

文章编号: 0258-7025(2005)05-0622-05

## 平行板静电场法铯离子引出的实验研究

迟 涛, 包成玉, 陈 戎, 王德武

(清华大学工程物理系, 北京 100084)

**摘要** 为研究平行板静电场法离子引出的规律, 利用对由 YAG 四倍频脉冲激光(266 nm)一步电离产生的铯等离子体进行了多次离子引出实验。结果发现, 离子引出时间随外加引出电压的增加而减小, 随离子初始密度的增加而增长。通过对实验数据的分析, 获得了在此实验条件下光致瞬态铯等离子体离子引出时间与外加引出电压和离子初始密度之间关系的经验公式。但是, 离子引出时间并非一直随电压的增加线性减小。在外加电压超过 1200 V 以后发现离子引出时间有增加的趋势。在外加电压高于 1000 V 以后观察到溅射离子峰的存在, 并讨论了溅射现象的存在对离子引出时间的影响。通过对离子引出与收集和溅射现象的分析获得了本实验条件下平行板静电场法离子引出中外加电压的最佳值。

**关键词** 激光技术; 同位素分离; 原子法激光分离同位素; 离子引出; 平行板静电场法; 铯等离子体

**中图分类号** TL25<sup>+</sup>3 **文献标识码** A

### Experimental Study on Ion Extraction Process of Cesium Plasma of Static Electric Field between Two Parallel Plates

CHI Tao, BAO Cheng-yu, CHEN Rong, WANG De-wu

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Experiments of ion extractions of cesium plasmas produced between two parallel plates by the fourth harmonics of a YAG laser (266 nm) have been carried out. The influences of applied voltage and initial ion density on the ion extraction process have been discussed and a scaling relation has been formulated. But the ion extraction time does not always decrease with the applied voltage. In the experiment, the ion extraction time increases when the applied voltage is above 1200 V. The existence of ion sputtering peak has been observed above a certain applied voltage, which is coincident with the theoretical analysis. A best applied voltage is obtained from the experiments concerning not only the ion extraction time but the collection of target isotope ions.

**Key words** laser technique; isotope separation; atomic vapor laser isotope separation; ion extraction; parallel plate static electric field; cesium plasmas

## 1 引 言

原子法激光分离同位素(AVLIS)的基本原理是选择性激发<sup>[1]</sup>。它利用原子光谱的同位素位移效应, 使用强的单色可调谐激光照射原子系统, 对目标同位素原子进行选择性激发直至电离, 而其他同位素仍处于未激发的状态, 最后利用电磁方法将被电离的目标同位素原子引出, 完成分离过程。从原理上讲, 原子法激光分离同位素具有分离系数高, 同等分离功下生产规模小, 分离系统进入工作状态迅速等优点。如果要将该技术投入实际的工业应用, 它必须有较高的经

济性。原子法激光分离同位素工程的经济性和很多因素有关, 其中之一是要有合适的离子引出方法将激光电离的原子快速高效地取出。原子法激光分离同位素工程可以分为激光器系统和分离器系统。我们曾在分离器方面做过一些工作, 例如, 在原子蒸气束的产生, 即线性电子枪的研制<sup>[2]</sup>和激光感生荧光法测量原子蒸气速度<sup>[3]</sup>方面曾进行过研究。本文工作是关于离子的引出与收集, 也属于分离器系统。

离子的引出收集过程是原子法激光分离同位素工程中的关键环节之一。平行板静电场法是离子引

收稿日期: 2004-03-11; 收到修改稿日期: 2004-06-03

作者简介: 迟 涛(1978—), 男, 清华大学工程物理系研究生, 主要从事激光分离同位素方面的研究。

E-mail: chitao97@mails.tsinghua.edu.cn

出中最基本的方法,研究静电场中的离子引出规律有助于理解离子收集的物理过程,是进一步研究其他收集结构的基础。因此,它是离子引出研究的重点。从目前公开发表的文献来看,日本在这方面的研究比较多。Yamada 等<sup>[4]</sup>利用 553.5 nm 染料激光两步电离钡原子蒸气模拟激光分离铀同位素的过程,对影响离子引出时间的因素进行了详细的研究,并总结了钡离子引出时间的经验公式。张云兴等<sup>[5]</sup>用铯模拟较高离子密度等离子体,证明了在离子密度为  $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  且具有厘米量级几何尺寸的等离子体中存在屏蔽效应。

为缩短离子引出时间、减少引出过程中的碰撞损失,通常的做法是提高外加引出电压。但是,随着引出电压的增加,离子入射能量也随之增加,其中一

部分离子撞击收集板的固体表面时将会产生入射离子散射、表面溅射等现象,使离子收集率下降,从而影响原子法激光分离同位素的经济性。所以,离子引出的外加电压并不是越高越好。本文对平行板静电场法的铯离子引出特性进行了研究,通过获得的大量数据推导出平行板间距固定的铯离子引出时间的经验公式,并提出了本实验条件下的最佳离子引出电压。

## 2 实验方法

平行板静电场法铯离子引出的实验装置如图 1 所示。

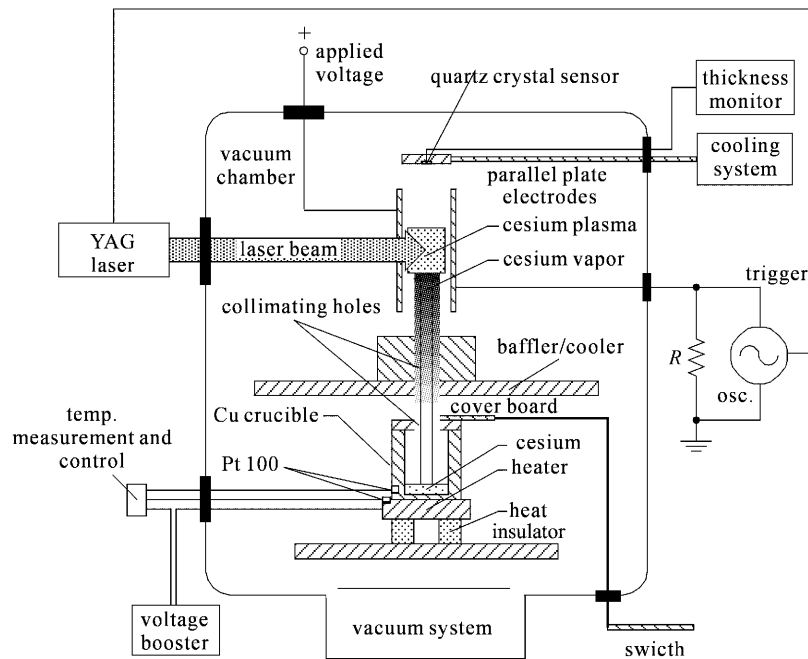


图 1 平行板静电场法铯离子引出的实验装置图

Fig. 1 Diagram of the Cs ion extraction experiment of parallel plate method

金属铯具有熔点低(28.6 °C)和电离电位低(3.89 eV)等特点,易于蒸发和电离。铯的蒸发装置位于真空室底部基座上。金属铯置于铜坩埚(内径  $\phi 48 \text{ mm}$ ,深 46.5 mm)内。采用电阻式加热元件对坩埚进行加热,产生原子束流。两个热敏电阻探头(Pt 100)分别固定在坩埚底部测量孔内和加热元件上方,用于测量和控温。原子束经过准直(准直孔直径  $\phi 10 \text{ mm}$ ,高度距离坩埚底部 46.5 mm 和 146 mm,准直孔长度分别为 10 mm 和 26 mm),进入两平行极板间的激光作用区。在激光作用区域的

上方 200 mm 处放置石英晶体探头,通过膜厚仪对金属原子的沉积速率进行监控,并由此推算金属原子的数密度。

实验采用 YAG 四倍频脉冲激光(266 nm),光子能量 4.67 eV,高于金属铯的电离电位,可以将铯原子一步电离。工作频率 10 Hz,脉冲持续时间 10 ns,垂直原子束流方向入射,光束直径  $\phi 9 \text{ mm}$ ,作用于原子束的激光能量约 50 mJ。当激光波长 266 nm 时,铯的吸收截面  $\sigma$  为 0.06 Mb( $1 \text{ Mb} = 1 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ )<sup>[6]</sup>,则电离速率  $W$  为

$$W = \frac{\sigma I}{h\nu} = 6.3 \times 10^5 /s. \quad (1)$$

设离子密度为  $n_i$ , 金属铯被激光一步电离。通过膜厚仪可以测得金属铯初始原子密度  $n_0$  为  $(3 \sim 8) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 。由速率方程知, 离子数增长的速率为

$$\frac{dn_i}{dt} = Wn_0 = 6.3 \times 10^5 \times (3 \sim 8) \times 10^{11} = (1.9 \sim 5.0) \times 10^{17} (\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}), \quad (2)$$

因此, 在激光作用时间内, 也就是激光脉宽  $\Delta t$  内, 激光作用区产生的铯离子数密度为

$$n_i = \frac{dn_i}{dt} \Delta t = (1.9 \sim 5.0) \times 10^{17} \times 10^{-8} = (1.9 \sim 5.0) \times 10^9. \quad (3)$$

由张云兴等的实验结果<sup>[5]</sup>知, 在此离子密度且具有厘米尺度的等离子体, 能够产生等离子体屏蔽现象, 可以很好地模拟激光分离铀同位素时离子引出的物理过程。

在激光作用区域加平行板电场 (200 ~ 2000 V), 离子在电场的作用下被迅速从等离子体中引出, 并被收集在阴极板上。两平行电极极板 (80 mm × 120 mm) 间距 27.5 mm。离子在极板上收集所产生的电流信号通过串联在电路中的电阻 (3.3 kΩ) 转化为电压信号, 由数字示波器 (DSO 2200) 采集。通过收集所有的离子信号数据, 计算等离子体中的离子密度。每个电压记录 5 组数据。离子引出过程中的最高峰值电流为毫安量级, 而外加电场通常在几百伏至上千伏, 因此在实验中可以忽略串联电阻分压对平行极板间引出电压的影响。

### 3 实验结果与讨论

实验中由示波器采集到的波形如图 2 所示, 上面的方波是激光触发信号的触发电平, 下方为离子引出的电压信号。设实验中光致瞬态等离子体中离子密度为  $n_i$ , 则

$$n_i = \left( \frac{1}{eRV} \right) \int U(t) dt, \quad (4)$$

其中  $\int U(t) dt$  为离子信号波形的面积,  $e$  为单位电荷电量,  $R$  为取样电阻,  $V$  为激光与原子束作用区域体积。计算离子密度的一般做法是通过膜厚仪测量镀膜速率, 推算原子束的原子密度, 然后利用电离截面参量计算等离子体中的离子密度。本实验中, 收集的离子信号数据通过 (4) 式计算离子密度, 可以避免激光功率和蒸发源温度波动的影响。从所有实验数据中选择相同离子密度的数据点读取离子引出时间,

进行离子引出特性分析。由于在示波器显示的波形中很难确定时间终点, 因此通过示波器公司提供的转换程序将实验波形转化为离散的数据格式进行分析。离子引出时间起点为激光触发信号的触发电平上升沿, 终点为电压信号衰减到零的时刻。离散后的实验数据点精度为  $\pm 0.1 \mu\text{s}$ 。

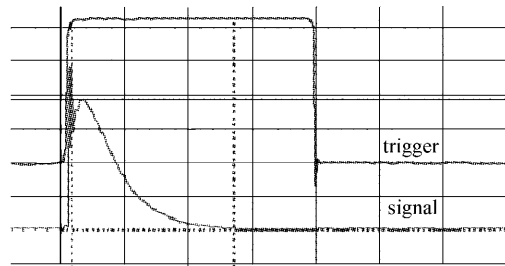


图 2 离子信号波形和触发信号波形

Fig. 2 Waveform of the ion current and the trigger signal

#### 3.1 离子引出时间与外加电压的关系

外加电压对离子引出时间的影响如图 3 所示。可以看出, 当引出电压小于 1000 V 时, 随着外加电压的增加, 离子的引出时间相应减小。

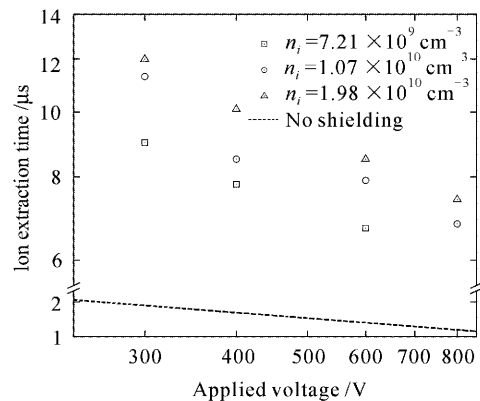


图 3 引出电压与离子引出时间的关系

Fig. 3 Relation between the applied voltage and the ion extraction time

等离子体在电场中产生的瞬间, 靠近阴极的电子迅速被排斥, 而离子几乎未动, 由于内建电场的存在形成屏蔽层, 产生等离子体屏蔽。外电场几乎进入不到屏蔽层内, 电场作用仅局限于鞘层, 导致离子引出时间加长, 从而增大了离子的损失率。当离子电流达到最大值时 (波形的最高点), 鞘层和屏蔽层建立完毕, 电场开始从鞘层中引出离子, 鞘层渐渐变宽, 屏蔽层变窄并消失, 直至完成离子引出过程。因此, 存在等离子体屏蔽的离子引出时间要比没有等离子体屏蔽的引出时间长得多。从图 3 中可以看

出,在本实验中,即离子密度在  $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  范围内时存在等离子体屏蔽现象。图中虚线为单粒子模型下的引出时间。

### 3.2 离子引出时间与离子密度的关系

如图 4 所示,相同引出电压下,离子引出时间随离子密度增加而增长。这是因为离子密度越高,等离子体的屏蔽就越严重,从而造成离子引出时间的增

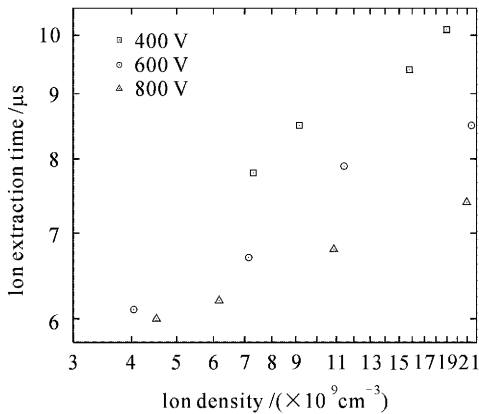


图 4 离子密度与离子引出时间的关系

Fig. 4 Relation between the ion density and the ion extraction time

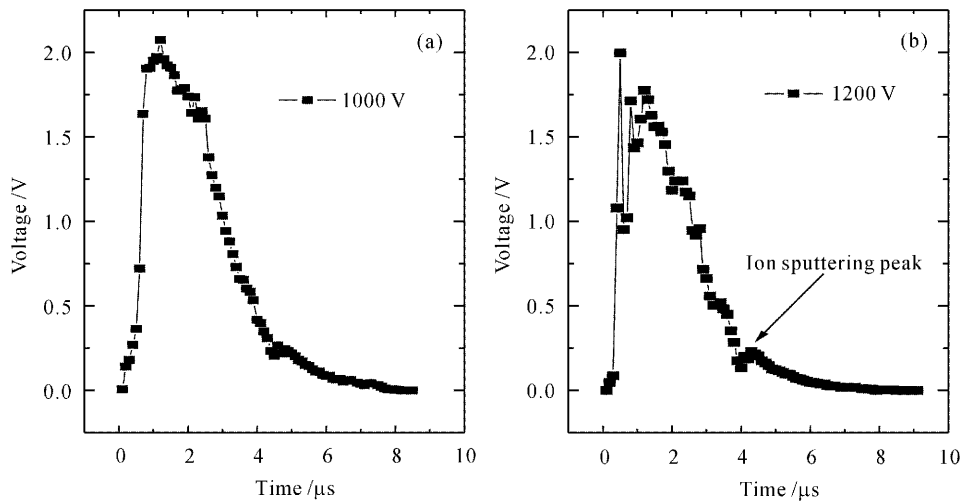


图 5 溅射离子峰的出现

Fig. 5 Emergence of sputtering ion peak

另一方面,从缩短离子引出时间的角度考虑,外加电压不应超过 1200 V。在实验中没有观察到离子引出时间随引出电压的增加而单调递减的变化关系。当外加电压超过 1200 V 以后,增大外加电压,离子引出收集时间不再减小,甚至出现了增加的趋势(图 6)。这一现象可以通过溅射离子峰的存在来解释。由于在本实验中离子是通过阴极板进行收集

长。同时,离子密度越高,碰撞损失也就越严重。从减少碰撞损失率的角度出发,在较高密度的情况下,应该尽量缩短收集时间,因此需要增大引出电压。

### 3.3 平行板静电场法离子引出的最佳外加引出电压范围

引出电压并不是越高越好,随着引出电压的增加,离子能量增加,溅射额也明显增加,离子的总收集量随离子的能量  $E$  增加而减小。溅射是离子轰击物质表面,在碰撞过程中发生能量和动量转移,最终将物质表面原子激发出来的过程。在溅射现象发生时,除了中性原子发射,还会伴随有入射离子的散射和返回,表面溅射和级联溅射离子的返回以及电子发射等现象<sup>[7]</sup>。从实验中采集的离子流波形可以看出(如图 5 所示,此处为离散信号图),当外加电压为 1200 V 时,在离子引出波形中可以看到一个明显的溅射离子峰。在溅射现象中,发射的原子远比离子多。由溅射造成的中性原子发射将不能再被电场引出收集,所以溅射的存在将会使目标同位素离子收集率下降。从减少溅射损失,提高离子收集率的角度出发,外加电压不宜超过 1000 V,与理论研究的结果吻合<sup>[8]</sup>。

的,随着离子沉积在收集板表面的涂层厚度的增加,增大外加引出电压,溅射额也会增加,溅射出来的离子的量也在增加<sup>[8]</sup>。这些离子在电场的作用下重新在极板进行收集,使得离子引出时间比没有离子溅射产出的时候要长。

因此,综合考虑缩短离子引出时间和提高离子收集率两方面的因素,认为在平行板静电场法离子

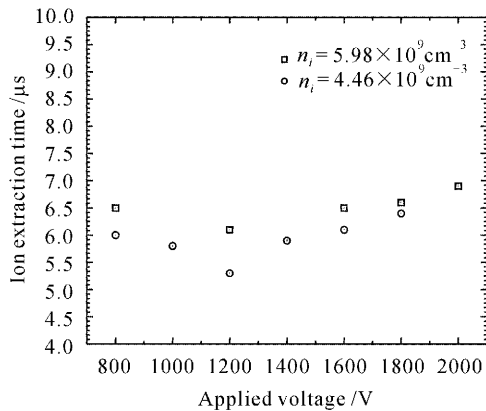


图 6 引出电压比较高时的离子引出时间

Fig. 6 Ion extraction time with higher applied voltage 引出收集过程中外加引出电压存在一个最佳范围。在我们的实验条件下,外加电压的最佳值在 1000 V 左右。

### 3.4 离子引出时间的经验公式

从图 3 和图 4 可以看出,在双对数坐标下,离子引出时间与外加电压和离子初始密度成简单的比例关系。Yamada 等<sup>[4]</sup>提出用幂指数乘积的形式来表达这种关系。在本实验中,因为等离子体宽度为常数,离子引出时间可以表示为

$$\frac{\tau}{\tau_s} = \left(\frac{U}{U_s}\right)^{\alpha} \left(\frac{n_i}{n_{is}}\right)^{\beta}, \quad (5)$$

其中,  $U$  是外加电压(单位 V),  $n_i$  为离子初始密度(单位  $\text{cm}^{-3}$ ),  $\tau_s$  是外加电压为  $U_s$ , 离子初始密度为  $n_{is}$  的引出时间(单位  $\mu\text{s}$ )。通过(5)式可以确定某一特定电压值和离子密度时的离子引出时间。通过对图 3 和图 4 以及实验获得的其他数据进行最小二乘法拟合等处理,得到

$$\frac{\tau}{7.4} = \left(\frac{U}{800}\right)^{-0.48} \left(\frac{n_i}{2 \times 10^{10}}\right)^{0.19}. \quad (6)$$

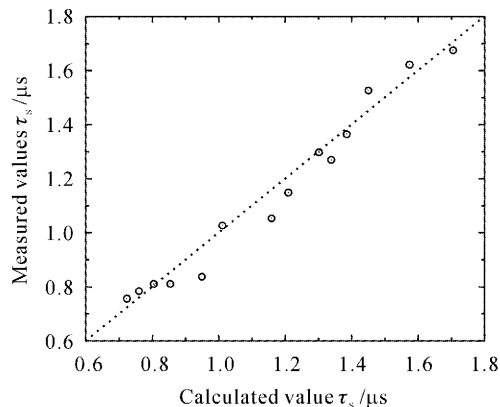


图 7 离子引出时间经验公式的计算值与实验测量值的比较

Fig. 7 Values of ion extraction time calculated from the scaling law and those measured by the experiment

如图 7 所示,在本实验条件下,由(6)式所确定的离子引出时间,在 300~1000 V 电压和  $4.04 \times 10^9 \sim 2.23 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  离子密度范围内与实验结果吻合得较好。

## 4 结 论

研究了平行板静电场法离子引出的规律。离子引出时间随外加电压的增加而减少,随离子密度的增加而增长。通过实验归纳了铯离子引出时间与外加电压和离子密度关系的经验公式。实验采用阴极板对目标同位素离子进行收集,观察到了明显的溅射离子峰。溅射峰的存在说明溅射损失比较高,这将会降低目标同位素的离子收集率。而且当外加电压超过 1200 V 以后,由于溅射离子的发射与返回,使得离子引出时间不再减少,反而出现了增长的趋势。因此,综合考虑缩短引出时间和提高离子收集率两方面的因素,平行板静电场法应当存在一个离子引出时间比较短且目标同位素收集率比较高的最佳引出电压范围。实验表明,这个最佳外加电压在 1000 V 左右。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Dewu. Laser Isotope Separation: Theory and Application [M]. 1st Edition, Beijing: Atomic Energy Press, 1999. 74~80  
王德武. 激光分离同位素理论及其应用[M]. 第一版,北京:原子能出版社,1999. 74~80
- 2 Bao Chengyu, Du Yingge, Chi Tao *et al.*. Manufacture and research of the linear-source metal atom evaporation device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 457~462  
包成玉,杜英歌,迟涛等. 线源金属原子蒸气发生装置的研制[J]. 中国激光,2003, **30**(5): 457~462
- 3 Wang Dewu, Kong Yufei, Yang Yi *et al.*. Measurement of velocity distribution of belted vapor by laser induced fluorescence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 735~738  
王德武,孔羽飞,杨移等. 激光诱导荧光法测量原子束速度分布[J]. 中国激光,2002, **A29**(8): 735~738
- 4 Kimio Yamada, Tsutomu Tetsuka, Yoshihiro Deguchi. New scaling relation for ion extraction by external electric field on a barium plasma produced between parallel-plate electrodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(10): 6962~6967
- 5 Zhang Yunxing, Zhu Hong, Zhang Xiuhua *et al.*. Experimental study of the influence of plasma shielding on ion extraction time [J]. *Chinese J. Atomic and Molecular Physics*, 1996, **13**(2): 170~174  
张云兴,朱洪,张秀华等. 等离子体屏蔽效应对离子取出时间影响的实验研究[J]. 原子与分子物理学报,1996, **13**(2): 170~174
- 6 G. V. Marr, P. M. Creek. The photoionization absorption continua for alkali metal vapours [J]. *Proc. Roy. Soc.*, 1968, **A304**: 233~244
- 7 Chen Baoqing. Ion Plating and Sputtering Technology [M]. 1st Edition, Beijing: National Defence Industry Press, 1990. 90~100  
陈宝清. 离子镀及溅射技术[M]. 第一版,北京:国防工业出版社,1990. 90~100
- 8 Zhu Honglian, Wang Dewu. Sediment and sputtering during ion extraction [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(6): 1338~1345  
朱红莲,王德武. 离子引出收集的沉积与溅射研究[J]. 物理学报,2002, **51**(6): 1338~1345