

氦喷嘴激光飞行时间质谱仪系统 传输效率的测定*

程鸿兴 庞文宁 尚仁成 张伟 塔拉肖 渊 徐四大

(清华大学物理系 北京 100084)

赵之正 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 建立了一套氦喷嘴激光飞行时间质谱仪系统并进行了离线模拟研究。其工作原理是：首先在原子化室蒸发产生样品气态原子来模拟核反应产物，然后利用氦气传输和氦喷嘴技术，使样品原子形成准直原子束与激光作用。通过激光共振激发电离实现原子序数 Z 的选择，再利用飞行时间质谱技术来确定原子量 A ，实现样品原子的分离与鉴别。通过用 ^{24}Na 的放射性测量的方法对谱仪系统效率进行了研究，其传输效率约为17%。

关键词 激光离子源 氦喷嘴 飞行时间质谱仪 传输效率

1 引言

远离稳定线核素的合成、鉴别和衰变性质研究是原子核物理研究的重要方面。随着越来越多远离核的相继发现，那些尚待发现的核素的位置逐渐靠近中子、质子滴线，其合成和鉴别都较为困难。有些核反应产物高温难熔，难以有效传输。因此，近年来新核素的发现仍是一个十分活跃的研究领域^[1,2]。目前世界上常用的分离和鉴别新核素的装置是在线同位素分离器。它大多采用热离子源，因而存在一些弱点，引出高温难熔元素比较困难，蒸发和电离过程没有元素的选择性，会造成质谱分析中同量异位素的干扰，同时其蒸发过程弛豫时间过长，不利于短寿命核素的研究。因此必须找到一种灵敏、快速、并适用于高温难熔元素的分离和鉴别的方法^[3]。为此清华大学与中国科学院近代物理研究所联合提出了一种新的氦喷嘴激光离子源方案，并且已在清华大学建立了一套氦喷嘴激光离子源的离线装置，称之为氦喷嘴激光飞行时间质谱仪系统，并已取得了预期的结果^[4]。

系统传输效率是该谱仪系统及激光离子源设计方案的重要参量之一，它的定量测量

1998-02-09收稿，1998-05-18收修改稿

* 国家自然科学基金(19175025)、国家教委博士点基金资助

结果不仅反映了谱仪系统分析样品的能力,而且也反映了激光离子源方案的可行性,为在线装置的建立提供了重要数据和依据. 只有极少数文献报道过对纯氦气、短毛细管传输效率的研究^[5]. 为了提高氦喷嘴系统的传输效率,通常都在氦气中加入一些添加剂微粒. 我们的谱仪系统中,为了利用激光共振电离,需要待研究的原子是单个独立的原子,而不是附在添加剂微粒上的,因此只采用纯氦气携带待研究的原子. 本工作对这种纯氦气传输的谱仪系统的传输效率进行了测量研究.

2 氦喷嘴激光飞行时间质谱仪系统

2.1 系统结构和原理

氦喷嘴激光飞行时间质谱仪系统是由氦传输系统、激光系统、飞行时间质谱仪、真空系统和数据获取系统等 5 部分构成(见图 1). 其基本工作原理是:先将模拟核反应产物热

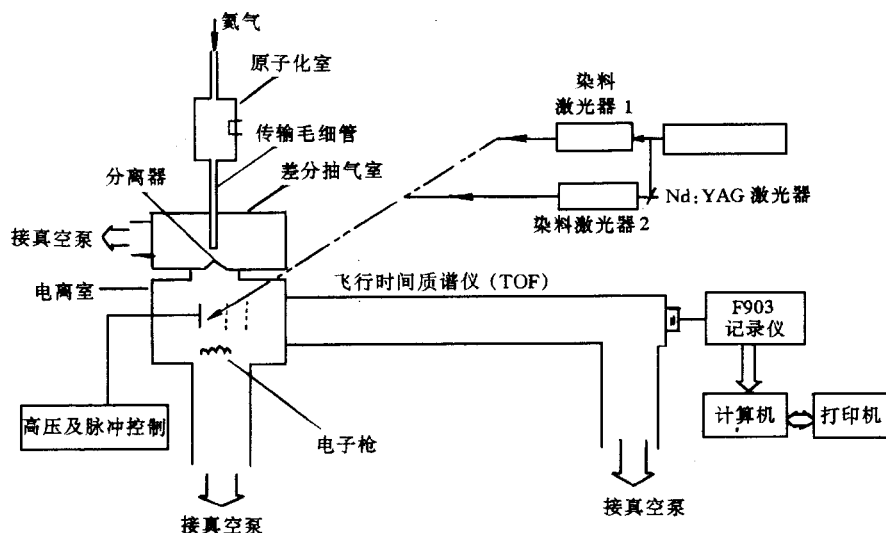


图1 氦喷嘴激光飞行时间质谱仪系统示意图

蒸发原子停止在氦气中,再用氦气携带这些中性原子形成准直性很好的原子束,经过分离器后与激光相互作用,通过多束激光使待测原子共振激发与电离,此过程存在对原子序数 Z 的选择,然后将电离离子引入飞行时间质谱仪,测量离子的质量数 A ,从而实现待测核素的鉴别和分离.

2.2 氦传输系统

在模拟核反应产物的原子化室中,各种元素单质被加热蒸发成原子,并在纯氦气的携带下运动至毛细管出口处以超声速喷出. 连接于差分室的大机械泵抽走氦原子,而质量大的原子由于横向动量小将通过分离器的小孔进入电离室,成为一束准直的中性束流. 经过分离器的原子束横向速度分布对应的热力学温度可在几 k 之内,消除了激光同原子

相互作用时的多普勒展宽¹⁾。

2.3 激光系统

本实验使用一台声光调 Q 的 YAG 激光器, 二倍频输出功率在 5W 左右, 由它泵浦两台可调谐染料激光器, 输出激光每个脉冲功率为 0.1mJ, 重复频率为 1—10kHz, 脉冲宽度为 90ns, 线宽为 0.1Å. 输出激光的波长分别在 589.0nm 和 616.0nm 处连续可调。

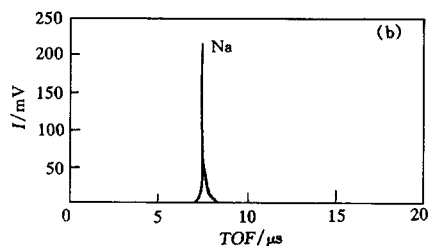
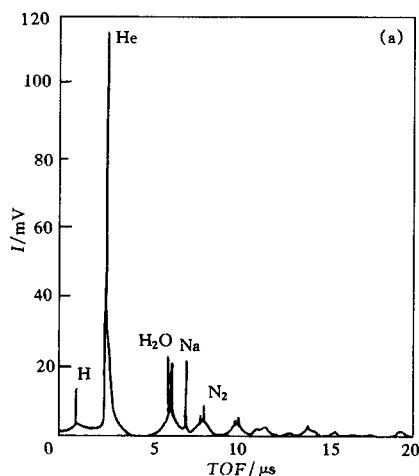


图2 飞行时间质谱

- (a) 用电子枪电离没有 Z 选择的质谱;
(b) 用激光对 Na 原子共振电离的质谱.

可由计算机处理数字示波器获取的数据。

3 氦喷嘴系统传输效率的研究

3.1 传输效率测量原理

$$\text{系统传输效率定义为 } \eta_{\text{传}} = \frac{\text{进入电离区的原子数}}{\text{原子化室中产生的气态原子数}} .$$

原子化室中产生的气态样品原子经氦携带传输至电离区的过程中, 一部分可被原子

2.4 飞行时间质谱仪

飞行时间质谱仪主要由脉冲离子源、飞行管道和离子探测器组成. 用 Hg 同位素标定了谱仪的质量分辨率 $\frac{M}{\Delta M} \cong 250$. 用该飞行时间质谱仪测得的典型的质谱如图 2 所示. 可以看出, 用激光共振电离后除 Na 峰外, 所有其它杂质原子(或分子)的峰都没有出现。

2.5 真空系统

谱仪系统各个部分的真空度要求各不相同. 原子化室和差分室在未通氦气时应达到 1Pa. 电离室和飞行时间质谱仪在通氦气的条件下, 真空度分别为 3×10^{-3} Pa 和 6×10^{-4} Pa.

2.6 数据获取系统

数据获取系统采用 F903 瞬态记录仪或数字存储示波器获取离子探测器的飞行时间谱信号,

1) 潘强岩, 硕士学位论文, 中国科学院近代物理研究所, 1989

化室壁毛细管吸附及被分离器截住。这造成传输效率降低。可以通过增大原子化室压强及氦气进气量,降低毛细管的温度以减小被携带原子的热运动动能,将毛细管准直地对正分离器小孔并设法减小准直原子束的发散度来提高传输效率。对于质量大的被携带原子,其形成的准直束发散度小一些,从而传输效率要高一些。

对系统传输效率的测量,以前曾采用称重法、X射线荧光分析等方法,结果都不理想。本工作采用放射性测量的方法来测量传输效率。实验前将钠样品进行中子活化,通过 $^{23}\text{Na}(n, \gamma)$ 反应获得 ^{24}Na , ^{24}Na 衰变产生能量分别为1.368MeV和2.754MeV两种 γ 射线,分支比分别为99.993%和99.843%。但2.75MeV的 γ 射线产生逃逸峰,不利于精确测量。因此本实验选用1.368MeV的 γ 射线作为特征峰。由实验前后 ^{24}Na 谱的1.368MeV γ 射线的全能峰面积计数相减得到的计数正比于实验中蒸发气化的 ^{24}Na 的数目;再测量收集片上 ^{24}Na 的 γ 谱,收集片上 ^{24}Na 的 γ 谱的1.368MeV γ 射线的全能峰面积计数应正比于传输下来的 ^{24}Na 的数目;由两者之比即可得到传输效率。实验测得 ^{24}Na 的 γ 谱如图3所示。同时,通过测量原子化室、毛细管的 ^{24}Na 的 γ 谱,还可以确定原子化室和毛细管吸附原子占蒸发气化的原子总数的百分比。

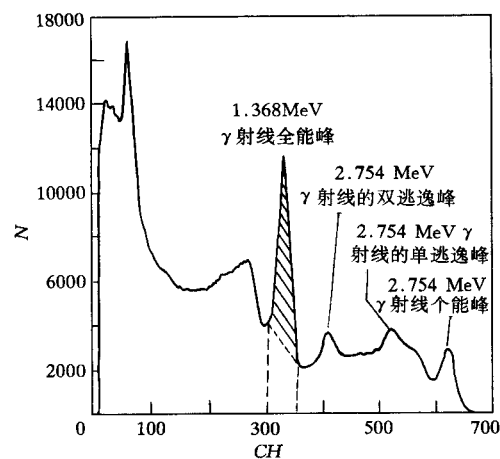


图3 实验测得 ^{24}Na 的 γ 谱
阴影面积为1.368MeV γ 射线的全能峰面积计数。

3.2 测量传输效率的实验结果

本实验共使用了两个活化后的 ^{24}Na 样品进行测量,分别称为1号源和2号源。1号源测量传输效率实验结果:传输效率 $\eta_{\text{传}} = (17.1 \pm 2.4)\%$,原子化室吸附百分比 $\eta_{\text{传}} = (12.2 \pm 1.7)\%$,毛细管吸附百分比 $\eta_{\text{传}} = (8.8 \pm 1.2)\%$ 。传输效率的相对误差 $\frac{\Delta\eta_{\text{传}}}{\eta_{\text{传}}} \approx 14\%$ 。

第二次重复传输效率测量实验(2号源)时,扣除了毛细管和钳锅中前次实验残留 ^{24}Na 的放射性的影响,其实验结果为:传输效率 $\eta_{\text{传}} = (18 \pm 11)\%$,原子化室吸附百分比 $\eta_{\text{原}} = (13 \pm 8)\%$,毛细管吸附百分比 $\eta_{\text{毛}} = (9 \pm 6)\%$ 。

误差计算方法与前次实验类似。两次实验结果在误差范围内是一致的,但在第二次实验中,由于钠存放时间比较长,氧化或发生其它反应的量较多,在实验中加热蒸发出来的量比较少,导致计数很小,结果误差比较大。

4 结论

通过测量 ^{24}Na 的 γ 放射性强度的方法得到了谱仪系统的传输效率,两次实验结果在误差范围内是一致的。虽然第二次实验误差较大,但是它验证了第一次测量的实验结果。

最终可以确定谱仪系统传输效率约为 17%。原子化室吸附百分比约为 12%，毛细管吸附百分比约为 9%。这表明大部分蒸发产生的钠原子经氦携带通过毛细传输管后被分离器挡住。在拆下原子化室和毛细传输管后，从差分室上端可以看到，分离器小孔上有钠喷束形成的环行痕迹，外直径约为 2mm，分离器小孔的直径为 1mm，由此估计通过分离器的原子数与到达分离器的原子数之比约为 1:4。

由实验结果可以看到，该谱仪系统的传输效率是相当高的。但由于真空系统抽气能力的限制，实验中氦气的进气量比较小，差分室真空度不高，不能在毛细管出口处形成超声喷流，影响了被携带原子形成的原子束准直性，使在分离器小孔处相当多的被携带原子无法通过。针对这套谱仪系统的改进措施有两个：一个是加大机械泵的抽气速率，从而可以改善差分室的真空度，提高实验中的氦气进气量以达到超声喷流，提高原子喷束的准直性，增大传输效率；或使用脉冲进气，在不提高真空系统抽气能力的情况下，可以增大脉冲进气时间内的进气量，从而提高传输效率。

参 考 文 献

- 1 Detraz C, Vieria D. *Ann. Rev. Nucl. Sc.*, 1989
- 2 Xu Sida, Shang Rencheng. *Progress of Physics (in Chinese)*, 1991, **11**(1):53—82
(徐四大, 尚仁成. *物理学进展*, 1991, **11**(1): 53—82)
- 3 Shang Rencheng. A Conceptual Design for a Laser Spectroscopy Setup on the HIRFL. In: Shen W Q, Luo Y X, Liu J Y ed. *International Symposium On Heavy Ion Physics and Application*. Singapore: World Scientific, 1990. 479—492
- 4 Shang Rencheng, Xu Sida, Zhang Wei et al. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(8):3027
- 5 Aysto J, Valli K. *Nucl. Instrum. Methods*, 1973,**112**:531

Measurement of the Transmission Efficiency of He-Jet Laser Time-of-Flight Mass Spectrometer*

Cheng Hongxing Pang Wenning Shang Rencheng Zhang Wei Ta La
Xiao Yuan Xu Sida

(*Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Zhao Zhizheng Luo Yixiao

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

Abstract A He-jet laser time-of-flight (TOF) mass spectrometer system is built. The sample atoms evaporated in the atomization chamber are used to simulate the reaction products. The sample atoms are transferred by helium gas through a thin capillary. After passing through a skimmer, the sample atoms are formed into a neutral atom stream. A two- or three-color laser beams perpendicular to the atom jet is used to excite and ionize the atoms multi-steply. Then a pulsed electrical field pulls the ionized atoms to the TOF mass spectrometer. By this processing, the (Z, A) values of the sample atoms can be determined precisely. The efficiency of the spectrometer is studied by measuring the radioactivity of ^{24}Na atoms. The transmission efficiency consists of two parts, the transportation efficiency and the efficiency of laser resonance ionization. The transportation efficiency is determined to be about 17%.

Key words laser ion source, He-jet, time-of-flight, transmission efficiency