

ECR 离子源阅读笔记

X.Y. Wang

April 6, 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:

$$n_e \tau_e = \frac{1}{S_{q,q-1} - S_{q+1,q}} \quad (1)$$

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

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:

$$I_q^z \approx \frac{1}{2} \frac{n_q^z q e V_{ex}}{\tau_{q,l}^z} \quad (3)$$

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, 因为过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:

$$\left(\frac{B}{B_{ECR}}\right)^2 > 2 \cdot 10^2 k T_e \frac{\mu_0 \varepsilon_0}{m_e} \quad (4)$$

通常情况下 $\frac{B}{B_{ECR}} \geq 2 B_{ECR}$, $B_{inj} \approx 3 \cdot B_{ECR}$ 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:

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

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 $L = (\Delta B/B)^{-1}$

References