

# 兰州在线同位素分离器激光离子源的研制

赵之正 罗亦孝 谈锦封 朱少飞

(中国科学院近代物理研究所 兰州 73000)

尚仁成 徐四大 代毅 张书明 李少甫 李彤

(清华大学近代物理系 北京 100084)

**摘要** 本文阐述了发展在线同位素分离器离子源的重要性,描述了激光离子源的优点、基本原理和研究现状. 报告了兰州在线同位素分离器使用的激光离子源研究的设想和进展.

**关键词** 激光离子源, 在线同位素分离器, 激光共振电离.

## 1 前言

自 60 年代以来,在线同位素分离器已获得重大进展,以它为主要研究设备的远离  $\beta$  稳定线核性质的研究已成为核物理实验研究中的主要科研方向之一. 随着技术的进步,各种类型的反冲质量谱仪有很大进展,其功能大有取代在线同位素分离器的势头. 但从目前看,只要对分离器的关键部分—靶离子源系统作重大改进,它就具有更为优良的特色,成为独特的不可取代的新技术<sup>[1,2]</sup>. 在线同位素分离器离子源的改进,实际上在远离  $\beta$  稳定线核素研究中起着关键作用,国际上各有关实验室对其都极为重视.

我们作了全面的调研分析后认为:目前广泛使用的是热靶电弧离子源系统,新型离子源的研制在两个方面的改进是最重大的. 一个是以气体传输系统代替加热蒸发使核反应产物挥发出来的办法,这能使高温难熔元素被电离并且具有快速、高效率的优点. 另一个是以激光共振电离取代电弧放电和表面电离,这使得离子源可能具有很好的元素选择性(或称  $Z$  分辨),并同时具有高电离效率、短的分选时间,也适用于高温难熔元素的电离. 因此,从原理上看气体传输方式与激光共振电离机制的结合,将能产生性能最优良的离子源.

目前国际上,He-jet 同电弧离子源(即

Bernas-Nier 源)<sup>[3]</sup>结合已成功地用于在线同位素分离器,使许多元素能获得高电离效率. 但是因为“冷斑”效应,仍不能解决高温难熔元素的分离. 表面电离源和电子回旋共振离子源(即 ECR 源)也实现了同气体传输系统的结合,使气体元素获得了很高的电离效率,但是也未能克服“冷斑”效应. 自 80 年代末以来,各实验室提出了许多同气体传输系统结合的激光离子源方案,近来在实验上已获得重大进展.

由于 HIRFL 加速器可以产生极广泛质量区的新核素,已为远离  $\beta$  稳定线核素研究创造了良好基础,同时我们已建成的在线同位素分离器具有良好的质量分辨率,因此我们于 1988 年提出研制激光离子源的建议,并同清华大学物理系及加拿大 McGill 大学的李克平教授合作,开展了激光核物理研究,在激光离子源研制方面获得了进展.

## 2 激光共振电离原理及影响电离效率和电荷分辨能力的因素

在线同位素分离器通常仅使用单电荷态离子,而不使用多电荷态离子. 激光产生离子的机制有激光溅射和共振电离两种. 前者需要强度较高的激光,可使任何固体表面的原子飞出并电离. 离子可以是多种电荷态,没有电荷选择性,所以在线同位素分离器激光离

子源都使用仅产生单电荷态的共振电离机制。

泵浦激光器产生的激光经过可调谐染料激光器后变成波长可以调整的激光。当激光的波长等于被激发原子能级差对应的波长时,将产生共振激发。如果将一个原子从基态激发到  $E_i$  能级,在它的能级寿命时间范围内,再来第二束激光就能将它激发到更高能级直至电离。这种电离方式称多步共振电离。到激发态的激发截面为  $10^{-11} \sim 10^{-14} \text{cm}^2$ ,从激发态到非共振电离态的截面为  $10^{-17} \sim 10^{-19} \text{cm}^2$ 。若存在自电离态,那么可激发到自电离态产生电离的截面为  $10^{-15} \text{cm}^2$  左右,还可以激发到比电离态低一些的里德堡态,然后经电场或连续红外激光电离。通常上述各种激发达到饱和所需能量密度:到激发态的光强度为  $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,到里德堡态需  $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,到自电离态为  $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,非共振电离为  $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。如实现多步共振电离,还要求在能级寿命长度范围内 ( $1 \sim 10 \text{ns}$ ) 达到这个能量值。目前,商业激光器中只有脉冲激光器才能达到。若按通常使用的光束直径可压缩到  $\phi 3 \text{mm}$ ,并考虑到可调染料激光器的效率为 10%,相应泵浦激光器每脉冲的能量为:到激发态需  $10^{-9} \sim 10^{-6} \text{J}$ ,到自电离态为  $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{J}$ ,到里德堡态为  $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{J}$ ,非共振电离需  $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{J}$ 。除非共振电离外,这个能量均可在目前商业卖的激光器所满足。这个条件是发展激光离子源的技术基础。

在满足饱和和激发条件下,从多步共振电离机制考虑,影响电离效率的因素有:由于原子无规则运动产生的多普勒谱线加宽和激光使原子极化,在下一个激发时激光偏振方向将影响激发,这称动力学效应;由于热运动,使原子基态成份的减少<sup>[10]</sup>等。对此,在正确选择激光谱线宽度、正确选择激光路线和适当加大激光强度等措施后,上述因素都可克服。理论估计,绝大部分元素电离效率可以达到 90% 以上<sup>[2]</sup>。

实际离子源结构主要考虑激光束能否照射到所有被电离原子,即位置和时间的覆盖。此外,应考虑核反应产物引入激光电离室的传输效率、单原子化过程的原子损失和离子引入分离器磁铁的效率,即离子的速度分散与发散度,这都影响总分离效率。

离子的电荷分辨本领是激光离子源所特有的。激光束的窄线宽和原子能级窄宽度及不同元素的超精细结构引起足够大的波长差别,是产生电荷分辨的基本原因。在实际离子源中,由于表面电离将产生不带电荷分辨的离子,形成了本底。此外,激光溅射或激光非共振电离也将产生本底离子。

据上述饱和激发与电离的要求,每脉冲能量几个 mJ 将能实现不包括非共振电离的多步共振电离方式,这个能量要求商业激光器的平均功率为几十瓦,如铜蒸气激光器和准分子激光器等。此外,商业可调染料激光器的线宽完全能适应元素选择性要求。因此发展激光离子源的主要技术基础是成熟可靠的。事实上研制激光离子源主要工作是两个方面,一是选择、订购适用激光器系统,并作激光光路设计,同时确定要分离元素的激发路线及其自电离态或里德堡态位置等光学及光谱学工作;二是离子源本身的结构研制,以满足激光尽可能大的时间和空间覆盖率,以获得最高电离效率,同时又能保持好的电荷分辨、短分离时间及能适用于高温难熔元素的电离。另外,还要考虑引出离子束的速度分散和发散度。光学与光谱学工作已在清华大学取得重要进展,离子结构正在实验中。

### 3 几种激光离子源方案与初步实验结果以及我们的考虑

由于类似技术如激光微量分析和激光光谱学的发展,80 年代就已提出了几种激光离子源方案。这些方案大体可分为加热挥发式、激光溅射式和激光直接照射传输气体方式。后两种都考虑了激光与气体传输系统的结合。

### 3.1 加热挥发式

把被电离的物质放在加热小管中加热(见图 1),使其原子呈蒸气被储存在管内.激光从加热管一端的小孔射入使原子电离,离子在小孔区电场作用下引出<sup>[4]</sup>,并且经过透镜聚焦引入分析磁铁<sup>[5]</sup>.为了增加电离效率,这里使用了铜蒸气激光器.它的光脉冲重复频率为 6~9kHz.由小孔泄漏的中性原子比例很小,因此大大提高了时间与空间覆盖性,可以达到很高的电离效率.由于小管的外

形与原来使用的 FEBIAD 源相似,因此极易实现同在线同位素分离器的结合.首次实验分别在原苏联的 IRIS 分离器和 CERN 同原苏联小组合作在 CERN 的在线同位素分离器上实现,对稀土元素获得了极高的在线电离效率,对 Yb 元素为(10~20)%,与此同时,电荷分辨率为 100~10000.与此同时,德国的 Mainz 小组同样也获得了对 Sr 17%的电离效率和对 Tc 13%的电离效率<sup>[5]</sup>.

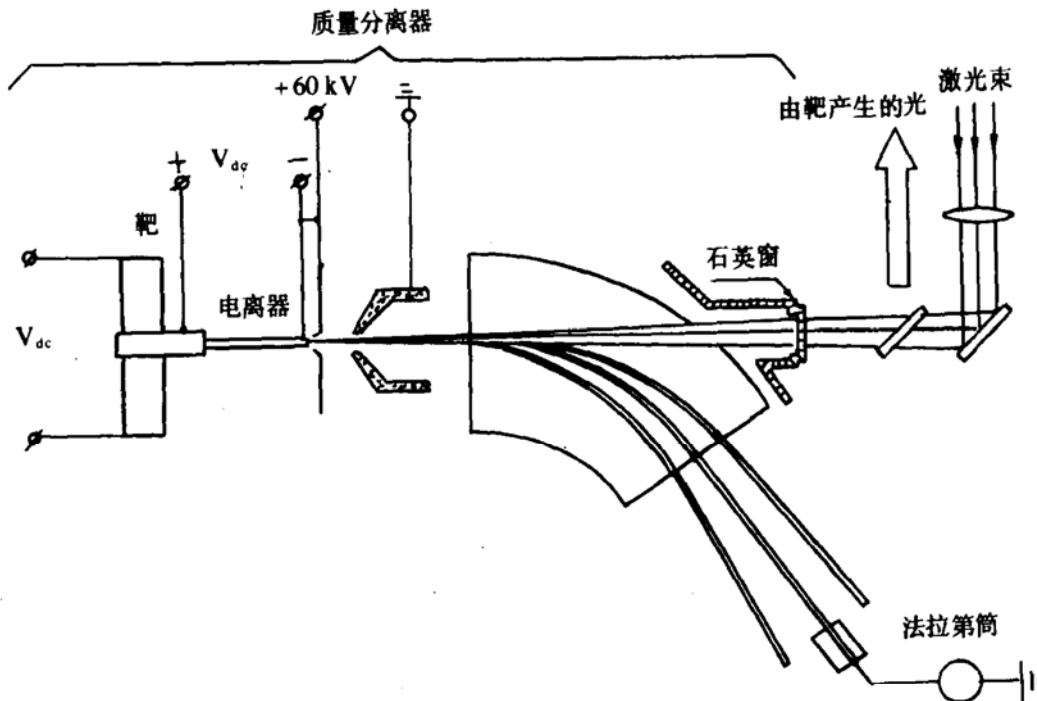


图 1 加热小管存贮方法激光离子源

虽然这种方式对一些稀土元素达到了很高的电离效率,但是因为没有脱离加热蒸发的单原子化方式,所以影响了分离速度,并且不能用于高温难熔元素的分离.由于无元素选择性的加热和表面电离的影响,这种方法不是对所有元素的电荷分辨率都那么好.

### 3.2 溅射式(见图 2<sup>[7]</sup>)

以 gas-jet 传输来的核反应产物在真空中直接沉积在一个绝缘体轮上,形成一个沉积物斑.这个轮子定时转动,使这个斑转到电离

位置.以一束足够强的激光照射这个斑,那么沉积物原子就脱离轮表面飞出来.经过约  $10\mu\text{s}$ ,以一束共振电离激光照射,这样就可获得所选原子的单电荷态离子.这种方式适用于包括高温难熔元素的多数元素的电离,并且已在激光光谱学测量中实现了 Pt、Au 的电离,效率约  $10^{-5}$ .设计者认为,加上反射镜等其它措施,效率会大大提高.固有缺点是由于沉积过程和轮的转动影响了分离速度,并且由于无电荷选择性的溅射过程造成电荷分辨

率下降. 这种方式乃是首次实现了 Pt 这样的高温难熔元素的电离.

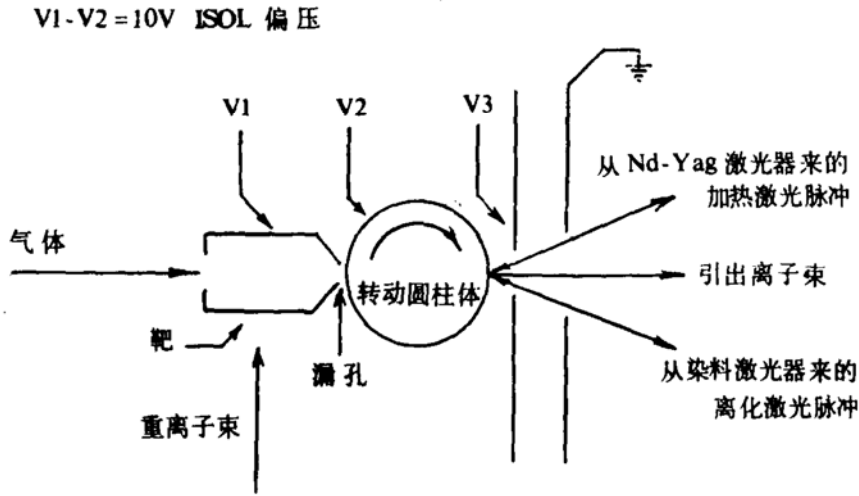


图 2 建议的溅射式激光离子源

### 3.3 直接作用式

不加任何添加剂在短毛细管(约 10cm)的传输实验中早已证明,核反应产物可以传出靶室<sup>[7]</sup>. 同时在气体池中的核反应产物的激光谱学测量中,已成功地测出<sup>242m</sup>Am 裂变同质异能态的同位素移动<sup>[8]</sup>. 这都提示这种方法是有道理的. 已有多个实验企图以激光共振电离的方法增加离子制导式离子源的效率,其中气体池内的激光共振电离方法已有初步结果. P. VAN DUPPAN 以稳定的 Ni 原子已得到相当好的电离效率<sup>[9]</sup>.

我们曾建议在使用 He-jet 传输系统条件下,以激光照射经过漏孔的传输气流即可获得所需元素的离子,这个气流经过漏孔后原子流直径仅  $\phi(1\sim 3)\text{mm}$ ,原子运动速度约每秒几百米. 若激光有效作用距离大于 1cm,那么用重复频率 10kHz 的激光束共线照射将有足够的电离效率. 由于气体的快速流动,将使高温难熔元素的原子很少被吸附在容器壁上,因此它应适用于高温难熔元素的电离. 本离子源在常温下工作,不需溅射用强激光,因此除需电离的离子外,产生的其他离子很少,具有很好的电荷分辨本领. 在高速气流的冲击作用下,原子在离子源内停留时间极短,因

而具有极快的分离时间,极限时间约为 0.1 ms. 为此,清华大学物理系的同志们已设计了一套实验装置,不久将有实验结果以检验这种电离方式.

总之,激光离子源将有十分优越的特性,初步的实验已获得重要进展,已经表现出部分的优点. 如果实现了高效率、快速、良好的元素选择性和对高温难熔元素的分离,那么配备激光离子源的在线同位素分离器的功能将推动远离  $\beta$  稳定线核研究大大前进一步.

### 参 考 文 献

- 1 Van Duppan P, et. al. Rev. Sci. Instrum. April 1992, 63(4): 2381
- 2 Ravn H L. N. I. M., 1992, B70: 107
- 3 Schmeing H, et. al. N. I. M., 1987, B26: 321
- 4 Letokhov V S, et. al. ZINAL, 1984, 07
- 5 Ames F, et. al. Appl. Phys., 1990, B51: 200
- 6 Lee J K J, et. al. N. I. M., 1988, B34: 252
- 7 郭俊盛等. 高能物理与核物理, 1978, 2(2): 143
- 8 Backe H, et. al. Abstract of RIS-92, 23
- 9 Qamhieh, et. al. N. I. M., 1992, B70: 131
- 10 Scheerer F, et. al. Spectrochimica Acta., 1992, 47B: 793

## Laser Ion Source Used for On—Line Isotope Separator

Zhao Zhizheng Luo Yixiao Tan Jinfeng Zhu Shaofei

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Shang Rencheng Xu Sida Dai Yi Zhang Shuming Li Shaofu Li Tong

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

**Abstract** The importance of developing ion source used for on-line isotope separator for researching nuclei far from stability line is explained. The merit, basic concept and studied current status of laser ion source are described. The assumption and researching development of laser ion source in Lanzhou on-line isotope separator are reported.

**Key Words** laser ion source, on-line isotope separator, laser resonance ionization.

## 日本物理学家 Arima 教授

Arima 教授是日本一位活跃的物理学家,是东京大学的物理学教授,主要从事原子核的研究.他对国际著名的“Tokyo Group”的研究工作起了指导性的作用.他的研究领域十分广阔,最著名的就是开创了相互玻色子模型的研究,这为原子核各种结构性质提供了统一的论题.他用原子核壳层结构建立了天文物理学研究的基础,解决了星系宇宙的年龄等深奥的问题.

Arima 教授的研究工作非常突出,他曾获得过日本著名的 Nishia 纪念奖,欧洲著名格拉斯哥(Glasgow)大学名誉博士学位,前联邦德国 Humbolt 奖,Orde van Oranje Nassau 奖,荷兰比阿特丽克斯(Beatrix)女王授予的指挥家奖,菲律宾富兰克林研究所韦瑟里尔(Wetherill)勋章,德雷克塞尔(Drexel)大学理学博士学位.

80年代初,Arima 教授就是日本物理学会主席,任职期间他不仅走遍了全日本和其它有学术活动的国家,而且还亲自走访了亚洲许多不发达国家.他所做的一切是日本科

学家的一个伟大功绩,并赢得了全世界的赞叹.为此,孟加拉国科学院任命 Arima 教授为名誉成员.

Arima 教授 50 年代中期在芝加哥 Argonne 国家实验室攻读博士后,60 年代在 Princeton 和 Rutgers 大学做访问教授,70 年代在 Stony Brook 纽约州立大学任教授,那时 Arima 教授就树立了全球观点,Arima 这种放眼全球的观点对日本的教育事业起了重要的作用.目前,Arima 教授作为日本国立大学协会主席,正全力以赴投入日本教育的改革工作.

Arima 教授除了在科学领域享有盛名外,在文学方面是日本 Haiku 诗人中的主要诗人之一,也是著名日本作家协会的成员.

(中国科学院近代物理所 蒋西虹编译自

AAPPS Bulletin, Vol. 2, No. 2, 1992)