

文章编号: 1007-4627(2017)02-0164-06

ECR离子源外电子注入技术研究

唐城^{1,2}, 钱程¹, 孙良亭¹, 张雪珍¹, 张子民¹, 李中平¹, 赵环昱¹, 卢旺¹, 赵红卫¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 使用电子枪对 ECR(Electron Cyclotron Resonance) 等离子体注入外电子束是继铝衬弧腔、偏压盘之后, 对等离子体电子的额外补充的又一种手段, 通过向弧腔中注入一定能量与流强的电子束, 以期提高引出束流的流强与电荷态。但由于该方法可控参数繁多, 经验积累与报道资料都很少, 且设计与操作远不如偏压盘等手段简便, 故一直未能得到深入研究。通过以三维仿真软件 CST 粒子工作室对注入到弧腔电子束的运动轨迹的模拟结果为依据、以 18 GHz ECR 蒸发冷却源为平台, 进行了 ECR 等离子体注入电子束的实验, 结果表明: 在一定实验条件下, 当注入电子束能量超过 1800 eV 时, 会产生一种引出的离子束流的激增现象。在这个现象中, 脉冲与直流的流强均比未注入电子时要高, 束流电荷态向高价方向移动, 且可通过控制实验条件来控制这种现象。最后对于这种电子并未通过共振面, 却能起到提高电荷态与流强的作用进行了分析与讨论, 并认为该现象在改善直流束与脉冲束性能的方面都有着积极的意义。

关键词: ECR 等离子体; 电子枪; 注入组件; 磁约束; 共振面

中图分类号: TL501.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.02.164

1 引言

ECR 离子源^[1]是现今世界上公认的产生强流高电荷态离子束流最有效的装置之一, 它的原理是在真空的离子源弧腔中产生等离子体, 由离子源注入与引出端的两组线包产生的轴向磁场实现轴向约束, 并由弧腔四周包围的永磁体产生的径向六极场实现径向约束, 两种场叠加成“最小 B ”磁场, 当等离子体中的电子在磁场中作拉莫回旋运动的频率与馈入弧腔的微波的频率相同时, 电子会因共振而被微波中垂直于磁场方向的电场加速获得能量, 高能电子与中性原子碰撞, 就会逐渐将其剥离为高电荷态离子, 在引出端通过吸极引出等离子体中扩散的高电荷态离子形成束流。综上所述, 要在 ECR 离子源中产生高电荷态离子的必需条件有:

首先, 起游离作用的电子能量至少高于此外层电子的离化能, 并且高能电子密度要足够高, 以保证中性原子与电子有较大的碰撞截面;

其次, 等离子体内中性原子的密度必须足够低, 使电荷交换效应的影响远低于电离过程的影响;

最后, 离子在等离子体中的约束时间要足够长, 使其有充分时间通过逐渐剥离达到需要的电荷态。

这里需要说明的是, 离子质量很大, 对于磁场约束不敏感, 且因其碰撞频率远大于自身作拉莫回旋运动的频率, 因此磁镜场并不能体现出对离子的约束作用, 而是通过约束电子来完成的: 对于较稀薄的等离子体, 电子被磁镜场约束在等离子体中心, 从而产生了一个负的势阱, 离子因为受势阱作用而被约束^[2-4]。

由以上可知, 电离中性原子的高能电子是由等离子体中低能电子通过 ECR 共振加热而来; 而低能电子本身又对维持等离子体势、等离子体约束和稳定性起着重要作用。故提高等离子体中的电子密度, 有利于引出束流向着高电荷态、强流的方向发展。正因为此, 铝弧腔和偏压盘技术才会在全世界范围内的 ECR 离子源上广泛应用。二者的原理都是通过安装高二次电子发射率的材料(如 Al, SiO₂ 等), 在粒子的轰击下产生大量二次电子, 从而实现对弧腔内等离子体的电子进行补充, 以达到改善束流强度和电荷态分布的目的。同理, 电子枪注入外电子的思路是通过电子枪注入电子使其通过 ECR 共振面, 部分电子得到微波加热获得能量, 从而直接成为可以游离中性原子的高能电子; 没有被加热的电子, 也可以作为低能电子参与到对离子的约束中来。不过在后面的实验与分析中可知, 电子枪安装在不同横向位置

收稿日期: 2016-06-01; 修改日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11305228)

作者简介: 唐城(1991-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 从事核能科学与工程研究; E-mail: chengtang@impcas.ac.cn.

时, 其注入的电子束在弧腔内的运动情况及对 ECR 等离子体所产生的影响都不相同, 不能简单地用 ECR 加热的原理来概括。

2 实验设计

要向 ECR 弧腔中注入外电子, 电子枪的选位、固

定、供电都是工程设计上的难点。我们为电子枪与实验平台——18 GHz 蒸发冷却源 (LECR4) 更好地配合工作, 在 LECR4 原有注入组件的基础上进行了改造, 因空间紧张, 取消了金属炉子, 电子枪及其安装结构如图 1 所示, 通过陶瓷与栅极后弯片的设计, 同时解决了固定、绝缘、供电的问题。

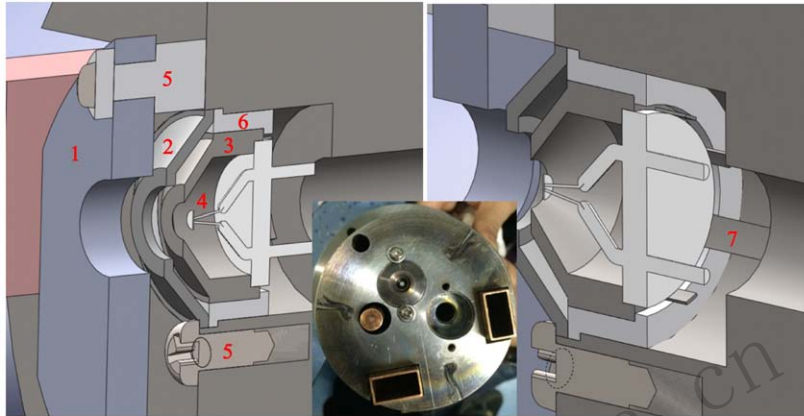


图 1 (在线彩图) 电子枪的结构与安装设计图及实物对比

其中: 1 为偏压盘, 2 为阳极, 3 为栅极, 限制阴极向前运动, 4 为阴极, 5 分别是偏压盘与塞铁间的绝缘陶瓷与螺钉, 共同限制阳极向前运动, 6 为栅极与塞铁间的绝缘陶瓷, 它同时限制阳极和栅极向后运动。右图中 7 为栅极后延伸出的弯片, 粗弯片向内弯, 紧贴阴极陶瓷盘并接触连接阴极的接线柱, 使栅极与阴极同电位, 细弯片向外弯, 紧贴 6 的陶瓷面且不会接触到塞铁, 两种弯片同时限制阴极向后运动。这些结构使电子枪得到很好的安装固定。中间为电子枪安装后的实物图(无偏压盘)。

我们选择钽热阴极作为实验用阴极, 直径 1.57 mm, 厚度 0.1 mm, 逸出功 4.1 eV, 额定加热电流 6.6 A, 此时的发射电流强度为 5 mA, 工作真空要求 1.33×10^{-3} Pa。热阴极的优点是安装思路简单, 只要提供加热电路就可工作; 缺点是打开与关闭需要等待其达到特定温度, 花费时间较长, 且阴极的高温会使附近真空组件出气, 影响实验结果, 需要等待出气完毕才可正常使用。而选择这种发射电流很小的电子枪型号一方面是由于保护等离子体稳定性的考虑, 太高的电子

束能量或流强都可能使 ECR 等离子体不稳定, 使电子注入产生与期望相反的效果; 另一方面则是由于等离子体的漏电流强度为毫安量级, 那么以同等量级的流强来进行补充是比较合理的。

接下来需要设计电子枪的位置。我们模拟计算出的 LECR4 的轴向与径向磁场分布如图 2 所示。此时为 LECR4 的最大工作磁场, 四个线包的电流密度分别 12.05, 12.05, 11.89, 15.06 A/mm²。为了对引出束流进行优化, 磁场的强度在实验中不是固定的。

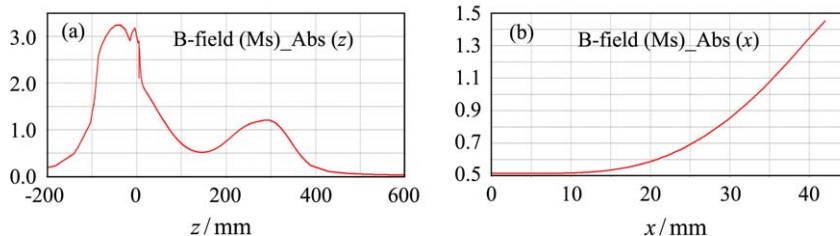


图 2 (在线彩图) LECR4 的轴向(a)与径向(b)磁场分布

对于横向位置的选取, 以本实验中磁感应强度与电子能量和质量来估算, 电子的运动轨迹被限制在磁力线周围 0.1 mm 的空间之内, 这相对于弧腔的径向尺

度 75 mm 来说, 是可忽略的小量(磁场中, 电子回旋半径为 $r = mv/eB$, B 越强, r 越小, 这是磁场对于带电粒子运动的横向约束), 即理论上磁力线能够通过共振

面时，此线约束的电子才能通过共振面。

为了验证这一点，我们在塞铁的前端面上取不同角向与径向的点放置电子枪，观察发射出的电子束在弧腔内的运动轨迹，将刚好不能通过共振面边缘的发射位置处的半径称为临界半径 r_0 。由于 min- B 磁场是 120° 旋转对称的磁场，而在 120° 的周期之内，又是轴对称场。因此至少在 60° 的范围之内，不同角向上的临界半径是不同的。我们以 10° 为单位，测量了横向上 60° 角向内的临界半径分布，记录数据如表 1 所列。

表 1 $0^\circ \sim 60^\circ$ 角向内临界半径分布

$\theta/^\circ$	r_0/mm	$\theta/^\circ$	r_0/mm
0	4.1	40	6.0
10	4.4	50	9.0
20	4.5	60	18.0
30	5.2		

根据对称性，我们将表 1 中的数据补全至全角度，在塞铁面上将这些点标示出来，并用平滑曲线相连，得到的就是塞铁面上，能够通过共振面的横向临界半径分布（第一象限内的红线为模拟测得的点相连而成），如图 3 所示。

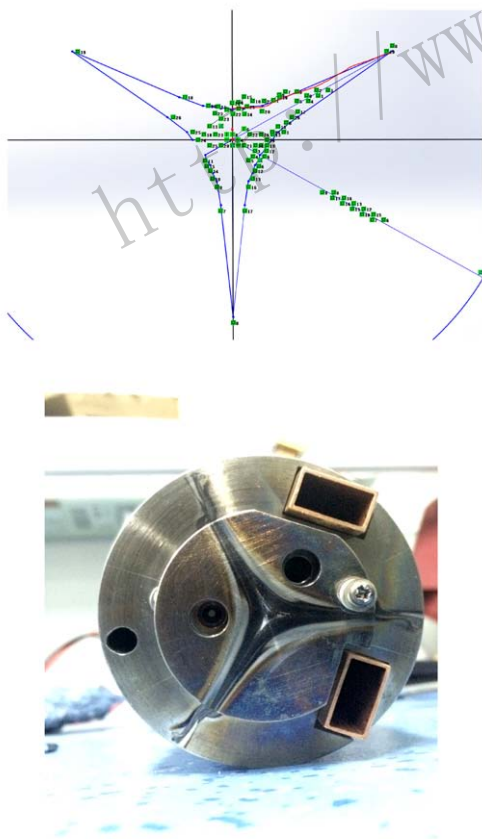


图 3 (在线彩图) 塞铁面上横向临界半径分布曲线与“三星”痕迹对比

要解释这个区域所代表的意义，还要从 min- B 的磁场构型说起，如图 4 所示。ECR 离子源所用的磁场之所以要在磁镜场的基础上叠加一个六极场，是为了克服等离子体的磁流体动力学不稳定性。对于在 min- B 磁场中的粒子约束，我们可以利用另一个绝热不变性方程来进行研究：

$$J = \oint v_{\parallel} dl = \left(\frac{2}{m} \right)^{1/2} \oint (W - \bar{\mu} B(l))^{1/2} dl,$$

这其中， $\bar{\mu} = W(l)/B(l)$ ，是该情况下的磁动量矩。对于一个具有一定 W/μ 值的粒子来说，它会在 J 值恒定的磁面上移动。所有相同 J 的磁力线拼成了某个 W/μ 值粒子所能运动的面。而由图 4 所示，叠加出的最小 B 磁场在轴向的部分区域磁感应强度较低，因此在这些方向上的磁压要弱于其他方向，这样的区域在等离子体中心呈圆形，而在两端被扭曲成为三角形，所以大部分逃逸出等离子体的粒子都倾向于穿过前后两个阴影所示的三角区域，这样的区域因类似星形，在离子源领域中被称为“三星”。我们在设计约束磁场时，也要考虑使这些 $J=c$ 的面不与材料壁相交，以免粒子碰壁损失^[5]。

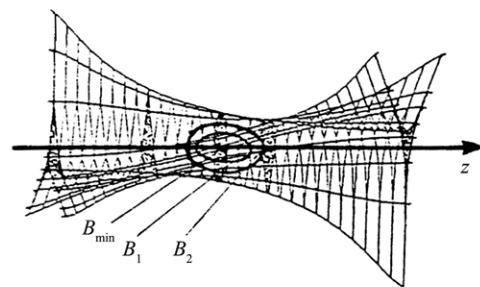


图 4 min-B 场型的磁力线分布

因此，可以得出结论：临界半径内的区域即是注入电子可以通过共振面的区域。但这也带来了一个很大的矛盾：三星区域内有很强的粒子轰击，阴极在此处根本不能正常工作。换句话说，我们虽然知道了能使电子束进入共振面的位置，但这些位置对于电子枪来说是禁区，任何种类的阴极放置在此处都会迅速因粒子轰击而损坏；但如果放置在三星以外，低能量的电子束将没有可能通过共振面。为保护阴极，仍需将电子枪的横向位置设计在三星区域之外，但还是要尽可能地接近轴心，所以就使安装电子枪的孔与三星边界的内凹处相切，具体见图 3 实物图所示。

电子枪的纵向位置的确定是从工程上、对磁场的影响上、对等离子体的影响上三个方面来考虑的。结合注入组件前端的结构图，如图 5 所示，我们将注入组件前端的区域分为三部分，标为 A, B, C。

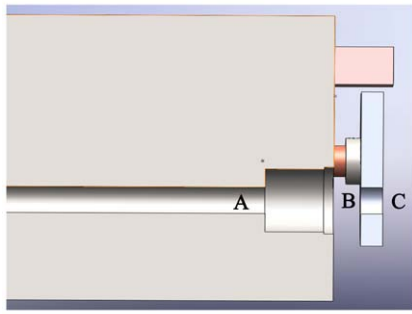


图 5 (在线彩图) 注入组件的前端结构示意图

若电子枪安装在 A 以及更偏左的区域, 即塞铁的内部, 会有两处不妥: 一是在工程上, 电子枪与塞铁的安装固定、接线绝缘都会变得很困难; 二是为了满足在塞铁内部安装枪体的需要, 必须在塞铁自前端至安装处开一个半径至少为 9 mm 的孔, 而塞铁对于 ECR 磁场来说, 还有很重要的激励作用, 在塞铁内挖空太多会使注入端磁场下降, 影响等离子体的约束; 若电子枪安装在 C 以及更偏右的区域, 即偏压盘外侧, 更靠近等离子体的区域, 除了同样不便于工程上的操作以外, 也会使电子枪失去偏压盘的保护, 虽然不在三星区域内, 但也会有来自少量粒子的照射, 直接轰击电极可能会损害电子枪的寿命。综上, 电子枪的纵向位置选在 B 区域, 阴极发射面选在塞铁端面外 1 mm 处。

实验时, 我们充入氩气为工作气体; 为防止高温下氧气毒化阴极, 不使用掺气效应; 为单纯分析电子枪的作用, 不对偏压盘供电; 馈入微波频率为 18 GHz, 功率为 100 W; 工作时弧腔内真空约为 10^{-4} Pa 左右; 实验中维持较低的阴极加热电流, 数值为 5.79 A, 此时对应的阴极发射电子束流强约为 0.01 mA。虽然弧腔在运行时的真空度满足钨阴极的要求, 但毕竟还有初始时的真空组件出气、少量的粒子轰击, 无法预料阴极此条件下的寿命。同时, 由于阴极处在强磁场环境下, 不加太高的电流可以防止安培力扭曲阴极和加热丝。

3 结论与分析

以轴向磁镜场的强度和注入电子束能量为控制的变量分别进行实验观察不同磁感应强度与不同电子束能量条件下注入电子束后, 引出束流的电荷态与流强变化。最终发现: 在四个产生轴向磁场的线包的电流密度分别为 10.04, 10.04, 9.91, 13.05 A/mm² 的条件下, 当注入电子束能量超过 1 800 eV 时, 引出的束流强度的数值开始出现一种脉冲式的“跳跃”, 如图 6 所示, 在这种现象产生时, 数值先迅速下降并上升分别形成一个谷值和峰值, 随后从峰值开始缓缓下降。下降到接近原值

时, 这种现象又会出现。随着电子束能量的不断升高, 这样的现象出现地愈发频繁, 但当电子能量超过 2 200 eV 时, 频繁发生的“跳跃”会演变成为等离子体的不稳定: 高价束流迅速降至接近零点, 总负载上升 1 ~ 2 个量级, 引出真空度迅速变差等等。

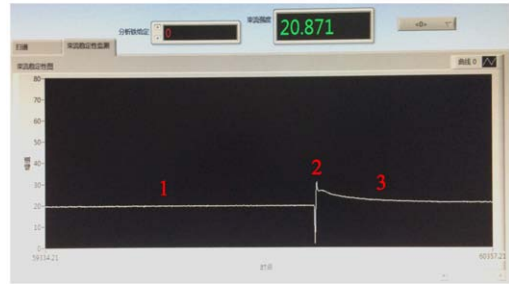


图 6 (在线彩图) “跳跃”现象的束流监控画面示意图

其中 1 为束流的平稳阶段, 此时流强、总负载、引出真空度等参数均十分稳定; 2 为束流出现谷值和峰值的阶段; 3 为束流从峰值开始缓慢下降的阶段, 一定时间后, 束流趋于稳定, 进入 1 阶段, 开始下一次“跳跃”现象。在此过程中, 1 阶段的稳定流强值相比于前一循环在不断上升, 整体引出束流增强, 电荷态向高价方向移动。

引起这种现象的原因和机理, 现在并不能确定, 但经反复试验, 可确定其两点规律:

(1) 这种束流的“跳跃”现象当且仅当电子束能量超过 1 800 eV 时才会出现;

(2) 在出现这种现象且等离子体仍维持在相对稳定状态时, 整体束流明显增强。

我们取阴阳极电势差为 2 000 V 时电子枪开启至 LECR4 稳定与关闭电子枪至 LECR4 稳定的谱图做对比, 如图 7 所示, 将两种状态下部分电荷态的流强数值列入表 2 作为对比, 可以明显看出, 不仅大部分电荷态的束流都有增强, 且越高价态的离子束流涨幅越大, 说明整体的电荷态分布已向高价方向移动, 这是我们非常乐见的结果。

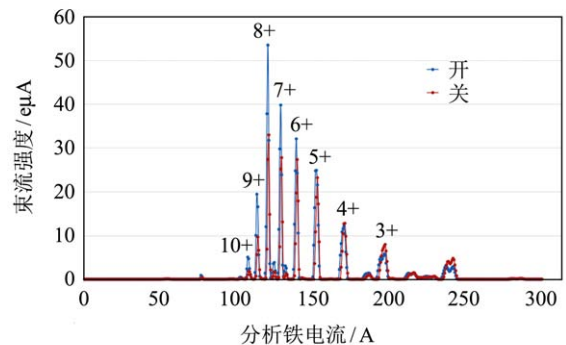


图 7 (在线彩图) 阴阳极电势差为 2 000 V 的电子枪在开启与关闭条件下, 引出束流的谱图对比(工作气体: Ar)

表 2 电子枪关闭与开启时部分电荷态束流强度对比(电子能量2 000 eV)

电荷态	关闭时流强/eμA	打开时流强/eμA	涨幅/%
5+	23.14	24.84	7.35
6+	27.30	32.04	13.7
7+	27.75	39.78	43.35
8+	32.94	53.54	62.54
9+	9.66	19.47	101.55
10+	1.80	5.05	180.56

眼下虽然有较为积极的效果，但我们知道，弧腔中的电子对于等离子体的作用方式并不止一种，究竟可能是哪种原因引起的束流改善还需要我们作进一步的分析。图 8 给出了电子束在被枪体发射、进入弧腔后的运动轨迹模拟图。从图中我们看到，电子并未通过 ECR 共振面，而是在磁场的作用下很快向一侧偏转，并最终打在弧腔的侧壁上。这在先前确定电子枪横向位置时已给出了解释：磁感线的走向即代表了电子束的运动方向。

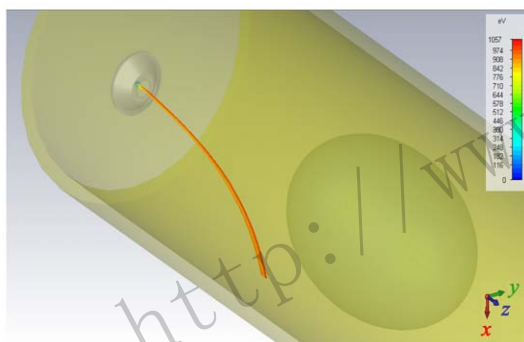


图 8 (在线彩图) 注入电子束在弧腔中的轨迹(电子能量1 keV)

很明显，由于电子束不能通过共振面，所以让注入电子被加热从而参与电离的设想不能实现；同样的，低能电子对离子的约束与对等离子体的维稳作用，也仅针对等离子体区内的电子，而注入的电子束在弧腔侧壁上损失，也不会直接起到这样的作用。所以，注入电子束能够改善引出束流，需要用其他观点来解释。

首先，在 ECR 等离子体中，由于磁场的约束不是无限制的，粒子会时刻从等离子体内向外损失。其中电子以轴向损失为主，离子以径向损失为主，二者在磁场中不同方向上的扩散系数差别很大：

$$D_{\perp}^{\text{ions}} \gg D_{\perp}^{\text{electrons}}, \quad D_{\parallel}^{\text{electrons}} \gg D_{\parallel}^{\text{ions}}.$$

但由于等离子体呈电中性，因此损失的束流满足关系：

$$I_{\parallel}^{\text{electrons}} \approx I_{\perp}^{\text{ions}}.$$

因为离子与电子损失后最终打在了弧腔壁上，而我们采用的弧腔壁一般为铝或不锈钢，都是良导体，所以在离子、电子、弧腔壁之间形成了一条回路，称为“Simon circuit”^[6]。我们以图 9 来说明这个过程：

- (1) 一束电子从等离子体内沿轴向逃逸，并沉积在弧腔右壁处；
- (2) 等离子体区电中性被破坏；
- (3) 一束离子受迫沿径向离开等离子体区；
- (4) 离子沿径向沉积在弧腔上壁处，且流强与电子束相等；
- (5) 由于弧腔壁为导体，电荷由电子沉积处向离子沉积处转移，形成电流；
- (6) 在等离子体与弧腔壁之间，通过逃逸的离子与电子束，建立起一个回路，这便是“Simon circuit”。由于这个回路的建立，使得等离子体中的粒子更加倾向于逃逸，这种因建立回路而对等离子体的约束产生负面影响的现象，我们称为 Simon 效应。

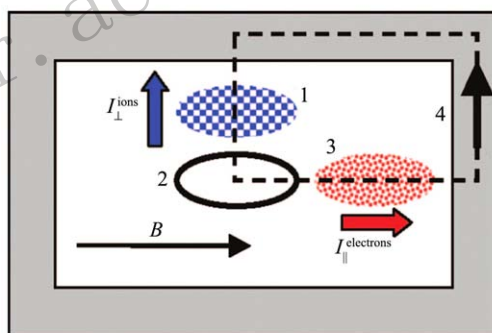


图 9 (在线彩图) Simon circuit模型示意图

在这个模型下，注入的外电子打在了弧腔的侧壁上，是与逃逸的离子束同向的径向沉积，我们设这个电流为 $I_{\perp}^{*\text{electrons}}$ 。这样一来，原有的平衡 $I_{\parallel}^{\text{electrons}} \approx I_{\perp}^{\text{ions}}$ 被打破，直至其建立新的平衡：

$$I_{\parallel}^{*\text{electrons}} \approx I_{\perp}^{*\text{ions}} - I_{\perp}^{*\text{electrons}}.$$

外注入电子会从径向逃逸，与横向离子扩散形成的电流叠加后，Simon 回路中电流减弱，从而一定程度上抑制了电子的纵向逃逸。最终表现为通过注入一束外电子，使得 Simon 效应被抑制，等离子体内的电子损失降低，也就变相地提高了共振区内的电子密度。

其次，电子束沉积在弧腔壁上，会在弧腔壁上造成一定程度的出气。从扫得的图谱可以看出，在 Ar^{7+} 和 Ar^{8+} 之间有一个很低的 O^{3+} 峰，且在打开电子枪后，这个峰同样得到了增长，说明束流的增长可能有一

定的掺气效应的因素影响。不过 O^{3+} 是否也只是单纯的因抑制 Simon 效应而增长, 并不能确定。况且, 从出气的角度考虑, 图 6 那样的现象还可大概理解为因气压等因素的改变, 等离子体从打破平衡到重新建立平衡的过程中, 状态从不稳定到稳定的体现。但当包括注入电子束的能量等所有参数全部固定后, 这样的现象还是会重复出现, 其原因还有待进一步的研究。

不过由于离子源不仅要求引出平稳的直流束流, 脉冲束也同样具有重要的意义。而在此现象中, 除了直流部分的强度有明显提升之外, 脉冲部分对于流强的增益也很明显。例如对于 Ar^{9+} 来说, 当其直流部分的强度为 $13 \mu A$ 时, 脉冲的峰值就已超过了 $30 \mu A$ 。所以, 此现象中的直流与脉冲部分都具有继续研究开发的价值。

若对本课题提出更高的要求, 在实验思路与设计上仍有许多改进与深入研究的空间。比如以冷阴极替换本实验中有缺点的热阴极、加大发射流强、提高微波功率等。对于电子枪注入这一颇具潜力的辅助手段仍有大量的工作要做, 这需要每一个 ECR 离子源工作者的共同

努力。

参考文献:

- [1] GELLER R Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas[M]. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1996.
- [2] MELIN G, BOURG F, BRIAND P, *et al.* Rev Sci Instrum, 1990, **61**(1): 236.
- [3] BOLSHUKHIN D, MEYER D, WOLTERS U, *et al.* Rev Sci Instrum, 1998, **69**(2): 1197.
- [4] NAKAGAWA T, ARJE J, MIYAZAWA Y, *et al.* Rev Sc. Instrum, 1998, **69**(2): 637.
- [5] SUN Liangting. Design and Experimental Study of Highly Charged ECR Ion Sources[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 21. (in Chinese)
(孙良亭. 高电荷态 ECR 离子源的设计与实验研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2004: 21.)
- [6] DRENTJE A G, WOLTERS U, NADZEYKA A, *et al.* Rev Sci Instrum, 2002, **73**: 775.

Research on External Electron Injection Technology in ECRIS

TANG Cheng^{1,2,1)}, QIAN Cheng¹, SUN Liangting¹, ZHANG Xuezheng¹, ZHANG Zimin¹,
LI Zhongping¹, ZHAO Huanyu¹, LU Wang¹, ZHAO Hongwei¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The injection of the electron beam into the ECR (Electron Cyclotron Resonance) plasma by electron gun is a new method for the additional supplementary of the plasma electron, following the aluminum chamber wall and the bias plate, we are expecting for the higher current and charge state of the ion beam with it. However, because of the controllable parameter's variety, the lack of the accumulation of experience and data, and the shortage of convenience in designing and experimental practicing compared by biased disk and other means, it has always not been intensively studied. In this article, we take the 18 GHz ECR Ion Source using evaporative cooling technique as experimental platform, do the experiment of injecting electron into ECR plasma base on the simulation result of the electron beam's path in ECR's chamber by the 3D simulation software CST the particle studio. It shows that a pulsing leap of the current of the extracting ion beam appears when the injecting electron's energy is above 1800 eV. In the mean time, the top of the pulse and the average current of the ion beam rises, the ionization state moves to a higher level. This phenomenon can be turned on and off by controlling the experimental condition. At the last part of the article, we discuss this improvement of the current and charge state of the ion beam despite of the position's missing between the injection of electron beam and the resonance surface, and hold the opinion that this phenomenon is positive to both pulsed and direct beam.

Key words: ECR plasma; electron gun; injection component; magnetic confinement; resonant surface

Received date: 1 Jun. 2016; Revised date: 15 Aug. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11305228)

1) E-mail: chengtang@impcas.ac.cn.