弹性碰撞,正电子损失其能量,在约 $10^{-12} s$ 的时间内迅速慢化至热运动状态,室温 (300 K) 下具有动能约为 $E_T = 3/2 kT = 0.038 eV$.若物质完整性较好,即缺陷和杂质少,则热化的正电子以相对较长的寿命 (约 $10^{-10} s$) 在物质内扩散;若慢化的正电子距表面的距离小于正电子平均扩散长度,且具有清洁表面的该物质对正电子具有负的功函数,则正电子会以一定的几率垂直物质表面向外发射而成为慢正电子,这

样的物质称为慢化体,常用的慢化体有金属 W, Cu, Ni (MgO) 等.从慢化体表面出射的低能正电子动能大小约为 1eV 且单色性较好,将它们聚焦和加速 (由加速管完成) 就成为慢正电子束.

慢正电子束主要应用于材料表面及界面的物性研究,特别是其中的微观缺陷和电子态密度信息,适用于半导体异质结材料、多层膜等.因为慢正电子束流的一个重要特征是它的能量可调,所以可分析从表面至材料体内 μm 量级尺度的信息.和其他的通常用来分析样品内部微观缺陷的实验方法,如 TEM (透射电子显微镜)、XRS (X 射线衍射谱)、STM (扫描隧道显微镜)、AFM (原子力显微镜)、NS (中子散射) 等相比,慢正电子湮没谱学 (常规正电子湮没谱学加慢正电子束流技术) 具有自己独特的优越性,一是表现在它的高敏感性 (小到原子尺度的微观缺陷),同时可观测大到 μm 量级的缺陷;二是它原则上可分析样品内部任意深度的缺陷.

3 北京慢正电子束流装置的建设进展

北京慢正电子束流装置的前期建设目前已

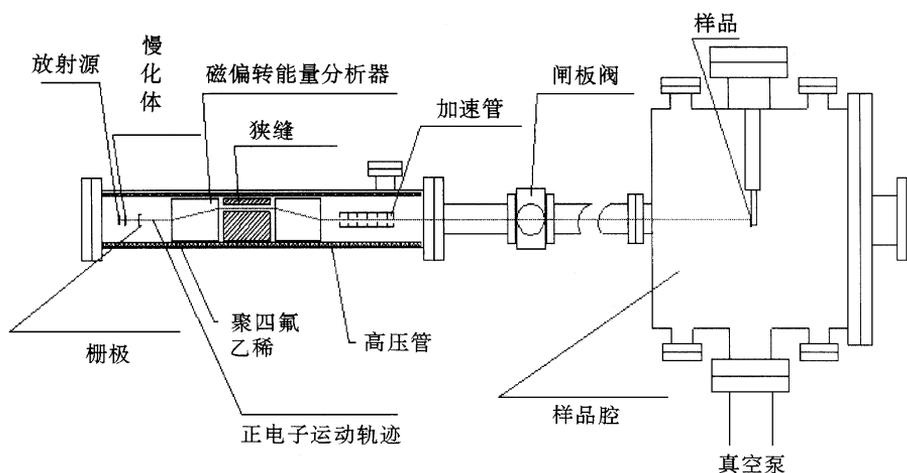


图 1 北京慢正电子束流装置原理示意图

经基本完成,图1是它的结构原理图.我们用的是百叶窗式W慢化体,加速管后面至样品腔之间留有一定长度的漂移管,以备日后建造斩波设备.

北京慢正电子束流装置的后期建设已经同时展开,目前正在实施与LINAC对接的具体事宜.基于加速器的慢正电子束流装置中一个重要的部分是用来产生正电子的靶以及慢化体,靶和慢化体一般装配在一起,如图2所示.

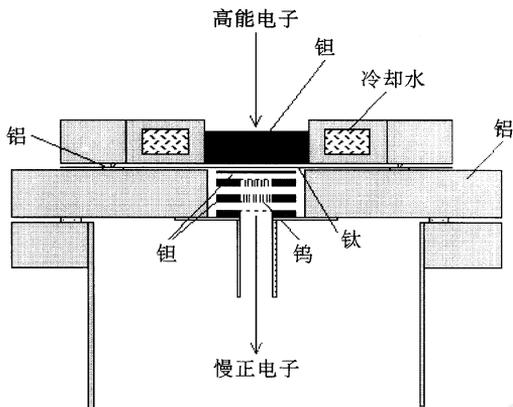


图2 利用电子直线加速器产生正电子的原理示意图

目前国际上都用 EGS4 程序包^[3]来模拟高能电子打靶产生正电子的数量及能量和角分布.目前已经对北京自由电子激光装置(BFEL)的LINAC和北京正负电子对撞机(BEPC)的电子直线段进行了计算,其中有关打靶产生的正电子的信息示于图3和图4.图3描述了对应于30MeV高能电子束正电子产额与Ta靶厚度的关系;图4描述了产生的快正电子的能量分布

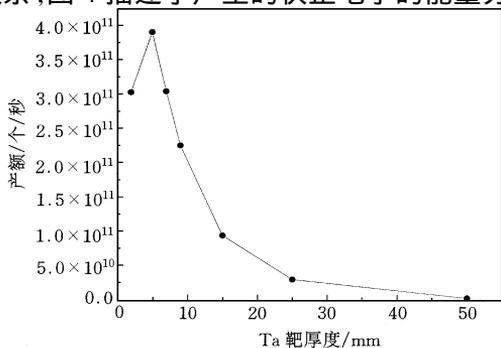


图3 出射正电子产额与Ta靶厚度关系

情况.考虑慢化效率及传输效率,最终到达样品腔的正电子数目约为 $(10^6 \sim 10^7) e^+/s$,这就为发展前面所述的几种实验方法(LEPD等)提供了有力的保证.但是工程上仍然有许多问题需要解决,如靶的冷却问题等.另外需增加的装置有彭宁陷阱(Penning-trap)设备、斩波系统等,其中彭宁陷阱是用来定时定量存储及释放慢正电子的,因为电子直线加速器内的电子具有脉冲属性,从慢化体射出来的慢正电子带有脉冲性质而且数目会大于通常核探头的分辨本领.

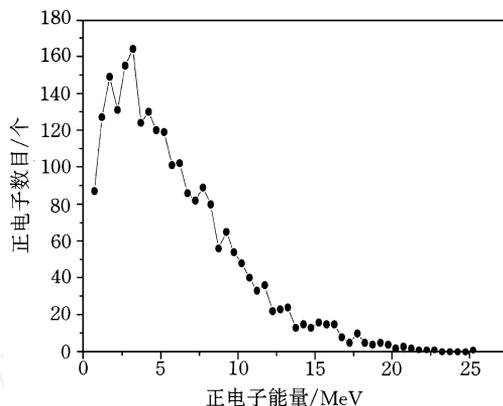


图4 出射正电子能量分布

4 结论

我们本着高起点、可技术升级的原则建造了北京慢正电子束流装置,前期基于放射性同位素的慢正电子束流装置已经基本结束,将应用于材料表面、界面微观缺陷方面的研究.一旦基于LINAC慢正电子束装置建成,将为许多实验方法,如LEPD(低能正电子衍射)、PAES(正电子俄歇能谱)、正电子显微镜等提供有力的保证.

参 考 文 献

- [1] 施宝华. 诺贝尔奖的遗憾. 中国科学报, 1998年10月7日, 总第1352期
- [2] Mills A P, Platzman Jr P M, Brown B L. Phys. Rev. Lett., 1978, 41:1076—1079; 1828—1831
- [3] Nelson W R, Hirayama H, Rogers D W O. The EGS4 Code System. Stanford, California: Stanford Linear Accelerator Center, 1985.