物理学报 Acta Physica Sinica



基于气体放电等离子体射流源的模拟离子引出实验平台物理特性 陈坚 刘志强 郭恒 李和平 姜东君 周明胜

Physical characteristics of ion extraction simulation system based on gas discharge plasma jet

Chen Jian Liu Zhi-Qiang Guo Heng Li He-Ping Jiang Dong-Jun Zhou Ming-Sheng

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 67, 182801 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180919 在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180919 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I18

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

甚高频激发容性耦合氩等离子体的电子能量分布函数的演变

Evolution of electron energy distribution function in capacitively coupled argon plasma driven by very high frequency

物理学报.2016, 65(5): 055203 http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.055203

光化学反应中氩气对激发态锂原子猝灭速率研究

Quenching rate of laser-excited lithium atoms with argon molecules in photochemical reaction 物理学报.2014, 63(3): 032801 http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.032801

应用于碳同位素丰度测量的激光频率刻度系统研究

Laser frequency scale system in carbon isotopic abundance measurement 物理学报.2013, 62(24): 242801 http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.242801

大气压冷等离子体射流灭活子宫颈癌 Hela 细胞

Inactivation of Hela cancer cells by an atmospheric pressure cold plasma jet 物理学报.2013, 62(6): 065201 http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.065201

氦-氧等离子体针灭活肺痨549细胞

Inactivation of A549 cancer cells by a helium-oxygen plasma needle 物理学报.2012, 61(18): 185203 http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.185203

基于气体放电等离子体射流源的模拟离子引出 实验平台物理特性^{*}

陈坚1) 刘志强2) 郭恒1) 李和平1) 姜东君1) 周明胜1)

1) (清华大学工程物理系,北京 100084)

2) (华北理工大学机械工程学院, 唐山 063210)

(2018年5月8日收到;2018年6月5日收到修改稿)

离子引出过程是原子蒸气激光同位素分离中非常重要的物理过程之一,而其中关键的等离子体参数(等离子体初始密度和电子温度等)均会对离子引出特性产生影响.基于千赫兹电源驱动的氩气高压交流放电等离子体射流源,建立了离子引出模拟实验平台-2015 (IEX-2015),开发了用于诊断氩等离子体参数的"碰撞-辐射"模型,对等离子体射流区的电子温度和电子数密度等关键参数进行了测量.结果表明,电源输入功率和驱动频率以及工作气体流量均会对等离子体射流区的电子温度和数密度产生影响;在真空腔压强为10⁻² Pa量级下,射流区电子数密度和电子温度的可调参数范围分别为10⁹—10¹¹ cm⁻³和1.7—2.8 eV,这与实际离子引出过程中的等离子体参数范围相近.在此基础上,开展了不同引出电压、极板间距和电子数密度条件下初步的离子引出实验,所得到的离子引出电流变化规律亦与实际原子蒸气激光同位素分离中的离子引出特性定性一致.上述研究结果验证了在IEX-2015上开展离子引出模拟实验的可行性,为后续深入开展离子引出特性的实验研究准备了良好的条件.

关键词:离子引出,低气压放电,非平衡态等离子体,"碰撞-辐射"模型 PACS: 28.60.+s, 52.50.Dg, 52.30.-q DOI: 10.7498/aps.67.20180919

1引言

相比于传统的电磁法、气体扩散法以及离心分 离法,原子蒸气激光同位素分离法作为一种新的同 位素分离方法日益受到学术界和产业界的广泛关 注.如图1所示,原子蒸气激光同位素分离过程的 基本原理是利用线宽极窄的激光选择性激发、光电 离金属蒸气中的目标同位素原子,随后利用外加电 磁场引出目标同位素离子至收集板,从而实现对目 标同位素的分离与富集^[1].受限于激光器的脉宽以 及光电离后金属等离子体自身的衰亡,是否能够实 现快速、高效地引出所需的目标同位素离子将在很 大程度上决定整个原子蒸气激光同位素分离过程 的效率.因此,系统研究光电离后不同参数对离子 引出过程的影响机制及其引出特性,对于提高整个 原子蒸气激光同位素分离技术的性能具有重要的 意义.



图 1 原子蒸气激光同位素分离过程示意图 Fig. 1. Schematic of the atomic vapor laser isotope separation process.

http://wulixb.iphy.ac.cn

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 11775128) 资助的课题.

[†]通信作者. E-mail: liheping@tsinghua.edu.cn

^{© 2018} 中国物理学会 Chinese Physical Society

目前的理论与实验研究结果均表明,离子引 出过程中的诸多因素均会对离子引出特性(引出时 间、引出效率、引出电流以及引出离子入射能量等) 产生显著的影响,这些因素包括等离子体中心区的 电子数密度以及电子温度[2-7]、外加引出电压的幅 值与类型^[8-11]、引出极板的位型^[12,13]、目标同位 素离子与非目标同位素原子间的共振电荷转移过 程以及离子在极板表面发生的溅射效应[14-16]等. 在实际的离子引出过程中需要依靠光电离金属原 子的方式产生等离子体,因此,实际的离子引出实 验装置需要配备特定的激光器,这不仅导致整个系 统结构复杂、建造成本高,而且影响离子引出特性 的某些关键参数(如等离子体初始密度和电子温度 等)的可变范围小.为了解决上述问题,国内外研 究者开始发展利用电离气体或光电离低沸点、易电 离金属蒸气的方法产生等离子体来代替实际应用 的激光光电离等离子体进行离子引出过程的模拟 实验研究. 比如, Matsui 等^[17] 采用电感耦合等离 子体 (inductively coupled plasma, ICP) 模拟光电 离等离子体源,采用氙(Xe)作为工作介质,在真空 腔压强为4×10⁻⁴ Torr (约为5.3×10⁻² Pa)、射流 区电子温度和数密度分别为7-12 eV和(0.2-1.4) ×10¹⁰ cm⁻³、离子收集段磁场强度为5×10⁻³ T的 条件下,研究了射频共振条件下的离子引出特性; 文献 [18] 采用光电离空气的方法, 在真空腔压强为 1 Pa的条件下产生了电子数密度在 10⁸—10⁹ cm⁻³ 的等离子体,研究了离子引出过程中等离子体的扩 散效应以及收集板上的电荷分布; 而文献 [8,19] 则 采用光电离钡(Ba)金属蒸气的方法产生了金属等 离子体,但所产生的等离子体由于受到激光器功率 的限制,其电子数密度相对较低(钡等离子体密度 均低于10⁹ cm⁻³).

本文采用低气压千赫兹高压交流放电等离子体射流源,建立了离子引出模拟实验平台-2015 (ion extraction simulation experimental platform-2015, IEX-2015),获得了低气压下稳定放电的氩 等离子体射流源,开发了用于诊断氩等离子体射流 参数的"碰撞-辐射"模型以及相应的计算机软件, 开展了等离子体射流特性的实验测量.在此基础 上,进行了离子引出特性的初步实验研究,获得了 不同等离子体参数和引出参数对离子引出特性的 影响规律,验证了该实验平台用于模拟离子引出特 性研究的可行性,为后续深入研究离子引出过程的 影响机制以及发展新的离子引出方法奠定了良好 的条件.本文首先讨论模拟离子引出实验平台的设 计思路、主要组成部分和基本结构以及等离子体射 流气体温度、电子温度和数密度等关键参数的实验 诊断方法和诊断系统; 然后,分别给出等离子体射 流特性的实验测量结果以及不同参数下的离子引 出特性;最后,给出本文研究得到的主要结论,并简 要讨论后续研究需要解决的主要问题.

2 实验平台的建立

2.1 IEX-2015的设计思路和整体构造

IEX-2015设计的基本思路是:第一,采用气体 放电的方式产生稳定的等离子体射流作为模拟离 子引出的等离子体源,通过改变等离子体发生器的 几何结构设计、电源驱动频率、波形和幅值、工作气 体化学成分和流量以及真空腔压强等参数来调节 等离子体射流区气体温度、电子温度和数密度等关 键参数;第二,通过在离子引出区域设计不同的引 出极板几何构型、加载不同频率和幅值的引出电压 以及引入外加磁场等方式,在较大的等离子体参数 范围和引出参数条件下系统地研究引出极板附近 等离子体鞘层的时空演化特性,以及带电粒子的非 平衡输运特性,进而为优化现有离子引出方法的工 作参数、甚至发展新的离子引出方法提供理论上的 指导.

IEX-2015的整体结构如图2所示,该平台主 要由真空系统、等离子体发生器、离子引出系统 以及测量系统等组成. 首先, 等离子体工作气体 (本文研究采用氩气)在发生器内被电离,形成等 离子体射流进入离子引出区域; 然后, 在外加电磁 场的作用下等离子体射流区的离子被引出至收集 板,形成引出电流信号,由霍尔型电流探头(Tektronix TCP0030A)测量并送入示波器(Tektronix DPO4034)记录.如图2所示,真空系统主要包括 真空腔、真空泵组以及真空规管; 主腔室设计为圆 筒形结构, 腔室侧壁布置有连接等离子体发生器、 离子引出极板、薄膜规、电离规以及步进电机等多 个设备的法兰接口, 亥姆霍兹线圈沿支架缠绕于主 腔室外壁,线圈内通入直流电时可在腔体中心(引 出区域)产生0-3×10⁻³T的均匀磁场. 副腔室为 长方形结构,其上部与主腔室相连,下部则通过两 个KF250法兰与两套真空泵组相连.每套真空泵组



图 2 (a) IEX-2015 示意图, (b) 真空腔内部及 (c) 实验平台实物照片 Fig. 2. (a) Schematic of the IEX-2015, (b) pictures of the chamber interior, and (c) experimental platform.

包括1台抽速为18 L/s的TRP-60型前级机械泵 与1台抽速为1600 L/s的JTFB-1600型分子泵,主 腔体外壁安装4套真空规管测量装置,包括:一 台CDG025D型薄膜规真空计(INFICON),其量 程为1.0×10⁻⁴—13.3 Pa;一台ZJ-27型电离规 真空计(成都睿宝电子科技有限公司),其量程为 1.0×10^{-5} —4 Pa;两台ZJ-52T型电阻规真空计(成 都睿宝电子科技有限公司),量程均为0.1— 10^5 Pa. 真空系统所能达到的极限真空度为 8.0×10^{-4} Pa, 在进气放电条件下的真空度可达 10^{-2} Pa.

离子引出系统主要包括离子引出电极、控制 极板位型的支撑板、导轨、步进电机和控制系 统.如图2(b)所示,平板型引出电极板面尺寸为 250 mm×150 mm,支撑板用于支撑与控制两块平 板电极位型,两极板间夹角的调节范围为0°—60°. 支撑板下端与导轨相连,通过步进电机运动控制系 统在引出过程中控制两极板之间的间距(间距可调 范围为0—140 mm).

2.2 千赫兹高压交流放电等离子体射流源 的设计

在实际的离子引出过程中,激光光电离所产生 的金属等离子体具有尺寸和电子数密度变化范围 大以及电子温度偏低等特点,且整个引出系统在高 真空度的环境下工作.因此,气体放电等离子体源 的设计需考虑以下两方面:第一,能够实现在低气 压、小流量进气条件下的稳定放电;第二,能够通 过调节发生器电极间距、工作气体流量和电源输入 功率等参数,实现在相对较宽的参数范围内对等离 子体电子温度和数密度等关键参数的调节.基于 此,本文采用同轴型等离子体发生器结构设计(见 图3),其中圆锥型内电极为功率电极,内外电极间



图 3 同轴型等离子体发生器结构 (a) 示意图; (b) 实物照片 Fig. 3. (a) Schematic and (b) picture of the co-axial-type plasma generator structure.

的轴向距离可根据不同的实验条件在0—7 mm之 间调节;采用千赫兹交流电源作为激励源,采用高 纯氩气(纯度为99.999%)作为等离子体工作气体; 将氩气沿切向注入等离子体发生器内部,当其流经 内外电极间的环形缝隙时,在外加高压交流电场的 作用下电离形成等离子体,并从发生器喷口喷出形 成等离子体射流;通过调节电源驱动频率和输入功 率以及工作气体流量,从而获得稳定的气体放电等 离子体射流.

2.3 基于氩等离子体"碰撞-辐射"模型的 光谱诊断方法

2.3.1 氩等离子体"碰撞-辐射"模型

一个等离子体体系,其中发生着多种化学反应 动力学过程,而且这些化学反应动力学过程中存在 多种碰撞与辐射跃迁过程^[20].考虑多种跃迁过程, 并通过求解粒子数平衡方程,就可以得到等离子 体中各能态粒子数密度的分布,这一模型称为"碰 撞-辐射"模型,其中每种粒子的数密度均满足粒子 数平衡方程^[21],即

$$\frac{\mathrm{d}N_i}{\mathrm{d}t} = -N_i \sum_{j(\neq i)} R_{ij} + \sum_{j(\neq i)} N_j R_{ji},$$
$$i, j = 1, 2, \cdots, \qquad (1)$$

式中下标*i*和*j*代表能级序号; *N*为粒子数密度; *t*为时间; *R_{ij}*为由*i*能态跃迁至*j*能态的速率常数. 对于低气压放电等离子体而言, 化学反应达到平衡 的特征时间与等离子体特征时间相比较短, 因此, 可以认为在测量过程中等离子体粒子数密度达到 稳态,此时

$$\frac{\mathrm{d}N_i}{\mathrm{d}t} = -N_i \sum_{j(\neq i)} R_{ij} + \sum_{j(\neq i)} N_j R_{ji} = 0,$$

$$i, j = 1, 2, \cdots.$$
(2)

由于:第一, 氩等离子体中处于 1s 能级的氩 原子数密度较高, 且参与多种化学反应;第二, 2p 能级到 1s 能级的辐射跃迁强度较大, 即 2p 能级对 氩等离子体的辐射性质影响较大;第三, 虽然存 在 3p 能级向其他能级的跃迁, 但在背景气压较低 (<1 Pa)时, 鉴于处于 3p 以上能级的氩原子影响较 小^[22], 可将其合并为一体进行研究.因此, 本文研 究氩等离子体"碰撞-辐射"模型所需考虑的粒子种 类以及相应的化学反应动力学过程分别如表 1 和 表 2 所列.

表1 氩等离子体 "碰撞-辐射" 模型中所考虑的粒子种类 Table 1. Species considered in collisional-radiative model for argon plasmas.

粒子种类	含义
Ar (gs)	基态氩原子
Ar $(1s_5)$ -Ar $(1s_2)$	1s5-1s2 激发态氩原子
Ar $(2p_{10})$ -Ar $(2p_1)$	2p10-2p1 激发态氩原子
Ar $(2s3d)$	2s和3d能级组成的等效能级氩原子
Ar $(3p)$	3p能级氩原子
Ar^+	氩离子
Ar_2^*	氩的准分子
e	电子

根据表2的化学反应动力学过程,结合方程(2),可以给出各粒子的质量守恒方程,即

表 2 氩等离子体 "碰撞 -辐射" 模型中所考虑的化学反应动力学过程 Table 2. Reaction pathways considered in collisional-radiative model for argon plasmas.

反应动力学	反应过程	速率常数影响因素
电子碰撞激发	$\mathrm{e} + \mathrm{Ar}(i) \xrightarrow{R_{ij}^{\mathrm{e}}} \mathrm{e} + \mathrm{Ar}(j) \ (i < j)$	$T_{ m e}$
电子碰撞退激发	$\mathbf{e} + \operatorname{Ar}(j) \xrightarrow{R_{ji}^{\mathbf{e}}} \mathbf{e} + \operatorname{Ar}(i) \ (i < j)$	$T_{ m e}$
原子碰撞跃迁	$\operatorname{Ar} + \operatorname{Ar}(j) \xrightarrow{R_{ji}^{\operatorname{atom}}} \operatorname{Ar} + \operatorname{Ar}(i)$	$T_{ m g}$
电子碰撞电离	$\mathrm{e} + \mathrm{Ar}(i) \xrightarrow{K_i} \mathrm{e} + \mathrm{e} + \mathrm{Ar}^+$	$T_{ m e}$
潘宁电离	$\operatorname{Ar}(i) + \operatorname{Ar}(j) \xrightarrow{K_{ij}} e + \operatorname{Ar} + \operatorname{Ar}^+$	$T_{ m g}$
三体复合	$e + e + Ar^+ \xrightarrow{\beta} e + Ar(i)$	$T_{ m e}$
自发辐射	$\operatorname{Ar}(j) \xrightarrow{A_{ij}} h u + \operatorname{Ar}(i)$	
与腔壁碰撞散射	$K_{ m wall}$	$D,T_{ m g}$
自吸收作用	η_{ij}	$D, N_{\text{low}}, \Delta \nu$

$$\left(\sum_{j(\neq i)} R_{ij}^{e} n_{e} + \sum_{j < i} \eta_{ij} A_{ij} + \sum_{j(\neq i)} R_{ij}^{atom} N_{g} + K_{i} n_{e} + \sum_{j(\neq i)} K_{ij} N_{j} \right) N_{i} + K_{wall} N_{i}$$
$$= \left(\sum_{j(\neq i)} R_{ji}^{e} n_{e} + \sum_{j > i} \eta_{ji} A_{ji} + \sum_{j(\neq i)} R_{ji}^{atom} N_{g} \right) N_{j}$$
$$+ \beta_{i} N_{i} n_{e}^{2}, \quad i, j = 2, 3, \cdots.$$
(3)

在表2及方程(3)中, R_{ij}^{e} 为电子碰撞激发 (i < j)与退激发(i > j)的反应速率; R_{ij}^{atom} 为 原子碰撞跃迁速率; K_i 为电子碰撞电离速率; K_{ij} 为潘宁电离速率; β 为三体复合速率; A_{ji} 为自发 辐射跃迁速率; K_{wall} 为粒子与腔壁碰撞散射速率; η_{ij} 为由于等离子体的自吸收作用所导致的光子发 射逃逸系数; N_{low} 为低能级粒子数密度; $\Delta \nu$ 为谱 线展宽; D为等离子体特征尺度. 从方程(3)以及 表2可以看出, 化学反应动力学速率常数与电子温 度(T_e)、电子数密度(n_e)或气体温度(T_g)相关, 因 此, 当给定以上3个参数时, 即可确定不同种类粒 子的数密度.

从实验测量的角度来看,一方面,当氩原子从 i能级跃迁到j能级并发出波长为 λ_{ij} 的光时,其谱 线强度 $I_{ij} \propto N_i A_{ij} \eta_{ij}$;若假定激发态的粒子跃迁 速率 (A_{ij}) 与等离子体光子发射逃逸系数 (η_{ij}) 均 为常数,则两条不同谱线的强度比正比于不同激 发态粒子数密度(N_i). 另一方面, N₂的谱线带系 $(C^3\Pi_n \rightarrow B^3\Pi_o)$ 与等离子体的转动能级有关,因此, 本文采用 SPECAIR 软件将 5% N₂-Ar 混合气体放 电波长 $\lambda = 337$ nm 附近的谱线进行拟合^[23],可近 似获得等离子体射流区的气体温度(Tg). 基于此, 在已知气体温度(Tg)的条件下,通过求解方程(3) 即可获得不同谱线强度比在ne和Te空间的等值线 分布; 通过将实验测量得到的等离子体发射光谱的 谱线强度比与上述理论计算得到的谱线强度比在 ne和Te空间的等值线分布进行对比,即可反推得 到对应的电子温度(T_e)和电子数密度(n_e).

2.3.2 实验测量方法

本文采用八通道光纤光谱仪(Avantes Ava Spec-3648)测量等离子体的发射光谱.为了获得 射流区等离子体参数的空间分布,在等离子体射流 和光纤探头之间放置了焦距 f 为250 mm的凸透镜, 并将光纤探头固定在定位精度为0.01 mm的二维 精密平移台上(GCD-202100M和GCD-203100M, 大恒新纪元科技股份有限公司), 对应的光谱测量的空间分辨率为3.0 mm (见图4).



Fig. 4. Schematic of experimental light path.

图5为基于"碰撞-辐射"模型,利用谱线强 度比法测量等离子体电子温度与电子数密 度的实验流程图. 以实验工况(真空腔压强 $p = 6.0 \times 10^{-2}$ Pa, 等离子体工作气体总质量 流量 $\dot{m} = 71.4 \text{ mg/min}$,高压交流电源驱动频率 f = 26 kHz 以及电源输入功率 $P_{in} = 11.7$ W,内 外电极间距s = 1.0 mm)为例,首先采用光纤光 谱仪测量得到等离子体射流区距发生器喷嘴出 口 4.5 cm 的射流几何轴线上P点(见图6(a),其 中照片的曝光时间 $t_{exp} = 1/30$ s)的发射光谱 图(见图6(b)); 然后, 采用SPECAIR软件对波长 $\lambda = 337 \text{ nm}$ 附近的谱线进行拟合, 可得射流区的气 体温度为 $T_{g} = 600 \text{ K}$ (见图 6 (c)); 将 $T_{g} = 600 \text{ K}$, $p = 6.0 \times 10^{-2}$ Pa代入依据方程(3)所编写的计 算机程序,即可得到谱线强度比 $r_1 = I_{750.4}/I_{912.3}$ 和 $r_2 = I_{750.4}/I_{738.4}$ (其中 $I_{750.4}$, $I_{912.3}$ 以及 $I_{738.4}$ 分别代表氩等离子体特征谱线 $\lambda = 750.4, 912.3$ 以 及738.4 nm的谱线强度, r_1 为谱线 $\lambda = 750.4$ nm 与 $\lambda = 912.3$ nm的谱线强度比, 而 r_2 则为谱线 $\lambda = 750.4 \text{ nm} 与 \lambda = 738.4 \text{ nm} 的强度比) 在 (T_e,$ $n_{\rm e}$)空间的等值线分布图. 在图6(d)中,每一组 $(n_{\rm e}, T_{\rm e})$ 都对应特定的谱线强度比 r_1 和 r_2 ,这表 征着当等离子体射流区的电子密度和电子温度 一定且其中各能态粒子数密度达到稳定时,不 同能态的粒子间跃迁所对应的发射光谱的强度 比也将保持恒定. 根据图6(b)的实验测量结果 可知 $r_1 = 0.31$ 和 $r_2 = 3.85$,于是,将 $r_1 = 0.31$ $和 r_2 = 3.85 代入图_6(d) 中进行插值, 即可得到$ 对应的等离子体电子温度和电子数密度分别为 $T_{\rm e} = 2.37 \text{ eV} \, \pi n_{\rm e} = 1.99 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}, \, \text{m} \underline{\mathbb{S}} \, \frac{6}{6} \, (d)$ 中的A点.本文在该工况下重复进行了3次实验 测量,所得到的等离子体电子温度和电子数密度 分别为 $T_{\rm e} = 2.46 \pm 0.09$ eV和 $n_{\rm e} = (1.98 \pm 0.1) \times$ 10¹¹ cm⁻³, 所对应的标准偏差均小于 3.6%.



图 5 谱线强度比法测量等离子体电子温度和电子数密度流程图

Fig. 5. Flow chart of electron temperature and number density measured by line intensity ratio method.



图 6 (a) 等离子体射流照片与光谱测量点 *P* 位置示意图; (b) *P* 点等离子体射流发射光谱图; (c) 对应的射流区等离子体气体温度 SPECAIR 软件拟合结果; (d) 谱线强度比 *r*₁ = *I*_{750.4}/*I*_{912.3} 和 *r*₂ = *I*_{750.4}/*I*_{738.4} 在 (*T*_e, *n*_e) 空间的分布以及等离子体电子温度和电子数密度的确定

Fig. 6. (a) Image of the plasma jet and schematic of the measurement point P; (b) emission spectrum of the plasma jet at point P; (c) derived plasma gas temperature using SPECAIR in jet region; (d) distributions of line intensity ratios $r_1 = I_{750.4}/I_{912.3}$ and $r_2 = I_{750.4}/I_{738.4}$ in the (T_e, n_e) space and the determined electron temperature and number density.

3 氩等离子体射流关键参数的实验 测量

本节将系统地研究不同实验工况(如等离子体 工作气体流量、电源输入功率和驱动频率等)对氩 等离子体射流特性的影响规律,以期进一步验证 低气压千赫兹高压交流放电等离子体射流源用于 离子引出模拟实验的可行性. 在本节的射流特性 测量中,如无特别说明,均将测量点固定在距等离 子体发生器喷嘴出口 4.5 cm 的射流几何轴线处 (如 图 6 (a) 所示的 P 点),发生器内外电极间距离固定 为 s = 2.0 mm.

图7给出了当 \dot{m} = 71.4 mg/min, f = 26 kHz,

 $p = 6.0 \times 10^{-2}$ Pa, $t_{exp} = 1/30$ s时, 等离子体射流 区电子温度与电子数密度随输入功率的变化规律. 从图7可以看出: 当输入功率 Pin < 9.0 W时, 电源 输入功率对电子数密度与电子温度的影响较小;随 着功率的进一步增大(Pin > 9.0 W), 射流区的电子 数密度与电子温度均随着电源输入功率的增加而 显著增大. 一方面, 这是由于随着电源输入功率的 持续增大,电子的平动动能增大,电子温度升高;而 获得更多能量的电子与中性原子之间的激发与电 离过程也会更为剧烈,从而使得电子数密度亦随之 升高. 另一方面, 电子温度与电子数密度随电源输 入功率的快速增加可能与发生器内部放电模式的 转变有关. 但在目前的实验条件下, 很难从真空腔 外部观察到等离子体发生器内部放电模式随电源 输入功率的变化过程. 我们将在今后的实验中设计 专门的装置进行等离子体放电模式的实验观察和 分析.



图 7 等离子体射流区 P 点电子温度和电子数密度随输入功率的变化

Fig. 7. Variations of electron temperature and number density with power input at point P in plasma jet region.

图8给出了当 \dot{m} = 71.4 mg/min, P_{in} = 10.0 W, $p = 6.0 \times 10^{-2}$ Pa, $t_{exp} = 1$ s时,等离子体射流区 P点电子温度与电子数密度随电源驱动频率的变化规律. 由图8可以看出,电子温度随电源驱动频率的增加逐渐下降,而电子数密度则在整体上呈现上升的趋势. 其可能的原因是,随着电源驱动频率的增加,等离子体中电子与中性粒子间的激发与电离更为剧烈,从而导致等离子体中电子数密度随之增大;同时,由于电子在与中性粒子的碰撞过程中不断损失能量,导致电子温度随之减小.

图 9 给出了当 $P_{in} = 10.0$ W, f = 26 kHz, p = 0.3 Pa, $t_{exp} = 1$ s时, 等离子体射流区电子 温度与数密度随氩气质量流量的变化规律.本文通 过改变与分子泵入口相连的挡板阀的开合程度,实 现对不同气体流量下真空腔压强的控制.从图9可 以看出,随着氩气质量流量从35.7 mg/min升高至 160.6 mg/min,电子数密度从2.06×10¹⁰ cm⁻³ 增 加至5.05×10¹⁰ cm⁻³,增长幅度较小,而电子温度 略有下降.这是因为当氩气质量流量升高时,氩原 子密度将会上升,与电子之间发生碰撞电离的概率 增大,从而引起电子数密度的升高.整体而言,氩 气质量流量对于射流特性的影响较小.另外,对比 图8和图9可以看到,真空腔的环境压强对等离子 体射流特性的影响并不十分明显,这可能与从发生 器喷嘴喷出的等离子体射流受到两平行放置的收 集板的约束作用,从而使得不同环境气压下两极板



图 8 等离子体射流区 P 点电子温度和电子数密度随电源驱动频率的变化





图 9 等离子体射流区 P 点电子温度和电子数密度随氩气 质量流量的变化

Fig. 9. Variations of electron temperature and number density with argon mass flow rate at point P in plasma jet region.

间等离子体射流的发散程度基本相同有很大的关 系.在今后的研究中,我们将通过实验与数值模拟 相结合的手段进一步对该现象进行深入的分析;在 本项目后续的实验研究中,将通过调节氩气质量流 量的方法来调控离子引出系统的压强水平.

为了进一步研究引出区域等离子体参数空间 分布的均匀性,图10给出了在 $\dot{m} = 71.4 \text{ mg/min}$, $P_{\rm in} = 10.0 \text{ W}, p = 6.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}, f = 26 \text{ kHz}$ 件下, z = 1.5, 3.0和4.5 cm 处(此处定义z轴正方 向为沿等离子体发生器几何轴线目指向射流流动 的方向; z = 0 对应于等离子体发生器喷嘴出口 处), 等离子体电子温度和电子数密度沿垂直于引 出极板方向(y方向)的分布曲线. 从图 10 可以看 出以下两点: 第一, 等离子体射流中心区的电子数 密度随着距离发生器出口轴向距离的增加而显著 降低, 由 z = 1.5 cm 处的 7.73 × 10¹⁰ cm⁻³ 减小至 z = 4.5 cm 处的 $3.10 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 降幅达 60%; 同 时,电子温度也会有所下降,但下降幅度相对较小, 由 2.63 eV 下降至 2.45 eV, 降幅约为 7%; 第二, 在 同一轴向位置处,从等离子体射流中心沿垂直于引 出极板的方向,越靠近引出极板,电子数密度也越 低,最大下降幅度达到75%,且电子数密度分布关 于通过射流几何轴线的对称面呈现对称分布;同 时,电子温度亦随着靠近引出极板而降低,但下降 幅度较小,整体分布比较均匀.

表3列出了IEX-2015与其他公开报道的离子

引出模拟实验平台之间的参数对比. 从表3可以 看出:目前采用气体放电方式的离子引出模拟实 验装置相对较少,相比ICP型放电实验装置^[17], IEX-2015所产生的等离子体射流电子温度和电子 数密度均与真实的离子引出过程所产生的等离子 体参数更为接近,且等离子体参数的变化范围也 比较宽;IEX-2015所产生的等离子体射流的电子 数密度范围基本覆盖了常见的光电离空气^[18]和金 属原子蒸气^[8,19]所产生的等离子体密度范围;但 IEX-2015所产生的等离子体射流的电子温度较真 实离子引出过程中的等离子体电子温度偏高,而且 产生等离子体的真空腔压强也同样偏高,而光电离 模拟离子引出装置^[19]在这两方面的参数则相对好 一点,这也是本文后续仍需深入开展的工作.



图 10 等离子体射流区电子温度和电子数密度的空间分布 Fig. 10. Spatial distributions of electron temperature and number density in plasma jet region.

		表 3	不同	离子引出模打	以实验平台_	上等离	子体关键参	数的对比		
Table 3.	Comparisons	of key p	olasma	parameters	on differen	t ion	extraction	simulation	experimental	platforms

			实验平台			
	IEX-2015	Matsui 等 ^[17]	曹宗亮等 [18]	Yamada 等 ^[8]	Majumder 等 ^[19]	
国家	中国	日本	中国	日本	印度	
工质	Ar	Xe	Air	Ba	Ba	
电离方式	容性放电	ICP	光电离	光电离	光电离	
$n_{ m e}/{ m cm}^{-3}$	$10^9 - 10^{11}$	$10^9 1.4 \times 10^{10}$	$10^8 - 10^9$	$\sim 10^9$	$10^6 - 10^7$	
$T_{\rm e}/{\rm eV}$	1.7 - 2.8	7 - 12	—	1.06	0.54	
p/Pa	$\sim 10^{-2}$	$5.3. \times 10^{-2}$	1.0	$\sim 10^{-4}$	—	

4 不同引出参数对离子引出电流的 影响

图 11 给出了 $n_{\rm e} = 7.57 \times 10^{10}$ cm⁻³, $T_{\rm e} =$ 1.78 eV, $p = 8.8 \times 10^{-2}$ Pa, $\dot{m} = 107.1$ mg/min 时离子引出电流(*I*_E)随引出电压(*U*)和极板间距 (*d*)的变化规律. 从图11可以看出: 当极板间距 一定时,离子引出电流随着引出电压的增大而增 大;而当引出电压一定时,离子引出电流则随着 极板间距的增大而减小. 这是因为当极板间距 一定时,随着引出电压的升高,束缚于两引出极 板间的等离子体中的带电粒子所受到的电场力 亦随之增大,从而导致离子引出电流的增大;相 反,当引出电压一定、极板间距增大时,离子所受 到的电场力会减小,从而使得离子引出电流随之 减小.



图 11 离子引出电流随引出电压和极板间距的变化 Fig. 11. Variations of ion extraction current with externally applied voltage and electrode gap spacing.

图 12 给出了 $T_{\rm e} = 1.78$ eV, $p = 8.8 \times 10^{-2}$ Pa, $\dot{m} = 107.1$ mg/min, d = 10 cm 时,离子引出电流 ($I_{\rm E}$)随射流中心区电子数密度和引出电压(U)的变 化规律. 从图 12 可以看出:在引出电压保持不变的 条件下,随着射流中心区等离子体电子数密度的升 高,离子引出电流随之增大.上述参数(包括引出 电压、引出极板间距和电子数密度)对于离子引出 电流的影响规律与文献中所报道的实际的激光光 电离离子引出过程^[6,7]定性一致,这也进一步验证 了本文建立的气体放电等离子体射流源代替激光 光电离等离子体源进行离子引出模拟实验研究的 可行性.





Fig. 12. Variations of ion extraction current with electron number density.

5 结 论

本文以原子蒸气同位素分离法中的离子引出 过程为研究背景,建立了基于千赫兹高压交流气 体放电等离子体射流源的IEX-2015;发展了用于 诊断射流区电子温度和数密度的氩等离子体"碰 撞-辐射"模型,对不同工况下的等离子体射流特 性进行了实验研究;基于此,开展了离子引出特性 的初步实验.本文主要得到以下结论.

1) 采用本文同轴型放电结构, 可以在真空腔压 强约为10⁻² Pa下获得均匀、稳定的等离子体射流; 等离子体电子温度和数密度等关键参数的变化范 围较ICP型气体放电等离子体源更宽, 且与实际的 激光光电离等离子体源特性也更为接近.

2) 电源输入功率和驱动频率以及等离子体工 作气体 (本文为氩气) 质量流量均会对射流区电子 温度与数密度产生影响.其中,电子数密度相比于 电子温度随上述参数变化的幅度更大.一方面,随 着电源输入功率的逐渐增大,电子将首先从外电场 获得能量,使得电子温度升高;同时,电子与中性 原子间的碰撞也变得更为频繁,从而导致电子数密 度随之升高.另一方面,随着电源驱动频率的升高, 电子与中性原子间的碰撞变得更加剧烈,在使得电 子数密度升高的同时,电子自身的能量损失增大, 从而导致电子温度降低.

3)初步的离子引出实验所得到的引出电压、极 板间距以及等离子体密度对离子引出电流的影响 规律与实际的激光光电离离子引出特性定性一致, 从而验证了IEX-2015实验平台用于研究离子引出 过程的可行性.

本文开展了不同工况下氩气放电等离子体射 流区电子温度和电子数密度等关键参数变化规律 以及初步的静电场离子引出实验研究,着重验证了 IEX-2015实验平台用于离子引出模拟实验的可行 性.在今后的工作中,我们将继续深入开展不同放 电工质、不同环境压强以及不同引出参数下的离子 引出特性研究,从而为真实的激光光电离离子引出 方案设计提供理论上的指导.

参考文献

- [1] Letokhov V S 1977 Ann. Rev. Phys. Chem. 28 133
- [2] Chen F F 1982 Phys. Fluid 25 2385

- [3] Widner M, Alexeff I, Jones W D, Lonngren K E 1970 Phys. Fluid 13 2532
- [4] Okano K 1992 J. Nucl. Sci. Technol. 29 601
- [5] Yuan K X, Xu P F, Yu P Z, Wang J Y 1993 Chin. J. Atom. Mol. Phys. 10 2839 (in Chinese) [袁奎训, 徐品方, 俞沛增, 王金月 1993 原子与分子物理学报 10 2839]
- [6] Li H P, Wang P, Wang X, You W, Chai J J, Li Z Y 2015 High Voltage Eng. 41 2825 (in Chinese) [李和平, 王鹏, 王鑫, 尤伟, 柴俊杰, 李增耀 2015 高电压技术 41 2825]
- [7] Li H P, Wang X, Wang P, Chai J J, Li Z X 2016 High Voltage Eng. 42 706 (in Chinese) [李和平, 王鑫, 王鹏, 柴 俊杰, 李占贤 2016 高电压技术 42 706]
- [8] Yamada K, Tetsuka T, Deguchi Y 1990 J. Appl. Phys.
 67 6734
- [9] Nishio R, Yamada K, Suzuki K, Wakabayashi M 1995
 J. Nucl. Sci. Technol. 32 180
- [10] Yamada K, Tetsuka T 1994 J. Nucl. Sci. Technol. 31 301
- [11] Gundienkov V A, Tkachev A N, Yakovlenko S I 2004 Quantum Electron. 34 589
- [12] Yamada K, Tetsuka T, Deguchi Y 1991 J. Appl. Phys. 69 8064
- [13] Kurosawa H, Hasegawa S, Suzuki A 2002 J. Appl. Phys. 91 4818

- [14] Chen R 2005 M. S. Thesis (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [陈戎 2005 硕士学位论文 (北京: 清华 大学)]
- [15] Chen J, Xiang J Q, Guo H, Li H P, Chen X, Wang P, Chai J J, Jiang D J, Zhou M S 2017 *High Voltage Eng.*43 1830 (in Chinese) [陈坚, 向金秋, 郭恒, 李和平, 陈兴, 王鹏, 柴俊杰, 姜东君, 周明胜 2017 高电压技术 43 1830]
- [16] Zhidkov A G 1998 Phys. Plasmas 5 541
- [17] Matsui T, Tsuchida K, Tsuda S, Suzuki K, Shoji T 1996 *Phys. Plasmas* **3** 4367
- [18] Cao Z L, Zhang W X, Bao C Y 2007 J. Chin. Mass Spectr. Soc. 28 5 (in Chinese) [曹宗亮, 张微啸, 包成玉 2007 质谱学报 28 5]
- [19] Majumder A, Mago V K, Ray A K, Kather P T, Das A K 2005 Appl. Phys. B 81 669
- [20] Bates D R, Kingston A E, McWhirter R W P 1962 Proc. Roy. Soc. A 267 297
- [21] Slavík J 1991 Contrib. Plasma Phys. **31** 605
- [22] Crintea D L, Czarnetzki U, Iordanova S, Koleva I, Luggenhölscher D 2009 J. Phys. D: Appl. Phys. 42 045208
- [23] Donnelly V M, Malyshev M V 2000 Appl. Phys. Lett. 77 2467

Physical characteristics of ion extraction simulation system based on gas discharge plasma jet^{*}

Chen Jian¹⁾ Liu Zhi-Qiang²⁾ Guo Heng¹⁾ Li He-Ping^{1)†} Jiang Dong-Jun¹⁾ Zhou Ming-Sheng¹⁾

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

2) (College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

(Received 8 May 2018; revised manuscript received 5 June 2018)

Abstract

In an atomic vapor laser isotope separation process, the required isotope atoms are ionized selectively by a pulsed laser with a specific narrow line width, and then the produced isotope ions are extracted to the collected plates under an externally applied electromagnetic field. In the whole ion separation process, the ion extraction sub-process is one of the most important physical processes. Previous studies have shown that the key parameters of the laser-induced plasma, e.g., the initial electron number density and temperature, have a significant influence on the ion extraction features. In an actual isotope separation process, a specifically designed laser is necessary to produce the required isotope ions, which, however, leads the whole facility to have a very complicated structure, high capital cost, and especially, very narrow window of the key plasma parameters. These will, to some extent, limit a more in-depth investigation of the influences of the key plasma parameters on the ion extraction characteristics.

In this paper, an ion extraction platform (ion extraction simulation experimental platform-2015, IEX-2015) is developed on the basis of a gas discharge plasma jet driven by a kilo-hertz high-voltage power supply. And an argon plasma "collisional-radiative" model is established to measure the electron temperature and number density in the plasma jet region. The experimental results show that the power input and driving frequency of the power supply and the argon mass flow rate can all affect the electron temperature and electron number density. The measured variation ranges of the electron number density and temperature are 10^9-10^{11} cm⁻³ and 1.7–2.8 eV, respectively, under a chamber pressure on the order of 10^{-2} Pa, which are close to the parameter levels in the actual ion extraction process. Subsequently, the preliminary ion extraction experiments are conducted under different extraction conditions including different externally applied voltages, different electrode distances and different plasma densities. The experimental results are also qualitatively consistent with those in an actual ion extraction process. The preceding preliminary experimental results show that it is feasible to conduct the ion extraction simulation study on IEX-2015. This is very helpful for systematically studying the ion extraction characteristics under different operating conditions in our future research.

Keywords: ion extraction, low-pressure gas discharge, non-equilibrium plasma, collisional-radiative model

PACS: 28.60.+s, 52.50.Dg, 52.30.-q

DOI: 10.7498/aps.67.20180919

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11775128).

[†] Corresponding author. E-mail: liheping@tsinghua.edu.cn