

北京慢正电子强束流束团化系统设计*

马雁云^{1,3} 裴士伦^{2,3} 曹兴忠¹ 王平^{1,3} 魏存峰¹ 马创新¹
章志明¹ 王书鸿² 王宝义¹ 魏龙^{1;1)}

1 (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)

2 (中国科学院高能物理研究所加速器中心 北京 100049)

3 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 慢正电子湮没寿命测量是研究材料表面微观缺陷的重要分析方法. 束团化系统是实现慢正电子湮没寿命测量的核心部件, 主要由斩波、聚束两部分组成, 它可以将随时间连续分布的束流束团化, 从而获得正电子湮没寿命测量的时间起点及满足时间分辨率要求的束团. 本文以粒子动力学计算为基础, 完成了束团化系统的物理设计, 其时间分辨率设计值为150ps(FWHM).

关键词 慢正电子湮没寿命测量 束团化 斩波 聚束 时间分辨率 能散

1 引言

正电子湮没寿命测量是正电子谱学的主要实验方法之一, 在研究材料微观缺陷的类型、浓度和分布等方面具有独特作用. 基于²²Na正电子源的常规正电子湮没寿命测量, 以能量为1.28MeV的特征 γ 射线作为时间起始信号、以能量为0.511MeV的湮没 γ 射线作为时间终止信号. 但是, 由放射源产生的正电子的能量是连续分布的, 且主要集中在高能端, 正电子在样品中的注入深度比较深, 因此无法应用于表面、近表面以及薄膜材料的微结构研究.

慢正电子湮没寿命测量主要利用慢正电子束流的单色性及能量连续可调等特点, 研究缺陷在材料表面或近表面不同深度的分布信息^[1]. 获得慢正电子湮没寿命测量的时间起始信号的方法主要有两种: (1) 利用慢正电子入射到样品时产生的二次电子获取时间起始信号^[2]. 由于二次电子的能量和角度的分散性导致时间分辨率较低, 一般约为500ps(FWHM)左右, 目前最好可达350ps(FWHM)^[3]; (2) 利用束团化系统将随时间连续分布的慢正电子束流进行束团化, 从而获取时间起始信号, 其时间分辨率可达

135—250ps(FWHM)^[1, 4].

北京慢正电子强束流系统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. 目前慢正电子束流强度达到 $6 \times 10^5/s$ 、正电子能量0—30keV连续可调, 束流能散约 $\pm 1.8eV$ 、束斑小于 $\phi 15$. 预计北京正负电子对撞机二期工程完成后, 正电子束流强度可达到 $10^8/s$ ^[5-7].

本系统以实现时间分辨率好于200ps的正电子湮没寿命测量为设计目标, 采用束团化方法获得慢正电子湮没寿命测量的时间起始信号.

2 原理

束团化系统由斩波器、聚束系统两部分组成, 基本原理是: 首先通过斩波器将随时间连续分布的正电子束流斩成具有一定时间宽度的正电子脉冲束流; 在正电子脉冲束流运动路径上设置一系列聚束系统构造的调制狭缝, 在调制狭缝内有轴向的、随时间变化的高频电场, 正电子脉冲束流经过调制狭缝时受到高频电场的速度调制作用, 经过一定的漂移距离后, 形成约150ps(FWHM)的束团.

2005-05-10 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: weil@ihep.ac.cn

2.1 反射式斩波器原理

斩波器的主要作用是:将随时间连续分布的束流斩成3—8ns的脉冲束流;排除脉冲束流之间的正电子,提高寿命谱的信噪比和分辨率。

反射式斩波器由3个金属网状电极组成。电极a接地电位,防止斩波信号对斩波前的正电子产生速度调制作用。电极b载入斩波信号,当电极b的电位高于正电子能量时,正电子被反射后,约束在电极b和直流化电极之间;当电极b的电位低于正电子能量时,正电子通过斩波器。电极c接负电位,将正电子脉冲束流加速以满足聚束系统的要求^[4]。斩波器原理如图1所示。

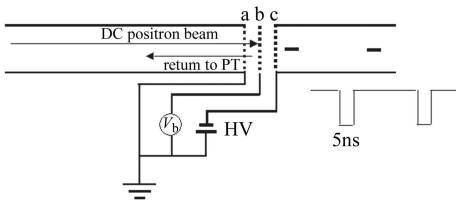


图1 反射式斩波器原理示意图

反射式斩波器具有工作频率无限制、对正电子束流的束斑半径无要求、脉冲束流的时间宽度可调节、正电子利用率高、构造较简单等优点^[4]。

斩波器的效率主要由斩波脉冲的占空比、金属网的通过率决定。设 η 为斩波脉冲的占空比, x 为金属网的正电子通过率。斩波器的效率可用下式表示:

$$\omega = \sum_{n=1}^{\infty} x^{2n+1} \eta (1+\eta)^{-n}, \quad (1)$$

若取 $x=0.9$ 、 $\eta=0.23$,得 $\omega \approx 0.4$ 。当然,由于电场及磁场的不均匀性,其实际效率比理论计算值要低。

2.2 聚束系统原理

聚束系统由预聚束器、聚束器两部分组成。聚束系统通过构造一系列的调制狭缝,对经过的正电子脉冲束流进行速度调制,从而达到聚束的目的。

取脉冲束流中心位置的正电子为参考正电子。定义参考正电子到达调制狭缝中心位置的时刻为时间零点、参考正电子能量为 E_0 、漂移距离为 S (从调制狭缝到样品的距离)、参考正电子经过 S 距离所用的时间为 T_0 。设 t 时刻到达聚束狭缝的正电子经过调制后获得的能量为 $\Delta E(t)$,为使该正电子和参考正电子同时到达样品,必须满足关系式^[8]:

$$\Delta E(t) = E_0 \left[\left(1 - \frac{t}{T_0} \right)^{-2} - 1 \right], \quad (2)$$

由于 $|t| \ll T_0$,即

$$\Delta E(t) \cong 2E_0 \frac{t}{T_0} = 2t \frac{\left(\frac{2E_0^3}{m_e} \right)^{1/2}}{S}. \quad (3)$$

根据(3)式可知,近似于理想信号的锯齿波满足(2)式的要求,在低频情况下,可直接应用锯齿波进行聚束^[9],在高频情况下可以利用正弦波的线性部分聚束。将(3)式所示的锯齿波进行傅立叶级数展开得

$$\Delta E(t) = \frac{2}{\pi} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin(nt\omega) \left(-\frac{T_0}{2} \leq t \leq \frac{T_0}{2} \right), \quad (4)$$

使用单一频率的正弦波时, t 时刻到达调制狭缝的正电子所获得的调制能量为

$$\Delta E(t) = eV_m \sin(\omega t), \quad (5)$$

式中 V_m 为正弦波最大幅值。

使用正弦波信号进行聚束时,主要利用正弦波信号的线性部分作为近似理想调制信号,线性部分占整个周期的25%—30%。在加速器使用的聚束器中,通常用 $\pm 45^\circ$ 的范围来聚束。若通过斩波器斩波得到5ns的脉冲束流,那么预聚束器的工作频率一般都选在几十MHz左右。聚束器对经过预聚束器后时间宽度为1—2ns的脉冲束流进行调制,因此聚束器的工作频率约200MHz,通常用TM型微波构造调制电场^[1,4]。

预聚束器是基于正弦波聚束理论的三电极预聚束器。两边的电极保持恒定的静电位,中间的电极加载调制信号,这样在电极狭缝就会产生调制电场。调制电场对经过狭缝的正电子脉冲束流进行速度调制,原理如图2所示^[9-11]。

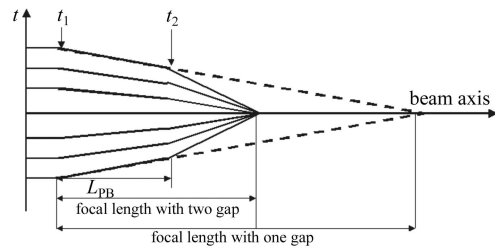


图2 三电极预聚束原理示意图

根据正弦波聚束器原理,狭缝间距 L_{PB} 可用下式表示^[11]:

$$\left(\frac{\tau}{4} \right) v_0 < L_{PB} < \left(\frac{3\tau}{4} \right) v_0, \quad (6)$$

其中 τ 表示预聚束信号的周期、 v_0 表示正电子运动速度。正电子经过两个狭缝后获得的调制能量可用下式表示^[11]:

$$\Delta E = eV_m \sin \omega t_2 - eV_m \sin \omega t_1, \quad (7)$$

式中 V_m 表示预聚束电压最大值, t_1, t_2 分别为正电子到达第1个和第2个调制狭缝的时刻, 当 $t_1 - t_2 = \tau/2$ 时, 正电子获得的调制能量最大, 在设计中取 $L_{PB} = (\tau/2)v_0$.

正电子脉冲束流经过预聚束后, 时间宽度约为1—2ns, 需要使用聚束器对其进一步调制才能满足寿命测量的需要.

本设计采用四分之一波长同轴谐振器作为聚束器. 在TM模式下工作时, 取狭缝的中心作为柱坐标系的原点. 聚束器腔体狭缝处非零的电磁场分量为 E_r, E_z, B_θ , 表达式如下

$$\begin{aligned} E_z(r, z, t) &= \sum_m A_m I_0(k_m r) \cos\left(\frac{m\pi z}{L}\right) \sin(\omega t), \\ E_r(r, z, t) &= \sum_m A_m \frac{m\pi}{k_m L} I_1(k_m r) \sin\left(\frac{m\pi z}{L}\right) \sin(\omega t), \\ B_\theta(r, z, t) &= \sum_m \frac{A_m \omega}{k_m c^2} I_1(k_m r) \cos\left(\frac{m\pi z}{L}\right) \cos(\omega t), \\ k_m^2 &= \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2, \\ m &= 1, 3, 5, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

其中 L 为狭缝宽度的一半, A_m 是傅立叶系数, I_0, I_1 分别为零阶、一阶修正 Bessel 函数. 因此, 正电子经过狭缝时获得的能量与狭缝处电场的空间分布和时间分布都有关系, 正电子经过高频狭缝后获得的调制能量为

$$\Delta E = -2ME_m L = - \int_{-L}^{+L} E_m f(z) e^{i\left(\frac{\omega z}{v} + \varphi_0\right)} dz, \quad (9)$$

其中 E_m 是调制间隙内沿空间分布的最大电场, $f(z)$ 为调制间隙内电场的分布函数, v 为正电子的速度, ω 为调制间隙中谐振场的角频率, φ_0 为正电子进入调制间隙时高频场的相位, M 是电子注耦合系数, 代表场分布和正电子渡越时间引起的有效间隙作用电压比理想参考电压降低的程度, 本设计中 M 的表达式为^[12]

$$M = \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos\theta}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \theta^2}, \quad (10)$$

其中 $\theta = \omega L/v_0$, 表示直流渡越角的一半, ω 表示角速度.

正电子脉冲束流经过聚束器调制后, 漂移至样品处形成约150ps (FWHM) 的束团, 进行慢正电子湮没寿命测量.

在样品前设置漂移管和加速电极, 使正电子能量在0.5—30keV 范围内连续可调. 根据加速能量的不同, 改变漂移管的电位使束团的时间焦点位置不变.

3 粒子动力学模拟

为确定束团化系统的基本工作参数、研究束流状态对束团化效果的影响和为下一步的设计提供依据, 本工作运用国际通用的粒子动力学计算程序 Parmela^[13] 对正电子在束团化系统中的运动过程进行了模拟计算.

在束团化系统设计中, 基本工作参数包括聚束器的工作频率 f_B 、正电子在聚束器中的能量 E_B 以及斩波器斩波得到的脉冲束流的初始脉冲长度等. 在现有束流条件下, 利用 Parmela 程序对不同 f_B, E_B 情况下的束团化效果分别进行计算, 结果如图3所示.

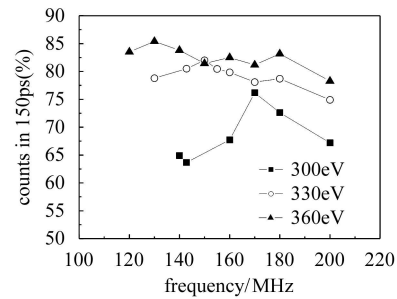


图3 利用 Parmela 程序对束团化效果的模拟

考虑实际加工因素, 确定 f_B, E_B 分别为150MHz, 330eV. 在此条件下, 脉冲束流的初始脉冲长度对束团化效果的影响如图4所示, 从图可以看出初始脉冲长度越短束团化效果越好; 由于斩波器的工作频率是预聚束器工作频率的1/n, 由公式(1)可知, 初始脉冲长度越短, 斩波效率越低. 综合考虑以上两个方面, 选定初始脉冲长度为5ns. 以相关参数作为 Parmela 程序的初始参数对束团化效果进行模拟, 得到时间分辨率为150ps的束团, 如图5所示.

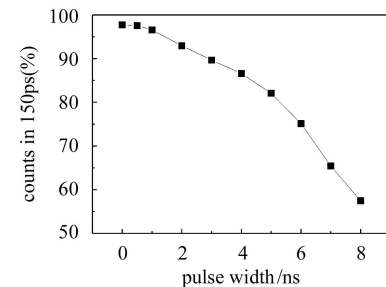


图4 初始脉冲长度对束团化效果的影响

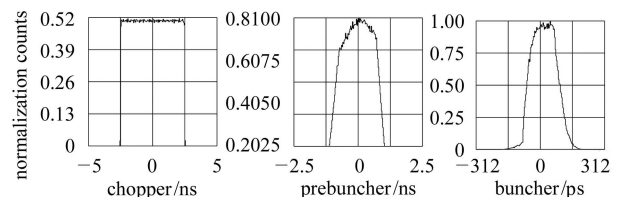


图5 束团化模拟结果

为确定正电子束流能散对束团化效果的影响, 运用Parmela程序对不同能散下束团化效果进行模拟, 结果如图6所示. 从图可以看出, 束流能散越大束团化效果越差; 当能散大于 $\pm 1.0\text{eV}$ 时, 对束团化效果的影响较为明显.

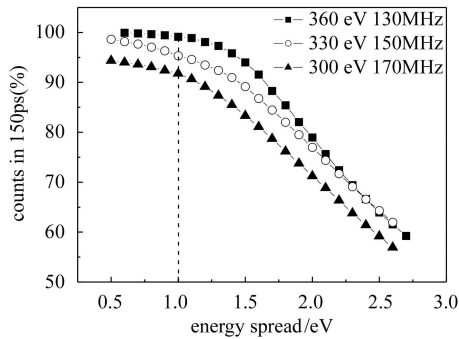


图6 束流能散对束团化效果的影响

模拟结果表明, 减小初始脉冲长度、降低束流能散有利于提高束团化效果. 选定 f_B , E_B 分别为150MHz, 330eV的条件下, 分辨率满足150ps (FWHM)时, 束流能散与最大初始脉冲长度的关系如图7所示. 可以看出, 减小能散可以增大初始脉冲长度, 进而提高计数效率.

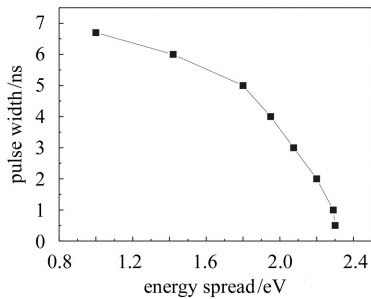


图7 束流能散与最大初始脉冲长度的关系

4 部件设计

根据动力学模拟的结果, 确定聚束器、预聚束器和斩波器工作频率分别为150MHz, 37.5MHz和 $150/4n\text{MHz}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), 以满足不同寿命成分的测量. 预聚束器由两个同轴圆筒构成, 外筒保持固定的静电位, 内筒加调制电压, 两个狭缝间距为14.36cm.

聚束器采用四分之一波长同轴谐振器, 其中缝宽是影响束团化效果的一个重要的结构参数, 不同狭缝宽度对应的电场分布不同, 这关系到聚束器的几何结构设计. 图8为运用国际通用的Superfish电磁场计

算程序^[14]对不同狭缝宽度的轴向电场分布的模拟结果. 可以看出, 狭缝越窄, 电场分布越满足对称性要求, 因此选主聚束狭缝缝宽为1cm.

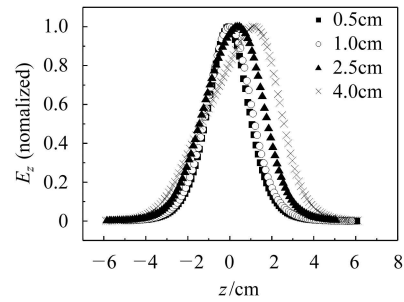


图8 不同狭缝宽度对应的电场分布

在固定工作频率和缝宽的条件下, 设计的聚束器结构如图9所示, 内管内径为 $\phi 30$ 、内管外径 $\phi 36$ 、外管内径 $\phi 111$ 、内管长468.8mm、 Q 值约为5100, 运用Superfish程序模拟谐振腔的电场分布, 结果如图10所示.

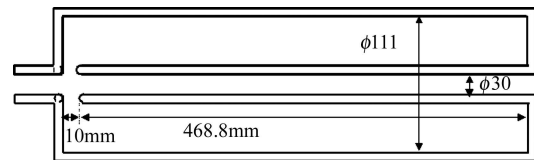


图9 聚束器结构示意图

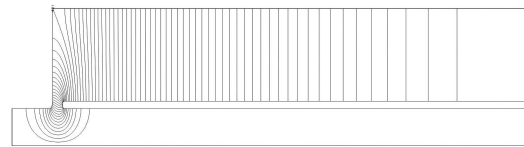


图10 采用Superfish程序模拟的腔体电场分布

本装置采用内腔体结构, 束团化系统整体置入真空腔内, 与真空壁绝缘.

5 结论

束团化系统由反射式斩波器、三电极预聚束器、四分之一波长谐振器组成. 在北京慢正电子强束流系统的现有束流条件下, 通过粒子动力学模拟, 确定聚束器工作频率为150MHz、正电子能量为330eV、斩波器斩波所得初始脉冲束流长度为5ns. 系统工作在上述参数下可以得到150ps (FWHM)的束团. 各项工作参数的获取为慢正电子湮没寿命测量技术的实现提供了理论数据.

参考文献(References)

- 1 Schödlbauer D, Speer P, Triftshäuser W. Nucl. Instrum. Methods, 1988, **B34**: 258
- 2 Lynn K G, Frieze W E, Schultz P J. Phys. Rev. Lett., 1984, **52**: 1137
- 3 Stanislaw S, Mihail P P, Kelvin G L. Review of Scientific Instruments, 2002, **73**: 147
- 4 Suzuki R, Kobayashi Y, Mikado T et al. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, **30**(3B): L532
- 5 WANG Bao-Yi, CAO Xing-Zhong, WEI Long et al. Materials Science Forum, 2004, **445—446**: 513
- 6 CAO Xing-Zhong, WANG Bao-Yi, WEI Long et al. Nuclear Techniques, 2004, **27**: 435 (in Chinese)
(曹兴忠, 王宝义, 魏龙等. 核技术, 2004, **27**: 435)
- 7 YU Run-Sheng, WANG Bao-Yi, MA Chuang-Xin et al. High Energy Phys. & Nucl. Phys., 2001, **25**(Supp.): 135 (in Chinese)
(于润生, 王宝义, 马创新等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(增刊): 135)
- 8 Iijima H, Asonuma T, Hirose T et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2002, **A483**: 641
- 9 Willutzki P, Störmer J, Kögel G et al. Materials Science Forum, 1995, **175—178**: 237
- 10 LÜ Jian-Qin, QUAN Sheng-Wen. Atomic Energy Science and Technology, 1995, **29**(2): 102 (in Chinese)
(吕建钦, 全胜文. 原子能科学技术, 1995, **29**(2): 102)
- 11 ZU Xiu-Lan, YANG Hai-Su, LOU Ben-Chao et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(7): 950 (in Chinese)
(祖秀兰, 杨海素, 娄本超等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(7): 950)
- 12 Branch C M. I. R. E. Trans ED-8., 1961, 193
- 13 Young L M et al. LA-UR-96-1835, Los Alamos National Laboratory, Revised July 30, 2002
- 14 James H B, Lloyd M Y. Possion Superfish: A-UR-96-1834. Los Alamos National Laboratory

Design of a Pulsing System for Beijing Intense Slow Positron Beam^{*}

MA Yan-Yun^{1,3} PEI Shi-Lun^{2,3} CAO Xing-Zhong¹ WANG Ping^{1,3} WEI Cun-Feng¹ MA Chuang-Xin¹
ZHANG Zhi-Ming¹ WANG Shu-Hong² WANG Bao-Yi¹ WEI Long^{1;1)}

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

2 (Accelerator Center, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

3 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The design of a pulsing system for an intense slow positron beam is described in this paper. Slow positron annihilation lifetime measurement is an important method to study the depth-dependent characteristics of the surface and near surface. The start signal for slow positron lifetime measurement can be obtained from the pulsing system, which consists of a reflection type chopper, a prebuncher and a buncher. On the basis of the simulation of dynamics process by Parmela, the frequency of the buncher and the positron energy have been chosen to be 150MHz and 330eV respectively. The designed time resolution of this system is about 150ps (FWHM).

Key words slow positron annihilation lifetime measurement, pulsing system, chopper, buncher, time resolution, energy spread

Received 10 May 2005

*Supported by NSFC (10475096) and Special Fund for Equipment of CAS (U-37)

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