

平行板静电场法离子引出的对称收集

宋晓鹏 陈 戎 包成玉 王德武

(清华大学工程物理系激光实验室,北京 100084)

(2004 年 12 月 24 日收到,2005 年 2 月 5 日收到修改稿)

离子引出的研究在 AVLIS 工程中有重要的意义,离子引出量和引出时间直接关系到整个系统的离子收集效率.在静电场中,由于等离子体屏蔽效应的存在,等离子体电位要高于正、负极板的电位,而且在靠近正、负极板的两侧均存在鞘层.理论模拟表明在正极板一边也可以引出离子.选取铯(Cs)作为实验对象,研究静电场对 Cs 等离子体的离子引出,使用安装在两个极板上的法拉第筒收集离子引出信号.实验结果表明,正极板确实可以引出离子,随着外加电压的升高,从正极板一边引出离子的比率降低.

关键词:AVLIS,离子引出,等离子体

PACC:5225,5265

1. 引 言

离子引出是 AVLIS(Atomic Vapor Laser Isotope Separation)系统中的一个重要组成部分,离子引出效率直接关系到整个 AVLIS 系统的分离效率,提高离子引出率能够提高 AVLIS 系统的分离效率.

最简单的也最常用的离子引出方法是平行板静电场法.使用平行板电极在激光等离子体外部加一个恒定电压,由于等离子体屏蔽效应,电场只存在于等离子体鞘层中,绝大部分等离子体区域内没有电场.鞘层中的离子可以被迅速引出,随着鞘层中离子的不断引出,鞘层厚度也逐渐增加,使等离子体内部的离子也可以被电场收集.

严敏^[1]、熊家贵^[2,3]、谢国锋^[4]等用电子平衡流体模型, PIC-MCC 粒子模拟方法,电子平衡和粒子模拟的杂化方法等,对常见的几种静电场离子引出方法进行了数值计算和计算机模拟.理论计算表明,等离子体电位要比正、负极板的电位都高,在等离子体靠近正、负极板的两侧均存在鞘层,可以从两个极板引出离子,但以负电极为主.

我们以 Cs 离子作为目标离子,根据实际的实验条件选择参数,进行数值模拟后得到与熊家贵类似的结果.当电压为 600V 时,正极板的离子引出量约占全部引出离子的 1/3.

国内、外已经有很多人对静电场法离子引出进行过实验研究,包括 Yamada^[5,6], Ogura^[7], 张云兴^[8],

迟涛^[9]等.然而在他们的实验中,都只是在负极板一边收集离子,忽略了正极板引出的离子.这样,虽然通过增加极板电压或提高电子温度等方法可以提高离子引出率,然而由于忽略了正极板离子的收集,引出效率都不能达到最理想的状态.

我们的实验研究了正、负极板同时收集的情况,使用法拉第筒收集引出的离子.实际测量发现正极板上安装的法拉第筒可以收集到离子,并且随着外加电压增大,正极板引出离子的比率降低,与理论计算相符合.

2. 实验装置

图 1 是实验装置原理图,在文献^[9]基础上进行了适当改进.实验中使用金属铯作为蒸发材料,在高真空室内通过电阻片将放置金属铯的坩埚加热至 170℃后恒温蒸发,然后打开坩埚的上盖使铯蒸气逸出,铯蒸气经上、下二个孔准直后,以竖直向上的速度进入两个平行板电极之间的激光作用区,266nm 波长的 YAG 激光束以垂直原子束流方向入射使铯蒸气电离,产生光致瞬态等离子体.激光脉宽 10ns,能量约 120mJ,频率 5Hz.在等离子体区域外的极板上加一恒定电压,实现离子的引出和收集.收集极板为 120mm × 80mm 的铝板,极板间距 $D_x = 27.5\text{mm}$.

由于需要测量两边极板的离子引出信号,直接测量由正极板引出的离子信号不方便,为了便于比

较,两边极板的引出离子均由法拉第筒收集,法拉第筒镶在带网孔的极板上,用聚四氟乙烯绝缘。通过 3kΩ 电阻将电流转化为电压信号,用数字示波器(DSO2200)测量。

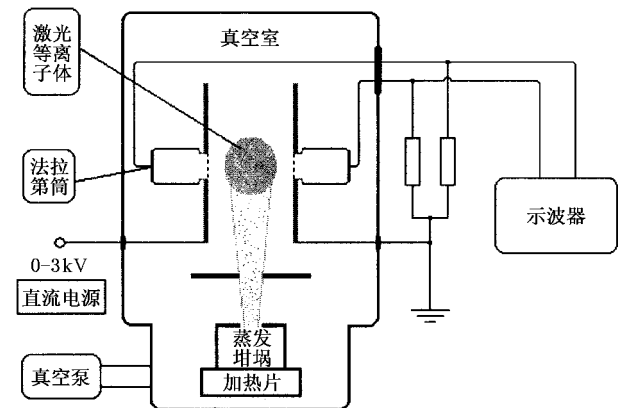


图 1 实验装置原理图

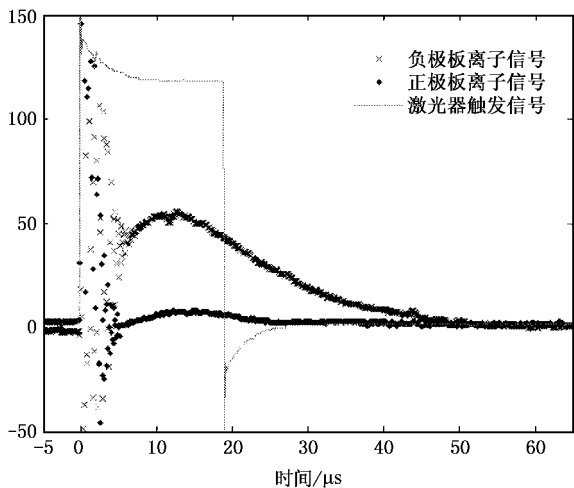


图 2 离子引出信号

当极板电压为 400V 时,用 DSO2200 数字示波器观察到正、负极板的离子引出信号如图 2 所示。从图 2 中可以看出负极板的离子引出信号要大于正极板,大部分的离子还是靠负极板引出。在离子引出最初阶段,有很强的干扰,主要可能由两个原因造成^[8]:1)脉冲激光器闸流管放电产生的空间干扰;2)在光致瞬时等离子体形成的初始阶段由于激光与 Cs 原子蒸气的相互作用以及电子的快速引出。由于这些干扰的存在,很难从离子信号中判断离子引出的开始时间,可以将激光触发脉冲的上升沿近似为离子引出的开始时刻。离子信号波形结束的时刻则意味着离子引出的结束,直接通过图像不容易确定

具体时间,我们通过该数字示波器所带的二次开发程序包实时将离子信号存储为数据文件,通过后续数据处理,认为离子信号衰减到零的那点为离子引出的结束时刻。

3. 理论分析

等离子体位于两块平行板电极中间,如图 3 所示。采用流体理论电子平衡模型,在建立模型时作如下假设:1)离子温度较低,可以用连续方程和动量方程很好地描述离子运动过程;2)电子质量远小于离子质量,在离子运动时间尺度上认为电子处于平衡态。

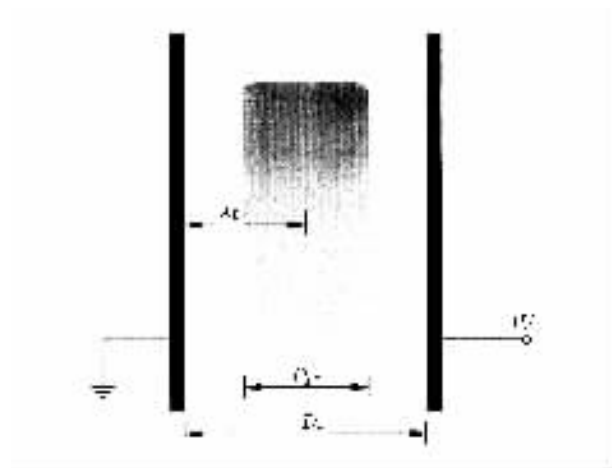


图 3 等离子体和极板的几何尺寸

描述离子引出的电子平衡流体模型方程包括^[2]:

连续性方程

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i v_i) = 0; \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + (v_i \cdot \nabla) v_i = \frac{e}{M_i} (-\nabla \phi + v \times B) - \frac{kT_i \nabla n_i}{M_i n_i} + P; \quad (2)$$

Poisson 方程

$$\nabla^2 \phi = \frac{e(n_e - n_i)}{\epsilon_0}; \quad (3)$$

电子平衡方程

$$n_e = \alpha(t) \exp(e\phi/kT_e); \quad (4)$$

电子约束条件

$$N_{et} = \oint n_e dV; \quad (5)$$

极板电子通量

$$\frac{dN_{\text{et}}}{dt} = \int_{\alpha\Omega} j_e \cdot n dA. \quad (6)$$

其中 $j_e = n_e u_{\text{th}}$, $P = -\sigma_{\text{ia}} n_a |v_{\text{ia}}| v_{\text{ia}}$, n_i 为离子密度, n_e 为电子密度, n_a 为原子密度(认为在整个过程中保持不变), M_i 为离子质量, e 为电子电量, T_i 为离子温度, T_e 为电子温度, v_i 为离子速度, ϕ 为电势, B 为磁感应强度(取 $B = 0$), ϵ_0 为介电常数, σ_{ia} 为离子和原子碰撞共振电荷转移截面, v_{ia} 为离子与原子相对速度, u_{th} 为电子的热运动平均速度, A 为极板面积.

各参数取值如下: $D_x = 27.5\text{mm}$, $D_{p_x} = 10\text{mm}$, $X_0 = D_x/2$, $kT_e = 1.0\text{eV}$, $kT_i = 0.1\text{eV}$, 离子为 Cs^+ , 其质量为 $m_i = 2.225 \times 10^{-25}\text{kg}$. 激光电离 Cs 原子蒸气时, 只有部分 Cs 原子被电离, 离子蒸气密度约为 $n_i = 1 \times 10^{16}\text{m}^{-3}$.

取外加电压 $U = 1000\text{V}$, 在离子引出的初始阶段, 极板间的电位分布如图 4 所示. 从图中可以看出, 等离子体内部基本没有电位差, 屏蔽了外部电场, 在正、负极板附近都存在鞘层, 鞘层内部有电位差. 等离子体电位比正、负极板电位均高, 在正极板一边也有 Cs^+ 引出.

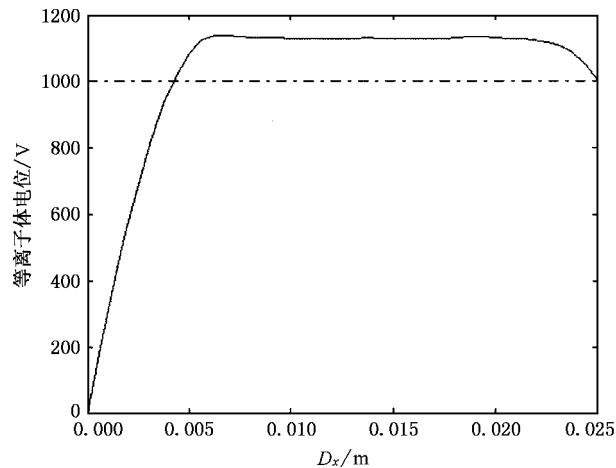


图 4 极板间电位分布

不同电压下从正、负极板引出离子的模拟计算结果在表 1 中列出. 收集板外加电压的大小直接关系到引出离子的速度大小, 因此也就与引出时间有直接的关系. 从表 1 中可以看出, 随着外加电压的增加, 离子引出时间减小, 负极板引出离子比率增加而正极板减少. 不过, 正极板一边的等离子体鞘层

电位差小, 引出离子获得的能量也小, 大多在溅射阈值之内, 溅射产额很小, 利于收集.

表 1 不同电压正、负极板离子引出量模拟结果

| 极板电压/V | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| 负极板/% | 57.6 | 61.9 | 65.5 | 67.3 | 70.3 |
| 正极板/% | 42.4 | 38.1 | 34.4 | 32.7 | 29.7 |
| 引出时间/ μs | 84.5 | 48.7 | 34.9 | 24.7 | 20.7 |

4. 实验数据分析

在整个引出实验中, 原子蒸气蒸发速率和激光功率基本恒定, 可以近似认为, 每次引出离子时的光致等离子体初始密度相同. 改变极板电压, 研究不同电压下正、负极板各自的引出时间以及引出电量的关系.

由于离子信号的开始阶段有很强的干扰噪声, 对每个离子信号进行傅里叶级数平滑处理, 图 5 所示是经过平滑处理后不同电压下正、负极板的离子引出信号. 图 5(a) 是不同电压下负极板的离子信号, 可以看出随着电压增大, 离子信号的峰值也越高, 同时引出时间缩短. 负极板离子引出结果与迟涛的实验数据以及理论计算结果相符合^[9], 离子引出时间远高于单粒子模型的离子引出时间, 可以确定在本实验中, 即离子密度约为 10^{16}m^{-3} 时存在等离子体屏蔽现象.

图 5(b) 则是正极板在不同电压下的离子引出信号, 很显著要比负极板的离子信号小很多, 而且随着电压的增大, 离子信号的峰值并没有明显增大, 甚至当电压到 1000V 时, 峰值反而有所下降. 这是因为电压越高, 等离子体与正极板间的鞘层电位越低, 正极板也就越不容易收集到离子.

4.1. 引出时间与极板电压的关系

图 6 表示不同电压下正、负极板上离子的引出时间. 在理论模拟中, 从正、负极板引出离子量之和达到离子总量 99% 所用的时间为离子引出时间. 从图 6 中可以看出, 无论正极板还是负极板, 引出时间均随着电压的升高而明显减小, 通过数学拟合引出时间与极板电压基本呈对数关系. 引出时间的理论值随着电压增加越来越接近负极板的实验值, 这也说明随着电压升高, 大多数离子由负极板引出.

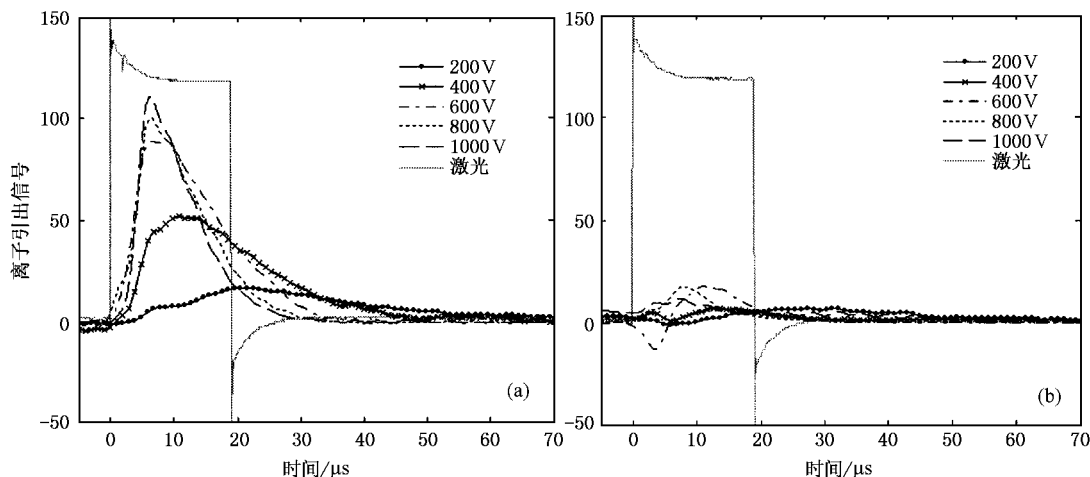


图 5 不同电压下各个极板的离子信号 (a) 负极板 ;(b) 正极板

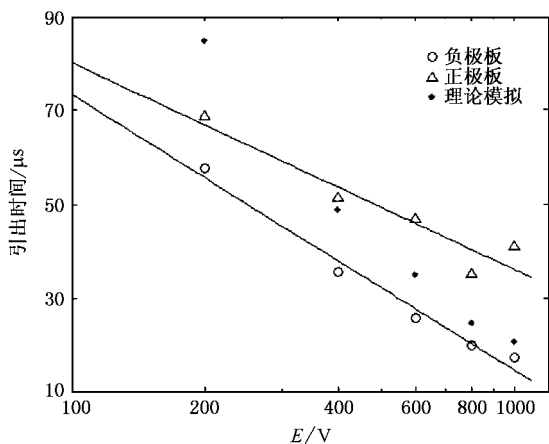


图 6 离子引出时间与极板电压的关系

4.2. 引出离子数与极板电压的关系

表 2 是不同外加电压下正、负极板引出离子比率的数据,从表中可以看出从负极板引出的离子要远远高于正极板.随着电压的升高,正极板引出的离子比率减小.与表 1 相比,正极板离子引出比率要小于理论模拟值,这是由于在实验中通过引出电流间接测量引出的离子,在离子引出的初始阶段,正

表 2 不同电压正、负极板的离子引出量

| 板板电压/V | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 负极板/% | 67.4 | 82.2 | 85.3 | 85.8 | 89.1 |
| 正极板/% | 32.6 | 17.8 | 14.7 | 14.2 | 10.9 |

极板会引出大量的电子,从而中和了一部分离子,使正极板的离子信号减小.

我们的实验是在电压较低的情况下测量的,可以忽略溅射的影响,认为引出的离子全部被极板收集.然而当极板电压继续升高到几个 kV 量级时,随着从负极板引出离子的能量增加,溅射效应将对负极板的离子收集起决定作用.从数值模拟可以看出,当考虑溅射效应,在电压为几个 kV 量级时,负收集板已经基本收集不到目标离子;而此时在正极板引出的离子能量依然很低,基本都可以被收集板收集.

5. 结 论

实验中使用法拉第筒分别收集正、负极板引出的离子,验证了正极板一边也有离子引出的理论计算结果.通过分析实验数据可以得到以下几个结论:

1. 正、负极板离子引出时间随极板电压的升高而减小,而且引出时间同极板电压基本呈对数关系.
2. 从负极板引出的离子量要远远大于正极板;而且随着电压的升高,从负极板引出的离子增加,从正极板引出的离子减少.

虽然正极板收集到的离子量比负极板要低,但是采用对称收集可以提高分离效率和目标粒子收集量,且正极产生的溅射小,这些对于 AVLIS 在实际工程中的效率提高都有很重要的意义.

- [1] Yan M *et al* 1996 *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)* **36** 5 (in Chinese) [严 敏 等 1996 清华大学学报(自然科学版) **36** 5]
- [2] Xiong J G and Wang D W 1999 *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)* **39** 48 (in Chinese) [熊家贵、王德武 1999 清华大学学报(自然科学版) **39** 48]
- [3] Xiong J G and Wang D W 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2420 (in Chinese) [熊家贵、王德武 2000 物理学报 **49** 2420]
- [4] Xie G F and Wang D W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2147 (in Chinese) [谢国锋、王德武 2005 物理学报 **54** 2147]
- [5] Yamada K *et al* 1993 *J. Nucl. Sci. Technol.* **30** 143
- [6] Yamada K , Tetsuka T and Deguchi Y 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 6734
- [7] Ogura K , Arisawa T and Shibata T 1992 *J. Appl. Phys.* **131** 1485
- [8] Zhang Y X *et al* 1996 *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics* **13** 170 (in Chinese) [张云兴 等 1996 原子与分子物理学报 **13** 170]
- [9] Chi T , Bao C Y and Chen R *Chinese Journal of Lasers* (in Chinese) (accepted) [迟 涛、包成玉、陈 戎 中国激光(已接收)]

Dual extraction and collection of ions by parallel electrode method

Song Xiao-Peng Chen Rong Bao Cheng-Yu Wang De-Wu

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

(Received 24 December 2004 ; revised manuscript received 5 February 2005)

Abstract

Ion extraction from laser-induced plasma is one of the key problems in atomic vapor laser isotope separation (AVLIS) engineering. In an electrostatic field , the plasma potential is higher than both electrodes due to the plasma shield effect. And sheaths exist on both sides of the electrodes. Using numerical simulation , it has been proven that ions can be extracted by the positive electrode. In conventional ion extraction experiments using an electrostatic field , the ions are only collected at the negative electrode. We focused on the positive electrode as well as the negative collector in our experiments. The Faraday cups , fixed on both electrodes , were used to collect the extracted ions and avoid the effect of power supply. As a result , the positive electrode can also extract ions. The collection ratio of positive and negative collectors decreases , as the applied voltage increases.

Keywords : AVLIS , ion extraction , plasma

PACC : 5225 , 5265