

毛细管式的靶-离子源系统在线实验研究*

赵之正 杨永峰 王同庆 郭应祥 郭斌 范红梅
祖凯玲 王旭东 郑兆妙 刘军辉 雷祥国

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 讨论了在线同位素分离器使用激光离子源的必要性,分析研究了毛细管式激光离子源对电离器的要求及热毛细管电离器的工作原理,并给出了在线实验的结果.为了在较低温度下形成等离子体鞘势和降低热电离效率,采用了低电子逸出功的耐高温材料 Nb 作毛细管材料.在线实验获得成功,使用毛细管式的靶-离子源的在线同位素分离器的总效率约达 0.2%,满足了激光离子源电离器和靶室的工作要求.

关键词 毛细管电离器 激光离子源 在线同位素分离器 分离效率

1 引言

在线同位素分离器在使用了激光离子源后不仅具有高的电离效率,而且还具有了新的特性——好的元素选择性.使得它在用于新核素研究时具有更高的灵敏度.例如西欧中心(CERN)的在线同位素分离器使用了激光离子源以后,排除了其它元素的干扰,因此可以使用高效率中子探测器,在 600MeV 质子轰击 U 靶的裂变产物中分离指定了 $^{125-129}\text{Ag}$ 的 5 个 β 缓发中子新核素^[1],得到了它们的半衰期和中子发射的分支比.这个结果比在 GSI 同时期进行的相对论能量的 U 炮弹和碎片分离器在裂变区鉴别出的 Ag 的丰中子同位素 $^{125,126}\text{Ag}$ ^[2]还多了 3 个同位素.这个结果初步显示了由质量分离和元素分离组成的完全分离方法的优越性.我们认为在线同位素分离器加激光离子源的分离系统比二次束装置具有产额大和更适于半衰期长于 1s 的同位素衰变测量的优点.这个特点使得它在 $A < 170$ 丰中子核区合成新核素的衰变测量中具有更大的优势^[3].

CERN 使用的毛细管式的激光电离器是具有优良特性的激光离子源^[4],它是目前研究的 3 种形式激光离子源中电离效率最高的一种.虽然它仍然需要依靠高温靶和靶室使核反应产物脱离靶子,而不适用于高温难熔元素的分离,但是在 $A > 170$ 丰中子核区包括了 20 多个元素,其实高温难熔元素只有 Hf, Ta, W, Re, Os, Ir 和 Pt 等 7 个元素,大部分仍然

2000-12-07 收稿

* 国家重点基础研究发展规划(G2000077400),国家自然科学基金(19875067)和中国科学院九五重大项目资助

是可挥发元素,在线同位素分离器仍然用途广泛。

热毛细管式的激光离子源^[4]是在毛细管式的电离器基础上发展的,它比较好地解决了脉冲激光束对高速热运动的原子的时间和空间高度覆盖问题,因此具有较高效率和好的元素选择性。为了使 $A > 170$ 丰中子核区的新核素和衰变研究深入一步,我们为此研制了普通热毛细管式的离子源以及与中能核反应相配合的热靶靶室,并对核反应产物在靶中的受热释放行为进行了研究。在这个基础上本工作做了在线实验,目的是用于检验毛细管电离器和靶室的性能。

2 热毛细管电离器和热靶靶室原理

根据激光离子源的设计,3 个不同波长的激光束应当聚焦成 1—2mm 直径的束斑并同时作用于原子流,才可能使激光多步共振电离达到高效率(即电离效率接近于 1 的饱和电离)。使用加热的靶管使原子受热扩散到这个金属毛细管内,聚焦的激光束通过毛细管将能实现高效率的激光电离。当然还要求毛细管内有尽可能低的非激光电离的电离效率和尽可能高的离子引出效率。

从前人的结果^[5,6]可知,热毛细管电离器的电离原理可以包括两部分,即热电离和表面电离。在热毛细管内运动的原子服从麦克斯威尔分布,例如在 2000℃ 时均方根速度的原子能量大约为 0.3eV ^[5]。在毛细管内的原子受到金属表面发射的热电子的多次碰撞将产生电离,这是热电离。热电离的电离度可以表示为

$$\gamma = \frac{2\sigma_i}{\sigma_0} \cdot \frac{1}{n_e + n_i + n_0} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^3} \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right), \quad (1)$$

其中 σ_i 与 σ_0 是离子和原子的统计权重。 h 是普朗克常数。 m_e 是电子静止质量。 k 是波尔兹曼常数。 T 是等离子体温度, W_a 是被电离元素的电离电位,对 Yb 元素为 6.3eV。 n_e 是等离子体内电子密度。 n_i 是等离子体内离子密度。 n_0 为等离子体内原子密度。热电离效率为

$$\epsilon_\gamma = \sqrt{\frac{\gamma}{1 + \gamma}}, \quad (2)$$

只有当温度非常高时热电离效率才高,反之除了碱金属外的其它元素热电离效率并不高。表面电离原理是:中性原子受热在高温的金属表面飞出时,一部分就是离子,这种电离机制称作表面电离。根据等离子体物理的理论,表面电离的电离度为

$$\alpha = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right) \exp\left[\frac{\Phi - W_a}{kT}\right], \quad (3)$$

Φ 为是电子逸出功。电离效率为

$$\epsilon_a = \frac{\alpha}{1 + \alpha}. \quad (4)$$

如(3)式所示,如果被电离元素的电离电位低于电离器的电子逸出功,电离效率将非常大,不能使用该公式,如碱金属元素表面电离效率会非常高。据(1)—(4)式在 2000—3000K 范围内热电离是主要的,如在 2300K 时 Ta($\Phi = 4.15\text{eV}$)表面对 Yb($W_a = 6.3\text{eV}$)元素的表面

电离效率为 2.4×10^{-5} , 而热电离效率是 $4.1 \times 10^{-3[5]}$.

根据上述原理, 只有采用低的毛细管工作温度才可以降低热电离和表面电离效率(碱金属元素除外). 同时采用低电子逸出功材料也会降低表面电离效率.

毛细管内的离子同样具有热运动, 并不断碰撞毛细管壁, 但是由于热电子的发射, 在毛细管内壁附近具有等离子体鞘势, 排斥正离子, 结果使离子不被中和. 等离子体鞘势 U_p 为

$$U_p = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_c}{n_0},$$

e 为电子电荷. 对圆柱形的等离子体鞘势可表示为^[7]

$$U_p = kT \cdot \ln \frac{A_0 T^2}{en_i \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_e}}},$$

其中 n_i 为

$$n_i = \frac{2I_0}{eS} \sqrt{\frac{m}{kT}}, \quad (7)$$

$A_0 = 120 \text{atmos/cm}^2$. m 为离子质量. I_0 为总的引出离子流, S 为引出孔面积. 公式(6)表明只要具有一定温度, 等离子体鞘势将具有一定高度. 当材料的电子逸出功低时, 等离子体鞘势增高, 所以从离子引出效率考虑希望维持一定高的毛细管工作温度和使用电子逸出功低的材料. 据我们以前的实验结果, 对低电子逸出功材料 Nb 毛细管在 2000K 以上离子引出效率达到饱和. 所以毛细管工作温度应在 2000K 以上.

综合上述, 在耐高温材料中 Ta ($\Phi = 4.15 \text{eV}$) 和 Nb ($\Phi = 3.65 \text{eV}$) 中, 采用 Nb 作毛细管材料除了具有电离效率较低外, 在相同温度下还具有较高等离子体鞘势, 因而离子引出效率也高.

作为厚靶核反应产物原子受热从靶中扩散到真空. 具有两个过程, 即从靶材料内部到材料表面和脱离靶材料表面扩散到真空. 我们以前的另一个实验结果^[8] 给出了不同温度对稀土元素 Lu, Yb, Tm 等的释放速度, 得到了不同元素的靶室工作温度, 同时计算出了靶室效率. 原子扩散到热毛细管直到被电离以前的运动中, 中性原子多次碰撞靶室和毛细管壁, 在这个过程中必须考虑中性原子在靶室和毛细管壁表面的吸附与释放. 高温将有利于减少平均表面吸附时间, 使用低吸附热材料也可以在相同温度下减少平均表面吸附时间, 也就是说增加了原子在空间浮动的时间. 据文献[6]可知, 在耐高温材料中 Ta 和 Nb 具有低的表面吸附热, 适合作毛细管和靶室材料. 综合上述多种原因, 我们选 Nb 作毛细管材料, Ta 作靶室材料, 确定了靶室和毛细管的工作温度范围.

在线同位素分离器的总分离效率为

$$\epsilon = \epsilon_s \epsilon_i \epsilon_c, \quad (8)$$

式中 ϵ_s 为离子输运效率, ϵ_i 为靶离子源效率, ϵ_c 为离子收集效率. 在真空度好于 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 的条件下, 由离子轨道计算^[8] 以及根据质量分辨率和狭缝宽度估计可知离子的输运效率应好于 0.99. 本实验进行之前调整分离器的质量分辨率达到 400 (此时狭缝宽度为 1.5mm), 使用时狭缝宽度为 3mm, 离子流在收集带上的光斑为 $5 \text{mm} \times 6 \text{mm}$ 的椭圆, 并且位

于收集带的中部,收集带宽为 12.5mm. 据其他人经验,只要离子流光斑能全部打在收集带上,收集效率能达到 0.95 以上. 靶离子源效率为

$$\varepsilon_i = \varepsilon_d \varepsilon_e \varepsilon_b (1 - \eta), \quad (9)$$

式中 ε_b 为靶效率,指核反应产物从靶上扩散到真空室的份数,它受靶室温度、靶及被分离原子的性质和同位素的半衰期影响,靶室效率可由靶室温度和核半衰期按照文献[8]给出的扩散常数与公式计算,计算结果见表 1. 从表 1 中可知,靶室温度从 2130K 降为 2000K,靶效率(对 ^{167}Yb)从 0.86 降低为 0.61. ε_d 为电离效率. ε_e 为离子引出效率,如果毛细管内电子密度足够高将产生足够高的等离子体鞘势阻止离子碰壁,从而达到足够大的离子引出效率. 从毛细管激光电离器的实验结果^[9]看,当 Nb 的毛细管温度在 2000K 以上时引出效率达到饱和值,可以判断引出效率是十分高的. η 为原子在靶-离子源系统的泄漏率,由于靶室存在较大的泄漏通道,如毛细管后端是为了调整激光留的孔,有证据^[10]表明这个孔可能使总效率减少到 1/3,即 $\eta \approx 0.7$.

表 1 核反应产物从靶中靶释放效率 ε_b 估算结果^{*}

同位素	靶室温度(K)	靶效率(%)	同位素	靶室温度(K)	靶效率(%)
^{167}Yb ($T_{1/2} = 17.5\text{min}$)	2130	0.86	^{167}Lu ($T_{1/2} = 52\text{min}$)	2130	0.63
	2000	0.61		2000	0.28

* 按文献[8]的公式和常数计算.

总之,在线同位素分离器的总分离效率主要由靶效率和电离效率以及泄漏率决定.

3 结构

采用 Nb 毛细管作为电离器,其外径 2.2mm,内径 1.7mm,靶室壁到毛细管的引出孔长度为 3.0cm. 两端接 Ta 导流片,引入直流电流加热毛细管,同时在毛细管上产生的电位能使正离子漂移到引出孔. 毛细管的一端为离子的引出孔,而另一端插入热靶靶室. 为了便于以后激光的调整,毛细管还延长穿出了靶室,其总长度为 5.5cm. 从靶中热扩散出来的核反应产物原子从毛细管的缺口进入毛细管. 加热毛细管电流为直流 50—130A,产生的温度在 1800—2700K 之间,毛细管产生的电压为 3—5V. 适当的毛细管电流引出电极的形状能使毛细管的温度不均匀性小于 100K. 靶室的结构图如图 1 所示. 靶管由 0.1mm 厚的 Ta 片制成. 靶管外面包裹着约 30 层 $6\mu\text{m}$ 厚的 Ta 箔,作为热屏蔽,Ta 箔反射能使靶室达到高温,使用 Mo 制接头引出入电流,靶室两端封有两个 Ta 薄窗($6\mu\text{m}$ 厚,两窗距离 1cm),以便炮弹穿过窗打到靶上,而核反应产生的同位素核不从靶室的两端泄漏(见图 1),其主要部分扩散入热毛细管内. 使用交流电加热,光学高温计测量了靶室各点的温度,同时发现靶室外的靶管侧壁温度最高,而薄窗处温度最低. 将薄窗的温度看作靶室温度时,最高靶室温度为 2200K,电流约 300A,靶管的最高温度达到 2800K,再高的温度将很快破坏靶室.

核反应产物通过加热扩散到真空室,这些原子在克服了表面吸附之后,到达毛细管. 在这个热毛细管内,热电离与表面电离产生的离子导入分离器,经过磁铁分离后,到达带传输系统,被收集.

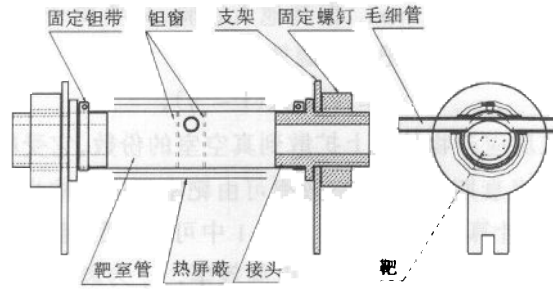
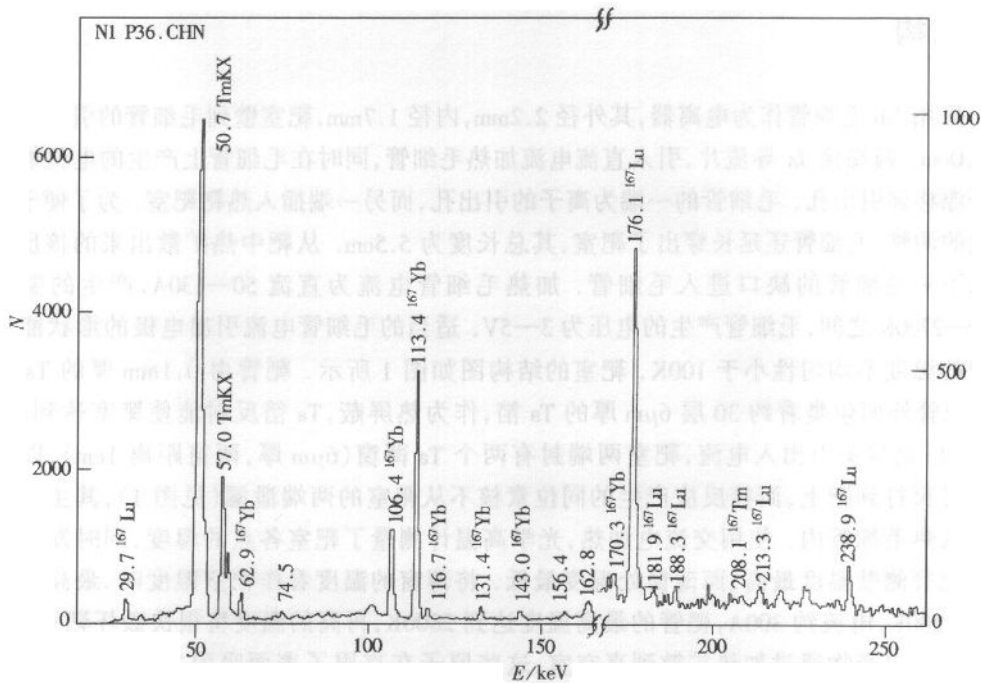


图 1 电离器和靶室结构

4 在线实验检验及结果

选用 $60\text{MeV/u } ^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta} \rightarrow ^{167}\text{Yb}$ 反应, 在兰州重离子加速器和在线同位素分离器^[1]上进行了在线实验. 靶厚为 500mg/cm^2 . 靶子由 50 片 $6\mu\text{m}$ 厚 Ta 箔组成, 总厚度为 500mg/cm^2 . 实验的目标核为 ^{167}Yb ($T_{1/2} = 17.5\text{min}$). 产物离子经同位素分离器分离后收集在带传输系统的收集带上, 并移至 Hp Ge γ 探测器前并测量其 γ 谱及其时间序列谱. 对不同的靶室和毛细管温度下的产物进行了 γ 谱测量. 每次的收集时间为 40min, 然后分 4 次测量, 每次 10min. 图 2 给出在束流收集站的探测器第 4 个 10min 的 γ 谱. 由系列 γ 谱中的 γ 能量、分支比和半衰期指定了 ^{167}Yb ($T_{1/2} = 17.5\text{min}$), ^{167}Lu ($T_{1/2} = 51.5\text{min}$), ^{167}Tm ($T_{1/2} =$

图 2 ^{167}Yb 的 γ 谱(测量 10min)

9.25d)等同位素,其中 ^{167}Yb 的 113keV(0.554),106keV(0.226)和 176keV(0.21)是全谱中最强的.以 113keV 峰下面积和探测器效率、束流强度、产生截面、靶厚度、半衰期及 γ 强度的分支比计算出总的 ^{167}Yb 产额,结果见表 2,其中 ^{167}Yb 的产生截面由程序 LISE 得到,为 9mb.

表 2 实验结果

谱号	靶室温度(K)	电离器温度(K)	113keV 计数	^{167}Yb 的分离总效率(%)
36	2130	2130	7032	0.20
40	2130	2030	5770	0.16
44	2000	2030	1245	0.035

5 结果与分析

由表 2 的 3 个结果谱比较可以看到,电离器温度从 2130K 降低到 2030K,引起总分离效率降低 20%.靶室温度从 2130K 降低到 2000K 时,总分离效率降为 0.035%.最高总分离效率为 0.2%.

考虑到在靶室温度 2130K 和毛细管温度 2130K 时,此时离子引出效率接近 100%⁹⁾,靶室效率为 0.86%,泄漏率约 0.7,离子传输效率根据质量分辨率估计为 0.8,收集效率为 0.9,总分离效率为 0.2%,结果得到该离子源的电离效率约 1%.

6 结论

目前的靶离子源整体可以正常工作,即可以使厚靶中的核反应产物扩散到真空室,并且做到质量分离,有低的热电离效率,所以能够满足激光离子源电离器所需的低的非激光电离效率和高的离子引出效率的要求.

参考文献 (References)

- 1 Fedoseyev V N, Jading Y, Jansson O C et al. *Z. Phys.*, 1995, **A353**:9—11
- 2 Bernas M, Armbruster P, Czajkowski S et al. *Nucl. Phys.*, 1997, **A616**:352c—362c
- 3 ZHAO Zhi-Zheng. *Nucl. Phys. Rev.*, 1998, **15**(1):10—14 (in Chinese)
(赵之正. 原子核物理评论, 1998, **15**(1):10—14)
- 4 Mishin V I, Fedoseyev V N, Kluge H-J et al. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1993, **B73**:550—560
- 5 Kirchner R. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1981, **168**:275—293
- 6 Kirchner R. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1987, **B26**:204—212
- 7 Lettry J, Catherall R, Focker G J et al. *Rev. Sci. Instr.*, 1998, **69**:761—763
- 8 ZHENG Zhao-Miao, ZHAO Zhi-Zheng, YANG Yong-Feng et al. *Nucl. Tech.*, 1999, **22**(1):37—41 (in Chinese)
(郑兆妙, 赵之正, 杨永峰等. 核技术, 1999, **22**(1):37—41)
- 9 ZHAO Zhi-Zheng, YANG Yong-Feng, ZHENG Zhao-Miao et al. *HEP & NP*, 1998, **22**(9):844—852 (in Chinese)
(赵之正, 杨永峰, 郑兆妙等. 高能物理与核物理, 1998, **22**(9):844—852)
- 10 Mising V I. Private Communication. 1991
- 11 HUANG Ye-Cheng, WANG Tong-Qing, TAN Jin-Feng et al. *HNP & NP*, 1990, **14**(1):70—75 (in Chinese)
(黄业成, 王同庆, 谈锦封等. 高能物理与核物理, 1990, **14**(1):70—75)

Research of the Capillary Target-Ion Source System in On-Line Experiment*

ZHAO Zhi-Zheng YANG Yong-Feng WANG Tong-Qing GUO Ying-Xiang GUO Bin
FAN Hong-Mei ZU Kai-Ling WANG Xu-Dong ZHENG Zhao-Miao
LIU Jun-Hui LEI Xiang-Guo

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

Abstract In order to study new isotopes and nuclear decay properties in the $A > 170$ mass region, the laser ion source is needed and developed. For on-line isotope separator, it is required that the capillary ionization has a speciality of low hot ionization efficiency and high ion extraction efficiency. The principle of the hot capillary ionization was described. The employment of Nb capillary reduces the temperature for forming the plasma potential and inhibitory hot ionization. The ionization tube is made of a Nb capillary of 2.2mm outside diameter, 1.7mm inside diameter and 30mm effective length. The temperature is 1600—2500K when the current is 40—100A. The target chamber is structured by Ta tube of 0.1mm wall thickness and windows of $6\mu\text{m}$ Ta foil at two ends. Its maximum temperature is 2200K with the current 300A. The test experiment with on-line conditions at isotope separator ISOLAND has been performed. ^{167}Yb ($T_{1/2} = 17.5\text{min}$) isotope was produced in nuclear reaction $^{18}\text{O} (50\text{MeV/u}) + {}^m\text{Ta} \rightarrow {}^{167}\text{Yb}$. In the condition of target chamber temperature 2130K and capillary temperature 2130K, the total efficiency is 0.2%. This target-ion source system will be satisfied in laser ion source.

Key words ion source, capillary ionization, on-line isotope separator, separation efficiency

Received 7 December 2000

* Supported by Major State Basic Research Development Program Under Contract Number (G2000077400) and NSFC (19875067) and Major Subject of The Chinese Academy of Sciences