

文章编号: 1007-4627(2004)01-0030-04

Schottky 探针研制与测试研究*

陈立新, 肖国青, 郭忠言, 詹文龙, 孙志宇, 李加兴,
王 猛, 毛瑞士, 陈志强, 白 洁, 胡正国, 李 琛
(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用 Schottky 质谱仪进行远离 β 稳定线核质量测量研究是九五国家大科学工程兰州重离子加速器冷却储存环上的一个重要研究方向. 简要分析了 Schottky 探针的工作原理和利用 Schottky 质谱仪进行质量测量, 给出了对用于 HIRFL-CSR 束流诊断与测量的 Schottky 探针的研制与测试结果.

关键词: 肖特基质谱仪; 冷却储存环; 质量测量
中图分类号: TL817+. 4 **文献标识码:** A

1 引言

核的基态质量是核的一个最基本的特征量, 这个量包含了整个核内的各种相互作用力的信息. 系统的核质量随质子数和中子数变化的演化研究能揭示出核的重要特性, 如核壳层结构和基态形变^[1], 远离 β 稳定线的核质量可以作为核模型的灵敏探针^[2]. 核质量测量在核天体物理研究中也有很重要的应用, 天体 r 过程或 rp 过程路径上的一些奇异核质量对解释核丰度或确定核合成路径都很关键, 这些核细微的质量差异都将对天体核反应过程产生深远的影响.

由于核质量测量在核理论研究上和核天体研究上的重要性, 以及众多奇异核的质量未确定和理论计算对远离 β 稳定线核质量预言的较大不确定性都激起了在高精度质量测量上的极大兴趣. 这些核的实验精度高于 10^{-5} 的测量值, 对核模型的优化有很大的作用. 当前世界上几个重要的实验室都开展了高精度奇异核质量测量实验. 在 GSI, CERN 和 GANIL 等实验室开展的奇异核高精度质量测量研究都达到了很高(超过 10^{-5})的实验精度^[3,4]. 大部分质量直接测量技术基于测量正比于粒子荷质比的物理量, 通过磁谱仪(GANIL 的 SPEG 和 LANL 的 TOFI)测量飞行时间或利用离子阱 (ISOLDE 的

ISOLTRAP)、储存环(GSI 的 ESR) 测量粒子回旋频率.

GSI 利用肖特基(Schottky)质谱仪(SMS)方法进行了大量核质量测量研究, 获得了很高的实验精度^[5-7]. 基于粒子回旋频率测量的 SMS 质量测量方法主要利用 Schottky 探针测量粒子的回旋频谱, 再从 Schottky 信号频谱中精确提取与粒子荷质比直接相关的粒子回旋频率, 利用频谱上已知质量的核作参考就可以计算出质量未知的核质量.

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的即将建成为我们大量开展高精度奇异核质量测量实验提供了优越的实验条件. CSR 是一个集加速、累积、冷却、储存、内靶实验及高分辨测量于一体的多功能实验装置. 它由主环 CSR_m 和实验环 CSR_e 构成, 以现有的 HIRFL 作注入器. HIRFL-CSR 将放射性核束(RNB)装置与储存环结合起来, 具有能量可变范围大、可用束流种类多和束流品质高等特点, 可以作为高灵敏度和高分辨谱仪使用. 利用 HIRFL-CSR 进行质量测量研究具有广阔的研究前景, CSR 先进的电子冷却装置大大压缩了电子冷却时间, 从而使更多的短寿命核素可应用 SMS 质量测量方法.

收稿日期: 2003 - 06 - 23; 修改日期: 2003 - 07 - 11

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401); 国家杰出青年基金资助项目(19825115); 国家自然科学基金资助项目(10105011, 10205019)

作者简介: 陈立新(1976-), 男(汉族), 安徽望江人, 硕士, 从事实验核物理研究.

2 Schottky 探针

利用 SMS 质量测量方法进行核质量测量的关键在于高精度提取各种粒子的回旋频率, 实验用 Schottky 探针记录冷却后粒子的回旋信息, 再从 Schottky 噪声信号的频谱中提取粒子的回旋频率. 利用电子冷却可以将束流冷却到极低的动量分散, 从而获得很高的频率分辨. 在 GSI 的 SMS 质量测量中获得了 $\Delta f/f \approx 3 \times 10^{-8}$ 的高频率分辨^[4], 由此得到的质量分辨 $\Delta m/m \approx 5 \times 10^{-7}$.

Schottky 探针是一种广泛使用的束流监测探测器^[8], 用于加速器和储存环内束流动力学特性测量. 从 Schottky 信号中可以得到束流动量分散、Q 值和发射度等信息. Schottky 探针既可作为横向位置探针, 又能进行离子纵向特性(如回旋频率)测量.

束流通过管道时, 会在管道内壁上产生与束流极性相反、大小相等的镜像电流^[9], 通过测量该镜像电流就可以实现对束流的无损测量^[10]. 如果束流偏离束流管道中心线(如图 1 所示), 则产生的感应电流分布的函数表达式为

$$J(\phi) = -\frac{I_{\text{beam}}}{2\pi b} \left[\frac{b^2 - r^2}{b^2 + r^2 - 2bc \cos(\phi - \theta)} \right]. \quad (1)$$

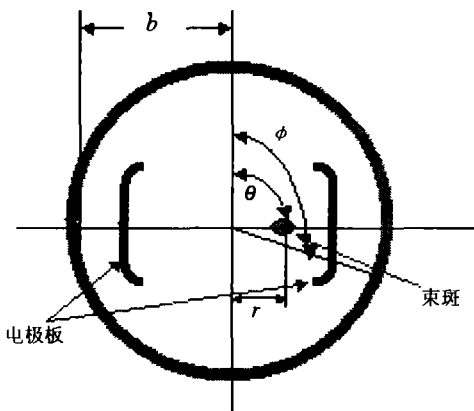


图 1 束流偏离中心线示意图

如果我们用两块电极板截取部分镜像电流(如图 1 所示), 两极板会因为与束流中心的距离不同而产生幅度不等的脉冲信号, 这样就可以利用两极板的信号差测量出束流运动的横向参数. 若只对束流纵向参数(如回旋频率)感兴趣, 可只测量一块极板的信号或取两极板信号的和值^[9].

测量束流位置时, 至少需要两块电极板. 为了

更精确的测定束流特性参数, 也有用 4 块甚至 8 块极板对称安装的. 在 CSR 上, Schottky 探针采用了两块极板的结构. 如图 2, 由两块对称电极板构成的电容式 Schottky 探针是常用的束流诊断和测量装置, 它可进行束流强度、位置和回旋频率的测量. 测量时取两极板的信号差则可得束流的横向运动参数; 若取两极板的信号之和, 则只能得到粒子运动的频率信息.

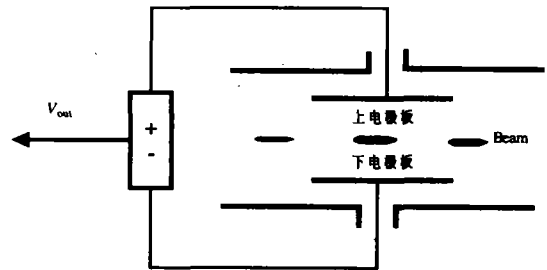


图 2 两对称极板构成的电容式 Schottky 探针

3 Schottky 探针的研制与测试

在 HIRFL-CSR 上的束诊断系统中, Schottky 探针也是不可缺少的诊断装置之一. 在 CSR 的多个位置上需要安装 Schottky 探针对束流进行监测. 在束流位置监测、Q 值测量及离子回旋频率测量上, Schottky 探针具有不可取代的作用. 在选择和设计 Schottky 探测器时, 要考虑的两个主要问题是 Schottky 探测器的带宽和灵敏度. 在束流诊断和测量中往往都需要大的带宽, 当需要高的时间分辨以及束流强度很弱时高灵敏度也是必需的, 而且 Schottky 探针参数如带宽、灵敏度、阻抗的优化设计对整个测量系统的优化是很重要的.

考虑到 CSR 上能提供的纵向安装空间和束流包络的大小, 我们研制了两块电容式 Schottky 探针分别作为水平和垂直方向的束流监测器. Schottky 探针的结构参数如表 1 所示. 该探针的极板形状参照三维电磁模拟程序 MAFIA 的计算结果确定. MAFIA 是一个可以模拟电磁场分布的程序, 它基于电磁场的基本方程——Maxwell 方程进行计算. 为在极板间形成好的横向电场, 我们使用 MAFIA 程序对极板间的电场做了模拟计算, 通过改变极板形状校正极板间电场分布. 在不影响束流包络的前提下, 在极板的两边加上一个小的曲边, 如图 3 为极板加上曲边后板间的电场分布图. 可以看出, 加上

曲边后极板间的电场均匀性得到了极大的改善, 在向均匀电场. 束流包络内可以得到很好的用于束流横向激发的横

表 1 Schottky 探针的结构参数

探针	极板长度/mm	板间距/mm	极板宽度/mm	曲边长度/mm	曲边宽度/mm·曲边弯角/(°)	
水平探针	400	160	100	400	40	20
垂直探针	400	100	160	400	30	30

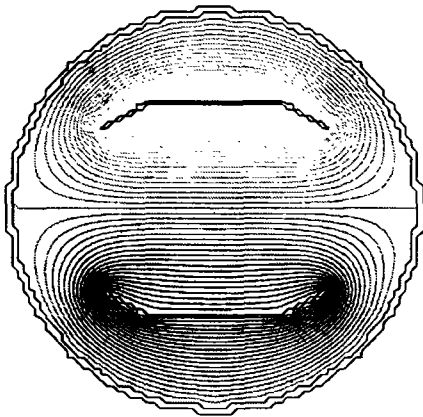


图 3 极板加曲边后改善的电场分布

安装前需要对探针的信号响应进行测试. 脉冲波通过金属丝产生的横向电磁场可模拟束流的行为. 信号响应测试时, 用一脉冲信号发生器产生一脉冲宽、幅度及上升时间均可调的方波, 将脉冲方波加载到一通过两极板之间的丝线上, 丝线上的脉冲电流可以模拟粒子运动. 通过改变方波的频率、脉宽、幅度和上升时间等特性可以模拟不同条件下的粒子束流行为. 通过改变丝线与极板的距离可以测试极板对束流横向位置的敏感程度. 如图 4 所示, 在方波频率为 382.5 kHz 和丝线上电流约为 100 mA 时, 极板上输出的感应信号幅度差与丝线极板间距离基本呈线性关系且变化敏感. 丝线越接近极板, 极板上产生的感应幅度越大. 由于测试条件的限制, 测试时信号噪声较大, 故将丝线上电流调得较大以得到高信噪比的输出信号. 图 4 中位置偏移值取两极板中心为 0, 靠近极板为正, 远离极板为负.

改变脉冲方波的上升和下降时间可以模拟束团处于不同纵向密度引起的感应信号. 如图 5 所示, 信号的幅度对上升时间很敏感, 对同样幅度与频率的方波, 方波上升时间与感应信号幅度近似成反比

关系. 对于一个真实的粒子来说, 其纵向尺度极小, 相当于上升时间无限小的脉冲, 从而可以得到较高幅度的类似 δ 脉冲的信号.

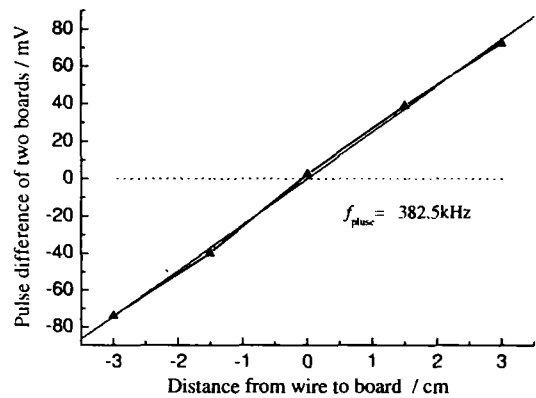


图 4 丝线和极板距离与信号幅度差的关系

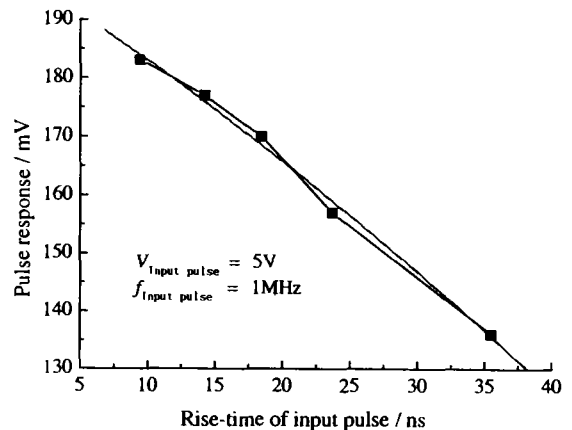


图 5 脉冲响应幅度与输入脉冲上升时间的关系

4 结束语

对大量质量未知或质量精度达不到要求的核进行高精度质量测量是 HIRFL-CSR 建成的一个重要实验研究方向. CSR 先进的电子冷却装置将使其上的核质量测量研究有着广阔的前景. 当前还有众

多远离 β 稳定性的核素质量是未知的, 而它们中很多有足够的寿命进行质量测量^[11]. 这些奇异核的质量无论是对理论模型的优化还是对核物理应用研究都是很重要的.

Schottky 信号处理是利用 SMS 方法进行核质

量测量的关键, 对 Schottky 探针的信号响应测试是 Schottky 探针设计完成后的必要步骤, 由于没有利用实际束流进行测试的条件, 我们只能用脉冲信号通过丝线模拟束流进行测试. 测试结果表明, 该 Schottky 探针能满足 CSR 束诊与测量的要求.

参 考 文 献:

- [1] Audi G, Wapstra A H. The 1993 Atomic Mass Evaluation [J]. Nucl Phys, 1993, **A565**: 1.
- [2] Swiatecki W J. Nuclear Physics: Macroscopic aspects[J]. Nucl Phys, 1994, **A574**: 233c.
- [3] Bolln G, Becker S, Kluge H J, *et al.* ISOTROP: A tandem penning trap system for accurate on-line mass determination of short-lived isotopes[J]. Nucl Instr and Meth, 1996, **A368**: 675.
- [4] Radon T, Kerscher T, Schlitt B, *et al.* Schottky Mass Measurement of Cooled Proton-rich Nuclei at the GSI ESR[J]. Phys Rev Lett, 1997, **78**(25): 4 701.
- [5] Radon T, Geissel H, Munzenberg G, *et al.* Schottky Mass Measurements of Stored and Cooled Neutron-deficient Projectile Fragments in the Element Range of $57 < Z < 84$ [J]. Nucl Phys, 2000, **A677**: 75.
- [6] Scheidenberger C, Beckert K, Beha T, *et al.* Mass Measurements of Stored and Cooled Exotic Nuclei at GSI[J]. Nucl Phys, 1998, **A630**: 379c.
- [7] 戴光曦. 肖特基质谱仪[J]. 原子核物理评论, 1997, **14**(4): 239.
- [8] Bousard D. Schottky Noise and Beam Transfer Functions Diagnostics[M]. CERN Proceedings 95-60, 1995, **12**: 749.
- [9] Cuperus J H. Monitoring of Particle Beams at High Frequencies[J]. Nucl Instr and Meth, 1977, **145**: 219.
- [10] Bousard D. Schottky Noise and Beam Transfer Function Diagnostics[A]. Proceedings of CERN Accelerator School[C]. Oxford, England, 1985.
- [11] Audi G, Bersillon O, Blachot J, *et al.* The NUBASE Evaluation of Nuclear and Decay Properties[J]. Nucl Phys, 1997, **A624**: 1.

Study of Design and Test of Schottky Pick-up*

CHEN Li-xin, XIAO Guo-qing, GUO Zhong-yan, ZHAN Wen-long,
SUN Zhi-yu, LI Jia-xing, WANG Meng, MAO Rui-shi,
CHEN Zhi-qiang, BAI Jie, HU Zheng-guo, LI Chen

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The mass measurement of the nuclides far from the β stability by using Schottky mass spectrometry is an important aspect of the studies on HIRFL-CSR. The principle of Schottky pick-up and the method and prospect of Schottky mass spectrometry are also briefly analyzed. The Schottky pick-up designed for the system of diagnostics and measurement of HIRFL-CSR and also the test results are given.

Key words: Schottky mass spectrometry; cooling storage ring; mass measurement

* **Foundation item:** Major State Basic Development Program (G2000077401); National Natural Fund for Distinguished Young Scholar (19825115); National Natural Science Foundation of China (10105011, 10205019)