

고주파플라즈마결층의 모형화에 대한 연구

김철송, 리대남

고주파속에서 방전하는 플라즈마에서는 비선형특성을 가지는 결층과 공간적으로 균일한 체적플라즈마가 형성되므로 결층에 대한 모형화는 대단히 중요하다.

논문에서는 고주파가 걸린 플라즈마에서의 결층에 대한 물리적해석에 기초하여 결층의 전기적모형화를 진행하였다.

1. 고주파플라즈마결층의 물리적모형화

플라즈마결층의 두께는 데바이길이 λ_D 와 관련되어있는데 플라즈마의 충돌자유행로에 따라 달라지고 외부에서 표면에 걸어주는 전압에 의하여서도 달라진다.[1, 2]

직류플라즈마에서는 다음과 같은 가정이 성립한다.

우선 시간에 대하여 결층두께가 일정하고 결층안에서는 이온과 중성립자의 충돌이 없다. 또한 전자는 막스웰분포에 따르며 이온의 열운동속도는 $0(T_i=0)$ 이다. 다음으로 플라즈마와 결층의 경계면에서는 전자밀도와 이온밀도가 같으며 플라즈마와 결층사이의 경계면에서 포텐셜 및 전기마당의 세기는 $0(\Phi=0, \Phi'=0)$ 이다.[1, 3]

그러나 고주파플라즈마에서는 벽표면에서의 결층이 주기적으로 시간의 영향을 받는 인자를 고려하여야 한다.

결층이 고주파로 진동하는 경우 플라즈마중심에서 생성된 이온과 전자의 운동특성을 고려하면 이온과 전자는 각각 주파수 ω 를 가지는 결층의 고주파진동에 응답하는 응답속도와 련관이 있다. 즉 응답속도 τ 는 매 대전립자의 플라즈마진동수 ω_p 의 거꾸수로 볼수 있다.

$$\tau_e = \omega_{pe}^{-1} = \frac{\lambda_D}{\sqrt{kT_e/m}} \quad (1)$$

$$\tau_i = \omega_{pi}^{-1} = \frac{\lambda_D}{\sqrt{kT_e/M}} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 매 대전립자의 진동수는 질량에 거꾸비례한다는것을 알수 있다. 즉 전자보다 이온의 질량이 크기때문에 일반적으로 비평형플라즈마속에서는 전자의 운동(전자진동수는 \sim 수GHz이다.)에 비하여 이온은 멎어있다고 가정할수 있으며 ($\omega_{pi} \ll \omega_{pe}$) 매 대전립자들과 결층의 진동주파수의 비교를 통하여 고주파플라즈마결층특성을 해석할수 있다. 결층의 진동주파수가 이온진동주파수보다 훨씬 작은 경우 ($\omega \ll \omega_{pi}$) 이온과 전자는 모두 고주파진동에 즉시적으로 응답한다. 즉 결층진동때 임의의 고주파진동신호에 대하여 임의의 시간구역의 순간에서도 모든 대전립자들에 직류결층모형이 적용될수 있다.

반면에 결층진동주파수가 이온의 진동주파수보다 훨씬 크지만 전자의 진동주파수보다 작은 경우 ($\omega_{pi} \ll \omega \ll \omega_{pe}$) 이온은 결층-플라즈마경계에서 결층의 움직임에 따르는 고주파진

동의 평균직류값으로 응답하게 되지만 전자는 결층의 진동특성시간변화에 대하여 응답한다. 이러한 조건은 일반적인 고주파플라즈마에 해당하는 경우로서 이온은 직류결층특성을 따르며 전자는 고주파플라즈마결층특성을 따른다고 볼수 있다.

결층진동주파수가 전자주파수보다 훨씬 큰 경우 ($\omega_{pe} \ll \omega$)에는 정전기적인 장애로 벽 표면으로부터 플라즈마로 입사되는 전자플라즈마파가 발생한다.

결층진동주파수가 이온진동주파수보다 훨씬 크지만 전자진동주파수보다 작은 일반적인 고주파방전조건에서 고주파결층에서의 류동포텐셜 Φ_w 는 표면으로 향하는 이온묶음과 전자묶음이 같다는 조건을 리용하여 구할수 있다. 벽표면에 지속적인 고주파신호가 작용하는 동안 표면에 도달하는 전자묶음은 어떠한 순간에 순시적인 포텐셜에 대한 볼츠만분포에 의존한다. 반면에 이온묶음은 직류결층과 같이 고주파신호의 평균적인 직류성분에 따라 응답한다. 즉 $V_1 \sin \omega t$ 의 신호파형을 가지는 고주파진동결층에서 류동포텐셜(Φ_w)에 대한 식은 다음과 같이 표현할수 있다.

$$n_s u_B = \left\langle \frac{1}{4} n_s \bar{v}_e e^{e(V_1 \sin \omega t + \Phi_w)/(kT_e)} \right\rangle \quad (3)$$

식 (3)을 적분하면 다음과 같다.

$$n_s u_B = \frac{1}{4} n_s \bar{v}_e e^{e\Phi_w/(kT_e)} (\omega/2\pi) \int_0^{2\pi} e^{eV_1 \sin \omega t/(kT_e)} dt \quad (4)$$

식 (4)에서 적분부분을 베셀함수를 리용하여 다시 쓰면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$n_s u_B = \frac{1}{4} n_s \bar{v}_e e^{e\Phi_w/(kT_e)} I_0 \left(\frac{eV_1}{kT_e} \right) \quad (5)$$

보함(Bohm)속도 및 전자의 열운동속도에 대하여 정리하면 식 (5)는 결과적으로 다음과 같다.

$$\Phi_w = \frac{T_e}{e} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2\pi m}{M} \right) - \ln I_0 \left(\frac{V_1}{T_e} \right) \right] \quad (6)$$

즉 고주파플라즈마결층에서의 류동포텐셜은 식 (6)에서와 같이 오른변에 베셀함수가 추가된다.

2. 고주파플라즈마결층의 전기적모형화

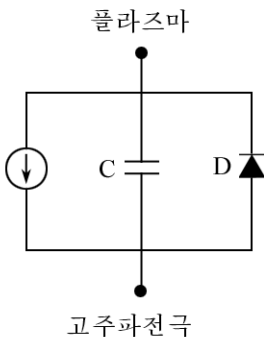


그림 1. 고주파플라즈마결층의 등가회로모형화

고주파플라즈마결층에 대하여 전기회로적모형화를 진행하면 결층의 완전저항특성을 더 정확하게 리해할수 있다. 결층의 진동주파수가 이온의 진동주파수보다 훨씬 크지만 전자의 진동주파수보다 작은 일반적인 고주파방전조건에서 결층을 전기적으로 모형화하면 그림 1과 같이 등가화할수 있다.

회로의 윗부분은 플라즈마부분이며 아래부분은 고주파신호가 걸리는 벽표면을 나타낸다. 이때 플라즈마로부터 아래의 벽표면으로 흐르는 전류를 기준으로 등가회로를 구성할수 있다.

전체 전류는 이온전류와 전자전류의 합인 전도전류와 벽표면에 걸어주는 고주파로 인한 변위전류로 구성될수 있다. 플라

즈마로부터 벽표면으로 흐르는 정전류원은 시간에 대하여 변하지 않는 보름속도의 이온 묶임에 의한 이온전류를 나타낸다. 전자전류는 결층포텐셜에 대한 볼츠만지수함수로서 플라즈마포텐셜과 반대로 벽표면전압이 +로 대전될 때에만 벽표면으로 흐른다. 변위전류는 콘덴샤로 표시할수 있다. 이때 콘덴샤용량은 고정된 상수값이 아니라 고주파플라즈마결층 길이의 변화로 하여 플라즈마생성조건 및 고주파신호의 크기, 주파수 등에 따라 변한다.

한편 결층표면으로 향하는 이온묶임 Γ_i 와 전자묶임 Γ_e 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Gamma_i = n_s u_B \quad (7)$$

$$\Gamma_e = \frac{1}{4} n_s \bar{v}_e e^{\Phi_w / T_e} \quad (8)$$

여기서 \bar{v}_e 는 평균전자열운동속도인데 $\bar{v}_e = [8kT_e / (\pi m)]^{1/2}$ (m 은 전자질량)이다.

이온전류 I_i , 전자전류 I_e , 변위전류 I_d 는 병렬회로로 구성되며 벽표면의 전극면적을 A , 결층포텐셜을 V_{sh} 라고 할 때 플라즈마로부터 벽표면으로 흐르는 전체 전류 I_{rf} 는 식 (7)과 (8)에 의하여 다음과 같이 표시할수 있다.

$$I_{rf} = -en_s u_B A + \frac{1}{4} n_s \bar{v}_e e^{-V_{sh} / T_e} A + I_d \quad (9)$$

결층의 전기회로적모형화에 기초하여 결층을 완전저항요소만으로 간단하게 구성하면 전자전류, 이온전류성분은 결층포텐셜에 대한 전도전류로서 결층에 형성된 포텐셜과 관계되는 저항성분으로 표현할수 있으며 저항과 콘덴샤의 병렬결합형태로 표현할수 있다.(그림 2)

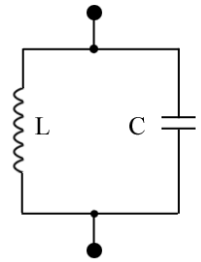


그림 2. 고주파 플라즈마결층완전 저항의 모형화

맺 는 말

고주파가 걸린 플라즈마에서의 결층에 대한 물리적해석에 기초하여 결층의 전기적모형화를 진행한 결과 결층을 완전저항요소만으로 구성하면 전자전류, 이온전류성분은 결층포텐셜에 대한 전도전류로서 결층에 형성된 포텐셜과 관계되는 저항성분으로 표현할수 있으며 저항과 콘덴샤의 병렬결합형태로 표현할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] G. Herzberg; Plasma Source Sci. Techno., 1, 96, 2014.
- [2] K. Godyak et al.; Plasma Source Sci. Techno., 1, 36, 2012.
- [3] P. Chabert et al.; Physis of Radio-frequency Plasma, Cambridge University Press, 120~136, 2011.

Modeling of Radio-Frequency Plasma Sheaths

Kim Chol Song, Ri Thae Nam

In this paper we developed electrical modeling of sheaths on basis of physical analysis of sheaths of radio-frequency plasma. We made sheaths be equal to impedance elements by electrical modeling over the sheaths formed nearby electrode.

Key words: sheath, radio-frequency plasma