

脉冲慢正电子束流的直流化装置*

魏存峰^{1,2;1)} 王宝义² 王平² 曹兴忠² 章志明² 马雁云² 薛德胜¹ 魏龙^{2;2)}

1 (兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室 兰州 730000)

2 (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 在基于加速器的北京慢正电子强束流装置上,用 Penning-Trap 技术实现了脉冲慢正电子束流的存储和直流化. 实验表明,系统的真空度对正电子的存储效率有严重影响,脉冲正电子的释放方式决定了直流化后束流的能量分散;改变释放级信号波形以及释放方式可以得到能量分散小于 1eV 的准直流化慢正电子束流.

关键词 彭宁离子阱 直流化 慢正电子束流 正电子湮没

1 引言

慢正电子束流技术作为一种核物理和材料表面研究的灵敏微探针,受到了广泛关注^[1],特别是基于电子加速器的慢正电子束流,与基于放射源的束流相比具有更高的束流强度,成为慢正电子束流技术发展的方向. 基于加速器的慢正电子束流由于其束流强度高优点,慢正电子的特色测量方法如慢正电子寿命测量、正电子湮没诱发 Auger 电子能谱测量以及二维角关联、正电子显微镜等具有更广泛的应用范围^[2]. 一般电子直线加速器的电子束流具有脉冲结构的特点,电子束流打靶产生的正电子束流也是脉冲式的,其重复频率和脉冲宽度决定于加速器的工作模式. 正电子束流聚集在一个很窄的时间宽度内. 大量正电子短时间内在样品中发生湮没造成了探测器脉冲堆积,无法进行相关的测量. 尽管慢正电子寿命测量需要脉冲化的慢正电子束流,但是电子打靶产生的脉冲慢正电子的脉冲时间宽度一般在微秒量级,而且脉冲重复频率太低,另外,加速器产生的慢正电子束流由于需要长距离的运输,会造成慢正电子束流能量分散增大,因而根本无法满足测量要求.

解决这一系列问题的方法是采用 Penning-Trap (彭宁离子阱, PT) 的方法,首先将正电子存储在 PT

中,然后在加速器的脉冲间隔内缓慢释放,得到时间上连续分布的正电子束流,称为“脉冲展宽”.

离子阱技术早在 19 世纪 50 年代末就被应用于约束和冷却带电粒子,目的是改进光谱测量的精确度. Penning-Trap 和 Paul-Trap 是最常见的两种离子阱. 在测量不受磁场干扰的情况下一般采用 Penning-Trap. Penning-Trap 利用电荷与电磁场间的交互作用力来限制带电粒子的运动,将粒子约束在某个小范围内. 典型的 PT 结构如图 1 所示,主要由上、下两片圆盖状电极和中间的环状电极三部分构成^[3].

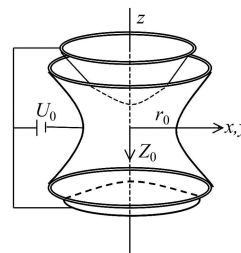


图 1 典型离子阱的外观和构造

如在两片圆盖状电极和环状电极间的施加直流电压为 U_0 ,则在环状电极中心附近的电势可以表示为

$$\phi(x, y, z) = \frac{U_0}{r_0^2 + 2Z_0^2} (2z^2 - x^2 - y^2), \quad (1)$$

由(1)式可知,无论 U_0 方向如何,若带电粒子在沿 z 方向是被吸向中心的,必然在 x, y 方向上是被推离中心

2006 - 01 - 07 收稿

* 国家自然科学基金(10475096, 10575112)资助

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

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

的, 或者刚好相反. 可见单纯的电场无法在 3 个方向上同时起到对粒子的约束作用. 这就是所谓的 Earnshaw 定理. 因此要将粒子约束在某个小区域内, 必须增加其他的约束机制. 常见的作法是在静电场上, 再叠加一个沿 z 方向的磁场, 这样的装置就是所谓的 Penning-Trap. 在核物理实验中, 常用这一装置在高真空中存储和冷却反物质粒子, 如反质子、正电子等.

1987 年, Hulet 等人提出将 PT 技术用于脉冲慢正电子的直流化^[1]. 这一方法既可以解决探测器堆积的问题, 还可以利用 PT 对带电粒子行为的控制能力, 大大降低慢正电子束流能散, 以满足寿命谱等各种慢正电子束流技术的测量要求. 甚至还可以将正电子冷却, 再用反质子穿越的办法制造反氢原子.

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 1.3GeV 的电子束流, 产生了重复频率 12.5Hz, 脉冲宽度约为 0.1 μ s 的慢正电子束流^[4-6]. 当慢正电子能量为 70eV 时, 正电子的能散约为 10eV (FWHM). 本工作采用 Penning-Trap 方法研制了脉冲慢正电子直流化装置, 并在北京慢正电子强束流系统上得到了成功的应用. 实际测量表明, 直流化装置的结构以及释放方式可以有效改善慢正电子能量分散, 得到能散接近 1eV 的准直流慢正电子束流, 满足各种正电子湮没测量方法的要求.

2 原理和结构设计

慢正电子存储和直流化 PT 的原理图和结构分别如图 2(a) 和 (b) 所示.

A, B, C 为 3 个同轴圆筒电极, 分别作为 PT 的入口级(右)、约束级(中)和释放级(左). 具有一定能量的正电子脉冲到达直流化系统的入口, A, B 级电位处于低电位, 当正电子脉冲全部进入约束级 B 后, A 的电位迅速提高至一个高电位, 使正电子存储在 B 中, 并保持 C 的电位处于高电位. 在 A, C 和 B 之间的电场作用下, 正电子在 z 方向的运动被限制在约束级 B 内. 而多个同轴线圈产生的均匀轴向磁场又限制了正电子在径向方向的运动. 与典型的 PT 装置存储带电粒子的基本原理相同, 正电子被存储在 PT 内时, 在沿 z 轴往复运动的同时, 在磁场中受洛伦兹力作回旋运动. 由于正电子束流具有一定的能量分布, 在 B 中进行多次往返运动后, 慢正电子脉冲由短脉冲变为准直流的长脉冲. 缓慢降低 C 电位或提高 B 的电位, 储存在 B 中的正电子将从释放级 C 缓慢放出, 形成准直流的慢正电子束流. 为了使正电子尽可能被均匀地释放, B 或 C 的电位需依据正电子束流的能量分布结构以一定函数形

式上升或下降.

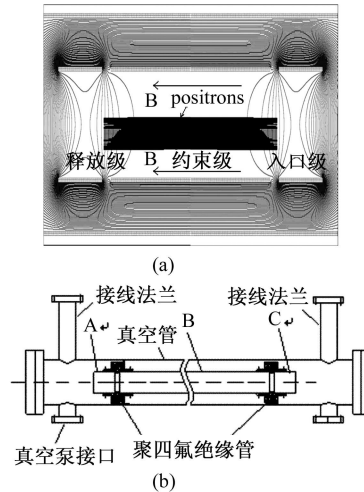


图 2 (a) Penning-Trap 电场的分布, 正电子运动轨迹的 SIMION 模拟结果和 (b) Penning-Trap 的结构

基于北京正负电子对撞机的慢正电子束流装置的正电子脉冲直流化系统位于距离地下靶室 12m 的地面大厅内, 结构如图 2(b) 所示. 系统总长 2.3m, 由真空管和其内的 3 个与真空管壁绝缘的直径为 50mm 的同轴无磁金属圆筒构成, 长度分别为 100, 1800 和 100mm, 分别作为开关级 A, 约束级 B 和释放级 C, A, B, C 间的狭缝大小约为 10mm, 通过真空管道上的接线法兰与真空外的控制电路相连. 用 14 个空心同轴线圈沿真空管道等距排列, 以产生沿管道轴线方向的稳恒磁场. 为了避免束线整体磁场出现较大起伏, PT 处的磁场强度与运输磁场相同, 管道中心附近为 1×10^{-2} T, 轴向方向的不均匀度小于 5%, 线圈的具体参数见文献[5]. PT 两端安装了两个抽速分别为 200 和 100 l/s 的溅射离子泵, PT 管道内的真空度达到 1.8×10^{-7} Pa.

PT 电极信号的控制单元由自行研制的信号发生器、放大器和 Tektronix 公司的双通道可程序信号发生器 (AFG320, 16MHz) 组成. 信号发生器 (SG) 产生宽度可调的方波脉冲信号, 经举电位放大器放大后, 作为入口级的开关信号. 任意波形发生器 (AFG320) 可以产生任何函数形式的信号, 用来控制正电子的释放速度. 为了保证各信号同步, 将加速器时钟信号作为统一的触发信号. 图 3 所示为用示波器测得的 PT 控制信号波形.

对于这一 PT 结构, 采用离子光学模拟软件 SIMION, 我们计算了当 A, B, C 的电位分别为 110, 90, 110V 时, PT 中各区域的电势分布, 并对正电子在均匀磁场下的运动轨迹进行了模拟, 结果如图 2 所示.

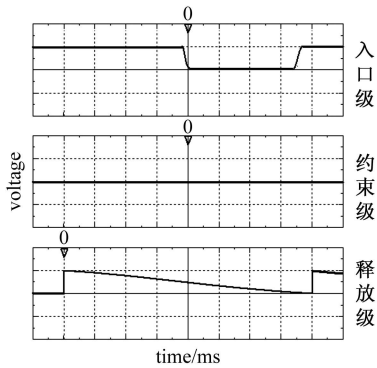


图3 PT入口级,约束级和释放级的波形(降低释放级电位的释放方式)

3 实验结果及讨论

3.1 正电子的存储

PT对正电子的存储效率直接影响直流化的效率,是评价PT性能的重要指标之一. 制约正电子在直流化管道内存贮时间的因素很多,主要包括脉冲慢正电子束流在直流化管道的位置、直流化管道门电极之间的相位配合、约束电磁场的分布和系统真空度等. 实验测量结果表明,直流化管道的真空度是影响慢正电子存储效率的重要因素. 实验中用测量PMT阳极电位的方法^[4],我们得到正电子在PT中存储一定时间后的相对强度. 当直流化管道真空度保持在 1.8×10^{-7} Pa时,慢正电子存储时间与正电子流强的关系见表1. 在PT中存储40ms之后,正电子数目降为原来的50%,此时正电子在PT中具有较好的存储效率. 而在其他条件不变的情况下,如将PT部分真空度变为 2×10^{-6} Pa时,正电子的数目减少到原来的50%仅用了10ms,存储效率大大降低. 因此提高直流化管道的真空度对提高慢正电子的存储效率是极为重要的.

表1 真空度为 1.8×10^{-7} Pa时正电子相对数目与存储时间关系

存储时间/ms	相对强度/mV	存储时间/ms	相对强度/mV
1	125	12	85
2	125	15	80
3	110	20	75
4	100	25	70
6	90	30	65
8	90	37	60
10	85		

3.2 初步直流化实验

在实现正电子在PT中的存储后,采用了匀速降低释放级电位的方式进行直流化. 通过波形发生器产生频率可调的脉冲波形,控制多道分析器符合门的方

法测量直流化后慢正电子的时间结构. 结果如图4所示(Linear fall),在一个直流化周期内(80ms),正电子的释放速度很不均匀. 这是由于处于不同能量的正电子的数目不同引起的. 为了解决这一问题,我们测量了正电子的能量分布^[4],以此为依据编制了复杂的释放波形. 实验结果表明,依据慢正电子能谱编辑的波形释放方式与匀速下降方式相比较,正电子在脉冲间隔时间内的分布更为均匀,如图4所示.

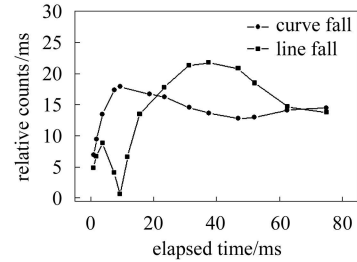


图4 释放级波形对直流化效果的影响

3.3 释放方式的改进及其对能量分散的影响

正电子的直流化可以用逐渐降低释放级电位的方法实现,得到近似直流的慢正电子束流. 但实验中发现,用这一方法进行直流化得到的正电子束流有较大的能量分散. 用阻挡电势法测量直流化后正电子的能量分布的结果表明,当正电子输运能量为100eV时,能谱峰半高宽约为10eV,这一数值与直流化前束流的能量分散相同,直流化过程并没有改变束流的能量分散. 对于实现寿命谱测量必须的微束团化,这一数值是无法接受的. 为解决这一问题,在不改变PT结构的情况下,对PT的释放方式进行了改进. 采用释放级电位保持不变,逐渐提高约束级电位的方法解决这一问题. 与降低释放级电位的方法类似,将约束级电位依据正电子束流的能量分布以一定函数形式逐渐升高,以使直流化后的束流具有更好的直流性能. 约束级电位升高时,正电子能量随之提高,一旦高于释放级电位时将从释放级放出. 理论上,这一释放方式得到的正电子束流能量分布在一个很小的范围内. 为了防止正电子从入口级放出,入口级电位高于释放级电位.

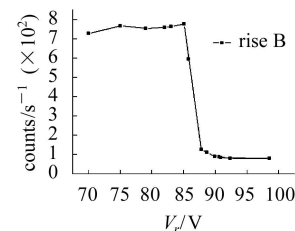


图5 改变释放方式后用阻挡电势法测量正电子的能量分布

图5为用阻挡电势法测得的采用这一方法直流化

后慢正电子束流的能量分布, 半高宽小于 2eV , 能量分散大大降低. 在这一情况下, 用示波器观测高纯锗探测器的输出脉冲, 得到了 80ms 内正电子湮没信号分布, 如图 6, 束流的时间结构仍然保持了较好的结果.

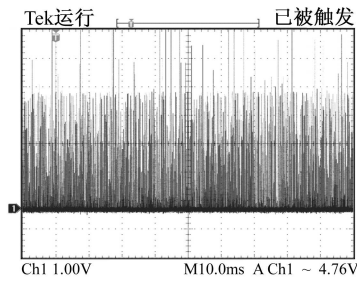


图 6 用提高约束级电位的方法直流化后湮没信号在一个脉冲间隔内(80ms)的分布

4 结论

用自行设计的基于 Penning-Trap 的直流化系统, 成功地将基于加速器的脉冲正电子束流转换为连续分布的“直流”慢正电子束流. 用降低释放级电位的方法可以得到较理想的直流化效果, 释放信号波形对直流化后束流强度的时间分布有很大影响. 根据脉冲正电子的能量分布确定的释放波形进行直流化, 可以得到较好的直流化效果. 实验表明, 采用降低释放级电位的方式得到的慢正电子束流的能量分散较大; 采用提高约束级电位的释放方式可以得到能量分散小于 1eV 的准直流慢正电子束流.

参考文献(References)

- 1 Shultz J, Lynn K G. Rev. Mod. Phys., 1988, **60**: 701
- 2 Haarsma L H, Abdullah K, Gabrielse G. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**: 806
- 3 Werth G. Contemp. Phys., 1985, **26**: 241
- 4 WANG Bao-Yi et al. Positron Annihilation-ICPA-13, Japan: TTP(Trans Tech. Publications), 2003. 513
- 5 CAO Xing-Zhong et al. HEP & NP, 2004, **28**(5): 560—563(in Chinese)
(曹兴忠等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(5): 560—563)
- 6 YU R S et al. Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A457**: 419

A Device Used in Pulsed Slow Positron Beam's Stretching*

WEI Cun-Feng^{1,2;1)} WANG Bao-Yi² WANG Ping² CAO Xing-Zhong² ZHANG Zhi-Ming²
MA Yan-Yun² XUE De-Sheng¹ WEI Long^{2;2)}

1 (Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Materials of the Ministry of Education of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

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

Abstract A slow positron beam's stretching device has been designed and constructed on Beijing Slow Positron Beam, which based on a 1.3GeV linac. Positron was storage and stretching use Penning-Trap technique. Measurements show that the positron storage time strongly depends on the vacuum level in Penning Trap tube. Two modes was used to release the positrons from storage part, lowering V_C while V_B kept constant and rising V_B while V_C kept constant. This technique makes the pulsed positron beam to a quasi-continuous beam. The energy spread of positrons depend on in release mode. In the latter mode, we observe that the energy spread was reduced to a value less than 1.0eV . The time profile in user-defined waveform is more uniform. It is beneficial to reduce the probability of amplifier pileup especially in the case of measurement with high counting rate.

Key words Penning-Trap, stretching, slow positron beam, positron annihilation

Received 7 January 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10475096, 10575112)

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

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