

# 北京慢正电子强束流运行性能测试\*

曹兴忠<sup>1)</sup> 王宝义 王平 马雁云 秦秀波 魏龙<sup>2)</sup>

(中国科学院高能物理研究所核分析技术重点实验室 北京 100049)

**摘要** 慢正电子强束流采用高能脉冲电子束流轰击金属钨靶, 以产生正负电子对的方式提供正电子, 作为慢正电子束流方法学研究及薄膜材料缺陷研究的束流基础. 本文是在该装置实现运行后, 对慢正电子束流的强度、能散、形貌等运行性能的测试工作的介绍, 以及慢正电子湮没多普勒测量系统的调试和标准样品的测量结果.

**关键词** 慢正电子束流 束流强度 能散 束流形貌 正电子湮没 S 参数

## 1 引言

作为电子的反物质, 正电子与电子发生湮没的特性使其已广泛应用于体材料缺陷信息与电子局域态结构的研究<sup>[1, 2]</sup>. 而能量可调的慢正电子束流作为探测薄膜材料表面缺陷信息及其深度分布信息研究课题中的主要分析手段之一<sup>[3]</sup>, 已应用于固体物理、材料科学、化学等学科中对正电子敏感的原子尺度的空位型缺陷的研究工作中, 例如空位、空位团、空穴、位错和内表面等方面. 基于电子直线加速器(LINAC)的慢正电子强束流技术的发展, 使得正电子在各科学和技术领域的应用成为可能<sup>[4-6]</sup>, 如正电子透射显微镜、正电子冷却捕获技术的发展<sup>[7, 8]</sup>.

北京慢正电子强束流装置利用北京正负电子对撞机(BEPC)电子直线加速器, 产生高强度和高亮度的低能单色正电子束流. 系统主要组成部分有正电子转换靶室、束流输运真空系统、脉冲正电子存贮与直流化装置、正电子湮没谱学测量系统等<sup>[9]</sup>, 其中测量系统将包括正电子湮没多普勒展宽谱(PADB)、二维符合多普勒谱(CDB)、慢正电子湮没寿命谱(SPALS)、正电子诱导电子俄歇能谱(TOF)和慢正电子动量-寿命关联谱(SAMOC)等测量手段. 束流输运系统的真空度为 $3 \times 10^{-7}$ Pa, 约束磁场强度为轴向均匀100Gauss, 其不均匀度小于10%, 束流线

总长约16m. 高能电子束流(2.5ns, 12.5pps)打靶产生的脉冲正电子经慢化器慢化、栅极加速、直流化管道的存贮与直流化等束流技术后, 形成准一维连续分布的正电子束流进入样品测量室, 如图1所示为系统结构图. 实验获得脉冲正电子束流强度约为 $6 \times 10^5 e^+/s$ , 束斑小于 $\phi 15$ , 束流能散(FWHM) $\sim 10 eV$ <sup>[4, 10]</sup>. 北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)设计过程中, 考虑到强流慢正电子束的需求, 其直线注入器可工作在长脉冲束流状态, 预计脉冲正电子束流强度将高于 $10^8 e^+/s$ , 对慢正电子束流技术及其相关方法学研究的发展更为有利.

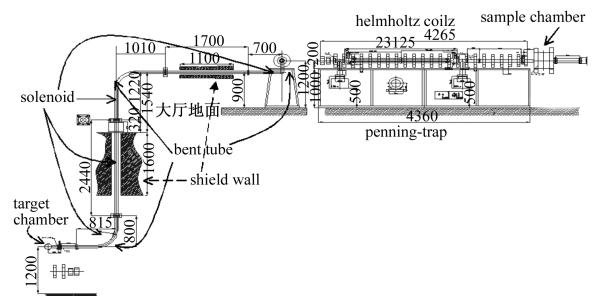


图 1 北京慢正电子强束流系统结构图

发展慢正电子湮没谱学测量技术, 要求在时间上连续分布的准一维慢正电子束流, 束流能量单一可调. 脉冲正电子经过彭宁阱(Penning-Trap, P-T)装置的存贮与直流化调制, 释放为时间上连续分布的准一

2006-03-10 收稿

\* 国家自然科学基金(10475096)和中国科学院大型仪器专项(U-37)资助

1) E-mail: caoxzh@ihep.ac.cn

2) E-mail: weil@ihep.ac.cn

维慢正电子束流，其束流性能主要由束流强度、束流能散和束斑大小等参数体现。慢正电子束流的能量调节通过样品加载负高压的方式实现，调节范围为 0.1—30keV。其中样品电位调节和测量数据分析纳入自动控制系统程序完成。本文将主要介绍直流化后慢正电子束流性能的测试结果，以及慢正电子湮没多普勒测量系统的建立和标准样品的测量分析结果。

## 2 束流性能测试

慢正电子束流的性能参数，不仅是建立慢正电子湮没谱学测量方法的要求，同时，通过对束流性能参数的测试，综合高能电子打靶中正电子产额、慢化体慢化效率、输运系统传输效率、PT 存贮及直流化效率、高压加速效果、地磁场影响等各项系统参数，为提高慢正电子束流技术水平提供实验数据，积累实验经验<sup>[4, 9, 10]</sup>。表 1 给出了慢正电子束流主要性能参数的实验测试结果。

表 1 慢正电子束流性能参数

束流性能	参数
真空状态(实载运行)	$< 3 \times 10^{-7} \text{Pa}$
输运磁场(轴向均匀 $<10\%$ )	$\sim 100 \text{Gauss}$
传输效率(电子束流模拟)	$> 98\%$
脉冲束流强度(BEPC 模式)	$\sim 6.5 \times 10^5 / \text{s}$
慢正电子束流强度	$\sim 1.8 \times 10^5 / \text{s}$
测量计数率(GEM-HPGe)	$\sim 5600 \text{cps}$
慢正电子能量分布	85—88eV
束流微分能谱(FWHM)	$< 1.0 \text{eV}$
束斑形貌(IP 成像板)	$< 15 \text{mm}$
能量调节范围(负高压)	0—30keV

采用 GEM-HPGe 探测器测量慢正电子束流在样品内的湮没计数，标度直流化后慢正电子束流的强度。实验模拟了实际测量中观察窗的影响，探测器前面放置 7mm 厚的石英玻璃，以已知强度的  $^{22}\text{Na}$  放射源标定探测器探测效率与放射源距离的关系，在标定的测量点测量正电子的湮没计数。图 2 为探测器的探测效率曲线，从图可知探测效率小于 10%。实验选用放射源强度为  $1.85 \mu\text{Ci}$ ，其衰变产生的正电子数为

$$1.85 \mu\text{Ci} \times 3.7 \times 10^{10} \text{e}^+ / \text{mCi} = 6.85 \times 10^4 \text{e}^+.$$

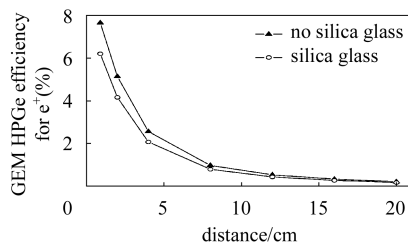


图 2 GEM HPGe 探测器探测效率曲线

选择分别距探测器 6cm, 9cm, 12cm, 17cm 点测量慢正电子束流的湮没计数，结果见表 2 数据。对比分析实验测量数据，可知慢正电子束流强度约  $1.8 \times 10^5 \text{e}^+ / \text{s}$ 。在慢正电子湮没测量样品时，探测器的实际距离为 5mm，正电子湮没计数高于 5000cps (表 1)。

表 2 束流强度测量结果

源距离/cm	6	9	12	17
源计数/cps	760	451	267	137
束流计数/cps	2200	1150	730	380
束流强度/ $(10^5 \text{e}^+)$	1.98	1.74	1.87	1.9

作为慢正电子束流性能参数的一项重要指标，束流能量的分布结构，即能散(FWHM)的大小不仅反映了束流的品质、Penning-Trap 装置的工作性能，也影响慢正电子束流束团化系统设计中工作参数的选择<sup>[11]</sup>。实验中，正电子束流能量保持不变，加载可调阻挡电极电势，通过测量穿过电极的正电子湮没计数，分析束流的能量分布结构。图 3 给出正电子湮没计数与阻挡电极电势之间的关系曲线，及其微分能谱图。从图中可以看出慢正电子主要集中在 85—87eV 的能量范围内，微分能谱图显示束流能散  $\pm \sim 1.0 \text{eV}$ 。

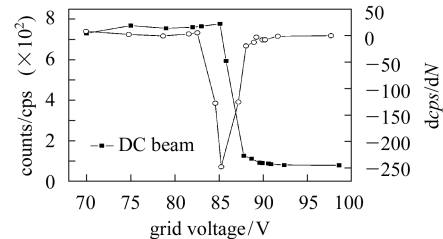


图 3 慢正电子束流能量分布结构

○为微分能谱曲线。

利用 IP 成像板技术探测慢正电子束斑的大小及二维位置信息，是近年来 IP 成像板在正电子谱学领域新的应用研究<sup>[12, 13]</sup>。实验时样品室真空度为  $10^{-5} \text{Pa}$  量级，栅极电压  $V_g$  为 63V，IP 成像板加速电压为  $-14 \text{kV}$ ，在无可见光的条件下对成像板板面照射 2400s 进行成像实验。实验结果表明，成像板对慢正电子具有良好的感光性能。成像板读出系统的最小分辨率为  $25 \mu\text{s} \times 25 \mu\text{s}$ ，因而具有优良的二维位置分辨能力，而成像板的能量沉积特点可提供慢正电子束流的强度信息。

图 4 所示为 DC 慢正电子束斑形貌(a)及束流强度分布信息的三维图(b)，由图可知，慢正电子束斑  $< 15 \text{mm}$ 。依据 IP 成像板探测结果，可进一步对慢正电子束流束斑的特性进行分析。比较而言，IP 成像板无

法对正电子束流进行实时监测,因而在束流调试实验中,选择微通道板(MCP)技术观测束斑形貌,但缺点不能获取束流能量沉积结果.本课题正在进行实现该技术的相关实验.

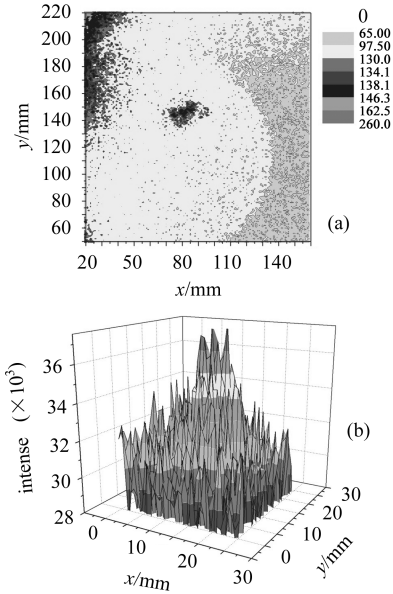


图4 IP成像板探测慢正电子束斑形貌(a),束流能量沉积三维图(b)

### 3 慢正电子湮没多普勒展宽测量

正电子湮没多普勒展宽方法利用正电子湮没释放的 $\gamma$ 光子携带的信息,以定义的 $S$ 参数和 $W$ 参数的相对变化,研究材料中电子的动量分布及固体缺陷等.与常规正电子湮没谱学技术相比较,慢正电子束流技术缺少时间起始信号,使得慢正电子寿命测量方法的应用难度较大<sup>[11]</sup>,因此多普勒展宽方法在能量可调的慢正电子束流中成为主要的探测手段,通过分析 $S$ 参数和 $W$ 参数随正电子能量的相对变化趋势,研究薄膜材料表面界面的缺陷结构及其深度分布信息<sup>[5]</sup>.

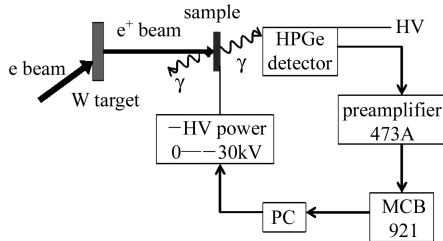


图5 慢正电子湮没多普勒测量系统原理

正电子注入样品的深度及分布结构由正电子的能量和样品内正电子的扩散常数决定.正电子在样品内迅速热化后(ps量级),被临近的电子或缺陷捕获,最终与电子湮没释放出一对能量为0.511MeV的 $\gamma$ 光子.

由GEM HPGe探测器探测的 $\gamma$ 光子信号,经放大器放大后输入多道采集卡,由计算机自动进行测量数据的采集、正电子能量调节、测量进程控制及分析测量结果并计算 $S$ 参数等工作.图5所示为慢正电子湮没多普勒展宽测量原理框图.

正电子湮没测量系统中电子学器件的工作性能,受温度、湿度等环境因素的影响较大,进而影响测量系统的工作稳定性,造成不真实的样品测量数据.通过对<sup>22</sup>Na放射源长时间的测量运行,分析能量为0.511MeV的正电子湮没 $\gamma$ 光子峰位、测量谱 $S$ 参数的相对变化,对测量系统的稳定性进行测试,结果如图6所示.由图可以看出,多普勒展宽谱的峰位未发生漂移现象, $S$ 参数相对变化范围小于0.002,多普勒展宽谱中 $\gamma$ 光子峰的半高宽(FWHM)为2.72.

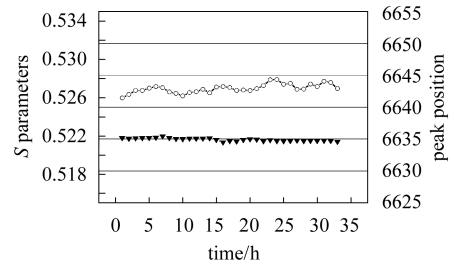


图6 多普勒测量系统稳定性  
○为 $S$ 参数,▼为峰位.

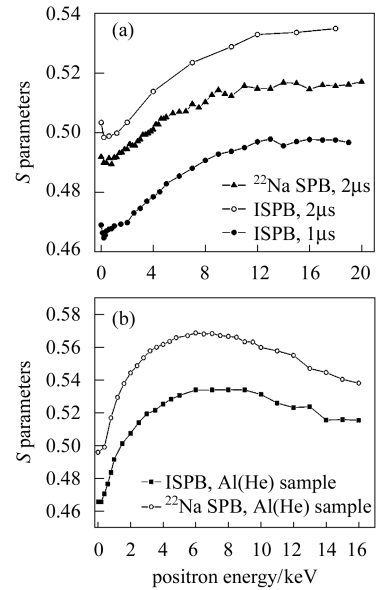


图7 多普勒展宽 $S$ 参数变化趋势  
(a) 标准Si样品; (b) Al(离子注入He)薄膜样品.

为了检验系统正常运行的工作性能并开展应用测量工作,分别在慢正电子强束流装置和<sup>22</sup>Na放射源慢正电子束流装置上测量标准Si薄膜样品、金属Al薄膜离子注入He样品,测量结果见图7.其中图(a)为不

同成形时间测量的 Si 标准样品  $S$  参数的相对变化曲线与放射源慢正电子束流测量结果的比较, 可以看出  $S$  参数的相对变化趋势非常吻合; 图(b)为测量金属 Al 经离子注入 He 的薄膜样品的  $S$  参数相对变化曲线与放射源慢正电子束流测量结果的比较, 同样得到了变化趋势非常一致的  $S$  参数曲线, 由此表明慢正电子强束流装置的正电子湮没多普勒展宽测量系统工作性能良好, 实验数据真实可信。

慢正电子强束流装置实现正常运行后, 已面向国内各研究单位开放, 完成了半导体薄膜材料、金属多层膜等相关学科一系列样品的测量工作, 主要结果将

陆续发表。

## 4 结论

针对慢正电子强束流的主要运行性能参数进行了测试, 实验结果表明直流化后正电子束流强度为  $1.8 \times 10^5 \text{e}^+/\text{s}$ , 束流的能散度约  $\pm 1.0 \text{eV}$ , 束流束斑小于  $15 \text{mm}$ 。作为慢正电子强束流装置的测量手段之一, 多普勒展宽谱谱仪稳定性测试结果和标准样品的  $S$  参数测量结果表明, 慢正电子湮没多普勒展宽测量系统运行正常, 测量数据真实。

## 参考文献(References)

- 1 Kogel G. Lifetime Spectroscopy in Sub-surface Defect Studies. Dorikens-Vanpraet L, Dorikens M, Segers D. Positron Annihilation. Singapore: World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd, 1988. 52
- 2 Manuel A A, Singh A K, Jarlborg T et al. Positron Annihilation at Geneva: Recent Results. Dorikens-Vanpraet L, Dorikens M, Segers D. Positron Annihilation. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1988. 109
- 3 Fischer C G, Connell S H, Coleman P G et al. Appl. Surf. Sci., 1999, **149**: 221—226
- 4 WANG Bao-Yi, CAO Xing-Zhong, WEI Long et al. Mater. Sci. Forum., 2004, **445—446**: 513—515
- 5 Segers D, Paridaens J, Van Hoecke T et al. Appl. Surf. Sci., 1995, **85**: 172—177
- 6 Haruo Saito, Toshio Hyodo. Mater. Sci. Forum., 2004, **445—446**: 457—461
- 7 Masao Doyama, Inoue M, Kogure Y et al. Appl. Surf. Sci., 2002, **194**: 218—223
- 8 Werner Triftshauser. Mater. Sci. Forum., 2004, **445-446**: 452—456
- 9 CAO Xing-Zhong, WANG Bao-Yi, WEI Long et al. Nucl. Techn., 2004, **27**: 435—439 (in Chinese)  
(曹兴忠, 王宝义, 魏龙等. 核技术, 2004, **27**: 435—439)
- 10 CAO Xing-Zhong, WANG Bao-Yi, YU Run-Sheng et al. HEP & NP, 2004, **28**: 560—563 (in Chinese)  
(曹兴忠, 王宝义, 于润升等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 560—563)
- 11 MA Yan-Yun, PEI Shi-Lun, CAO Xing-Zhong et al. HEP & NP, 2006, **30**: 166—170 (in Chinese)  
(马雁云, 裴士伦, 曹兴忠等. 高能物理与核物理, 2006, **30**: 166—170)
- 12 YU Run-Sheng, WANG Bao-Yi, LIU Jian et al. Nucl. Techn., 2000, **23**: 281—282 (in Chinese)  
(于润升, 王宝义, 刘健等. 核技术, 2000, **23**: 281—282)
- 13 Doyama M, Terashima Y, Ozaki A et al. Appl. Surf. Sci., 1999, **149**: 71—76

## Performance of Beijing Intense Slow Positron Beam<sup>\*</sup>

CAO Xing-Zhong<sup>1)</sup> WANG Bao-Yi WANG Ping MA Yan-Yun QIN Xiu-Bo WEI Long<sup>2)</sup>

(Key Laboratory of Nuclear Analysis Techniques, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** Beijing intense slow positron beam has been constructed successfully, which utilizes the pulsed electron beam of the BEPC LINAC with high energy to inject into the Ta target. The system will be used to expand the methodology research on positron beam and to study the defect of film materials. The running performance of DC positron beam will be introduced in this paper, such as the intensity, the energy spread and the beam size. As the main measurement method, Doppler broadening spectrum system of positron annihilation has also been accomplished.

**Key words** slow positron beam, beam intensity, energy spread, beam size, positron annihilation,  $S$  parameter

Received 10 March 2006

<sup>\*</sup> Supported by NSFC (10475096) and Special Fund for Equipment of CAS (U-37)

1) E-mail: caozh@ihep.ac.cn

2) E-mail: weil@ihep.ac.cn