ECR 离子源阅读笔记

X.Y. Wang

April 20, 2023

Abstract

RF Heating in Electron Cyclotron Resonance Ion Sources 文章阅读笔记, 争取在 4 月 5 日前完成。

1 简介

为了更好的理解 ECRIS 的原理，需要使用原子物理的相关知识，总结起来是以下的公式：

$$n_e\tau_e = \frac{1}{S_{q,q-1} - S_{q+1,q}} \tag{1}$$

$$S_{q,q-1} = \frac{1}{n_e}\int_{\varepsilon_{q,q-1}}^{\infty} \sigma_{q,q-1}\sqrt{\frac{2\varepsilon}{m_e}}F(\varepsilon)d\varepsilon \tag{2}$$

其中 τ_q 是电荷态为 q 离子的寿命，$S_{q,q-1}$ 是电离率 (它取决于电离截面 σ), $F(\varepsilon)$ 是电子的能量分布，其中 ε 是电荷态的电离能。

式1中的分母在低温时逐渐升高，但是当温度超过 20-30 keV 时下降。当电离率为定值时，只有产生率 $n_e\tau_e$ 足够高时才能产生足够高电荷态的离子。这时引出的粒子流强为：

$$I_q^z \approx \frac{1}{2}\frac{n_q^z qeV_{ex}}{\tau_{q,l}^z} \tag{3}$$

其中 V_{ex} 是等离子体内核的体积，n_q 是某电荷态离子的密度。这个公式表示离子密度和离子寿命是高性能 ECRIS 的关键。电子温度同样也很重要，但是过热的加热需要被避免，因为超热电子产生硬韧致辐射，这会增加超导磁铁低温恒温器的热载，并且对绝缘器件造成损伤。

以往对等离子体起弧和稳定性问题的研究是基于半经验公式。最小 B 结果是磁流体稳定的，它的磁压比 $\beta \ll 1$。基于 $n_e = n_c = \frac{m\omega_{RF}^2\varepsilon_0}{e^2}$ 的假设，磁流体稳定性条件为：

$$(\frac{B}{B_{ECR}})^2 > 2\cdot 10^2 kT_e\frac{\mu_0\varepsilon_0}{m_e} \tag{4}$$

通常情况下 $\frac{B}{B_{ECR}} \geq 2B_{ECR}$，$B_{inj} \approx 3\cdot B_{ECR}$ 或更多，$B_{ext} \approx B_{rad}$，$0.3 < \frac{B_{min}}{B_{rad}} < 0.45$。考虑电磁场的截止现象，R. Geller 提出了流强和平均电荷态关于 ω_{RF} 的 scaling law:

$$I \propto \frac{\omega_{RF}^2}{M} < q > \propto\ log\omega_{RF}^{3.5} \tag{5}$$

根据这些 scaling laws，ECRIS 性能的提升也取决于微波频率和约束磁场的提升。发展更经济有效的磁铁，高效的微波耦合，和更深入的微波加热机理研究是目前所需要的。

2 ECRIS 中的加热模型

Lieberman 等人利用单电子模型，考虑动量随机效应去解释无碰撞的 ECRIS 电子加热模型。模型中假设电子的运动提供了波-粒子相互作用的随机相位。在一个抛物线型的磁场 $B = B_{min}(1 + z^2/L^2)$，其中 $L = (\Delta B/B)^{-1}$ 是磁场 B 的特征长度。电子在 z 方向上的运动可以描述为：

$$z = z_0 \cos(\omega_b t + \Psi_0) \tag{6}$$

其中 ω_b 是电子运动的往复频率。电子每次穿过共振面时将获得一个垂直磁场方向的冲量，这个能量冲量大小取决于随机相位 ϕ:

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \Delta\varepsilon + 2\cos(\phi)\sqrt{\varepsilon_i \cdot \Delta\varepsilon} \tag{7}$$

考虑电磁场中的电场方程，可以得到：

$$E(r, \theta, z, t) = E_0 \cos[\omega_{RF} t + \theta - k z_0 \cos(\omega_b t + \Psi_0)] \tag{8}$$

上述公式描述了电子经过多次共振相互作用的结果。这个模型也被称为“非线性摆模型”。在相空间中，每一个虚波的分界线在一个宽的速度范围内重叠，也就意味着混沌的扩散和加热现象。加热在分界线上停止，比如：$\omega \cong \omega_c \approx \omega_{RF}$，此时能来个你为 W_s。随机势垒为：

$$W_b \approx 5W_s = [m_e L(1 + \frac{l^2}{L^2})]^{1/4} l \omega^{1/2} (eE)^{3/4} \tag{9}$$

其中 l 是共振区的长度。

电子加热过程可以通过速度空间的扩散来理解。考虑球坐标系 (v, μ, θ),其中 v 是速度,$\arccos\mu$ 是螺旋角，θ 是与磁场的夹角。此时扩散张量为：

$$D_{vv} = \frac{\Delta v^2}{2\Delta t} = \pi(\frac{eE}{2m_e})^2 \frac{L}{d\omega} \text{ and } D_{\mu\mu} = \frac{\Delta\mu^2}{2\Delta t} = D_{vv}(\frac{v}{v_\phi})^2 \tag{10}$$

其中 d 是等离子体尺寸，v_ϕ 是相速度。分布函数为：

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} = \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{coll} + \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{RF} + S_{i,e}, \quad \text{with: } \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{RF} = \frac{\partial}{\partial v_i}\left(D_{i,j}\frac{\partial f_e}{\partial v_i}\right) \tag{11}$$

其中 $S_{i,e}$ 是离子和电子的电离率和二次电子发射系数。RF 项代表扩散系数，扩散是各向异性的，因为 RF 场中的螺角散射的原因。

可以得到一个结论是：随着 L 的增加，加热效率迅速提升。螺角散射的影响取决于 v_ϕ，越靠近共振面，冷等离子体的折射率可以写为：

$$\frac{k^2 c^2}{\omega^2} \approx -\frac{\omega_p^2}{\omega k v_T} \tag{12}$$

其中 v_T 是热速度，ω_p 是等离子体频率。因此 v_ϕ 为：

$$v_\phi^3 \approx \frac{\omega^2}{\omega_p^2} v_t c^2 = \frac{n_c}{n_e} v_t c^2 \tag{13}$$

根据公式10，$D_{\mu\mu}$ 随着 v_ϕ 减小而增长。当 v_t 接近 v_ϕ 时，RF 散射使电子进入损失锥中，这会限制 n_e 的增长。继续提高 n_e，n_c 就必须提高，因此 $n_e \propto \omega_{RF}^2$；$\omega_{RF}$ 又确定了特征的电子能量：$E_{char} \approx \frac{m_e v_\phi^2}{2}$。这种方法可以很好的解释 Geller 提出的”omega squared” 定律，以及频率提高会导致电子平均能量的提高。

3 L 的非经典标度和基体效应的影响

上述模型在尝试预测 L 方向上最大的 E_max 时失效。Koivisto 等人测量了 EEDF 与 L 的关系，得到结论与理论预测并不相符。