

氦喷嘴激光离子源离线系统的 实验结果*

徐四大 尚仁成 张书明 叶子飘 张 伟

(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)

1994-11-17 收稿

摘 要

简要介绍了建立在清华大学的氦喷嘴激光离子源离线系统,并给出了在氦喷嘴出口处激光直接共振电离喷束中的钠原子的实验结果.此结果表明,在氦喷嘴出口处,用激光在束电离钠原子是可行的.由此出发可设计具有Z选择性、效率高、可测同位素寿命下限低又能适用于高温难熔元素的激光离子源.

关键词 离子源,氦喷嘴,激光共振电离.

为了研究远离 β 稳定线核素,发现和鉴别新核素,提高在线同位素分离器(ISOL)的灵敏度是极为重要的问题.而提高灵敏度的关键又在于减小同量异位素(Isobar)的干扰.通常在线同位素分离器的离子源都采用表面电离或气体放电产生等离子体.这类电离方式对元素没有多大选择性,因此,常出现来自干扰元素的某种质量的计数比待测的同位素高几个量级的情况,以致完全无法测量.例如在CERN的PS-BOSSTER的在线同位素分离器,可产生70种同位素,但无严重干扰的同位素只有30种^[1].解决同量异位素干扰问题最有效的办法就是在离子源中加上元素Z的选择.因此,从80年代末开始,各国核物理学家都在考虑设计激光离子源.这种离子源通过激光共振电离来实现Z选择,是一种极有效的方法.共振电离对元素的选择能力通常可达到 $10^{10} - 10^{18}$,最差的情况也可达到 10^4 .采用激光离子源,由于有Z选择,有效地消除了同量异位素干扰,可使在线同位素分离器对产额稀少的同位素的检测灵敏度提高四个量级以上.

激光离子源通常和氦喷嘴(He-Jet)技术相联系.在核反应的靶室中充一定气压的氦气,核反应产物反冲进入氦气中,然后在氦气中热化,并中性化,再通过毛细管将含有核反应产物的原子的氦气传输相当距离,到达离子源区与激光作用产生共振电离,用适当的电场将共振电离的离子引出,注入到在线同位素分离器中.目前提出的激光离子源大体上有三种方案.第一种方案是苏联的V. S. Letokhov^[2]提出的.利用氦气将靶室

* 国家自然科学基金资助.

的放射性核引入一小加热腔内, 激光通过热腔使其中感兴趣的原子电离, 然后加一定电场, 使电离的离子引出, 再注入 ISOL. 第二种方案是 W. M. Fairbank 和 J. K. P. Lee 提出的^[3,6]. 将氦喷嘴引出的束流或将常规 ISOL 引出的离子束流, 喷射到一附着在转轮上的薄膜上, 当转轮转到另一位置时先用一束激光使沉积的放射性产物蒸发, 然后再用激光共振电离选择所需要的元素. 第三种方案是本合作组在 1989 年提出的^[4]. 用多束激光在氦喷嘴出口处直接与喷束作用, 选择所需要的元素共振电离, 然后将离子引出注入到 ISOL 中. 与前两个方案比较, 我们提出的方案有以下优点:

1. 离子源总效率高. 若利用高重复频率激光, 电离效率(定义为电离产生的某种元素的离子数与氦喷嘴出口处携带的该元素的原子数之比)可达 20% 以上. 与较高的氦喷嘴传输效率相结合, 可达到相当高的离子源总效率($10^{-1} \sim 10^{-2}$). 第一方案也有较高的效率. 第二方案的效率较低($\sim 10^{-4}$).

2. 可测量同位素寿命的下限较低(ms 量级).

3. 可适用于高温难熔元素.

4. 装置比较简单.

当然, 这一方案也有缺点: 为了提高电离效率, 必须用高重复频率激光, 而目前可利用的高重复频率激光的波长覆盖范围不够广, 因此可研究的元素受到一定限制.

80 年代中, Argonne 一个小组用氦喷嘴系统传输串列加速器束流引发的核反应产生的 ^{126}Ba 原子, 以及直接将加速器加速的 Na 离子束停止在氦气中形成的 Na 原子, 并在氦喷嘴出口处用激光诱导荧光观测 Ba 原子和 Na 原子^[5]. 他们的实验未观察到 Ba 原子和 Na 原子的荧光信号, 因此宣告停止该项实验. 由于 Argonne 小组的失败, 近十年来, 各国物理学家在设计激光离子源时, 都不再考虑在氦喷嘴出口处直接电离的方案.

Argonne 小组分析他们失败的原因, 认为主要是反应产物原子和氦气中的杂质原子(主要是氧原子)发生了化学反应. 我们分析, 除此之外, 若在氦喷嘴出口形成超声喷流, 会使待测原子与其他原子结合成原子团(cluster), 也会造成在出口处看不到单个原子的信号. 为此, 在我们的设计中采取了以下措施: ① 调节喷流速度, 使不形成超声喷流; ② 减少氦气管道及真空系统中的杂质气体; ③ 必要时在氦喷嘴出口附近用红外激光(例如 CO_2 激光)加热氦气便形不成原子团.

在研制用于加速器上在线运行的 He-Jet 激光离子源之前, 我们设计了离线实验系统(THLITF), 它包括氦喷嘴系统、真空系统、原子化室、电离室、飞行时间谱仪(TOF)、电子枪、激光系统、数据获取与自动控制系统(见图 1). 激光系统由一台声光调 Q 的二倍频 YAG 激光器泵浦两台染料激光器构成, 电子枪装在真空室内, 电子束方向与氦喷束方向成 180° ; 电子束电离和激光电离可以很快地切换, 也可联合使用. 数据获取系统以中国科技大学生产的 F903 型快速瞬态记录仪为基础, 与微机联结构成.

该系统于 1993 年初安装完毕, 经调试电离室的静态真空度达到 10^{-5}mmHg , 飞行管道中达到 10^{-6}mmHg , 在 Skimmer 之前我们未用大抽速的罗茨泵而用一台 30L/s 的机械泵代替. 我们比较系统地研究了进气量与各级真空度的关系, 在氦气流速小于 10mL/s 的情况下, 可保证电离室的真空度达到 10^{-5}mmHg , 飞行管的真空度保持在 10^{-6}mmHg , 能满足实验要求. 在研究了氦气流速和真空度关系的基础上, 我们用电子

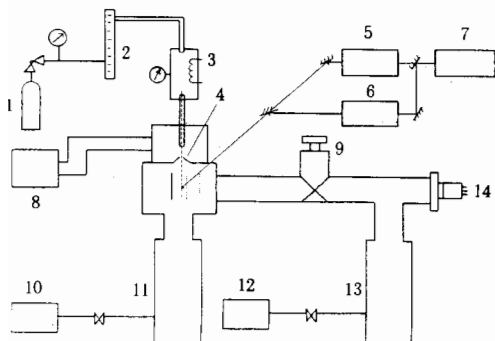


图1 在清华大学建立的激光离子源离子系统(THLITF)示意图

- 1 He气瓶; 2 流量计; 3 原子化室; 4 Skimmer;
5,6 染料激光器; 7 YAG激光器; 8 机械泵(30L/S);
9 闸板阀; 10 机械泵(4L/S); 11,13 分子泵;
12 机械泵(8L/S); 14 离子探测器。

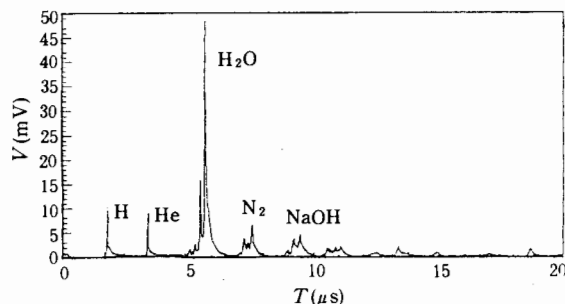


图2 当水蒸汽浓度高时,在TOF的质谱图上可观察到很强的 $(\text{H}_2\text{O})^+$ 峰,同时在 $m=40$ 处出现较强的峰,此峰为 $(\text{NaOH})^+$ 峰

V : 幅度; T : 飞行时间。

枪电离残余气体和电离氦气携带的 Hg 蒸汽标定了 TOF 的分辨率,对 Hg 同位素,质量分辨率可达到 230,达到了设计指标。

近几个月,我们研究了氦喷嘴系统对 Na 蒸汽传输情况,以及在氦喷嘴出口处的直接电离。在原子化室内的石墨钳锅内加入少量金属钠,加热使 Na 蒸发,用氦气将 Na 蒸汽传输到氦喷嘴出口处,传输距离约为 25cm,开始阶段在出口处用电子枪电离,未观察到 Na^+ 的信号。但我们观察到两个现象,一是该系统的 $(\text{H}_2\text{O})^+$ 对应质量峰特别高,另一现象是在 $m=40$ 处有一较明显的峰(见图 2),而且此峰随加热 Na 的温度变化。从这两个现象我们得出结论:系统内水蒸汽浓度太高,原子 Na 与 H_2O 反应产生 NaOH 分子,因此看不到 Na^+ 信号而在 $m=40$ 附近出现了 $(\text{NaOH})^+$ 的信号。我们采取措施,使水蒸汽浓度降低了将近一个量级,并适当地降低电子束的能量,使其不能电离大多数残余气体分子,这样就观察到了很强的 Na^+ 峰(见图 3)。用电子束电离观察到 Na^+ 信号,说明氦气确实能传输单原子 Na。当然由于电子束能量较高($>10\text{eV}$)也有可能是由于电子束将原子团或化合物分子打碎后产生的 Na^+ 。为此,我们进一步在氦喷嘴出口处进行激光共振电离实验。用两台染料激光器,输出的波长分别为 589.0 nm 和

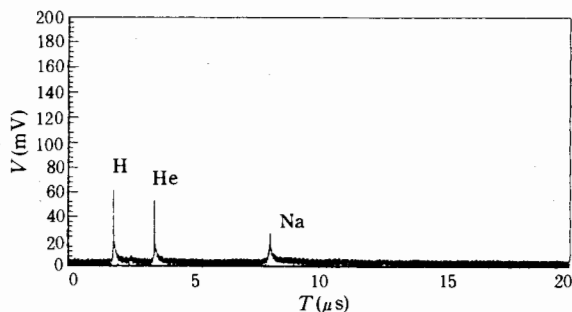


图3 降低水蒸汽浓度后,用电子枪电离观察到很强的 Na^+ 峰

616.0nm,分别将 Na 原子从基态激发到第一激发态(2P态)和 2P 态激发到了 3S 态。然后两束激光之任一束都可将 Na 原子从 3S 态电离。当两束激光都调谐到共振波长时,在飞行时间谱上出现了比电子枪电离强 10 倍以上的 Na^+ 峰(见图 4)。两束激光联合起来电离,每个脉冲也只有 0.1mJ,由此推算电离几率只有 0.1% 左右。因此可以肯定,氦喷嘴出口处

Na 原子的浓度是相当高的, 但目前的实验还不能对传输效率和电离效率做定量的计算, 定量研究目前正在着手准备.

我们的实验结果证明氦喷嘴系统能有效地携带热化在氦气中的 Na 原子. 还证明了在氦喷嘴出口处直接用激光共振电离感兴趣的原子是一种既简单又十分有效的方法. 我们提出的氦喷嘴激光离子源的方案是可行的.

目前, 我们正在准备按离线系统的实验的结果, 在中科院近代物所的重离子加速器上研制实际使用的激光离子源, 有关的设计、安装工作已经开始.

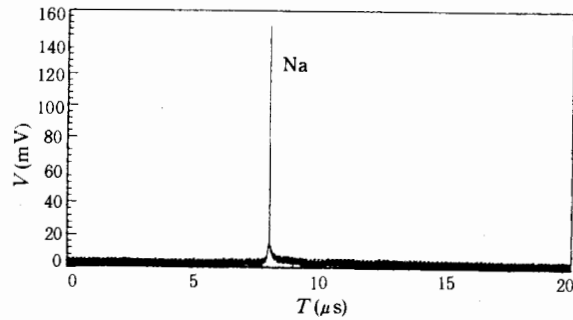


图 4 用两束激光共振电离观察到的 Na⁺ 峰, 此峰幅度较电子枪电离峰幅度高一个量级以上

参 考 文 献

- [1] J. Barker et al., CERN/ISC 93-10 ISC/IP47.
- [2] V. S. Letohhov, Proposal for ISOLDE-CERN, ZZNAL 1984.
- [3] J. K. P. Lee, *Nucl. Instr. Meth.*, **B26** (1987) 444.
- [4] Shang Ren Cheng, An Invited talk to the Int. Symp. on Heavy Ion Phys and Appl. Oct. 1990, Lanzhou.
- [5] C. N. Davids et al., ANL85-22.
- [6] W. M. Fairbank Jr. *Nucl. Instr. Meth.*, **B26** (1987) 357.

Experimental Results of the Off-Line System of He-Jet Laser Ion Source

Xu Sida Shang Rencheng Zhang Shuming Ye Zipiao Zhang Wei

(Department of physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Zhao Zhizheng Luo Yixiao

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

Received 17 November 1994

Abstract

The off-line system of He-jet laser ion source at Tsinghua University was tested and described briefly. Experimental results of direct resonant ionization of Na atoms at the outlet of He-jet of the system by laser were reported. The results show that in-beam ionization of Na atoms at the outlet of the He-jet is practicable. A laser ion source based on such design will possess good Z selectivity, high efficiency, short delay time, and applicability to refractory elements.

Key words ion source, He-jet, laser resonant ionization.