

文章编号: 1007-4627(2010)03-0296-04

用于辐射复合与双电子复合实验的低能离子闪烁探测器^{*}

孟令杰^{1,2}, 马新文¹, 刘惠萍¹, 岳珂^{1,2}, 张鹏举^{1,2}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了在 CSRm 的电子冷却器上进行辐射复合以及双电子复合实验, 需要探测能量小于 4 MeV/u 的离子, 因此设计了新的置于超高真空环境的 CsI(Tl) 闪烁探测器, 探测器采用的光电倍增管为 R7525(Hamamatsu)。介绍了新闪烁探测器的结构, 并对其进行了性能测试。测试结果表明, 该探测器对高、低能离子均有良好的响应, 探测器的信号十分明显。探测器的最高计数率可以达到 10^6 ions/s, 并且探测器附近的真空度可达 10^{-10} Pa 量级, 能够满足辐射复合与双电子复合实验以及储存环对真空的要求, 为今后在 CSRm 上进行复合实验打下了良好的基础。

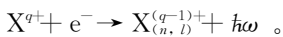
关键词: 辐射复合; 双电子复合; CsI(Tl) 闪烁探测器; 低能离子; CSRm

中图分类号: TL503.92 **文献标识码:** A

1 引言

辐射复合(Radiative Recombination, 简称 RR)和双电子复合(Dielectron Recombination, 简称 DR)是各种等离子体中最基本的过程, 它们的复合截面以及复合速率系数是研究天体物理过程以及聚变等离子体的重要参数。目前, 对于研究这两种过程, 最理想的实验方法是储存环合并束实验。在储存环实验中, 电子冷却器一方面可提供温度很低的电子束流, 用来冷却离子束, 另一方面电子束也可作为电子靶, 来研究离子与电子的相互作用。与传统的电子束离子束的合并束实验相比, 冷却电子束作为靶子在能量分辨及束流强度方面有巨大优势。

RR 是一个非共振的单步过程, 离子俘获一个电子的同时发射一个光子。它的反应式为



DR 是一个共振的两步过程, 入射离子至少具有一个束缚电子。在第一步中, 自由电子被入射离子 X^{q+} 俘获的同时, 由于自由电子与该离子的某个电子束缚电子相互作用, 束缚电子被激发到某个激

发态, 形成一个双激发态离子。在第二步中, 这个处于双激发态的离子通过辐射光子而衰变到稳定态。它的反应式为



在电子冷却器中, 离子 X^{q+} 与电子发生 RR 或 DR 反应后, 会从 X^{q+} 变为 $X^{(q-1)+}$, 离子的电荷态会减少一个单位, 因此反应后的离子在经过二极偏转磁铁时会向束流轨道的外侧偏移。为了研究 RR 和 DR 过程, 需要对反应后的离子进行探测, 因此在电子冷却器下游的两块二极偏转磁铁后面安装了闪烁探测器, 位置如图 1 所示。两个探测器 PD1 和 PD2 均可径向移动, 通过将探测器移动到不同的位置, 可探测实验中不同电荷态(具有不同的轨道)的离子。

2007 年底, 在兰州重离子加速器的冷却储存环主环 CSRm 上进行了第一次束流为 21.44 MeV/u 的 Ar^{18+} 测试性实验, 且取得了一定的进展^[1]。在该实验中, 闪烁探测器置于不锈钢材质的探测器盒中, 探测器盒安装在 CSRm 的真空管道上。探测器盒上设有 $30 \mu m$ 厚的不锈钢窗, 用于隔离超高真

* 收稿日期: 2009-12-29; 修改日期: 2010-03-10

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10434100, 10674140)

作者简介: 孟令杰(1983-), 男(汉族), 山东龙口人, 博士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究;

E-mail: menglingjie@impcas.ac.cn

通讯联系人: 马新文, E-mail: x.ma@impcas.ac.cn

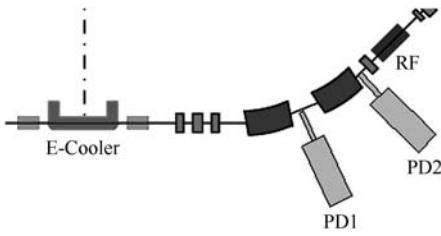


图 1 离子探测器 PD1 和 PD2 的位置示意图

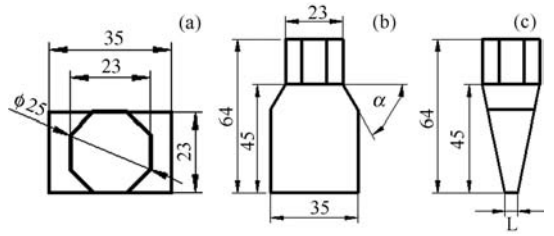


图 2 闪烁体结构示意图

(a)紧贴石英窗的面；(b)为正对束流的面；(c)为平行于束流的面；(b)中的 α 角和(c)中的长度 L 是模拟光收集效率时变化的两个参量。

空，同时作为离子到探测器的入射窗口。然而，由于离子在物质中有能量损失，当离子能量低于某个阈值时，将会被完全阻止在不锈钢窗内而不能到达探测器。例如，4 MeV/u 的 C^{6+} 在不锈钢中的射程只有大约 23 μm ，而在 CSRm 的电子冷却器上开展的 RR 和 DR 实验，离子束的能量都是注入能量，比较低，特别是对于低能重离子，注入能量不会超过 4 MeV/u。为了获得对一些低能离子的探测能力，需要设计新的探测器，以满足实验的要求。本文描述了为此目的而新设计的 CsI(Tl) 闪烁探测器的结构，并对其测试结果进行了分析。

2 探测器的结构

探测器整体分为两个不锈钢套筒。其中，外套筒安装在 CSRm 的真空管道上，取代原来的探测器盒。外套筒顶部安装有石英窗，用于闪烁体与光电倍增管之间的光传输，闪烁体固定在套筒与真空连接的一面，与石英窗密合压接。由于闪烁体处于真空中，外部没有任何遮蔽物阻挡，理论上可以探测到能量极低的离子，但超高真空环境要求闪烁体的真空出气率很低并且能够承受较高的烘烤温度，因此选择了 CsI(Tl) 晶体。内套筒放置于外套筒中，用于固定光电倍增管 R7525 (Hamamatsu)、分压器以及高压、信号接头。内套筒配有缓冲弹簧，以防止光电倍增管在安装过程中因压力不均匀而碎裂。为提高光收集效率，光电倍增管与石英窗之间采用硅油耦合。

为了增加闪烁体对光的收集效率，对晶体表面进行了抛光并镀铝膜作为反射层。闪烁体设计图如图 2 所示。图 2 中的(a)为紧贴石英窗的面，闪烁体中的荧光从这个面出射，到达光电倍增管；(b)为正对束流的面；(c)为平行于束流的剖面。通过模拟，可以得到不同 α 和 L 下的光收集效率，以确定理想的参量值。

模拟所用的软件为 Geant4。在进行模拟时，设置光源为点光源，并且处于闪烁体的几何中心。最终得到了光收集效率和能量分辨率随 α 角和长度 L 的关系，分别如图 3 和图 4 所示。由于在 RR 和 DR 实验中只需要得到离子计数的信息，因此探测器的能量分辨并不重要。对于角 α ，模拟的结果显示从 15° 到 75° 范围内的光收集效率十分接近。考虑到加工和安装的方便，最终选择了 60° 。对于长度 L ，模拟结果显示：该长度越短，光收集效率越高。因此在工艺允许的情况下，应该使该长度的值尽可能地小，考虑到安装和定位，最终选择的长度为 5 mm。

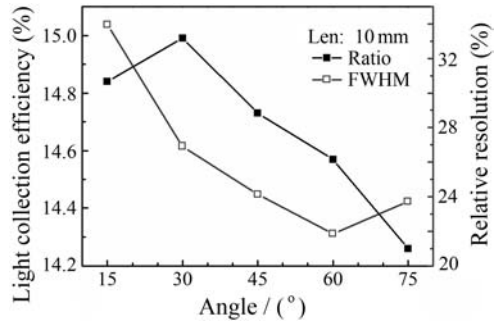


图 3 对图 2(b)中 α 角的模拟结果
实心点表示光收集效率，空心点代表能量分辨率。

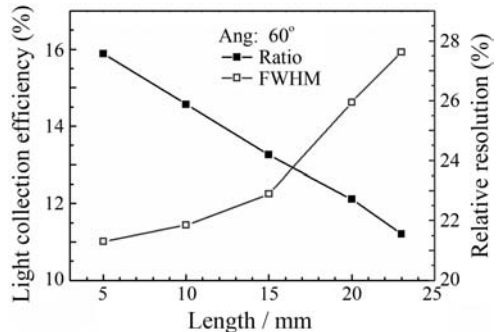


图 4 对图 2(c)中顶端长度 L 的模拟结果
实心点表示光收集效率，空心点代表能量分辨率。

3 测试结果和讨论

利用 200 MeV/u C⁶⁺ 离子束流和 α 放射源分别测试了探测器的性能,以测试探测器对不同能量离子的响应程度,输出的信号直接用示波器记录。

首先,利用 200 MeV/u C⁶⁺ 离子束流对探测器进行了测试。由于离子能量很大,光电倍增管输出信号也很大。为了确保信号不超过示波器的量程,将光电倍增管阴极电压设置为 -1200 V,分别用示波器记录了离子信号以及该环境中的本底信号。其中本底信号如图 5 所示,信号幅度约为 90 mV。200 MeV/u C⁶⁺ 离子的信号如图 6,幅度约为 2500 mV。

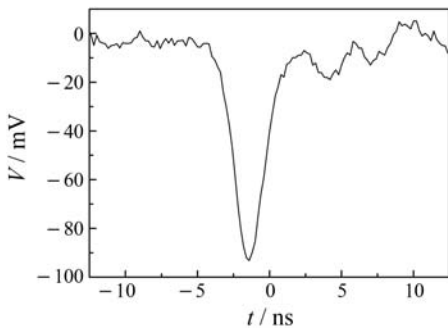


图 5 环境本底信号(偏压-1200 V)

为检验探测器对低能离子的响应能力,用 α 源对探测器进行了测试,所使用的 α 源为²³⁹Pu 源,其主要 α 粒子的能量为 5.155 MeV。在测试时,为增加信号幅度,将光电倍增管阴极电压设置为 -1600 V,测试并记录了本底信号和 α 粒子信号。另外,为了测量 α 源中 X 射线对探测器的影响,在 α 源与探测器之间用一层约 30 μm 的铝箔挡住 α 离子,并记录了信号。信号如图 7 所示,其中本底信号为实线,幅度约为 300 mV。α 粒子信号为虚线,幅度约为 600 mV,明显高于本底信号的幅度。加遮挡铝箔后的 α 源信号为点线,幅度约为 300 mV,接近本底信号的幅度,这说明幅度较大的信号不是来自 X 射线,而是来自 α 离子。

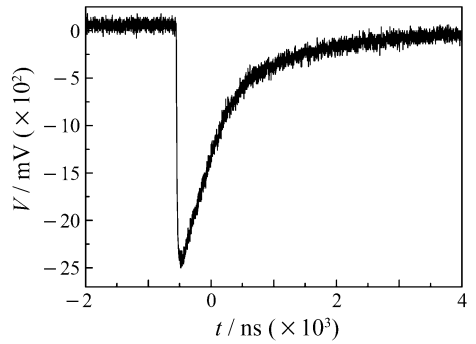


图 6 200MeV/u 的 C⁶⁺ 离子信号(偏压-1200 V)

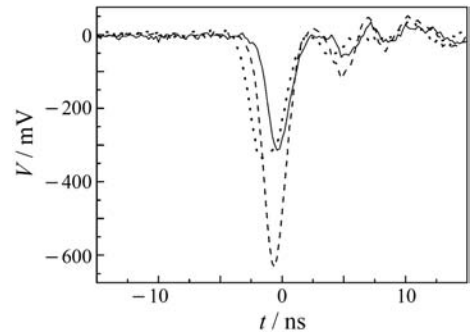


图 7 示波器记录到的信号

实线表示本底信号,虚线表示 α 源信号,点线表示遮挡铝箔后的 α 源信号(X 射线信号)。

为测量探测器的计数效率,记录了这 3 种情况下的探测器计数,测量时间为 60 s。α 放射源标称的强度为 2.06×10^4 (表面粒子/ $2\pi \cdot \text{min}$),即 129434(表面粒子/min),标称的测量误差为 3%—5%。在对 α 放射源进行探测时,由于 α 放射源紧贴闪烁体放置,因此有近似 2π 的探测立体角,各种计数如表 1 所示。

在表 1 中,放射源被铝箔遮挡后的探测器计数包含了 X 射线和本底两部分贡献,因此用 α 放射源时的探测器计数减去这部分计数,即为 α 粒子的计数。由此可以得到:电压为 -1600 V 的情况下,如果不考虑 α 放射源标称的测量误差,那么探测器对于该能量 α 离子的探测效率为 $99.10\% \pm 0.28\%$,接近 100%。而在实际实验中,离子的能量一般都

表 1 各种情况下的探测器计数以及 α 放射源标称的强度

放置 α 源时的总计数 /min	α 源被遮挡后的计数 /min	本底计数 /min	标称的源强/min (误差按 5% 计算)
133274 ± 365	5006 ± 71	2694 ± 52	129434 ± 6472

高于放射源的 α 离子能量, 使离子更容易被探测, 因此该探测器能够满足实验需求。

4 结语

根据 CSRm 实验需要, 即对低能 (<4 MeV/u) 离子的探测需要, 设计了新的闪烁探测器, 并对其性能进行了测试。测试结果显示, 探测器对高能量 (200 MeV/u) 和低能量 (≈ 1.3 MeV/u) 的离子均有良好的响应。在探测高能离子时, 信号幅度很大。对低能离子探测时, 增加光电倍增管偏压, 可以得到满足要求的低能离子的信号幅度。探测器的最高计数率可以达到 10^6 ions/s, 满足实验的要求。目前, 探测器已经通过测试并安装在 CSRm 上。在经过烘烤后, 闪烁探测器能够正常工作, 并且探测器附近的真空度可达 10^{-10} Pa 量级, 满足储存环对真空的要求, 为今后在 CSRm 上进行 RR 和 DR 实验打下了良好的基础。

参考文献 (References):

- [1] Meng L J, Ma X, Liu H P, *et al.* Journal of Physics, Conf. Series, 2009, **163**: 012031.
- [2] Wolf A, Gwinner G, Linkemann J, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2000, **A441**: 183.
- [3] Zhu Xiaolong, Ma Xinwen, Sha Shan, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, **24**(3): 253(in Chinese).
(朱小龙, 马新文, 沙杉, 等. 核电子学与探测技术, 2004, **24**(3): 253.)
- [4] Hu Qiang, Li Jiaying. Nuclear Physics Review, 2008, **25**(1): 52(in Chinese).
(胡强, 李加兴. 原子核物理评论, 2008, **25**(1): 52.)
- [5] Fudan University, Tsinghua University, Peking University. Experiment Methods of Nuclear Physics. Peking: Atom Energy Press, 1985, 99—131(in Chinese).
(复旦大学, 清华大学, 北京大学合编. 原子核物理实验方法. 北京: 原子能出版社, 1985, 99—131.)

A Scintillator Detector for Low Energy Projectile Detection in Radiative Recombination and Dielectron Recombination Experiments^{*}

MENG Ling-jie^{1, 2}, MA Xin-wen^{1, #}, LIU Hui-ping¹, YUE Ke^{1, 2}, ZHANG Peng-ju^{1, 2}

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A new CsI(Tl) scintillation detector readout with R7525 PMT(Hamamatsu) is designed to detect low energy (<4 MeV/u) ions in radiative recombination and dielectronic recombination experiments at the main cooler storage ring in Lanzhou. The structure of the scintillator detector is described in this paper. The detector is tested with α source and ion beams, respectively. The signals from background, 200 MeV/u C^{6+} and alpha radioactive source are recorded and analyzed. The results show that the detector has good response to high- and low-energy ions. The maximum counting rate of the detector can reach 10^6 ions/s and the vacuum level near the detector can reach 10^{-10} Pa, both are good for recombination experiments. The installation of the new detector to CSRm is of great help for future radiative recombination and dielectronic recombination experiments.

Key words: radiative recombination; dielectronic recombination; CsI(Tl) scintillation detector; low energy ion; CSRm

* Received date: 29 Dec. 2009; Revised date: 10 Mar. 2010

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10434100, 10674140)

Corresponding author: Ma Xin-wen, E-mail: x.ma@impcas.ac.cn