

电子回旋共振激发氘负离子数密度的光发射谱诊断*

陈越 朱晓东[†]

(中国科学技术大学物理学院, 合肥 230026)

(2024年11月18日收到; 2024年12月16日收到修改稿)

本文利用多道高分辨发射光谱对电子回旋共振(ECR) 激发氘负离子数密度进行研究。基于Yacora氘原子碰撞辐射模型, 结合氘原子分子谱线相对强度测量, 估算电子回旋共振激发的氘负离子密度。对ECR源区和扩散区不同位置的氘原子及氘分子特征谱线进行测量, 发现源区的 D_α 特征谱线强度远高于 D_β 的强度, I_{D_α}/I_{D_β} 比高达 23, 表明存在着 D^- 中性化机制, 选择性地增强了特征谱线强度; 进一步拟合估算了源区的 D^- 密度, 约为 $3.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$; 相对于源区, 扩散区的 D^- 密度大幅下降。由于ECR源区腔体小, 等离子体和壁的相互作用较强, 重组脱附过程会产生更多振动激发态氘分子, 增强了解离附着反应, 有利于氘负离子的产生; 另一方面, ECR等离子体中源区与扩散区间存在的空间电场阻碍了氘负离子的轴向输运, 氘负离子的产生和损失是局域性的; 这些使源区与扩散区间存在较大的 D^- 密度梯度。

关键词: 氘负离子源, 发射光谱, 电子回旋共振等离子体

PACS: 52.27.Cm, 52.70.Kz, 52.50.Sw

DOI: [10.7498/aps.74.20241605](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241605)

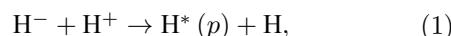
CSTR: [32037.14.aps.74.20241605](https://cstr.ustc.edu.cn/32037.14.aps.74.20241605)

1 引言

以氘负离子源为核心的中性束注入系统是未来聚变装置的重要组成部件^[1-3]。利用金属铯来提高 D^- 密度的负离子源存在易损耗和引入杂质等问题^[4]。无需添加铯的氘负离子源, 如螺旋波氘负离子源^[5] 和电子回旋共振(electron cyclotron resonance, ECR) 氘负离子源^[6], 是重要的替代方案。ECR等离子体利用右旋圆偏振微波加热磁场中回旋运动的电子, 具有无电极、低工作气压、高解离率以及易形成负离子的特点, 被广泛用于离子源^[7-9]、材料加工处理^[10,11] 离子推进等领域^[12,13]。目前, 已报道过德国的 HOMER^[14]、法国的 ROSAE-III^[1] 和 Camembert-III^[15] 等多个 ECR 负离子源装置^[6,16]。

在氘负离子源的研究中, D^- 密度是一个关键参数, 可靠地诊断这一参数是氘负离子源开发和运

行的重要条件。 D^- 密度一般较低, 且不存在自发辐射过程^[17], 目前主要使用激光脱附探针^[18] 和腔振铃光谱^[19] 方法来诊断 D^- 密度。这些技术基于 D^- 的光脱附过程来诊断 D^- 密度, 需要复杂的设备和精细的数据处理^[20]。2006年, Fantz 和 Wunderlich^[21] 提出了 Yacora 氢原子碰撞辐射模型, 利用氢原子 H_α 与 H_β 谱线强度比值 I_{H_α}/I_{H_β} 给出低气压等离子体($<1 \text{ Pa}$)中的 H^- 密度(D^- 密度)。其基本思想是 H^- 与 H^+ 相互中性化过程产生激发态氢原子:



其中, $H^*(p)$ 是激发态氢原子, p 是能级主量子数; H^- 的中性化过程会选择性地增强氢原子谱线, 导致 I_{H_α}/I_{H_β} 显著增大。再结合氢原子谱线绝对强度测量, 即可给出 H^- 的绝对密度等参数^[21]。这种方法相对简单且对等离子体无扰动, 已经被应用于射

* 国家磁约束核聚变能发展研究专项(批准号: 2018YFE0301102)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: xdzhu@ustc.edu.cn

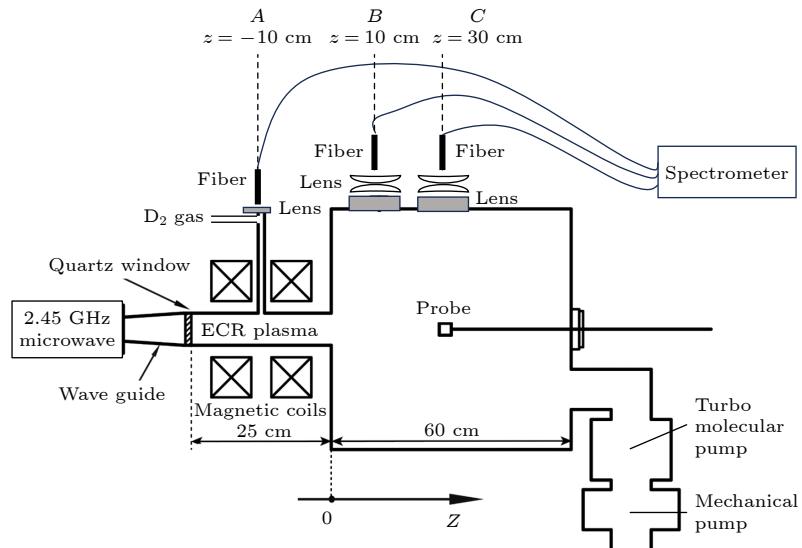


图 1 ECR 等离子体源示意图
Fig. 1. The layout of ECR plasma source.

频负离子源和螺旋波负离子源的 D^- 密度 (D^- 密度) 的诊断, 其结果与利用激光脱附探针和腔振铃光谱测量得到的结果很好地相符 [5,21–24].

微波放电 ECR 源通常由小尺寸的源区和较大的扩散区构成. 等离子体在源区产生, 沿发散位型的磁场向扩散区输运, 两个区域间存在分布式空间电场; 相对于源区, 扩散区空间大, 壁对等离子体影响较小; 这些对 ECR 等离子体空间特性产生重要影响. 尽管人们在 ECR 负离子源上进行了大量的研究工作, 但还未见利用发射光谱方法研究 D^- 密度及其空间结构特征的报道.

本文将 Yacora 碰撞辐射模型应用于 ECR 氚等离子体中负离子发射光谱诊断; 利用 I_{D_α}/I_{D_β} 比值, 并结合其他氚原子分子谱线的相对强度来估算 D^- 密度; 这样就不再需要对谱仪进行复杂的绝对强度标定. 对源区、扩散区不同位置等离子体的多道发射光谱进行诊断, 研究了 D^- 密度及其空间结构特征, 对其中的物理机制进行了讨论.

2 实验装置

实验中使用的 ECR 等离子体源见图 1 [25]. ECR 源由 2.45 GHz 微波源、波导管、磁场线圈、不锈钢真空腔体和真空维持系统组成. 微波源功率最高为 2000 W. 实验气体为氘气, 通过质量流量计控制其流量. 真空由机械泵和分子泵维持, 本底气压可抽至 5×10^{-4} Pa. 真空腔体分为源区和扩散区

两个部分, 源区为水平放置的圆柱, 内径 8 cm, 长 25 cm; 扩散区为竖直放置的圆柱, 内径和高度均为 60 cm. 为了方便讨论, 使用 A , B , C 位置来分别代表源区 $z = -10$ cm、扩散区上游 $z = 10$ cm 和下游 $z = 30$ cm 这 3 个位置, 其中 z 为轴向坐标. 将多道高分辨率光谱仪安装在了 ECR 装置的 A , B , C 位置, 来测量等离子体的发射光谱. 工作时, 2.45 GHz 微波源产生的微波沿着波导传输, 通过石英窗口注入到源区.

在开始放电实验之前, 将左右两个磁场线圈电流分别设置为 210 A 和 200 A, 用高斯计测量了磁感应强度轴向分量沿 z 轴的分布 $B_z(z)$, 结果见图 2. 线圈产生发散位型的磁场, 共振点在 $z=0$ cm 位置附近, 对应的磁感应强度为 875 Gs (1 Gs = 10^{-4} T).

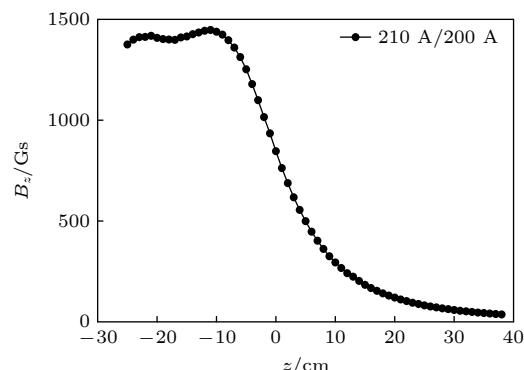


图 2 磁感应强度轴向分量沿 z 轴的分布
Fig. 2. The profile of magnetic field along z axis.

3 ECR 氚负离子发射光谱诊断方法

实验中的 ECR 氚等离子体源的工作气压较低 (~ 1 Pa), 电子温度约几个 eV, 电子密度在 10^{16} m^{-3} 量级 [25–28]. Yacora 模型的计算结果表明, 当电子温度为 1–5 eV, 电子密度为 1×10^{16} – $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 时, $I_{\text{H}_\alpha}/I_{\text{H}_\beta}$ 对 H^- 密度较为敏感, 为诊断 ECR 中 H^- 密度 (D^- 密度) 提供了一种可能性 [21,29]. 根据 Yacora 模型, 氚原子谱线由 6 种机制产生, 分别为 D^+ 复合, D 激发, D_2^+ 激发, D_3^+ 解离复合, D_2 激发以及 D^- 中性化机制, 故特征谱线强度与等离子体中 6 种粒子 D^+ , D , D_2^+ , D_3^+ , D_2 和 D^- 的密度相关 [21,29,30]. D^+ 复合机制在电子温度大于 1 eV, 电子密度小于 10^{19} m^{-3} 时可以忽略 [21]. ECR 氚等离子体解离率较高, Wünderlich 等 [20] 测得 ECR 等离子体解离率大于 5%, 通过 Langmuir 探针测得实验中的 ECR 氚等离子体电离率约为万分之一 [27], 比解离率低两个数量级以上; 由 Yacora 模型计算结果可知, D_2 激发机制、 D_2^+ 激发机制和 D_3^+ 解离复合机制均可以忽略 [21]. 故在上述 ECR 氚等离子体参数区间内, D_α , D_β , D_γ , D_δ 谱线的主要激发机制为 D 激发机制和 D^- 中性化机制 [21,29]. 于是, $I_{\text{D}_\alpha}/I_{\text{D}_\beta}$ 与 D^- 密度和 D 密度之比 $n_{\text{D}^-}/n_{\text{D}}$ 、电子温度和电子密度参数有关 [21]:

$$\frac{I_{\text{D}_\alpha}}{I_{\text{D}_\beta}} \cong \frac{X_{\text{D}_\alpha}^{\text{eff},\text{D}}(T_e, n_e) + \frac{n_{\text{D}^-}}{n_{\text{D}}} X_{\text{D}_\alpha}^{\text{eff},\text{D}^-}(T_e, n_e)}{X_{\text{D}_\beta}^{\text{eff},\text{D}}(T_e, n_e) + \frac{n_{\text{D}^-}}{n_{\text{D}}} X_{\text{D}_\beta}^{\text{eff},\text{D}^-}(T_e, n_e)}, \quad (2)$$

其中, $X_{\text{D}_\alpha}^{\text{eff},\text{D}}(T_e, n_e)$ 和 $X_{\text{D}_\alpha}^{\text{eff},\text{D}^-}(T_e, n_e)$ 分别代表 D_α 谱线的 D 激发机制和 D^- 中性化机制的有效激发系数, $X_{\text{D}_\beta}^{\text{eff},\text{D}}(T_e, n_e)$ 和 $X_{\text{D}_\beta}^{\text{eff},\text{D}^-}(T_e, n_e)$ 分别代表 D_β 谱线的 D 激发机制和 D^- 中性化机制的有效激发系数. 类似 (2) 式, $I_{\text{D}_\beta}/I_{\text{D}_\gamma}$, $I_{\text{D}_\beta}/I_{\text{D}_\delta}$ 也与 $n_{\text{D}^-}/n_{\text{D}}$ 、电子温度和电子密度有关. 故使用 $I_{\text{D}_\alpha}/I_{\text{D}_\beta}$, $I_{\text{D}_\beta}/I_{\text{D}_\gamma}$, $I_{\text{D}_\beta}/I_{\text{D}_\delta}$ 这 3 个比值可以求解 $n_{\text{D}^-}/n_{\text{D}}$ 、电子温度和电子密度 [21].

要进一步得到 D^- 的密度, 还需要诊断 D 的密度. Fantz 和 Wünderlich [21] 通过测量 D_γ 的绝对强度来确定 D 密度, 进而给出 D^- 密度, 但测量谱线的绝对强度需要对光谱仪进行复杂的标定. 在低气压氘等离子体中, 使用氘原子和氘分子的谱线相对强度来诊断解离率 (氘原子与氘分子密度比值

$n_{\text{D}}/n_{\text{D}_2}$) 是一种被广泛使用的方法 [1,26,28–37]. D_2 密度一般可以由理想气体状态方程估算, 故可以给出 D 密度, 进而可以估算 D^- 密度. 这种方法只需要测量氘原子分子谱线相对强度, 而无需测量谱线的绝对强度及标定. 记氘分子 Fulcher band ($\text{d}^3\Pi_u \rightarrow \text{a}^3\Sigma_g^+$) 的 (2-2) Q_1 谱线为 $F_{(2-2)Q_1}$, 氚原子 D_α 和氘分子 $F_{(2-2)Q_1}$ 的相对强度 $D_\alpha/F_{(2-2)Q_1}$ 与 $n_{\text{D}}/n_{\text{D}_2}$ 直接相关 [1,26,28–37]:

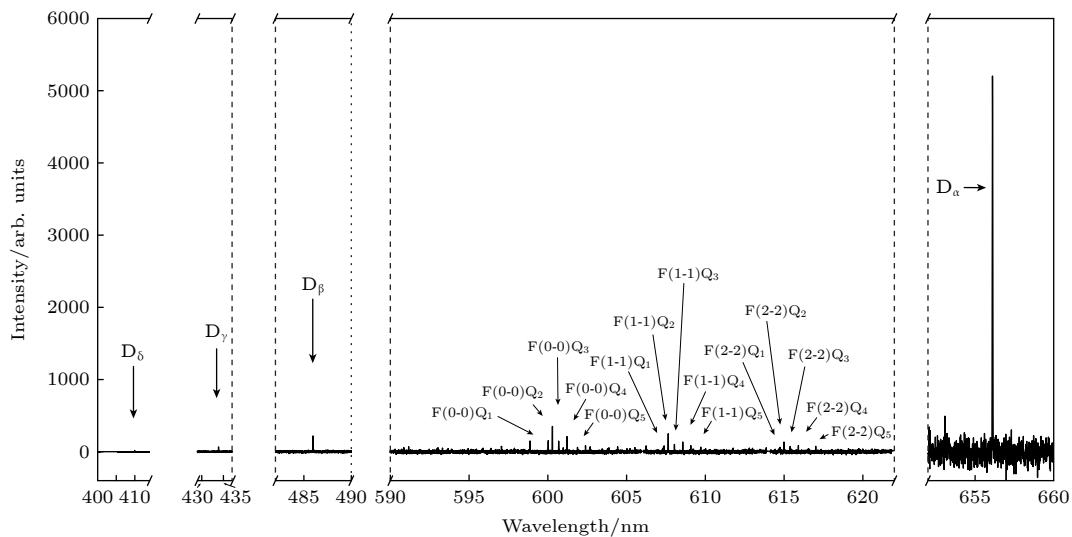
$$\frac{D_\alpha}{F_{(2-2)Q_1}} \cong \frac{\frac{n_{\text{D}}}{n_{\text{D}_2}} K_{\text{dir}}^{\text{em}}}{A_{\text{a}21}^{\text{d}-21} \tau_{\text{d}-21} K_{\text{mol}}^{\text{ex}} \eta(T_g)}, \quad (3)$$

其中, $K_{\text{dir}}^{\text{em}}$ 是氘原子的电子碰撞激发速率系数, $\eta(T_g) = n_{\text{X}01}/n_{\text{D}_2}$, 与气体温度 T_g 有关, $n_{\text{X}01}$ 是 $\text{d}^3\Pi_u^-$, $\nu = 2$, $J = 1$ 能级的密度, $\tau_{\text{d}-21}$ 是 $\text{d}^3\Pi_u^-$, $\nu = 2$, $J = 1 \rightarrow \text{a}^3\Sigma_g^+$, $\nu = 2$, $J = 1$ 跃迁的辐射寿命, $A_{\text{a}21}^{\text{d}-21}$ 是 $\text{d}^3\Pi_u^-$, $\nu = 2$, $J = 1 \rightarrow \text{d}^3\Pi_u^-$, $\nu = 2$, $J = 1$ 的电子碰撞激发过程的速率系数. 在实验中, D_2 密度可由 D_2 气压和理想气体状态方程给出. 这样, 将 (3) 式与 Fantz 等的 $I_{\text{D}_\alpha}/I_{\text{D}_\beta}$ 的比值方法结合, 可以进一步估算出 D^- 密度. 利用发射光谱数据诊断 D^- 密度方法的误差主要来源于谱线测量数据和碰撞辐射模型截面数据的不确定性. 根据 Fantz 等 [5,21] 的估计, 这两类不确定性引起的 D^- 密度测量的相对误差低于 40%.

4 实验结果与讨论

在 ECR 氚气放电实验中, 设置 D_2 气压为 1 Pa, 微波功率为 660 W. 使用高分辨率光谱仪采集了源区 A 位置、扩散区上游 B 位置、扩散区下游 C 位置处的氘原子和氘分子的谱线. 以 A 位置的光谱为例来说明 ECR 氚等离子体发射光谱特征, 见图 3. 图 3 可以看到氘原子 D_α , D_β , D_γ , D_δ 以及氘分子 Fulcher band 一系列振动转动谱线, 并标出了 $F_{(0-0)Q_1}$ – $F_{(2-2)Q_5}$ 共 15 条 Q 支谱线.

从图 3 的氘原子特征谱线可以看出, 源区 A 位置处的 $I_{\text{D}_\alpha}/I_{\text{D}_\beta}$ 较高, 约为 23.2. Yacora 模型的计算结果表明, 在电子温度 1–5 eV、电子密度 1×10^{16} – $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 的参数范围内, D^- 中性化机制激发的 $I_{\text{D}_\alpha}/I_{\text{D}_\beta}$ 显著高于其他 5 种机制激发的 $I_{\text{D}_\alpha}/I_{\text{D}_\beta}$ [21]. 这表明源区的 $I_{\text{D}_\alpha}/I_{\text{D}_\beta}$ 包含有 D^- 布居机制的贡献, 即存在着氘负离子. 类似地, 在射频

图 3 A 位置的氘等离子体光谱Fig. 3. The spectrum of ECR deuterium plasma at A position.

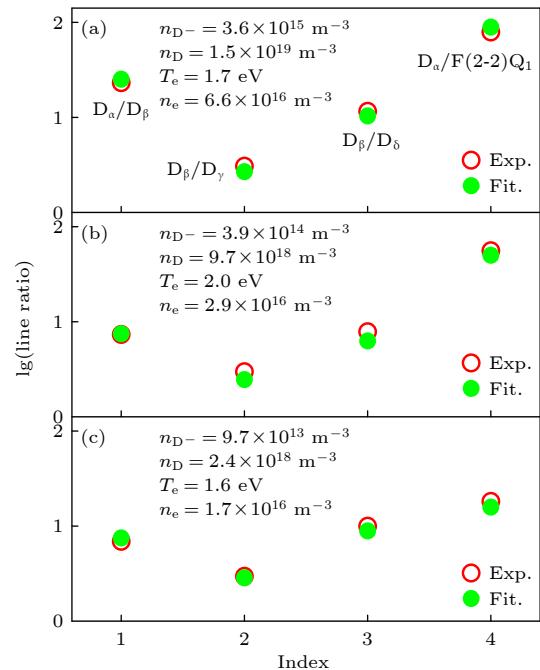
负离子源 MANITU 中, 观察到 I_{H_α}/I_{H_β} 约为 14.1, 对应的 H^- 密度约 $1.2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ [21]. 此外, 在 ECR 扩散区 B, C 位置, I_{D_α}/I_{D_β} 的值分别为 7.4 和 6.9, 相比源区 A 位置更低. 这可能是由于扩散区的 D^- 密度较低, D^- 中性化机制在谱线的激发机制中占比较小, 导致 I_{D_α}/I_{D_β} 的比值降低.

利用 A, B, C 位置的 $D_\alpha, D_\beta, D_\gamma, D_\delta, F_{(2-2)Q_1}$ 特征谱线, 根据模型拟合估算 D^- 密度等参数值, 计算结果见图 4(a)–(c). 图中空心圆圈是实验测量到的 3 个位置的 $D_\alpha/D_\beta, D_\beta/D_\gamma, D_\beta/D_\delta, D_\alpha/F_{(2-2)Q_1}$ 谱线相对强度的实验值, 实心圆点表示模型计算得到的谱线相对强度的拟合值. 横轴是序号, 1–4 分别对应 $D_\alpha/D_\beta, D_\beta/D_\gamma, D_\beta/D_\delta, D_\alpha/F_{(2-2)Q_1}$, 纵轴是对数化的谱线相对强度 $\lg(\text{line ratio})$.

源区 A 位置处的 D^- 密度较高, 其估算值约为 $3.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$. 相比 A 位置, B 位置和 C 位置的 D^- 密度大幅下降, 分别为 $3.9 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}, 9.7 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$. 源区 A 位置的 D^- 密度显著高于扩散区 B, C 位置; D^- 密度和电子密度沿 A, B, C 位置依次下降, 电子温度则是先增大后减小. 源区产生的等离子体会沿着磁力线进入扩散区, 电子密度在此扩散过程中不断衰减 [38,39]. 本工作中, A 位置诊断窗口与送气口是重合的, 我们认为 A 位置电子温度略低于扩散区上游可能是由于通入的冷气体与等离子体相互作用导致的.

基于振动转动谱线的日冕模型, 对测量到的氘分子 Fulcher band (0-0)Q₁–(2-2)Q₅ 这 15 条 Q

支谱线强度进行拟合, 诊断了 A, B, C 三个空间位置的振动温度 T_v 和转动温度 T_r [2,40]. 图 5(a)–(c) 给出了 A, B, C 三个位置的 Fulcher band Q 支谱线强度的实验值和相应的模拟值, 分别用实线柱和虚线柱表示. 横轴是谱线的波长, 纵轴是谱线的强度. 通过拟合结果可知, 振动温度沿 A, B, C 三个位置依次下降, 转动温度则是先降低再升高. 源区的高振动温度说明存在更多高振动激发态氘分子.

图 4 A, B, C 位置谱线相对强度的实验值与模型拟合值Fig. 4. The experimental and fitted line ratios at A, B, C positions.

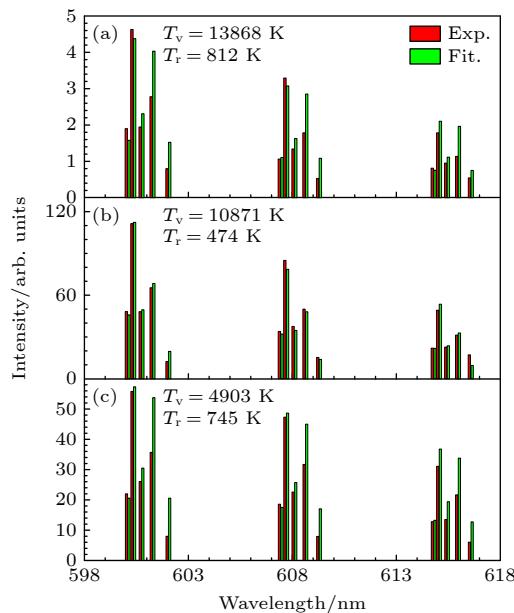


图 5 A, B, C 位置 Fulcher band Q 支谱线强度的实验值和相应的模拟值

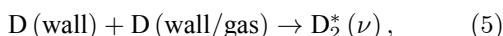
Fig. 5. The experimental and fitted intensity of Fulcher band Q-lines at A, B, C positions.

氘负离子的产生和损失机制对理解和优化负离子源性能至关重要。在 ECR 等离子体中，氘负离子主要是通过体过程生成，即低能量的冷电子与高振动激发态的氘分子 $D_2^*(\nu)$ 之间的解离附着 (dissociative attachment, DA) 反应^[16]:



DA 反应对电子能量和氘分子振动激发态密度非常敏感，电子能量降低或者氘分子振动激发态密度升高时，DA 反应速率会快速增大。

实验中观察到源区的 D^- 密度显著高于扩散区。我们认为这与 ECR 等离子体源特征有关。ECR 等离子体源区腔体小，等离子体与壁相互作用较强，这会导致重组脱附 (recombination desorption, RD)^[1,3,14]:



其中， $D(\text{wall})$ 指吸附在壁上的氘原子， $D(\text{wall/gas})$ 是吸附在壁上的氘原子或等离子体中的氘原子。源区的 RD 过程会产生更多高振动激发态氘分子，与观察到的源区振动温度较高现象一致。这会增强解离附着反应，有利于氘负离子的产生。另一方面，氘负离子的形成和损失通常还与空间输运过程有关。ECR 等离子体的源区和扩散区电子密度差异形成的空间电场^[25,27]，亦对氘负离子的轴向输运起

阻碍作用，氘负离子的产生和损失是局域性的。这些导致了 ECR 源区的 D^- 密度明显高于扩散区，存在较大的密度梯度。因此，在设计 ECR 氘负离子源的负离子引出位置时，应尽可能地将其靠近源区，以获得较高的 D^- 密度。

5 结 论

本文利用发射光谱对电子回旋共振激发的氘负离子密度进行了研究。对 ECR 等离子体源区和扩散区不同位置的氘原子及氘分子特征谱线进行测量，根据 Yacora 氘原子碰撞辐射模型，结合 I_{D_α}/I_{D_β} 比值和其他氘原子分子谱线的相对强度估算了 D^- 密度。研究发现，源区的 I_{D_α}/I_{D_β} 比值较大，说明存在 D^- 中性化机制对特征谱线的选择性增强；进一步的数据拟合估算了源区的 D^- 密度，约为 $3.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 。相对于源区，扩散区的 D^- 密度大幅下降。我们认为这与 ECR 等离子体源特征有关。ECR 源区腔体小，等离子体和壁的相互作用较强，重组脱附过程产生更多振动激发态氘分子，增强了解离附着反应，有利于氘负离子的产生；另一方面，ECR 等离子体中存在沿轴向的空间电场，对氘负离子的轴向输运起阻碍作用，氘负离子的产生和损失是局域性的，这些导致了源区与扩散区间较大的 D^- 密度梯度。

参考文献

- [1] Bentounes J, Béchu S, Biggins F, Michau A, Gavilan L, Menu J, Bonny L, Fombaron D, Bès A, Lebedev Y A, Shakhatov V A, Svartas P, Hassaine T, Lemaire J L, Lacoste A 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 055015
- [2] Fantz U, Heger B 1998 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **40** 2023
- [3] Averkin S N, Gatsonis N A, Olson L 2015 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** 1926
- [4] Fantz U, Franzen P, Kraus W, Falter H D, Berger M, Christ K S, Froschle M, Gutser R, Heinemann B, Martens C, McNeely P, Riedl R, Speth E, Wunderlich D 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 02A511
- [5] Marini C, Agnello R, Duval B P, Furno I, Howling A A, Jacquier R, Karpushov A N, Plyushchev G, Verhaegh K, Guittienne P, Fantz U, Wunderlich D, Béchu S, Simonin A 2017 *Nucl. Fusion* **57** 036024
- [6] Sharma S, Sahu D, Narayanan R, Kar S, Bandyopadhyay M, Chakraborty A, Singh M J, Tarey R D, Ganguli A 2022 *J. Phys. Conf. Ser.* **2244** 012055
- [7] Alton G, Smithie D 1994 *Rev. Sci. Instrum.* **65** 775
- [8] Zhao H, Sun L, Guo J, Lu W, Xie D, Hitz D, Zhang X, Yang Y 2017 *Phys. Rev. Accel. Beams* **20** 094801

- [9] Ren H T, Peng S X, Xu Y, Zhao J, Lu P N, Chen J, Zhang A L, Zhang T, Guo Z Y, Chen J E 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 02A927
- [10] Torii H, Matsui S 2024 *J. Vac. Sci. Technol. A* **42** 062701
- [11] Seker Z, Ozdamar H, Esen M, Esen R, Kavak H 2014 *Appl. Surf. Sci.* **314** 46
- [12] Ke Y J, Sun X F, Chen X K, Tian L C, Zhang T P, Zheng M F, Jia Y H, Jiang H C 2017 *Plasma Sci. Technol.* **19** 095503
- [13] Li X, Zeng M, Liu H, Ning Z X, Yu D R 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 225202 (in Chinese) [李鑫, 曾明, 刘辉, 宁中喜, 于达仁 2023 物理学报 **72** 225202]
- [14] Kurutz U, Friedl R, Fantz U 2017 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **59** 075008
- [15] Svarnas P, Breton J, Bacal M, Mosbach T 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 532
- [16] Aleiferis S, Tarvainen O, Svarnas P, Bacal M, Béchu S 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 095203
- [17] Hill R N 1977 *Phys. Rev. Lett.* **38** 643
- [18] Bacal M, Hamilton G W, Bruneteau A M, Doucet H J, Taillet J 1979 *Rev Sci Instrum* **50** 719
- [19] O'Keefe A, Deacon D A G 1988 *Rev. Sci. Instrum.* **59** 2544
- [20] Lee H, Kim W, Lee J, Park K S, Yoo J J, Atala A, Kim G H, Lee S J 2021 *Appl Phys Rev* **8** 021405
- [21] Fantz U, Wunderlich D 2006 *New J. Phys.* **8** 301
- [22] Heinemann B, Fantz U, Kraus W, Schiesko L, Wimmer C, Wunderlich D, Bonomo F, Fröschle M, Nocentini R, Riedl R 2017 *New J. Phys.* **19** 015001
- [23] Furno I, Agnello R, Guittienne P, Howling A, Jacquier R, Plyushchev G, Stollberg C, Bechu S, Barbisan M, Fadone M 2020 *EURO Fusion Consortium*
- [24] Berger M, Fantz U, Christ K S, Team N 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** 025004
- [25] Zhu B L, Yi K Y, Yang K, Ke W, Ma J X, Zhu X D 2019 *Phys. Plasma* **26** 082107
- [26] Schulz-Von D G V, Dbele H F 1996 *Plasma Chem. Plasma Process.* **16** 461
- [27] Zhou H Y, Wang L, Zhu X D, Ke B, Ding F, Wen X H, Wang Y N 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 033501
- [28] Aleiferis S, Svarnas P, Béchu S, Tarvainen O, Bacal M 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 075015
- [29] Wunderlich D, Dietrich S, Fantz U 2009 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **110** 62
- [30] Wunderlich D, Fantz U 2016 *Atoms* **4** 26
- [31] Hollmann E M, Brezinsek S, Brooks N H, Groth M, McLean A G, Pigarov A Y, Rudakov D L 2006 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **48** 1165
- [32] Lavrov B P, Pipa A V, Röpcke J 2006 *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** 135
- [33] Rayar M, Le Quoc H, Lacoste A, Latrasse L, Pelletier J 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** 025013
- [34] McNeely P, Wunderlich D 2011 *Plasma Sources Sci. Technol.* **20** 045005
- [35] Dang J J, Chung K J, Hwang Y S 2016 *Rev Sci Instrum* **87** 053503
- [36] Yoon J S, Kim Y W, Kwon D C, Song M Y, Chang W S, Kim C G, Kumar V, Lee B 2010 *Rep. Prog. Phys.* **73** 116401
- [37] Méndez I, Gordillo-Vázquez F J, Herrero V J, Tanarro I 2006 *J. Phys. Chem. A* **110** 6060
- [38] Wu H M, Graves D B, Porteous R K 1995 *Plasma Sources Sci. Technol.* **4** 22
- [39] Fu S L, Chen J F, Hu S J, Wu X Q, Lee Y, Fan S L 2006 *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** 187
- [40] Majstorović G L, Šišović N M 2015 *J. Res. Phys.* **38–39** 11

Diagnosis of number density of negative deuterium ions excited by electron cyclotron resonance by optical emission spectroscopy*

CHEN Yue ZHU Xiaodong †

(School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 18 November 2024; revised manuscript received 16 December 2024)

Abstract

The electron cyclotron resonance (ECR) plasma is characterized by low working pressure and high dissociation rate, and it has important applications in the deuterium negative ion D⁻ source technology. In this paper, the Yacora collisional-radiative model is applied to the emission spectrum diagnosis of D⁻ in ECR deuterium plasma. The D⁻ density is estimated by using the I_{D_α}/I_{D_β} ratio and the relative intensity of other deuterium molecular lines, thereby avoiding complex calibration procedure of absolute intensity. The spatial structure of D⁻ is studied by the multichannel emission spectrum measured in the source region and diffusion region.

The experiments are conducted on a 2.45-GHz ECR plasma source at a deuterium gas pressure of 1 Pa and microwave power of 660 W. The Balmer series of atomic deuterium (D_α , D_β , D_γ , D_δ) and the Fulcher band Q-branches of molecular deuterium are measured in the source region and expanding region of the ECR plasma. It is found that the intensity of D_α in the source region is much higher than that of D_β , specifically, the I_{D_α}/I_{D_β} ratio reaches as high as 23, indicating a selective enhancement of Balmer lines due to the mutual neutralization process of D⁻. Furthermore, D⁻ density in the source region is estimated to be about $3.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, and the D⁻ density in the expanding region decreases significantly. In the ECR plasma source region, the plasma-wall interaction is strong due to the small volume of the cavity. The recombination desorption process produces more vibrationally excited molecules, thereby further enhancing the dissociation attachment reaction, which is beneficial to the generation of deuterium negative ions. On the other hand, the axial electric field within the ECR plasma inhibits the axial transport of D⁻, suggesting that the production and loss of D⁻ are both localized. These characteristics of the ECR plasma source contribute to the formation of a large gradient of D⁻ density between the source region and the expanding region.

Keywords: negative deuterium ion sources, optical emission spectroscopy, electron cyclotron resonance plasma

PACS: 52.27.Cm, 52.70.Kz, 52.50.Sw

DOI: [10.7498/aps.74.20241605](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241605)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241605](https://cstr.ustc.edu.cn/32037.14.aps.74.20241605)

* Project supported by the National MCF Energy R&D Program of China (Grant No. 2018YFE0301102).

† Corresponding author. E-mail: xdzhu@ustc.edu.cn



电子回旋共振激发氘负离子数密度的光发射谱诊断

陈越 朱晓东

Diagnosis of number density of negative deuterium ions excited by electron cyclotron resonance by optical emission spectroscopy

CHEN Yue ZHU Xiaodong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 74, 085201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241605

CSTR: 32037.14.aps.74.20241605

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241605>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微型电子回旋共振离子源的全局模型

Global model of miniature electron cyclotron resonance ion source

物理学报. 2022, 71(14): 145204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212250>

2 cm电子回旋共振离子推力器离子源中磁场对等离子体特性与壁面电流影响的数值模拟

Numerical simulation of influence of magnetic field on plasma characteristics and surface current of ion source of 2-cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2021, 70(7): 075204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201667>

应用于电推进的碘工质电子回旋共振等离子体源

Iodine electron cyclotron resonance plasma source for electric propulsion

物理学报. 2023, 72(22): 225202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230785>

2 cm电子回旋共振离子源猝灭现象模拟

Numerical study on abnormal flameout of 2-cm electron cyclotron resonance ion source

物理学报. 2022, 71(8): 085203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212151>

基于前馈神经网络的等离子体光谱诊断方法

Plasma optical emission spectroscopy based on feedforward neural network

物理学报. 2021, 70(9): 095211 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202248>

磁场对电子回旋共振中和器等离子体与电子引出影响的数值模拟

Numerical simulation of magnetic field influence on plasma and electron extraction of electron cyclotron resonance neutralizer

物理学报. 2024, 73(16): 165203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240612>