

从简谐振动推导 等离子体的谐振频率和德拜长度

贺迎秋
2023.12.05

等离子体

- 处于等离子态的物质，含有等量电荷的带正电及负电的粒子体系，呈电中性
- 其中离子具有很高能量和动量，广泛用于薄膜淀积和薄膜去除等
- 可通过高温加热、气体放电形成
- 宇宙中99%以上的可观测物质都处于等离子态
- 对于稳定的等离子体，通过带电粒子的产生和损失过程达到动态平衡

等离子体的电荷集体振动

假设某个自由电子引入打破平衡，产生振荡特征，可近似为

一维简谐振动的动力学方程： $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$

$$\left. \begin{aligned} \text{恢复力: } F = m_e \ddot{x} = eE \\ E = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} = -\frac{en_e x}{\epsilon_0} \end{aligned} \right\} \text{消 } x$$

导出对于电子的等离子谐振频率：

$$\omega_e = e \sqrt{\frac{n_e}{m_e \epsilon_0}}$$

也叫朗缪尔频率，只与电子密度 n_e 有关，
因此，可利用于测定等离子体的电子密度的工艺测试中

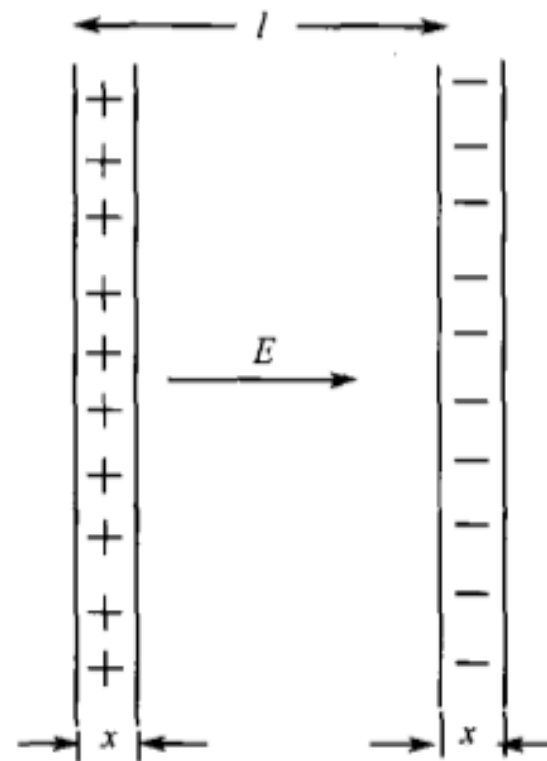


图 2.53 等离子体的局部电荷分离

电中性和德拜长度

电荷分离对应的位能由电子运动的热运动提供，以保持一定的电荷分离距离，此距离为德拜长度 λ_D

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \longrightarrow x = A \cos(\omega t + \phi)$$

$$A = \lambda_D$$

* 个人理解，没有参考资料依据

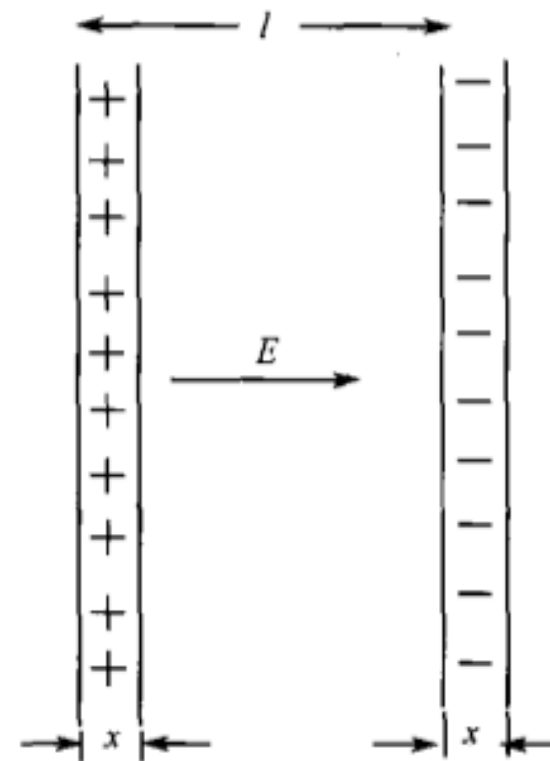


图 2.53 等离子体的局部电荷分离

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \longrightarrow x = A \cos(\omega t + \phi)$$

下文将述及, 振幅 A 和初相位 ϕ 可由系统的运动学量确定.

实验上很容易发现, 图 7-19 中小物块的初始位置和初始速度会影响振动的振幅和初相位. 系统的初始运动学量可设为

$$t = 0 \text{ 时, } x = x_0, \quad v_x = v_0,$$

$$x_0 = A \cos \phi, \quad v_0 = -\omega A \sin \phi,$$

据

可解得

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}, \quad (7.33)$$

$$\tan \phi = -v_0 / \omega x_0. \quad (7.34)$$

初始位置 \rightarrow 平衡位置, 势能为零

一个自由度的热运动提供动能: $\frac{1}{2} k T_e = \frac{1}{2} m_e v_0^2$

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{T_e}{m_e}}$$

电中性和德拜长度

德拜长度 λ_D ：等离子体的热运动限定的局部非电中性的范围，不具有等离子体的性质

$$\left. \begin{aligned} \omega_e &= e \sqrt{\frac{n_e}{m_e \epsilon_0}} \\ A &= \lambda_D \\ A &= \frac{1}{\omega_e} \sqrt{\frac{T_e}{m_e}} \end{aligned} \right\} \lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2}} = 69 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}}$$

调整温度和密度 \rightarrow 控制德拜长度 \rightarrow
影响等离子体与材料表面的相互作用

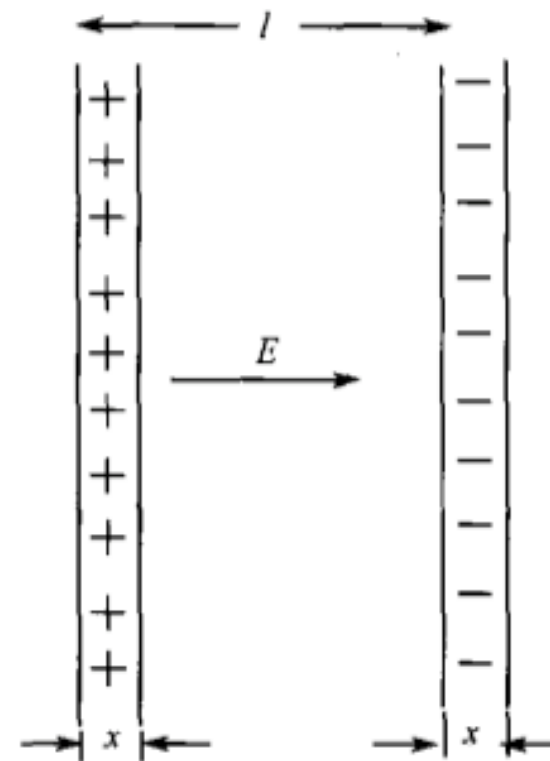


图 2.53 等离子体的局部电荷分离

新一代人造太阳 “中国环流三号”

- 2023年8月25日宣布取得重大进展
- 首次实现100万安培等离子体电流下的高约束模式运行
- 突破了等离子体大电流高约束模式运行控制、高功率加热系统注入耦合、先进偏滤器位形控制等关键技术难题
- 是我国核聚变能开发的重要里程碑
- 标志着我国磁约束核聚变研究向高性能聚变等离子体运行迈出重要一步

参考文献

- 微纳加工科学原理, 唐天同、王兆宏
- 力学, 舒幼生
- Plasma Physics: An Introduction, Richard Fitzpatrick
- <https://www.cnnc.com.cn/cnnc/xwzx65/ttyw01/1365133/index.html>