

激光离子源的首次在线实验结果*

杨永峰 赵之正 郑兆妙 祖凯玲 王旭东 刘军辉 赵晓岩
王同庆 郭应祥 郭斌 雷相国 靳根明 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

尚仁成 徐四大

(清华大学现代物理系 北京 100084)

李克平

(McGill 大学物理系 加拿大)

摘要 介绍了在线同位素分离器使用激光离子源的重要性、激光离子源原理和相关激光技术,以及热毛细管激光离子源和靶室的结构.在首次在线实验中使用 $50\text{MeV/u } ^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta} \rightarrow ^{167}\text{Yb}$ ($T_{1/2} = 17.5\text{m}$) 反应道,实现了加速器、分离器和激光系统的联合运行.通过测量分离后产物的 γ 谱,确定了分离后的 ^{167}Yb 的产额,并与从产生截面、束流强度、收集时间和靶厚度计算得到的产生率相比,得到总分离效率约为 0.2%.通过有激光与无激光条件下测量的 γ 谱中 ^{167}Yb 与 ^{167}Lu 相应峰下面积比值 K 得到元素选择性 η 为 3.2.发现了新的 ^{167}Yb 的长寿命高自旋的同质异能态,分析了提高效率的途径.

关键词 激光离子源 在线同位素分离器 元素选择性 同质异能态

1 引言

使用了激光离子源的在线同位素分离器不仅具有高的电离效率,而且具有好的元素选择性^[1,2].这使得在线同位素分离器有了新的特点,在用于发现新核素时将具有很高灵敏度.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测量长于 1s 半衰期的同位素衰变特性,这个特点使得它在 $A > 170$ 丰中子核区合成新核素以及衰变测量中具有比二次束流装置更大的优势^[3].

欧洲粒子物理研究所(CERN)使用毛细管式电离器的激光离子源具有高电离效率^[2].它比较好地解决了激光束与原子束作用的时间和空间高效率覆盖问题,具有低的非激光

2001-02-28 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共同资助

电离效率(碱金属除外)和高的离子引出效率,因此得到了较高的分离效率(如 $> 10\%$)和好的元素选择性(在线工作时通常为 10)^[2].

为了实现 $A > 170$ 丰中子区核素的高灵敏度的分离与测量,我们几年前就开始了热毛细管式的激光离子源研究. 设计了毛细管式的电离器与中能重离子炮弹使用的厚靶靶室相结合的靶-离子源系统^[4],并且对毛细管材料和核反应产物从靶中扩散出来的速度及效率进行了研究^[5]. 利用激光束的长距离传输、聚焦与合成系统,将多束激光聚焦并合成在在线同位素分离器的离子源处,在在线同位素分离器上进行了一系列离线实验. 在以上工作的基础上进行了首次在线实验,本文将对首次在线实验的结果予以介绍.

2 激光离子源的原理

采用激光多步共振电离产生的离子束具有十分优良的元素选择性. 在激光功率密度足够大时有很高的电离效率. 根据目前激光器的技术,只有选用窄脉冲的脉冲激光器,并且把激光束聚焦到几个 mm^2 的截面积,才能达到饱和电离所需要的功率密度. 把原子束束缚在截面为几个 mm^2 的毛细管内,再用激光照射能够实现激光束和原子束高度的空间覆盖率. 在原子处于高温下的热运动状态时,只有采用高重复频率(约几十 kHz)的脉冲激光,才能达到激光对每一个原子都具有高度的时间与空间的覆盖率. 所以我们选择高重复频率的泵浦激光器——铜蒸气激光器,经过染料激光器后可得到波长可变的激光束,再经过聚焦和合成使激光束在热毛细管内同原子作用,从而得到高电离效率^[6].

为了将原子束缚在毛细管内,使原子有更长的时间在毛细管内的空间运动,而不是长时间地吸附在壁上,毛细管必须处于高温,并且采用低表面吸附热材料(如 Ta 或 Nb). 用低电子逸出功材料 Nb 作毛细管材料,可以在低温度下形成等离子体鞘势^[6],该鞘势将阻止电离后的离子和毛细管壁相碰,从而降低离子因碰壁中和的几率. 所以高温金属毛细管内表面的等离子体鞘势可提高离子引出效率. 由于加在毛细管上的直流电位使离子在毛细管中沿引出电场方向移动,所以热毛细管电离器能解决激光与原子作用的高电离效率问题,也能解决离子高效率引出问题^[6].

3 激光设备与相关技术及靶室

实验中用激光多步共振电离使中性 Yb 原子在毛细管内被电离. 激光使原子共振激发电离的路线图见文献[6]中图 2(a). 实验中使用的激光波长为 $\lambda_1 = 555.6\text{nm}$,采用重复频率为 10kHz ,用最大功率为 90W 的铜蒸气激光器作为泵浦激光器. 它的输出光分为两路,泵浦染料激光器得到两路可调谐波长的激光. 由于 Yb 的自电离态能级较宽,实验中第二步与第三步的激光波长相同($\lambda_2 = \lambda_3 = 581.0\text{nm}$),两台染料激光器输出功率分别为 1W 和 3W . 用波长计和空心阴极灯校准和连续监测波长. 第一级激光谱线宽度为 7GHz ,第二和第三级激发的线宽为 24GHz . 激光脉冲宽度为 20ns . 激光器与激光束线路见图 1. 经过多个全反射镜和透镜组成的两组望远镜使两路激光传输、合成和聚焦在电离器毛细管内. 聚焦透镜到离子源的距离为 14m ,通过调整望远镜的两个透镜间的距离使激光聚

焦在毛细管的中段. 激光进入分离器磁铁前的真空室后, 经过一个放在离子流旁边的小反射镜使激光与离子流反向穿过分离器的离子引出电极(见图 1), 从毛细管前端进入毛细管电离器, 穿出毛细管后经玻璃窗穿出真空室. 这个小反射镜距分离器束流中心线 4cm, 从离子轨道计算和实践都可以证明它不阻挡离子流. 反射镜直径 3cm, 它使激光束与分离器引出电极所在的管道几何中心线的角度小于 1° . 激光传输总长度为 25m. 激光传输效率为 30%—40%. 二路激光的光程差小于 1m. 当激光通过 5.5cm 长, 内径 1.7mm 毛细管后, 呈现圆光斑时, 则认为激光束位置调整好了. 测量离子流随每一激光功率的变化证明, 上述激光能使 Yb 达到饱和激发与电离. 使用这样的激光设备和热毛细管电离器及内置稳定 Yb 元素的高温靶室, 在毛细管温度为 1700—2300K, 靶室温度足以使 Yb 蒸发时, 测量了离线情况下有激光与无激光时离子流强度之比, 得到元素选择性为 3000—20.

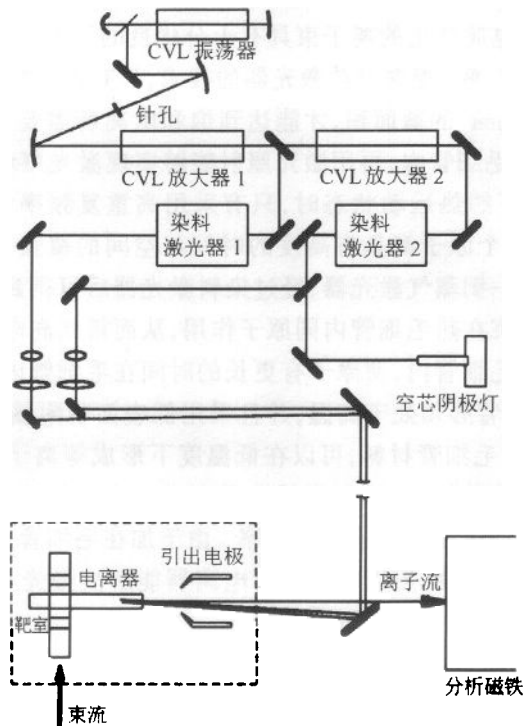


图 1 可调谐激光束传输路线图

靶室由 0.1mm 厚 Ta 片卷制成直径为 15mm 的管. 两端以 6μ 厚的 Ta 箔蒙在直径 15mm 的 Ta 圈上塞入靶管作为靶室端窗, 有效靶室长度为 1.5cm. 毛细管在靶室上部穿过, 在靶室内开口, 使靶室内的原子扩散到毛细管. 靶室使用交流电加热, 最高温度为 2200K^[4], 靶室结构见文献[4]. 根据预先进行的原子从靶中受热释放规律的研究^[5], 这样的温度足以使许多稀土元素从靶中扩散出来, 如 Lu, Yb, Tm 等元素. 毛细管使用直流电加热, 60A 能产生 2000K 高温, 两端电压 3V, 出口端为负, 离子在这个电场引导下漂移出毛细管.

在离子源安装到分离器后,调整了引出电极与引出孔的距离,在4cm时获得的离子流最大.调整了分离器的离子光学系统,在狭缝为1.5mm时得到的质量分辨率为400.使用稳定的Yb同位素,对在线同位素分离器的磁场进行了刻度.

4 在线实验

在兰州中能重离子加速器(HIRFL)和在线同位素分离器(ISOLAN)上完成了 $50\text{MeV/u } ^{18}\text{O} + \text{天然 Ta} \rightarrow ^{167}\text{Yb}$ ($T_{1/2} = 17.5\text{m}$)实验.在上述激光和电离器及靶室条件下,将分离器质量数对准167.收集40min,然后拉带使收集的源斑到达探测站,使用高纯Ge γ 探测器测量时间序列 γ 谱.在收集位置也放一个高纯Ge γ 探测器,每10min测量一个 γ 谱(见图2).

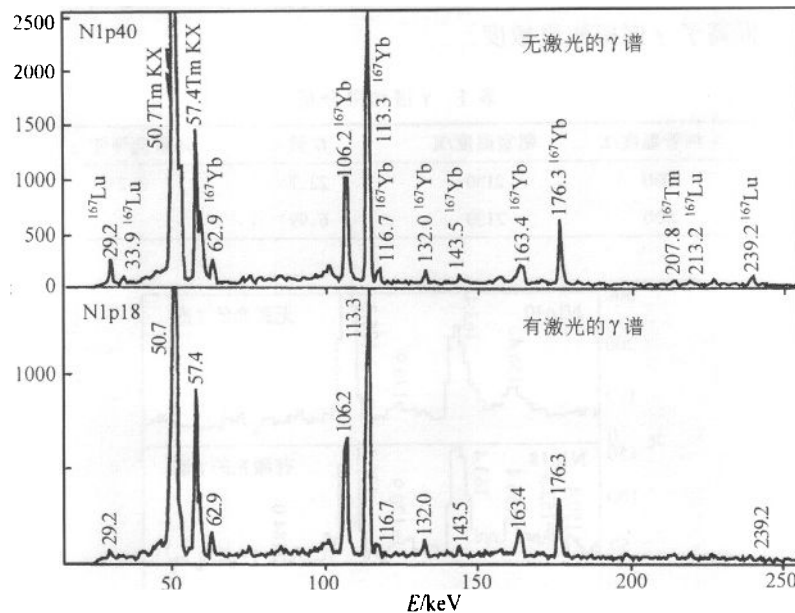


图2 在收集位置测量的第4个10min的 γ 谱

5 结果与分析

从时间序列谱中以 γ 能量、半衰期和分支比可以指定 ^{167}Lu , ^{167}Yb , ^{167}Tm 3个同位素的特征 γ 射线及作为 ^{167}Yb 衰变子体 ^{167}Tm 电子俘获产生的KX射线.它们是谱中最强峰,没有发现其它质量数的同位素的 γ 峰.

从 γ 谱峰下计数、探测效率、分支比及半衰期可以得到分离后 ^{167}Yb 同位素的产额.使用光学模型计算的 ^{167}Yb 的产生截面(9mb)、束流强度、靶厚度和照射时间也可得到 ^{167}Yb 产生率,从而获得了分离效率.选择不同条件下在收集位置探测的第4个10min谱作为比较谱.用 γ 谱中 ^{167}Yb 的最强峰(113.34keV,分支比55.5%)的峰下面积计算,得到本实验中

最好的有激光的分离效率约为 0.2%。以没有激光电离的 ^{167}Lu 的主要峰 29.66keV(分支比 14.4%)及 239.22keV(分支比 8.6%)峰为参考峰,求它们的峰下计数之和,定义 η 为元素选择性,

$$\eta = \frac{\text{有激光 } \gamma \text{ 谱的 } G}{\text{无激光 } \gamma \text{ 谱的 } G}, \quad (1)$$

$$\text{其中 } G = \frac{{}^{167}\text{Yb 的 113keV 峰下面积}}{{}^{167}\text{Lu 的 29.7keV 和 239keV 峰下面积之和}}, \quad (2)$$

结果见表 1. 其它条件相同时,有激光的 N1p18 号 γ 谱和无激光 N1p40 号 γ 谱的 G 相比,得到元素选择性 η 为 3.2. 同时从可以测量的最弱 γ 峰的能力比较可知,有激光的 N1p18 号 γ 谱中可以观测到分支比为 0.014% 的 184.01keV 的 γ 峰和分支比 0.037% 的 150.4keV 的 γ 峰(见图 3),而无激光的谱中由于本底高而观测不到它们. 这也说明了激光离子源有效地提高了 γ 谱探测灵敏度.

表 1 γ 谱结果分析

谱号	毛细管温度/K	靶室温度/K	G 值	元素选择性 η	备注
N1p18	2030	2130	22.7	3.2	有激光
N1p40	2030	2130	6.99		无激光

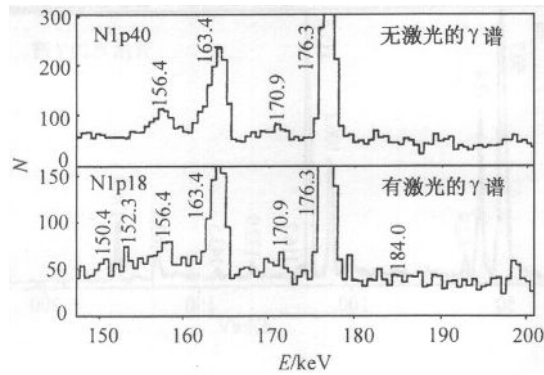


图 3 有激光与无激光 γ 谱的比较

本毛细管电离器和靶室有较大的泄漏孔存在,是造成总分离效率低的原因之一. 由于添加的稳定 Yb 元素没有蒸发完,所以有一个强的剩余 Yb 离子流存在(大于 $1\mu\text{A}$),它引起等离子体鞘势下降. 特别是激光电离时离子流更大,是无激光时的 η 倍,这个电流降低了等离子体鞘势,因而导致引出效率降低,是造成效率和元素选择性低的主要原因之一. 此外由于 ^{167}Yb 的基态具有超精细结构劈裂($\Delta\nu$ 为 5GHz)和同位素移动(频率与丰度最大的稳定同位素 ^{174}Yb 相差 3.5GHz),而第一级的激光线宽(7GHz)较窄,不足以覆盖全部劈裂成分,而 Yb 原子在这几个劈裂能级上都有分布,也是造成选择性低和分离效率低的另一个原因.

在有激光的 γ 谱中 163keV 峰的峰下面积与 ^{167}Yb 的主要峰 113keV 峰的峰下面积比

为0.13,在有激光的N1p18号谱与无激光时的N1p40号谱中,这个比值是相同的,考虑在线同位素分离对质量的分离效果,说明这个峰是属于 ^{167}Yb 的.从测量的时间序列谱的第一个谱中发现163keV峰比在收集站的第4个 γ 谱中要小很多,其后的谱中几乎看不到这个峰,这说明163keV峰的半衰期比 ^{167}Yb 的半衰期17.5min要短很多,估计为1—5min.又从核数据表查得, ^{167}Yb 及附近同位素都没有这个能量的 γ 跃迁.因此判断这个 γ 跃迁来自一个新的长寿命同质异能态.应当说明,在过去的实验中,除在束 γ 谱学实验外,所有衰变实验中的 ^{167}Yb 都是由质子和中子炮弹打重靶产生的,因此高自旋成分的产生截面很低.本实验采用的是重离子核反应,高自旋成分有高的产生截面.所以可以合理地假设这个跃迁是从高自旋长寿命同质异能态发射,不会同其它跃迁符合,从而可以理解在此以前此同质异能态一直没有被发现的原因.同时也说明这个新同质异能态是高自旋的.这个长寿命同质异能态的发现也体现了使用激光离子源的特色.

6 结论

本实验首次实现了激光系统、在线同位素分离器和加速器的联合运行.得到了 ^{167}Yb 的在线元素选择性为3.2.总分离效率约0.2%.在激光电离条件下, γ 谱的可探测灵敏度明显提高.通过有激光和无激光 γ 谱的比较,发现了 ^{167}Yb 新的长寿命同质异能态.今后将主要进行靶离子源系统结构的改进和染料激光器的改进,以进一步提高激光离子源的性能.

参考文献 (References)

- 1 Fedoseyev V N, Jading Y, Jansson O C et al. *Z. Phys.*, 1995, **A353**:9—11
- 2 Mishin V I, Fedoseyev V N, Kluge H J et al. *Nucl. Instr. And Meth.*, 1993, **B73**:550—560
- 3 ZHAO Zhi-Zheng. *Nucl. Phys. Rev.*, 1998, **15**:10—14(in Chinese)
(赵之正. 原子核物理评论,1998,15:10—14)
- 4 ZHAO Zhi-Zheng, YANG Yong-Feng, WANG Tong-Qing et al. *HEP & NP*. 2001, **25**(11):1106(in Chinese)
(赵之正,杨永峰,王同庆等. 高能物理与核物理,2001,25(11):1106)
- 5 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)
- 6 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)

Results of the First On-line Experiment of the Laser Ion Source*

YANG Yong-Feng ZHAO Zhi-Zheng ZHENG Zhao-Miao ZU Kai-Ling
WANG Xu-Dong LIU Jun-Hui ZHAO Xiao-Yan WANG Tong-Qing
GUO Ying-Xiang GUO Bin LEI Xiang-Guo JIN Gen-Ming LUO Yi-Xiao
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

SHANG Ren-Cheng XU Si-Da
(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

J. K. P. Lee
(Department of Physics, McGill University, Canada)

Abstract The importance of using a laser ion source in the on-line isotope separator, the principle of laser ion source, laser technique and the structure of hot capillary laser ion source and target chamber are introduced. A high repetition frequency copper vapor laser and three dye lasers were used. The capillary is made of Nb with inside diameter of 1.7mm and effective length of 3cm. It was heated by 50—100A direct current and temperature of 1800—2700K can be achieved. The nuclear reaction channel used in the first on-line experiment is $50\text{MeV/u } ^{18}\text{O} + ^m\text{Ta} \rightarrow ^{167}\text{Yb}$ ($T_{1/2} = 17.5\text{min}$). A joint operation of accelerator, on-line isotope separator and laser system has been realized. A total separation efficiency of 0.2% is obtained by comparison of the measured yield of ^{167}Yb with the calculated yield of ^{167}Yb by using production cross-section, beam intensity, collection time and the thickness of target. A element selectivity of 3.2 is deduced from the ratio of the corresponding peak areas of ^{167}Yb and ^{167}Lu in the γ spectra of laser on and laser off. A new high spin isomer with long half-life of ^{167}Yb was found. The methods that may be used to improve the efficiency of laser ion source are discussed.

Key words laser ion source, on-line isotope separator, element selectivity, isomer

Received 28 February 2001

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