

计及溅射损失的平行板静电场法 离子引出和收集

谢国锋 王德武 应纯同

(清华大学工程物理系 北京 100084)

(2004 年 7 月 13 日收到 2004 年 12 月 22 日收到修改稿)

采用粒子模拟-Monte Carlo 碰撞 (particle in cell-Monte Carlo collision) 方法研究了原子蒸气激光同位素分离工程中一维平行板静电场法离子引出和收集过程, 记录引出离子的能量分布和角度分布, 计算离子在收集板上造成的溅射损失. 模拟结果表明, 增加引出电压可以缩短引出时间, 降低碰撞损失, 但是增加了溅射损失, 使得收集率降低; 增加电子温度可以缩短引出时间, 提高收集率. 增加初始等离子体密度将使引出时间增加, 收集率降低, 而目标同位素丰度较高的情况下, 离子引出过程的碰撞损失率较低, 收集率较高. 提出了一种平行板静电场的改进方法, 大大降低了溅射损失, 提高了收集率.

关键词: 原子蒸气激光同位素分离, 离子引出, 溅射

PACC: 2842H, 5265

1. 引 言

在原子蒸气激光同位素分离工程中, 目标同位素被激光选择性电离后, 在电磁场的作用下向收集板运动. 激光等离子体离子引出是原子蒸气激光同位素分离系统的重要一环, 快速低耗地将激光选择性电离产生的目标同位素离子引出收集是其核心问题. 文献 [1—7] 用电子平衡流体模型、粒子模拟-Monte Carlo 碰撞 (particle in cell-Monte Carlo collision, 简称 PIC-MCC) 方法以及结合电子平衡和粒子模拟的杂化方法, 对常见的几种静电场离子引出方法 (平行板电场法、II 型电极法、改进 M 型电极法)、RF 共振离子引出方法以及 $j \times B$ 方法进行了数值计算和计算机模拟, 得到了引出时间、碰撞损失率的规律, 但是没有分析离子轰击收集板的能量沉积和质量沉积特性, 也没有分析离子的溅射损失. 朱红莲等^[8]应用 Sigmund 线性级联碰撞理论对收集过程的溅射损失进行了初步分析. 本文采用 PIC-MCC 方法研究一维平行板静电场法的离子引出和收集过程, 记录引出离子的能量分布和角度分布, 将其代入 Trim 程序, 分析不同引出条件下离子在收集板上造成的溅射损失对离子收集率的影响.

2. 模型和方法

如图 1 所示, U 为外加电压, 等离子体位于左右两块平行的电极中, 左边的电极加上负高压, 右边的电极接地. 离子在电磁场的作用下被左右极板收集. 如果没有特殊说明, 取 $D_x = 2 \text{ cm}$, $D_{px} = 2 \text{ cm}$, $X_0 = D_x/2$, $k_B T_e = 1.0 \text{ eV}$, $k_B T_i = 0.1 \text{ eV}$, 目标同位素离子 U^{235} 的质量 $m_i = 3.93 \times 10^{-25} \text{ kg}$, 蒸气原子密度 $n_a = 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 目标同位素的丰度 $c = 1\%$, 外加磁场 $B = 0$, 其中 k_B 是 Boltzmann 常数, T_e 和 T_i 分别是电子和离子的温度. 在激光选择性电离过程中, 设所有目标同位素全部被电离, 而所有非目标同位素则保持原子状态.

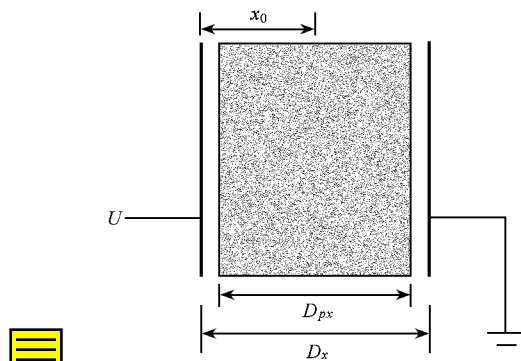


图 1 等离子体和收集板的几何尺寸

PIC-MCC 方法是一种粒子模拟方法,它把长期以来用于模拟无碰撞等离子体的 PIC 方法和模拟粒子碰撞的 Monte Carlo 方法结合起来,用来模拟考虑碰撞的带电粒子运动,这种方法对研究等离子体离子引出是非常适用的,得到了广泛的应用^[9,10].其模拟过程如图 2 所示.有关 PIC-MCC 的具体介绍,可以参见文献 [11,12].

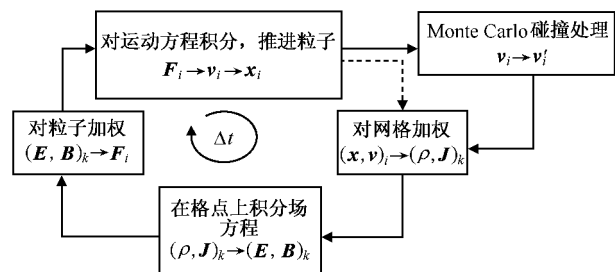


图 2 PIC-MCC 模拟的计算流程

就离子引出而言,离子和原子间的电荷交换是影响目标同位素离子引出的最重要的碰撞类型,所以在模拟中只考虑电荷交换.采用零碰撞技术^[13]来减少处理碰撞的计算量.电荷交换截面采用如下半经验公式^[14].

$$\sigma = (a - b \lg |\mathbf{v}|)^2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2. \quad (1)$$

3. 模拟结果及分析

目标同位素离子在引出过程中,与非目标同位素原子发生共振电荷交换,造成碰撞损失.引出的离子具有一定的能量,轰击收集板可以造成溅射损失.碰撞损失和溅射损失造成收集率下降.用 Trim 程序计算得到的单能离子束的射程分布和溅射系数如图 3、图 4 所示. Trim 程序用 Monte Carlo 方法模拟离子以及反冲原子在固体中的运动,采取了两个假设:一是靶原子晶格无序,二是只发生二体碰撞.有关离子与固体相互作用的详细内容以及 Trim 程序的介绍可参见文献 [15].

图 3 为 1, 2, 3 keV U^+ 离子入射 Cu 靶 U^+ 离子的垂直射程分布.在原子蒸气激光同位素分离工程中,离子引出电压在几百到几千伏特,引出离子在收集板中的射程很小,就在表面附近的十来个原子层中. U^+ 离子在 Al, Cu 和 U 收集板上造成靶原子溅射,图 4 为溅射产额与离子能量的关系.由图 4 可见,溅射产额随入射离子能量的增加而增加,尤其需要注意的是,1 keV 的 U^+ 造成 U 靶的溅射产额已经接近 1,

可以推测,在平行板静电场法中离子的溅射损失将是相当大的,如果引出离子的能量过高使得溅射产额大于 1,则无法收集到目标同位素离子.

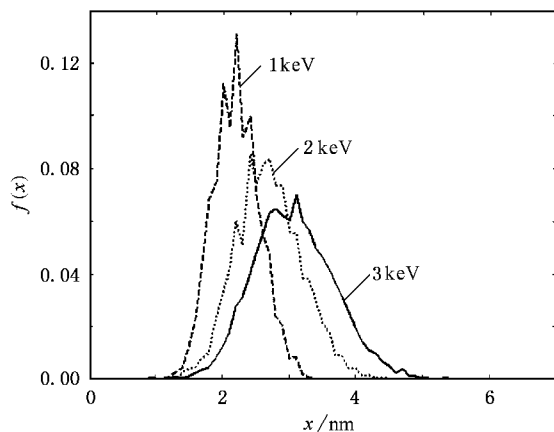


图 3 离子的射程分布

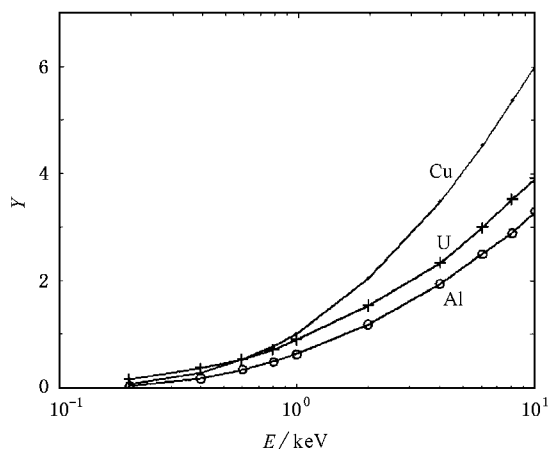


图 4 溅射产额 Y 随入射离子能量 E 的变化关系

3.1. 引出离子的能量分布和角度分布

由于 U^{235} 离子在引出过程中与 U^{238} 原子发生电荷交换,所以引出的离子既有 U^{235} ,又有 U^{238} .图 5 所示为左边收集板引出离子的能量分布 $f(E)$ 和角度分布 $f(\theta)$.外加电压仍然为 -500 V ,角度 θ 为引出离子的入射方向与收集板法向的夹角.从图 5 中可以看出, U^{235} 和 U^{238} 的能量分布和角度分布都是相似的,由此可以推断电荷交换主要发生在鞘层以外的部分,因为如果发生在鞘层,电荷交换后 U^{238} 的初始能量是蒸发原子的能量,几乎为零,那么引出的 U^{238} 离子能量应该比 U^{235} 低一些.从引出离子的角度分布看,它们几乎是垂直入射的.从能量分布看,能量

集中分布在 500 eV 左右且有一定的宽度,这是因为在引出过程中等离子体的电位有变化.图 6 所示为引出离子数量分别为 10%、50% 和 90% 时极板间的电位分布.从图 6 可以看出,在等离子体内部没有电位差,保持了电中性,屏蔽了外部电场,而在左右极板附近都存在鞘层,鞘层内部有电位差,电中性被破坏,离子在鞘层电场的作用下被引出.随着离子的引出,等离子体的密度逐渐降低,鞘层逐渐变厚.

文献 [16] 用 Monte Carlo 方法模拟了高压加速辉光放电离子鞘层离子轰击靶阴极的能量分布和角度分布,当靶室气压较低时得到的结果与本文的结果相似,主要是小角度入射,能量分布比较窄.当靶室气压较高时,能量分布和角度分布都比较宽,这是因为气压较高时原子密度较大,离子与原子发生弹性散射的概率增加.本文的模拟情况气压极低,所以弹性散射可以忽略.

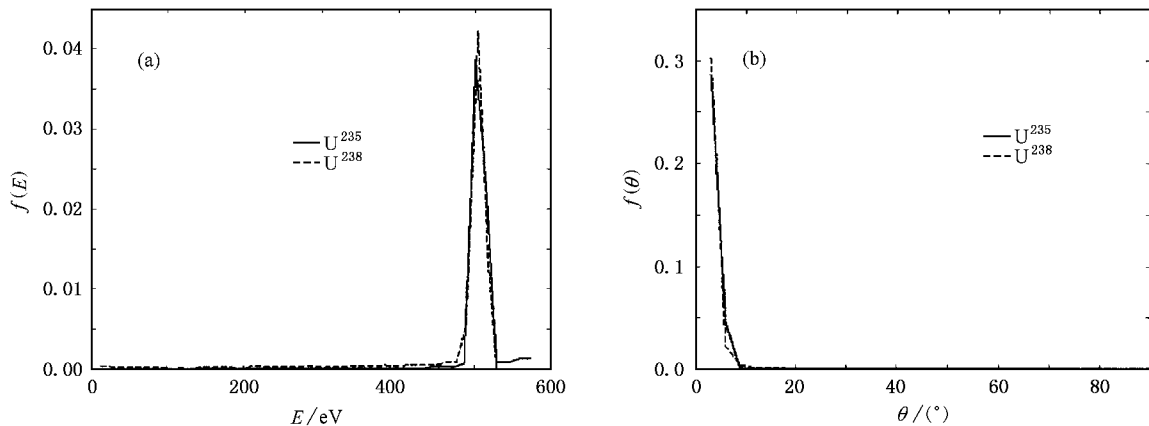


图 5 左收集板引出离子的能量分布和角度分布 (a)为能量分布 (b)为角度分布

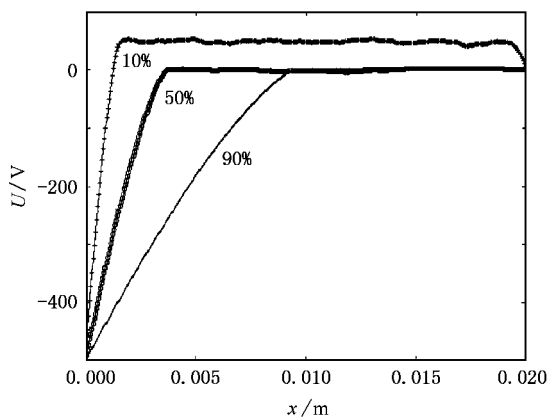


图 6 极板间的电位分布

从图 6 可以看出,右边收集板附近也存在鞘层,所以右边收集板也有离子引出.当前的模拟条件下,左右两边收集板引出量分别占 56.7% 和 43.3%,右边收集板引出了相当多的离子.模拟表明右边引出量随着等离子体密度的降低而降低,并且随外加电压的增大而降低.右边收集板引出离子的能量分布和角度分布如图 7 所示(包括 U^{235} 和 U^{238}).从图 7 可见,右边收集板引出的离子能量很低,大多在溅射阈能以内,角度分布则很宽,因为右边鞘层电位差很

小,引出离子获得的能量小.右边收集板引出离子的能量大多在溅射阈能之内,所以溅射产额很小利于收集.用 Trim 程序计算,左边收集板引出离子的溅射产额为 0.377,右边仅为 0.01(靶材为 U).

3.2. 不同引出电压的影响

表 1 是不同外加电压下静电场法离子引出和收集的数据,其中 η_L 表示左边引出离子所占的比例; $\eta_R = 1 - \eta_L$ 表示右边引出离子所占的比例; S_L 表示左边引出离子的碰撞损失率; S_R 表示右边的碰撞损失率,碰撞损失率定义为引出离子中 U^{238} 离子所占的比例,左右收集板收集到 U^{235} 的丰度分别为 $1 - S_L$ 和 $1 - S_R$; $S = S_L \times \eta_L + S_R \times \eta_R$ 表示总的碰撞损失率; Y_L 表示左边收集板的溅射产额; Y_R 表示右边收集板的溅射产额; $C_L = (1 - S_L) \times (1 - Y_L)$ 表示左边的收集率; $C_R = (1 - S_R) \times (1 - Y_R)$ 表示右边的收集率,收集率定义为收集到的 U^{235} 离子占被激光电离 U^{235} 的比例; $C = \eta_L \times C_L + \eta_R \times C_R$ 表示总的收集率.如果引出电压太高以致左边收集率为负值,则总的收集率 $C = \eta_R \times C_R$; t 表示引出时间(如果没有特殊说明,引出时间表示 99% 的离子被引出所需

要的时间) 单位为 μs .

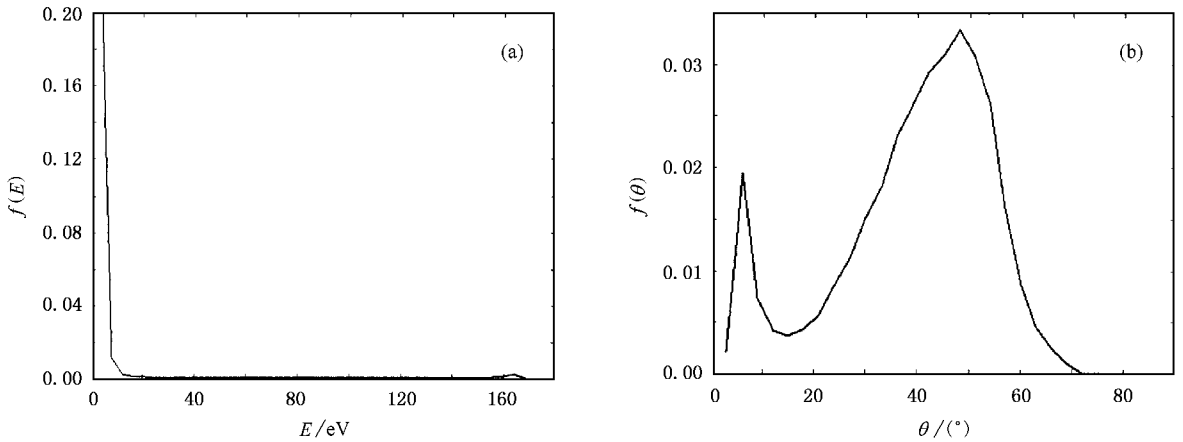


图 7 右收集板引出离子的能量分布和角度分布 (a)为能量分布 (b)为角度分布

表 1 不同引出电压下静电场法离子引出的数据

U_{dc}/V	$\eta_L/\%$	$\eta_R/\%$	$S_L/\%$	$S_R/\%$	$S/\%$	Y_L	Y_R	$C_L/\%$	$C_R/\%$	$C/\%$	$t/\mu\text{s}$
-500	56.7	43.3	19.6	16.5	18.3	0.377	0.01	50.1	82.6	64.2	122
-1000	58.9	41.1	15.7	9.2	13.0	0.754	0.019	20.7	89.1	48.9	61.6
-2000	64.0	36.0	14.9	7.4	12.2	1.334	0.077	-28.4	85.5	30.7	35.5
-3000	66.4	33.6	12.9	5.3	10.3	1.761	0.151	-66.3	80.4	27.0	24.3

从表 1 中的数据可以看出,随着引出电压的增加,引出时间减少,离子在快速引出过程中发生电荷交换的概率减少,所以碰撞损失率降低;另外,左边引出离子增加,右边引出离子减少,但因为引出离子的能量增加,所以溅射产额增加,使得收集率反而降低,在 -2000 和 -3000 V 的情况下左边收集板已经收集不到目标离子.从左右两边的比较看,左边虽然引出的离子多一些,但是由于左边的鞘层较厚,离子在引出过程中发生电荷交换的概率较大,所以左边的碰撞损失率较高,而且左边引出离子的能量远远高于右边引出的离子,所以左收集板的溅射损失远远大于右收集板.引出时间和收集率存在着矛盾, -500 V 的收集率较高,但是引出时间太长.激光照射等离子体的重复时间大概是 $50 \mu\text{s}$,所以引出时间应该控制在 $50 \mu\text{s}$ 以内,以避免重复照射.加大引出

电压可以缩短引出时间,降低碰撞损失率,但是引出离子的能量增加将增大溅射损失,使总收集率下降.

3.3. 电子温度的影响

电子和离子的温度对离子引出都有影响,但是电子温度的影响要显著得多.这是由于电子的质量远远小于离子,温度增加热运动加剧,电子更容易逃逸,使得屏蔽作用减弱导致加速电场增加,引出时间减少,离子电荷交换概率减小,碰撞损失率降低.但是离子的温度不宜增加,因为增加离子温度对减少引出时间作用甚微.根据(1)式,离子热运动速度增加导致电荷交换概率增大,使得碰撞损失率增加.表 2 给出了不同电子温度下各种引出和收集的数据,引出电压为 $U_{dc} = -1000 \text{ V}$.

表 2 不同电子温度下的引出和收集参数

$k_B T_e/eV$	$\eta_L/\%$	$\eta_R/\%$	$S_L/\%$	$S_R/\%$	$S/\%$	Y_L	Y_R	$C/\%$	$t/\mu\text{s}$
0.1	60.4	39.6	19.6	15.1	17.8	0.754	0.019	44.9	76.8
1.0	58.9	41.1	15.7	9.2	13.0	0.756	0.020	48.9	61.6
2.5	57.4	42.6	14.6	7.8	11.7	0.759	0.021	50.6	47.1

从表 2 中可以看出, 增加电子温度能显著地减少引出时间, 降低了碰撞损失率, 而引出离子的平均能量并没有多大改变, 所以溅射损失率增加很少, 使得总的收集率增大. 可见, 增大电子温度是减少引出时间, 同时增加收集率的有效方法.

表 3 $U_{dc} = -2 \text{ kV}$ 不同初始等离子体密度下引出和收集参数

$N/10^{17} \text{ m}^{-3}$	$\eta_L/\%$	$\eta_R/\%$	$S_L/\%$	$S_R/\%$	$S/\%$	Y_L	Y_R	$C_L/\%$	$C_R/\%$	$C/\%$	$t/\mu\text{s}$
0.1	71.3	28.7	0.9	0.3	0.7	1.26	0.232	-25.8	76.6	22.0	5.39
1	64.0	36.0	14.8	7.4	12.2	1.334	0.077	-28.4	85.5	30.8	35.5
5	57.0	43.0	46.3	45.1	45.8	1.324	0.028	-17.4	53.4	22.9	63.3
10	54.8	45.2	64.0	65.9	64.9	1.324	0.022	-11.7	33.3	15.1	65.8

采用静电场法收集, 引出时间和碰撞损失将随等离子体密度增加而增加, 收集率随密度的增加而降低. 但是在密度很小的情况下, 尽管碰撞损失率非常小, 收集率反而更低. 原因有两方面: 一方面, 当密度很低时左边引出离子的比例 η_L 比较大, 在引出电压为 2 kV 的情况下左边引出离子的溅射系数大于 1, 左边收集不到, 而密度低时右边收集比例 η_R 较小, 所以收集率低. 另一方面, 密度很低时右边引出离子的溅射系数比较大, 这是由右边引出离子的能量分布决定的, 如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 等离子体密度低时右边引出离子中能量较高的所占比例

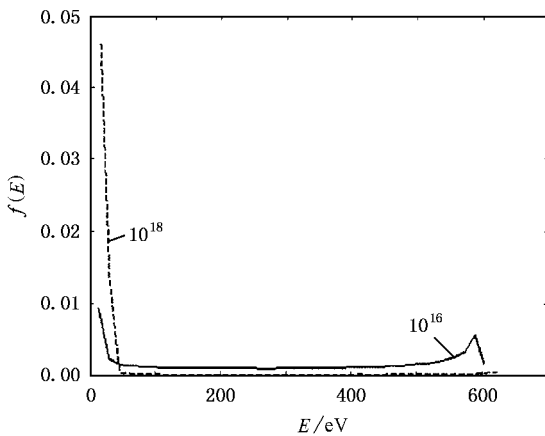


图 8 不同初始等离子体密度下右边引出离子的能量分布

3.4. 初始等离子体密度的影响

平行板静电场法等离子体初始密度对引出和收集的影响如表 3 所示. 引出电压为 -2 kV, N 表示初始等离子体密度.

较大, 所以溅射系数大. 而引出离子的能量是由电场决定的, 电位分布如图 9 所示(该电位分布图表示在引出了 10% 的离子时刻极板间的电位分布), 等离子体密度低, 屏蔽作用弱, 右收集板附近的鞘层电位降较大, 引出离子在电场的作用下获得的能量就较高.

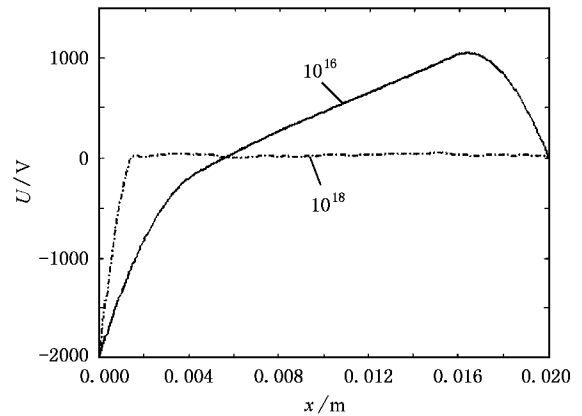


图 9 不同初始等离子体密度下极板间的电位分布

3.5. 同位素丰度的影响

同位素丰度是目标同位素原子占总原子的比例. 对于平行板静电场法, 丰度的影响如表 4 所示, 其中 c 表示丰度, 引出电压为 -2 kV.

表 4 $U_{dc} = -2 \text{ kV}$ 不同丰度的引出和收集参数

$c/\%$	$\eta_L/\%$	$\eta_R/\%$	$S_L/\%$	$S_R/\%$	$S/\%$	Y_L	Y_R	$C_L/\%$	$C_R/\%$	$C/\%$	$t/\mu\text{s}$
1	64.0	36.0	14.8	7.4	12.2	1.334	0.077	-28.4	85.5	30.8	35.5
5	55.9	44.1	14.0	12.2	13.2	1.36	0.027	-31.0	85.4	37.6	66.3
10	53.9	46.1	13.0	11.6	12.3	1.373	0.019	-32.5	86.7	39.9	63.4
20	52.5	47.5	10.7	10.3	10.5	1.38	0.013	-33.9	88.5	42.1	54.8
30	52.0	48.0	8.6	8.3	8.4	1.39	0.012	-35.7	90.6	43.5	48.3
40	51.8	48.2	7.4	7.1	7.2	1.39	0.01	-36.1	92.0	44.4	43.9

随着丰度的增加,引出时间先增加后减少,这是因为引出离子与中性原子碰撞的概率减小,使得已经获得加速的离子能量损失较少、碰撞损失率降低,收集率增加.总之,收集高丰度同位素离子更容易一些.

3.6. 对平行板静电场法的改进

平行板静电场法易于实现,是目前常用的一种方法.从上述模拟可以看到,用平行板静电场法引出,当引出电压为 -3000 V 时引出时间较短,为 $24.3\ \mu\text{s}$.但是从左边引出的离子能量太高、溅射损失太大,以致收集不到离子.现在对平行板静电场法进行改进.如图 10 所示,在两个收集板电极中间加入多孔的栅极.几何参数如下:栅极距离左右两个收集板的距离分别为 0.5 和 $2.0\ \text{cm}$,等离子体的宽度为 $2.0\ \text{cm}$,充满栅极和右收集板之间的空间.栅极电位 $-3000\ \text{V}$,左右收集板的电位均为零.通过栅极电位将离子引出,引出的离子在栅极与左收集板之间减速,使得到达左收集板的离子能量降低,从而降低溅射损失率,提高收集率.

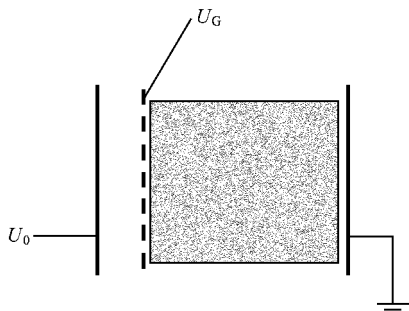


图 10 改进的平行板静电场法

电位分布的模拟结果如图 11 所示,图中的曲线分布表示引出离子占初始总离子数的 10% , 50% 和 80% .从电位分布图可以看出,栅极和右极板附近存在鞘层,离子被鞘层中的电场加速后穿过多孔栅极,从栅极引出的离子在飞向左极板的过程中被电场减速.

电子、 U^{235} 离子和 U^{238} 离子的数量(归一化因子为初始电子数量)随时间的变化如图 12 所示.电子和 U^{235} 离子的数量在引出的初期迅速减少,然后缓慢减少直到全部引出,这与没有改进的平行板电场法是相同的.不同的是 U^{238} 离子数量的变化,经历了很长的时间 U^{238} 离子也没有完全引出,而是达到饱和.由上述对没有改进的平行板电场法的模拟结果

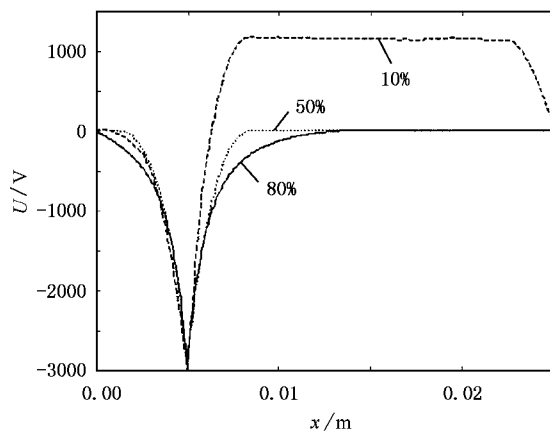


图 11 极板间的电位分布

可知,如果引出电压为 $-3000\ \text{V}$,那么有一部分引出离子的能量低于 $3000\ \text{eV}$.对于改进的情况,从栅极中引出的离子有一部分能量低于 $3000\ \text{eV}$,那么这些离子就难以克服减速电场的作用而无法到达左边的收集板,这些离子将在栅极两边来回运动而无法引出.经过一段时间后这些离子就全部发生了电荷交换,变成 U^{238} 离子.

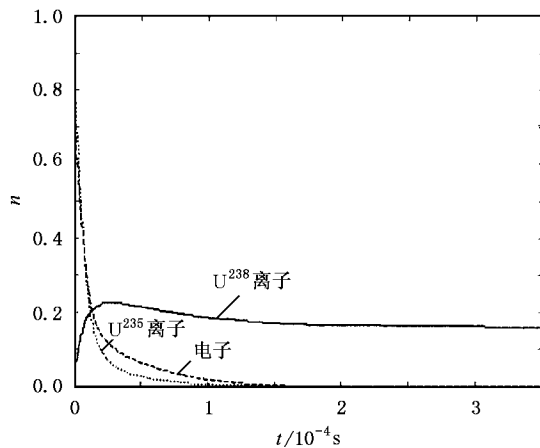


图 12 电子、 U^{235} 离子和 U^{238} 离子的数量随时间的变化

离子到达左收集板时的能量分布和角度分布如图 13 所示.改进前,在 $-3000\ \text{V}$ 的引出电压下,大部分离子的能量分布在 $3000\ \text{eV}$ 附近,溅射产额大于 1,无法收集引出的离子.改进后,大部分离子的能量分布在 $500\ \text{eV}$ 以内,大大降低了溅射损失,提高收集率.而从右边收集离子的能量分布与未改进的相似,引出离子的能量较低,溅射损失很小.

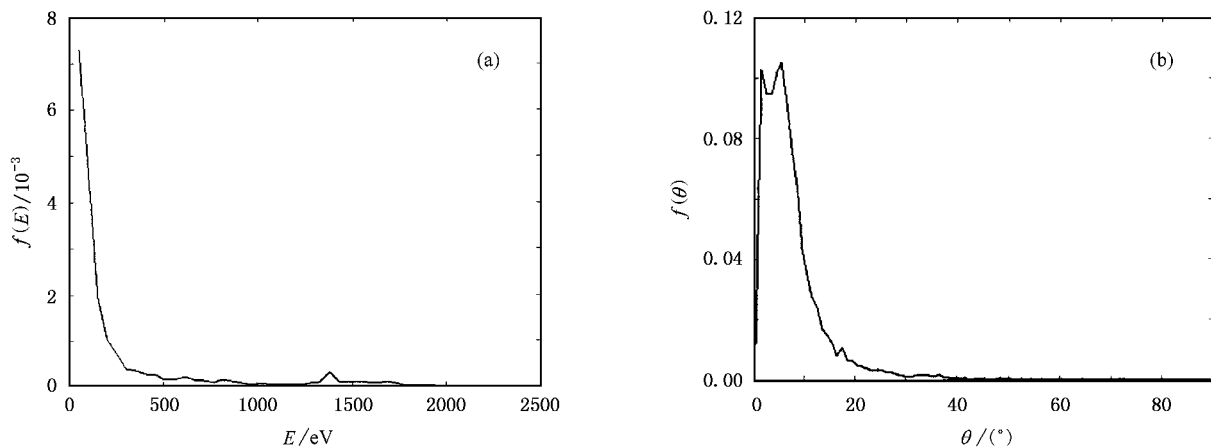


图 13 左边引出离子的能量分布和角度分布 (a)为能量分布 (b)为角度分布

以上所述的改进还存在两个问题. 一是离子的引出率比较低. 从栅极引出的一部分离子由于能量较低, 无法到达收集板, 所以不能引出. 引出时间一般要控制在 $50 \mu\text{s}$ 左右. 按现在的模拟条件, $50 \mu\text{s}$ 引出率为 76.8%. 如果用改进前的平行板电场法, $50 \mu\text{s}$ 时离子已经几乎完全引出. 虽然如此, 经过改进后的平行板电场法收集率还是得到了极大的提高. 改进后左右两个极板的电位均为零, 可设法在左收集板上加上一个负电位 U_0 , 提高引出率. 另一个问题是离子在栅极和左极板之间是减速运动的, 速度较小电荷交换截面就比较大, 使得碰撞损失率增大. 解决的办法是在引出系统的下面加上挡板, 使得蒸气原子几乎不能进入栅极和左极板之间的空隙.

当 U_0 分别为 -100 , -500 和 -1000 V, 左边引出离子的能量分布如图 14 所示. 负电位 U_0 的绝对值越大引出离子的平均能量越高, 溅射损失就越多, 但是离子引出率却增加了.

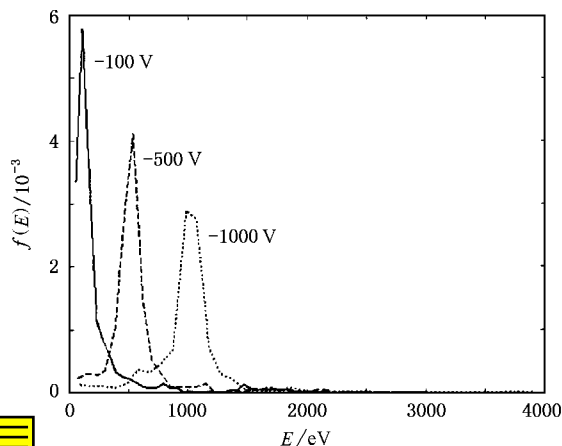


图 14 不同 U_0 时 左边引出离子的能量分布

为了选择合适的 U_0 , 表 5 给出了离子引出和收集的参数, 其中 E 表示引出率. 由表 5 可见, 增加 U_0 后引出率有明显的提高, 但是溅射损失的增加也很明显. U_0 过高收集率反而下降, 当 U_0 为 -100 V 时收集率为最高.

表 5 不同 U_0 时的引出和收集参数

U_0/V	$\eta_L/\%$	$\eta_R/\%$	$S_L/\%$	$S_R/\%$	$S/\%$	Y_L	Y_R	$C_L/\%$	$C_R/\%$	$C/\%$	$E/\%$
0	33.0	67.0	11.7	11.2	11.3	0.147	0.130	75.4	77.3	58.9	76.9
-100	47.0	53.0	13.5	8.0	10.6	0.149	0.159	73.6	77.4	64.5	85.3
-300	51.7	48.3	14.0	7.2	10.7	0.282	0.167	61.7	77.3	62.1	89.6
-500	54.0	46.0	13.3	7.0	10.4	0.435	0.164	49.0	77.7	56.5	90.7
-800	56.3	43.7	13.3	6.4	10.3	0.644	0.166	30.9	78.1	47.4	92.0
-1000	58.5	41.5	13.8	6.5	10.7	0.775	0.167	19.4	77.9	40.6	92.9

4. 结 论

用 PIC-MCC 方法模拟了平行板静电场法原子蒸气激光同位素分离工程中激光等离子体的引出,重点分析离子在收集过程中造成的溅射损失,从而得到各种不同引出条件下的收集效率.

1) 加大引出电压将缩短引出时间,减小碰撞损失,增加溅射损失.

2) 增加电子温度显著地减少了引出时间,降低了碰撞损失率,溅射损失率增加很小,使得总的收集率增大.

3) 初始等离子体密度增加会使引出时间、碰撞损失率增加,收集率降低.但并不是初始等离子体密度越小越好,因为初始密度太低会使得产额下降、单位成本增加.所以对于一个引出系统,有一个最佳的初始密度.

4) 引出目标同位素丰度较高的离子可以使碰撞损失率降低,收集率增加.

5) 对平行板电场法进行改进后可以大大提高收集率.

总之,影响离子引出和收集的因素很多,需要加以综合考虑,选择合适的参数和方法.

-
- [1] Yan M , Ying C T , Wang D W *et al* 1996 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Tech.)* **36** 5 (in Chinese) [严 敏、应纯同、王德武等 1996 清华大学学报(自然科学版) **36** 5]
- [2] Yan M , Ying C T , Wang D W *et al* 1998 *Chin. J. Nucl. Sci. Eng.* **18** 68 (in Chinese) [严 敏、应纯同、王德武等 1998 核科学与工程 **18** 68]
- [3] Xiong J G , Wang D W 1999 *J. Tsinghua Univ. (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]
- [4] Xiong J G , Wang D W 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2420 (in Chinese) [熊家贵、王德武 2000 物理学报 **49** 2420]
- [5] Xiong J G , Wang D W 2000 *Atomic Energy Science and Technology* **34** 307 (in Chinese) [熊家贵、王德武 2000 原子能科学与技术 **34** 307]
- [6] Zhu H L , Wang D W 2002 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Tech.)* **42** 587 (in Chinese) [朱红莲、王德武 2002 清华大学学报(自然科学版) **42** 587]
- [7] Zhu H L , Wang D W 2001 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Tech.)* **41** 15 (in Chinese) [朱红莲、王德武 2001 清华大学学报(自然科学版) **41** 15]
- [8] Zhu H L , Wang D W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1338 (in Chinese) [朱红莲、王德武 2002 物理学报 **51** 1338]
- [9] Wu Y Q , Han S S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 915 (in Chinese) [吴衍清、韩申生 2000 物理学报 **49** 915]
- [10] Xu H , Chang W W , Zhuo H B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 818 (in Chinese) [徐 涵、常文蔚、卓红斌 2004 物理学报 **53** 818]
- [11] Birdsall C K , Langdon A B 1985 *Plasma Physics via Computer Simulation.* (New York : McGraw-Hill Inc.)
- [12] Shao F Q 2002 *Plasma Particle Simulation* (Beijing : Science Press) (in Chinese) [邵福球 2002 等离子体粒子模拟(北京:科学出版社)]
- [13] Vahedi V , Surendra M 1995 *Comput. Phys. Commun.* **87** 179
- [14] Grossman M W , Shepp T A 1991 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19** 1114
- [15] Ziegler J F 1985 *The Stopping and Range of Ions in Solids* (New York : Pergamon)
- [16] Li B G 1997 *J. Hebei Univ.* **3** 17 (in Chinese) [李百贵 1997 河北大学学报 **3** 17]

Ion extraction and collection studied by parallel electrode method on considering sputtering loss

Xie Guo-Feng Wang De-Wu Ying Chun-Tong

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

(Received 13 July 2004 ; revised manuscript received 22 December 2004)

Abstract

One-dimensional ion extraction and collection is studied by parallel electrode method using particle in cell-Monte Carlo collision(PIC-MCC) simulation. The energy and angle distribution of extracted ions is recorded and the sputtering loss is calculated. The results show that the extraction time and collision loss are decreased by increasing extraction voltage , but the sputtering loss increases and collection ratio decreases. The extraction time is decreased and the collection ratio is increased by increasing electron temperature , while the extraction time is increased and the collection ratio is decreased by increasing initialized plasma density ;and the collision loss is decreased and the collection ratio is increased , if the target isotope concentration is higher. Improving the parallel electrode method leads to decreasing sputtering loss and increasing collection ratio greatly.

Keywords : atom vapor laser isotope separation , ion extraction , sputtering

PACC : 2842H , 5265