

脉冲慢束空间聚焦的 SIMION 模拟

许红霞, 陈祥磊, 成 斌, 熊 涛, 高传波,
郝颖萍, 翁惠民, 叶邦角

(中国科学技术大学近代物理系, 安徽合肥, 230026)

摘要: 用 SIMION 7.0 光学离子模拟软件对正电子在慢正电子束装置的静电及静磁场中的加速、输运、空间聚焦情况进行了模拟计算, 初步得到了很好的空间聚焦模拟结果。对于加速能量为 0.5~30 keV 的正电子束流聚焦半径控制在 5 mm 以下, 满足了实验的需要。

关键词: SIMION; 脉冲慢正电子束; 斩波器; 集束腔

中图分类号: O 411.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2010)03-0614-04

正电子湮没方法是一种研究微观缺陷的极灵敏的无损探测方法, 而传统的寿命谱、多普勒谱和角关联装置中的正电子注入能量很高, 通常在 MeV 量级, 正电子在样品中注入很深, 主要用来研究样品的体性质, 但无法反映影响材料应用的表面和近表面的特性^[1]。

慢正电子束 (Slow positron beam technique) 是一种能量单色性好、放射源远离样品、对缺陷及原子尺度微结构变化灵敏的无损探测方法^[2]。自 1979 年 Mills^[3] 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以来, 该技术被广泛应用于固体物理、表面物理、Ps 原子物理等科学研究中。但此系统对入射正电子和湮没特征 γ 射线已失去了时间关联性, 无法做正电子寿命测量实验, 使连续的慢正电子束向脉冲化方向发展。

脉冲慢正电子束可以说是国际上最先进的正电子研究材料表面微结构方法之一。该技术可以使正电子在材料中的行为按空间(控制能

量得到不同的注入深度)、时间(正电子湮没寿命)、能量(湮没峰位置)和动量(多普勒展宽)进行测量, 进而得到与材料表面缺陷、空位密度、电子结构等有关联的信息, 从而可以有效地研究和表征材料的表面微结构特性。

1 脉冲慢正电子束的装置及原理

脉冲慢束装置如图 1 所示, 其主体结构包括正电子源、慢化体和铅屏蔽、斩波器、预集束腔、主集束腔^[4]、样品室等。

其工作原理为从 ^{22}Na 正电子源(源强 $1.85 \times 10^9 \text{ Bq}$) 发出的高能正电子(能量上限为 500 keV) 首先经过钨慢化体(慢化效率在 3×10^{-3} 左右), 形成具有一定能量分布(小于 3 eV) 的慢正电子, 然后直流慢正电子束经过静电场加速和静磁场输运后通过 50 MHz 的斩波器来实现脉冲化, 考虑计数率的问题, 本文选择脉冲宽度为 5 ns 的近似方波脉冲, 然后该方波脉冲经过预集束腔和主集束腔进行压缩, 形成半高宽为 150 ps 的脉冲慢正电子束, 最后该脉冲正电子束经过加速电极加速并入射到靶室中的样品中。

收稿日期: 2009-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(10975133)。

作者简介: 许红霞(1983-), 女, 山东滨州人, 博士研究生, 研究方向: 核技术应用。

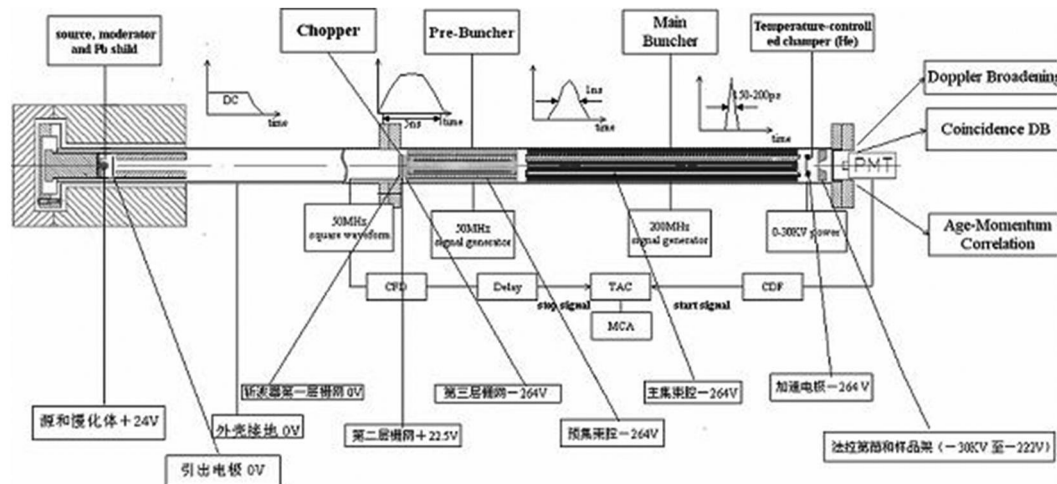


图1 脉冲慢束装置

2 模拟方法

2.1 SIMION 离子光学模拟软件简介

SIMION 7.0 是一款离子光学模拟软件,不仅可以模拟离子在电场或者磁场中飞行,显示出离子在静电或磁场中的飞行轨迹,还可以分析研究在二维或三维坐标下改变离子各种参数后离子的飞行特性。如今 SIMION 不仅能够模拟离子在电场或磁场中飞行这种简单的物理模型,而且还能模拟飞行时间质谱、四极质谱、离子源、光学探测器等更加复杂的物理模型^[5]。

本实验室的脉冲慢束装置使用静电场及磁场来加速和聚焦正电子, SIMION 完全可以模拟正电子在该装置中的加速、输运及空间聚焦过程,基于实验室中连续慢正电子束的空间聚焦模拟经验,选择 SIMION 程序来模拟脉冲正电子束在腔内的空间聚焦情况是可行的。

2.2 物理模型及 SIMION 中各离子参数的设置

从²²Na 正电子源发出的快正电子经过钨慢化体后发出初始能量一般小于 0.025 keV 的慢正电子,其发射角度一般小于 10°,然后慢正电子经过加速电场和 14 组螺线管线圈产生的磁场进入斩波器形成脉冲正电子,脉冲正电子接着进入预集束腔和主集束腔进行压缩,最后经过加速电极打到靶室中的样品中。

SIMION 光学离子模拟软件中离子各参数的相应设置:选择起始位置在 y 轴上位于 5.0~5 mm 的三组九个正电子模拟,每组三个正电

子发射角度分别为 7°、0°、-7°,每个正电子带一个单位正电荷,正电子的质量是 $5.485799030 \times 10^{-4} \text{ amu}$ 。

各电极参数的设置:从慢化体发出的正电子初始能量为 24 eV,源和慢化体电位设为 24 V,引出电极 0 V,斩波器和第一层栅网电压为 0 V,第二层 22.5 V,第三层 -260 V,预、主集束腔均是 -260 V^[4,6],法拉第筒和样品室的加速电压在 0.5~30 kV 之间连续可调^[7]。

磁场的大小由 14 组同轴螺线管线圈的匝数密度 n 和线圈的电流 I 决定,线圈参数,即安匝数密度 $N (N = nI)$ 最终由 SIMION 模拟结果得出。

2.3 模拟方法

根据各个线圈的位置、半径、长度、缠绕匝数密度等参数和有限长螺旋管的磁场公式:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \left[\frac{l_2 - z}{\sqrt{R^2 + (x - l_2)^2}} - \frac{l_1 - z}{\sqrt{R^2 + (x - l_1)^2}} \right]$$

R 和 l_2, l_1 分别是线圈的半径和线圈相对脉冲系统右端,左端的位置坐标, z 是脉冲系统上任意点的坐标。

在 SIMION 中编写一个磁场文件,调节 14 组线圈安匝数密度 N 来改变磁场的大小,进而得出好的空间聚焦半径,通过 SIMION 可以看出正电子在脉冲系统中的漂移、输运及聚焦轨迹,如图 2。利用上述模拟得到的线圈参数用 VB 程序计算出脉冲束装置中磁场分布,如图 3 所示。

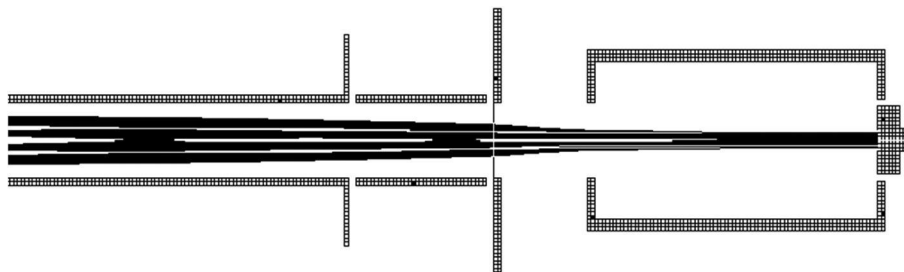


图2 正电子在脉冲束装置中打靶的过程

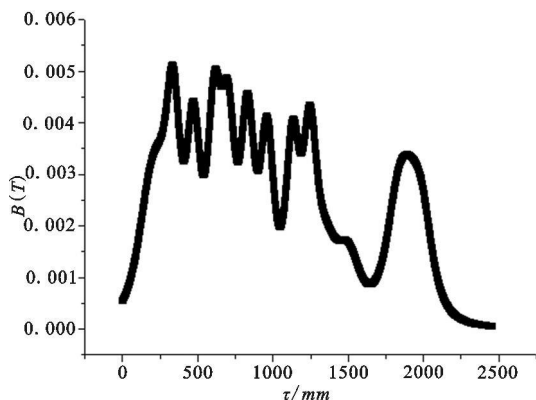


图3 脉冲束装置中磁场分布

3 模拟结果及讨论

在调节线圈安匝数密度 N 的过程中,采用先粗调后细调,逐步逼近理想聚焦结果的方法获得线圈参数。同时尽可能将具相同参数的线圈合并为一组以节省电源的个数。

在上述过程中得出一个规律: (1) 在调节安匝数密度 N 的同时要兼顾磁场均匀性。一般来说磁场越均匀总体聚焦效果越好。(2) 根据 SIMION 对正电子空间聚焦模拟的经验,在同一组线圈参数下,空间聚焦半径随着正电子加速能量的提高呈减小趋势。因此模拟时选择加速能量为 0.5 和 5 keV 的正电子,看它们的空间聚焦情况。(3) 线圈电流不能太大,这样会加大能耗,并且降低高压电源的使用寿命,一般不超过 5 A,根据已知线圈的匝数密度 n (匝/m),选择合适的 N 值。

根据上述模拟方法最终得出较理想的线圈参数。14 个线圈被分为 6 组,由 6 个电源控制,具体参数见表 1。其中 6 375 和 5 090 分别是正电子能量为 0.5 keV 和 5~30 keV 时线圈 1 的参数 N 。

在上述线圈参数下,用 SIMION 模拟出加速能量在 0.5~30 keV 之间的正电子的空间聚焦情况,得到聚焦半径随加速能量的变化趋势,

如图 4 所示。

表 1 6 类线圈的参数

线圈类型	包含线圈的编号	半径 R /mm	长度 L /mm	安匝数密度 N /安匝 $\cdot$ m $^{-1}$
1	1	125	132	6375/5090
2	2, 3, 5, 7, 12	65	43	8628
3	4, 6	65	43	9361
4	8, 9	65	43	8140
5	10, 11	120	43	5291
6	13, 14	120	43	6186

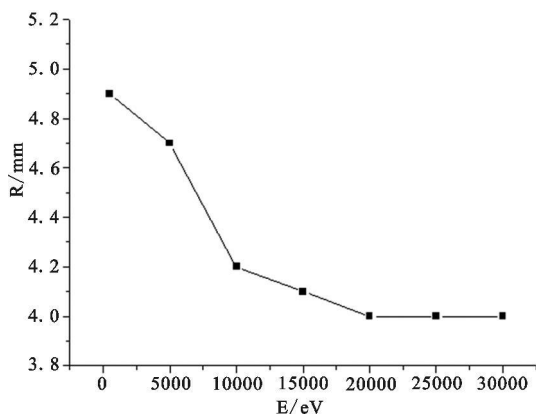


图4 聚焦半径 R 随加速能量 E 的变化趋势

4 结束语

SIMION 是一款适合于正电子空间聚焦模拟的程序,本文用此程序对正电子在脉冲慢束装置中的空间聚焦做了模拟并得出满足实验需要的理想结果。在同一组线圈参数下,用 SIMION 模拟出正电子的空间聚焦半径随着加速电压的升高而变小。导致这一现象的原因是加速电场有空间分布,不同的加速电压对应不同的空间聚焦结果。脉冲慢正电子束装置的基本安装现已完成,下一步的任务是参照模拟得到的线圈参数展开调束工作。

参考文献:

[1] 韩荣典,周先意,叶邦角,等. 慢正电子束技术的应用

- 用与发展[J]. 物理学进展, 1999, 19(3): 305-330.
- [2] 郁伟中. 正电子物理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 15-16.
- [3] Allen P. Mills, Jr. Surface Analysis and atomic Physics with Slow Positron Beams[J]. science, 1982, 218(4570): 335-340.
- [4] 马雁云, 裴士伦, 曹兴忠, 等. 北京慢正电子强束流束团化系统设计[J]. 高能物理与核物理, 2006, 30(2): 166-170.
- [5] J. De Baerdemaeker, C. Dauwe. Development and application of the Ghent pulsed positron beam[J]. Applied Surface Science, 2002, 194: 52-55.
- [6] L. Mileshina, a. Nordlund, Design and performance of the pulsed positron beam at Chalmers University of Technology[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2009, 267: 2934-2937.
- [7] David A. Dahl. SIMION for the personal computer in reflection[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2000, 200: 3-25.
- [8] Gao Chuan-bo, Xiong Tao, Xi Chuan-Ying, et al. Simulation of time bunching for a pulsed positron beam[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(11): 4149-4152.

Space Focusing Simulation for Pulsed Slow Positron Beam by SIMION

XU Hong-xia, CHENG Xiang-lei, CHENG Bin, XIONG Tao, GAO Chuan-bo,
HAO Ying-ping, WENG Hu-min, YE Bang-jiao

(Department of Modern Physics in the University of Science and
Technology of China, Hefei Anhui 230026)

Abstract: A kind of ion optics simulation software called SIMION 7.0 is used to simulate the acceleration, transportation and space focusing of the positrons of the positrons in the static electric and magnetic field in the slow positron beam device. Very good simulation results and talking are given at last. The space focusing radius of positrons reaching the target with low energy (0.5 ~ 30 keV) has been controlled less than 5 mm.

Key words: SIMION, Pulsed Slow Positron Beam, Chopper, Pre-buncher

(上接第 591 页, Continued from page 591)

4 Channel Readout ASIC for MaPMT

WANG Ke, LIU Zhen-an, WANG Zheng, LI Da-wu

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049)

Abstract: MaPMTs is widely used, but conventional PCB circuits can not satisfy their demands because of the defects of large volume, high power dissipation and noise. The 4-channel readout ASIC for MaPMT is designed for solving these problems with 0.35 μm CMOS technology. The circuit is composed of Pre-Amp, gain adjusting, and CR-RC shaper with Pole-zero canceling. The test results show power dissipation is 66 mW; gain 62.2 mV/pC; dynamic range 13 pC, INL= 1.5%; SNR= 9.1. The performances meet design requires.

Key words: MaPMT, Regulated Cascode, Multi-channel, preamplifier