

^{22}Na 放射源慢正电子束流插入装置的研制*

王平^{1,2} 曹兴忠¹ 马雁云^{1,2} 秦秀波^{1,2} 王宝义¹ 马创新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 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 北京慢正电子强束流是利用北京正负电子对撞机电子直线加速器电子打靶产生的高强度低能单色正电子束流。为了提高强束流的机时利用效率和节省强束流用于新建实验站的调试机时,设计了一套基于 ^{22}Na 放射源的慢正电子束流装置插入到强束流输运线上。 ^{22}Na 放射源慢正电子束流插入装置主要包括 ^{22}Na 放射源及慢化体、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器、多级静电加速管、磁场输运系统、真空系统、高压绝缘和辐射防护措施等。

关键词 慢正电子束流 正电子慢化器 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器 多级静电加速管

1 引言

慢正电子束流技术能够无损探测地材料表面微观缺陷的深度分布信息,在核分析技术和材料科学研究中有着广泛的应用。北京慢正电子强束流系统利用北京正负电子对撞机电子直线加速器电子打靶来产生高强度低能单色正电子束流,目前慢正电子束流强度已达到 $10^6\text{e}^+/\text{s}$ 量级,对撞机二期(BEPC II)改造完成后,束流强度可以达到 $10^8\text{e}^+/\text{s}$ 量级^[1-4]。

为了提高强束流的机时利用效率和节省强束流用于新建实验站(慢正电子湮没寿命谱测量实验站^[5],正电子湮没激发俄歇电子能谱实验站等)的调试机时,本工作设计了一套基于 ^{22}Na 放射源的慢正电子束流装置插入到强束流输运线上。此外在加速器停机检修期间时可以用 ^{22}Na 放射源产生的慢正电子束流进行用户样品测量工作。由于受放射源强度的限制,以 50mCi 的 ^{22}Na 源为例,其慢正电子束流强度一般只有 $10^3-10^5\text{e}^+/\text{s}$ 量级。

本文系统地介绍了 ^{22}Na 放射源慢正电子束流插入装置的设计原理,对束流线磁场计算、正电子源和慢化器、慢正电子能量选择器和慢正电子的加速等做

了详细的论述。

2 总体结构

^{22}Na 放射源慢正电子束流插入装置主要包括 ^{22}Na 放射源及慢化体、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器、多级静电加速管、磁场输运系统、真空系统、高压绝缘和辐射防护措施等。总体结构如图1所示。

放射源 ^{22}Na 衰变产生的快正电子射入慢化体中,由于慢化体材料对正电子具有负的逸出功函数,在慢化体表面可以发射出 eV 量级的低能正电子,引出慢正电子的栅极网的偏置电压为 200V 。这些慢正电子混杂在大量的穿过慢化体的快正电子中,采用 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 同轴圆柱面型能量选择器选出单一能量的慢正电子。慢正电子的加速方式为多级静电加速,加速电压从 $0-30\text{kV}$ 连续可调。慢正电子束的传输采用静磁场方式,利用多个Helmholtz同轴线圈来产生 100Gs 的轴向均匀传输磁场,磁场不均匀度 $<10\%$ 。束流管道的真空度达到 10^{-7}Pa 量级。根据辐射防护剂量的计算结果,采取的辐射防护措施保证距离放射源 1m 处的剂量当量指数率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

2006-01-19 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

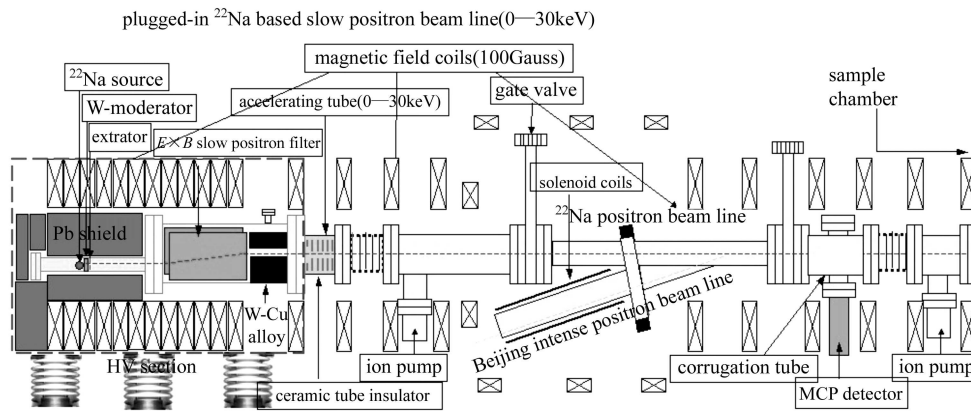


图 1 ²²Na 放射源慢正电子束流插入装置示意图

3 束流线磁场计算

根据公式 $R = mV_{\perp} / qB$ (V_{\perp} 为正电子径向速度分量, B 为轴向均匀传输磁场的大小), 在轴向传输磁场的作用下, 正电子做拉莫进动, 整体运动方向沿轴向直线前进.

3.1 多层密绕空心线圈轴线磁场

如图 2 所示, 多层密绕空心线圈内半径为 R_1 , 外半径为 R_2 , 线圈长度为 L , 采用导线的规格为 $\phi_1 \times \phi_2$, 单层匝数为 L / ϕ_1 , 每层单位长度匝数为 $n = 1 / \phi_1$, 层数为 $(R_2 - R_1) / \phi_2$, 单位长度层数为 $1 / \phi_2$.

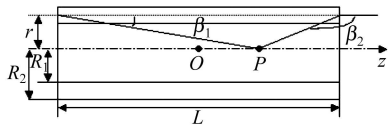


图 2 多层密绕空心线圈

根据毕奥-萨伐尔定律, 推导出载流螺线管的磁场公式, 通过叠加得到多层密绕空心线圈轴线磁场的公式^[6]:

$$B(z) = \frac{\mu_0 I}{2\phi_1 \phi_2} \left[(z + L/2) \ln \frac{R_2 + \sqrt{(z + L/2)^2 + R_2^2}}{R_1 + \sqrt{(z + L/2)^2 + R_1^2}} + (L/2 - z) \ln \frac{R_2 + \sqrt{(L/2 - z)^2 + R_2^2}}{R_1 + \sqrt{(L/2 - z)^2 + R_1^2}} \right], \quad (1)$$

式中 z 表示以密绕线圈内轴线中心 O 为原点的 z 轴坐标系中的坐标, μ_0 为真空磁导率, I 为通过线圈的电流.

3.2 束流线磁场计算结果

如图 1 所示, ²²Na 放射源慢正电子束流直线传输进入样品室, 强束流仍从侧面进入现有的束流线. 在

磁场计算中通过调整线圈的位置和电流, 来构造需要的均匀磁场.

根据多层密绕空心线圈轴线磁场公式(1), 在 Mathematica4.0 中用函数关系式将多个线圈产生的轴线上磁场叠加起来得到总的磁场强度 $B(z)$ 的表达式, 并画出 $B(z) \sim z$ 的关系曲线.

如图 3 所示为 ²²Na 放射源慢正电子束流直线段 (0.046—3.3845m) 磁场变化大小为 97—104.5Gauss, 磁场不均匀度 <10%.

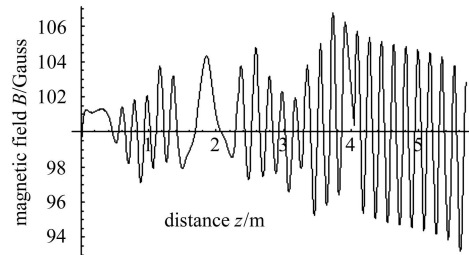


图 3 ²²Na 放射源束流直线运输磁场分布

如图 4 所示为强束流侧面接入磁场计算 $B(z) \sim z$ 曲线图, 强束流侧面接入段 (0—1.5235m) 磁场变化大小为 94—105Gauss, 磁场不均匀度 <10%.

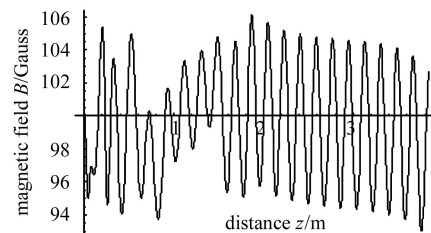


图 4 强束流侧面接入磁场分布

4 正电子源和慢化器

与其他 β^+ 衰变的核素正电子源相比, ²²Na 半衰

期为2.6年, 适合长期实验. 选用 ^{22}Na 作为正电子源, 源强约为50mCi.

放射源 ^{22}Na 衰变产生的正电子能量从0到545keV连续分布, 在固体中的射程为几十到几百 μm , 因而无法研究材料的表面和界面. 为了获得能量单一的慢正电子, 一般是利用某些材料对正电子具有负的逸出功函数特性而出现表面再发射出eV量级正电子的现象, 这些材料称为慢化体.

正电子慢化器通常用钨箔或钨网来做慢化体材料. 采用1片钨箔和3片钨网叠加的透射式几何结构来获得较高的慢化效率^[7, 8], 慢化效率达到 10^{-4} 量级, 设计的慢化器几何结构如图5所示, 慢化体尽量靠近放射源以提高慢化效率, 放射源与慢化体处于同一电势, 慢化体相对于栅极网处于高电势, 从慢化体表面发射出来的慢正电子在栅极的吸引下被收集.

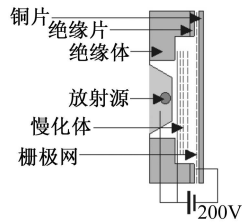


图5 慢化器几何结构

5 慢正电子能量选择器

放射源 ^{22}Na 衰变产生的部分能量较高穿过慢化体的正电子及1.28MeV γ 射线同慢正电子一起混杂在从慢化体引出的束流中. 能量选择器能够去除能量较高的正电子和 γ 射线, 并且选择出需要利用的慢正电子.

慢正电子能量选择方式主要有弯管道能量选择器、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器、 $\mathbf{B} \times \mathbf{B}$ 能量选择器等^[9, 10]. 同轴圆柱面型能量选择器基于平行板型正交 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器的原理, 改进了平行板型正交 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器中的束流截面出现严重畸变的缺点, 性能较好^[11], 因此采用同轴圆柱面型能量选择器作为 ^{22}Na 放射源的慢正电子束流插入装置的能量选择方案.

5.1 平行板型正交 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器的原理

如图6所示为平行板型正交 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器的原理图:

磁场为沿 z 方向的均匀磁场 B , 均匀电场 E 方向与 B 垂直, 正电子初始速度 v_0 沿 z 方向平行入射, 可以

解出正电子的运动公式:

$$\begin{cases} x = \frac{mE}{qB^2} \left(\frac{qB}{m}t - \sin \frac{qB}{m}t \right) \\ y = \frac{mE}{qB^2} \left(1 - \cos \frac{qB}{m}t \right) \\ z = v_0t \end{cases}, \quad (2)$$

正电子的荷质比 q/m 远大于1, 故正电子在正交电磁场中的运动可看作是沿 x 方向的定向漂移运动(速度 $v_x = E/B$)和 y 方向微小的拉莫进动以及 z 方向匀速直线运动的叠加. 正电子在平行板电场中的偏转距离 D 与初始正电子能量 eV_0 、平行板电极电压 $2V$ 及平行板电极长度 L , 间距 d 的关系为

$$D = v_x t = \frac{E}{B} \cdot \frac{L}{v_0} = \frac{E}{B} \cdot \frac{L}{\sqrt{\frac{2eV_0}{m}}}, \quad (3)$$

对于平行板电场, 式中 $E = 2V/d$.

从公式(3)中可以看出在 E , B , L , d 一定时, 不同能量的正电子的偏转距离 D 不一样, 从而实现了能量选择的目的.

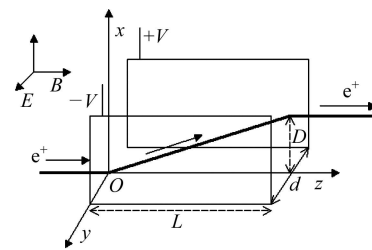


图6 平行板型正交 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 能量选择器

5.2 同轴圆柱面型能量选择器对束斑畸变的改进

单一能量的慢正电子束流进入平行板电场前存在由于电势差造成束斑不同位置的粒子加速或减速过程, 进入平行板电场时沿 z 方向速度 v_0 不一样造成了在电场中偏转距离 D 不一样^[12], 从而使束斑产生畸变. 同轴圆柱面型能量选择器内部的电场是不均匀电场, 如图7所示, 同轴圆柱面电极内板半径为 r_1 , 外板半径为 r_2 , 分别接 $-V$ 和 $+V$ 电势, 可以解出同轴圆柱板间的电场公式:

$$E(r) = \frac{C}{r}, \quad (4)$$

其中 $C = 2V/\ln \frac{r_2}{r_1}$, 电势为0处的圆弧半径 $r_0 = \sqrt{r_1 r_2}$.

靠近外板的正电子进入同轴板电场前减速, 电场较小; 靠近内板的正电子进入同轴板电场前加速, 电场较大, 根据公式(3), 最后的结果是偏转距离 D 偏差较小, 从而抵消了电场边缘效应的影响.

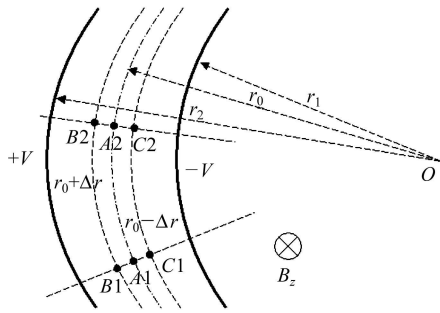


图 7 同轴圆柱面型能量选择器

近似应用公式(3)作为同轴圆柱面型能量选择器的偏转距离公式,如图7所示,假设正电子从A1运动到A2偏转的角度为 θ_0 ,从B1运动到B2偏转的角度为 $\theta_0 + \Delta\theta$,应用公式(3), (4), 得到偏转距离之比为

$$\frac{r_0\theta_0}{(r_0 + \Delta r)(\theta_0 + \Delta\theta)} = \frac{E(r_0)v(r_0 + \Delta r)}{E(r_0 + \Delta r)v(r_0)}, \quad (5)$$

应用公式(4), B1 与 A1 的电势差为

$$\Delta V = C \ln \frac{r_0 + \Delta r}{r_0}, \text{ 而 } \frac{v(r_0 + \Delta r)}{v(r_0)} = \sqrt{\frac{V_0 - \Delta V}{V_0}},$$

因此对(5)式化简,并作幂级数二级项展开得到

$$\frac{1}{1 + \frac{\Delta\theta}{\theta_0}} = 1 + \left(2 - \frac{C}{2V_0}\right) \frac{\Delta r}{r_0} + \left(1 - \frac{3C}{4V_0} - \frac{C^2}{8V_0^2}\right) \left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^2, \quad (6)$$

在 $\Delta r/r_0, \theta_0$ 一定时,当 $V_0 = C/4 = V/2\ln(r_2/r_1)$ 时,公式(6)右边展开式中一级项为0,不同位置的正电子进入电场后偏转距离的角度差 $\Delta\theta$ 最小,即束斑畸变最小.应用公式(3), (4)此时对于从A1到A2运动的正电子,其偏转距离D满足

$$D = \frac{E}{B_z} \cdot \frac{L}{v_0} = \frac{2V}{B_z \sqrt{r_2 r_1} \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{L}{\sqrt{eV / \left(m \ln \frac{r_2}{r_1}\right)}}. \quad (7)$$

设计采用的参数为:同轴圆柱面电极内板半径为 $r_1=56\text{mm}$,外半径为 $r_2=76.5\text{mm}$, $L=20\text{cm}$,在偏转距离D设定为3cm时,由公式(7)可以解出两个同轴圆柱电极板加的电势分别为 $\pm 124\text{V}$,正电子能量 $eV_0=200\text{eV}$.

6 慢正电子的加速

为了实现慢正电子束流对样品表面微米尺度内缺陷信息深度分布的测量,束流能量应在一定范围内能够连续可调,对于一般材料而言,0—30keV能量的正

电子束流注入深度为 μm 量级左右,满足了对样品表面研究的要求.

静电加速可以采用一级加速或者多级加速.一级加速方式为了做到电场均匀,加速电极靠得很近,当加速电压较高时,存在真空击穿的危险,多级加速方式将高压等梯度分布,降低了电极间真空击穿的危险性.

采用如图8所示的均匀场多级静电加速管,加速电极由1个内直径 $\phi 70$,外直径 $\phi 99$ 的圆环和5个内直径 $\phi 20$,外直径 $\phi 99$ 的圆环平行排列而成,电极间距为20mm,电极之间接高压电阻(100M Ω),分五级加速,电极间电势差相同,前端接正高压(0—30kV),尾端接地.

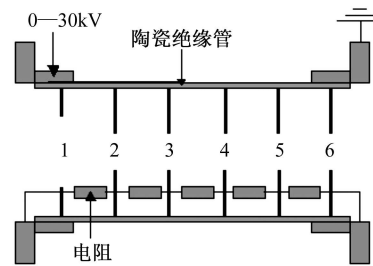


图 8 多级静电加速管

采用离子光学模拟软件SIMION对图8所示的多级加速电极结构下正电子的运动轨迹做了模拟,结果如图9所示,正电子的初始能量为200eV,束斑初始直径为 $\phi 12$,加速电压为30kV,轴向为100Gauss均匀磁场,尽管30kV的高压对正电子具有很强的会聚作用,但由于存在100Gauss的磁场约束,束流的能量发散度小.经过高压加速后,束斑直径最大时只有 $\phi 15$.

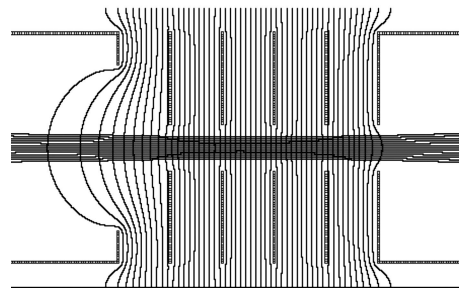


图 9 正电子的运动轨迹SIMION模拟

7 小结

²²Na放射源的慢正电子束流插入装置采用了100Gs的轴向均匀磁场设计,较高慢化效率的慢化体结构、束斑畸变很小且束流损失很少的同轴圆柱面型能量选择器以及束流能量发散度小的多级静电加速设

计,从而实现了得到能量单一且连续可调、束流强度较高,品质较好的慢正电子束流的目标.放射源或加

速器产生的连续稳定的慢正电子束流为慢正电子湮没技术的研究提供了束流基础.

参考文献(References)

- 1 YU Run-Sheng, WANG Bao-Yi, MA Chuang-Xin et al. HEP & NP, 2001, **25**(Supp.): 135 (in Chinese)
(于润升, 王宝义, 马创新等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(增刊): 135)
- 2 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)
- 3 CAO Xing-Zhong, WANG Bao-Yi, YU Run-Sheng et al. HEP & NP, 2004, **28**: 560—565 (in Chinese)
(曹兴忠, 王宝义, 于润升等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 560—565)
- 4 WANG Bao-Yi, CAO Xing-Zhong, WEI Long et al. Materials Science Forum, 2004, **445—446**: 513
- 5 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)
- 6 WANG Hua-Jun. Journal of Sichuan Institute of Light Industry and Chemical Technology, 1999, **12**(4): 23—25 (in Chinese)
- (王华军. 四川轻化工学院学报, 1999, **12**(4): 23—25)
- 7 ZHANG Zhi-Ming, WANG Bao-Yi, MA Chuang-Xin et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, **24**: 490—491 (in Chinese)
(章志明, 王宝义, 马创新等. 核电子学与核探测技术, 2004, **24**: 490—491)
- 8 HE Chun-Qing, Eisaku Hamada. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, **B211**: 571—576
- 9 YU Run-Sheng, WEI Long, WANG Bao-Yi et al. Nucl. Instrum. Methods, 2001, **A419**: 457/1—2
- 10 YU Run-Sheng. Construction of Slow Positron Beam Lines and Investigation of the Relative Techniques. Ph. D Dissertation of CAS. Beijing: Institute of High Energy Physics, 2001. 29—39 (in Chinese)
(于润升. 慢正电子束流装置的研制及相关技术研究. 中国科学院博士论文, 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2001. 29—39)
- 11 Hutchins S M, Goleman P G et al. J. Phys. E: Sci. Instrum., 1986, **19**: 282—283
- 12 DU Bing-Chu, WANG Jian-Ru. Electro-optics. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 280—281 (in Chinese)
(杜秉初, 汪键如. 电子光学. 北京: 清华大学出版社, 2002. 280—281)

Design and Construction of the Plugged-in ^{22}Na Based Slow Positron Beam Facility^{*}

WANG Ping^{1,2} CAO Xing-Zhong¹ MA Yan-Yun^{1,2} QIN Xiu-Bo^{1,2} WANG Bao-Yi¹
MA Chuang-Xin¹ WEI Long^{1,1}

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

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

Abstract The Beijing intense slow positron beam facility has restricted running time of the BEPC-LINAC designed for BES and BSRF operation, We have therefore designed and constructed the plugged-in ^{22}Na based slow positron beam section in the Beijing intense slow positron beam line with which we can supply continuous slow positron beam for debugging of newly-built positron annihilation measurement systems and saving running time of the Beijing intense slow positron beam. The plugged-in ^{22}Na based slow positron beam section includes positron source(^{22}Na), positron moderator, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ slow positron energy filter, multilevel electrostatic acceleration tube, radioprotection, magnetic transport system and vacuum system, etc. The new slow positron beam line will be running on April, 2006.

Key words slow positron beam, positron moderator, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ positron energy filter, multilevel electrostatic acceleration tube

Received 19 January 2006

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

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