高周波プラグギングについて

小島 昌治

(55年1月22日受理)

On the RF Plugging

Shoji Kojima

(Received January 22, 1980)

Abstract

This short note deals with the question whether an eigenmode of an electrostatic wave is excited in the rf plugging or not.

最近R F C計画報告書が発表され、ラインカスプに対する高周波プラグギングが述べられている。それによると、平行板電極で高周波電界を加え、プラズマ中に固有の波を発生させたとき、プラグギングがもっとも有効であると考えられている。これについて疑問があるので、以下に述べる。

簡単のため図のような平行板コンデンサーに様なプラズマがある場合を考えよう。プラズマの誘電率は $v_e^2 = 2 k_B T_e / m$ が小さいとき、

$$K = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{k^2 v_e^2}{\omega^2} \right) \quad (1)$$

となる。静電波の分散式は $K=0$ できまり、

$$\omega^2 = \omega_p^2 + (3/2) k^2 v_e^2 \quad (2)$$

で与えられる。 k は波数、 ω_p はプラズマ周波数、 v_e は熱速度である。

端子 $11'$ に高周波電圧 $V = V_0 \cos \omega t$ を加えたとき、(2)式をみたす周波数ならばプラズマ中に静電波を誘起することができるであろうか。プラズマの厚さを p 、コンデンサーの間隔を d とすれば、コンデンサーの静電容量 C は簡単な計算から

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{\epsilon_0} \left\{ (d-p) + \frac{p}{K} \right\} \quad (3)$$

となる。インピーダンス Z は $1/j\omega C$ であるから、 $K = 0$ のとき Z は無限大になる。高周波電流は流れないから、静電波を励起することは困難である。このことは既にレゾナンスプローブの時に経験済みである。

最大の電流が流れるのは $Z=0$ のときで、このときは、

$$K = -p/(d-p) \quad (4)$$

であって、これはシース共鳴といわれている。このとき

の真空領域の電界を E_0 とするとプラズマ中の電界 E_p は E_0/K となる。 ω が ω_p より小さいときは K は負であるから E_0 と E_p は逆方向でその大きさの比は

$$\left| \frac{E_p}{E_0} \right| = \frac{d-p}{p} \quad (5)$$

となる。

磁界が図の z 方向に加えられると、誘電率は

第 1 図

第 2 図

$$K_{\perp} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_c^2} \left(1 - \frac{k_{\perp}^2 v_e^2}{2\omega_c^2} \right) - \frac{k_{\perp}^2 v_e^2}{2\omega_c^2} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - (2\omega_c)^2} \quad (6)$$

となる。ここで ω_c はサイクロトロン周波数、 $v_e / \sqrt{2} \omega_c$ は電子のジャイロ半径で、(6)式は $k_{\perp}^2 v_e^2 / 2\omega_c^2$ が小さいときに成立つ式である。 $K_{\perp} = 0$ が静電波の分散式を与えるから、近似的に

$$\omega^2 = \omega_c^2 + \omega_p^2 - \frac{k_{\perp}^2 v_e^2}{2\omega_c^2} \left(1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_p^2 - 3\omega_c^2} \right) \quad (7)$$

となる。 $K_{\perp}$ は第2図のような関係にあるから静電波の周波数はA点に相当し、シース共鳴の周波数はB点に相当するところになる。プラズマが薄く、真空領域が厚いときは(5)によって $E_p > E_0$ になる。したがって固有の波が立たなくとも E_p が E_0 より大きいことも説明できる。また $\omega = \omega_c$ で $E_p = 0$ になることは(5)から明らかである。

ブラッキングを行う場合は磁界が一様でないから、固有の波を立たせることはきわめて難しい。シース共鳴ならば共鳴が幅をもつことになる。ブラッキングが最も有効である周波数が、固有周波数か、シース共鳴かを数量的に検討することは困難かも知れないが、電極間隔を変えた実験をすれば容易に判別できるであろう。固有波の励起ならば周波数は変わらず、シース共鳴なら変えることになる。