

자화 플라즈마의 분산특성과 유효광학계수 변화

라상호 · 정재성 · 오범환 · 박세근

인하대학교 전자전기 컴퓨터 공학부 반도체 전공
(1999년 11월 1일 접수)

dispersion characteristics and RF power absorption for a magnetized plasma

Sang-Ho Rha, Jae-seong Jeong, Beom-hoan O, Se-Geun Park

School of Electrical & Computer Eng. Inha University
(Received November 1, 1999)

요 약 - 축방향의 약한 자기장(약 1~20 gauss)으로 자화된 inductively coupled plasma의 투과깊이와 전파상수의 특성변화를 계산하였다. 자화 플라즈마에 있어서 전자밀도의 증가로 인한 플라즈마의 투과깊이 감소와, 그와 상반되는 충돌주파수 증가로 인한 투과깊이 증가를 고려하여, 보다 균일한 플라즈마 공정을 위한 기초 자료로서 중성 입자와 전자간의 충돌주파수, 전자밀도 및 자기장의 크기와 플라즈마 투과깊이 간의 상관관계를 확인하였다. 통상적인 저압 공정 플라즈마 조건하에서, 약 4.8 gauss의 자기장이 축방향으로 인가되는 경우 cyclotron 공명에 의해 투과깊이가 최소값을 가지는 것을 재확인하였으며, 그 이상의 자기장에서는 원형 편광파의 침투깊이를 비롯한 제반 특성의 급격한 변화를 볼 수 있었다.

Abstract - It has been well known that weak axial magnetic field on the process plasma enhances plasma density. As the magnetic field helps a specific polarized EM wave mode to penetrate into the plasma, the energy transfer to the plasma enhances and the ion density increases. We have analyzed systematic change of the dispersion relation caused by the cyclotron resonance condition. This resonance occurs at near 5 gauss to provide minimum penetration depth, as known before. RF penetration depth increases abruptly beyond the magnetic field of 5 gauss, and this phenomena lessen as the collision frequency increases.

1. 서 론

반도체 공정이 대형화됨에 따라 대면적 플라즈마 소스 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 플라즈마의 밀도 및 균일도 문제를 고려할 때, 저압 공정에서 고밀도 플라즈마를 얻을 수 있는 inductively coupled plasma가 주된 연구 대상이 되고 있으며, 안테나의 변형, 축방향의 자기장의 인가 등을 통하여 보다 우수한 성능의 플라즈마 소스 개발을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 약한 축방향의 자기장을 인가하는 경우 이온과 전자의 밀도가 증가하며, 높은 전자온도를 나타낸다 [1, 2]. 부수적으로 인가된 자기장을 시간에 따라 단속할 수 있도록 150 Hz 미만의 교류 전류를 외부 코일에 인가하면 발생된 플라즈마는 높은 이온밀도를

유지하면서도 낮은 전자온도와 좋은 균일도를 갖게 된다 [3]. 본 논문에서는 이러한 다양한 공정 plasma의 특성을 이해하기 위해 인가 RF파의 분산식을 이용하여 다양한 조건에 대해 자화된 ICP의 투과깊이와 전파상수의 변화를 계산하였다. 약 20 gauss의 축방향 자기장이 인가되는 경우, 비자화된 플라즈마에 비하여 유효굴절율은 100여 배 이상, 투과깊이도 약 100배 가량 증가하는 것을 확인하였으며 이와 함께 전자의 밀도, 충돌주파수 및 자기장의 크기가 투과깊이와 어떠한 상관관계를 가지고 있는지 파악하였다.

2. 플라즈마의 고주파 에너지 흡수 모델

ICP의 평면형 코일에 인가되는 수 MHz의 고주파

전력은 주로 플라즈마에 수직으로 입사하게 된다. 이 전력이 플라즈마에 에너지를 공급하며, 전자와 이온간의 질량차로 인하여 인가되는 고주파 에너지는 대부분 전자에 인가되는 것으로 근사된다. 플라즈마 내부에 존재하는 전자의 운동을 기술하기 위해 아래와 같은 Langevin 방정식을 따르는 기본 모델을 가정하였다.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} \times \vec{v} \times \vec{B}) - m\nu_m \vec{v} \quad (1)$$

이때, 계산의 편의를 위하여, TE파 만의 식을 고려하고, 축방향으로 인가되는 TE파는 단순히 아래와 같이 진행하도록 정의하였으며, 플라즈마내의 전자 분포, 충돌주파수 및 축방향의 자기장은 균일하다고 가정하였다.

$$E_\theta(z, t) = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \quad (2)$$

ω 는 대개의 ICP소스가 사용하는 인가 주파수 2 13.56 MHz를 기준으로 고려하였으며, ν_m 은 전자와 중성 입자간의 충돌주파수로서 인가 주파수와 비슷한 크기로 고려되어 1~50 mTorr의 압력 하에서 약 1~100 MHz의 값을 갖게 된다.

(1)의 Langevin 방정식과 (2)식을 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ 의 정의에 사용하면 아래의 conductivity 텐서를 얻게된다.

$$\vec{\sigma} = i \frac{Nq^2}{m} \frac{\omega'}{\omega'^2 - \Omega^2} \begin{pmatrix} 1 & i \frac{\Omega}{\omega'} & 0 \\ -i \frac{\Omega}{\omega'} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \frac{\Omega^2}{\omega'^2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, $\omega' = +i\nu_m$, $\omega^2 = \frac{q^2 B_z^2}{m^2}$, $\omega_p^2 = \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m}$ 로 정의되었다. 이때 ω_p 는 전자의 플라즈마 주파수이며, ω_c 는 전자의 cyclotron 주파수이다. 아래의 식 (4)에 주어진 전도율 텐서와 유전 텐서 관계식으로부터 식 (5)의 유전 텐서를 구할 수 있다.

$$\vec{\epsilon}_r = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\omega'}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega'^2 - \Omega^2} & -i \frac{\omega_p^2 \Omega}{\omega(\omega'^2 - \Omega^2)} & 0 \\ i \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega'^2 - \Omega^2)} & 1 - \frac{\omega'}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega'^2 - \Omega^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega'^2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

이제, 맥스웰 방정식으로부터 아래의 전기장 파동 진행 방정식을 얻고

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} \quad (6)$$

식 (5)의 유전 텐서를 위의 식 (6)에 적용하여 아래와 같은 분산 방정식을 얻어내었다.

$$\frac{c^2}{\omega^2} k^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega' + \Omega)} \quad \text{for Left circular polarization (L.C.Pol)} \quad (7-a)$$

$$\frac{c^2}{\omega^2} k^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega' - \Omega)} \quad \text{for Right circular polarization (R.C.Pol)} \quad (7-b)$$

위의 분산 방정식으로부터 존재 가능한 RF파의 전파상수 k 와 ω 의 관계를 구하고, 플라즈마의 투과깊이 및 effective optical index를 계산하였다. 본 논문에서

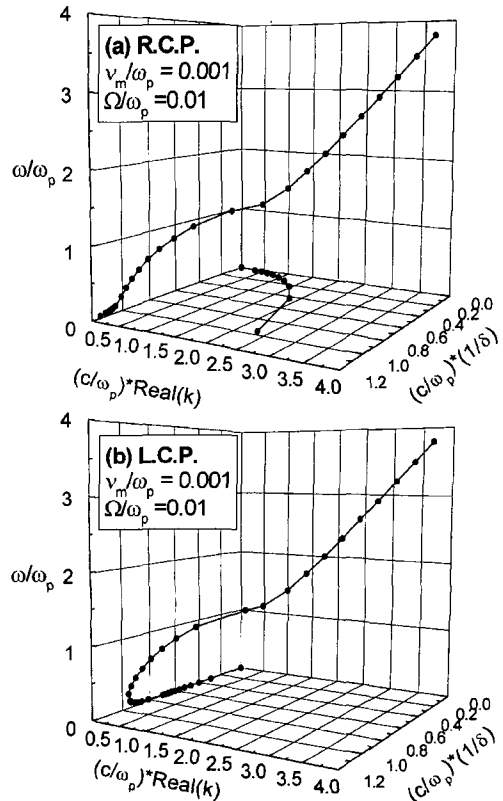


그림 1. 자화 플라즈마의 TE파 분산 관계도. (a) 우원편광파, (b) 좌원편광파.

서는 effective optical index를 $real(k)/k_0$ ($k_0 = \omega/c$, $c =$ 광속, $\omega = 2\pi \times 13.56$ MHz)로 규격화하여 정의하였다. 이때, 분산 관계식 7-(a)와 (b)로부터 k 의 복소 평면에 ω 와의 관계를 얻으면, 그림 1과 같은 전형적인 분산 특성 곡선을 얻게 되는데, 전자와 중성입자간의 충돌에 의하여, 축방향 자기장에 의한 공명효과와의 감소 경향을 볼 수 있으며, 이를 기반으로 보다 나은 공정 변수 조건을 얻는 상황의 예측을 가능하게 하였다.

3. 수치계산된 플라즈마 특성과 논의

자화 플라즈마의 축방향 자기장 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 두 종류의 원형 편광파에 대한 투과깊이 변화 양상을 그림 2에서 비교하고 있다. 그림 2-(a)에서 보여주고 있는 좌원편광파(L.C.Pol)의 경우 축방향 자기장에 의하여 자화됨에 따라 투과깊이가 증가하고 있으며, 우원편광파(R.C.Pol)의 경우 투과깊이가 4.8 gauss에서 최소값을 가지고 그 이상의 자기장이 인가되

면 투과깊이가 급격히 증가하고 있다. 그 반면에 그림 2-(b)에서 보여주고 있는 유효굴절율은 좌원편광파의 경우 자화됨에 따라 단순 감소하는 반면, 우원편광파의 경우에는 유효굴절율이 자기장 인가에 따라 급격히 증가하다가 약 4.8 gauss에서 극대화되고, 그 이상의 자기장이 인가되면 다소 감소하지만 여전히 상당히 큰 수치를 유지하는 특이한 경향을 보이고 있다. 이와 같은 좌원편광파와 우원편광파의 축방향 자기장에 대한 특이한 특성 변화로 인하여 약 10 gauss이상으로 자화된 플라즈마는 플라즈마 내부에서도 주로 우원편광파에 의한 에너지 흡수가 가능하게 된다. 좌원편광파의 경우 짧은 투과깊이로 인하여, 플라즈마 내부 전계 형성과 에너지 인가에 큰 영향을 미치지 못하고 있으나, 우원편광파의 경우 플라즈마 내부에 전계를 형성하여 에너지를 인가시키기에 충분한 투과깊이를 가지고 있으며, 이에 대한 전자 가열이 플라즈마 밀도 향상과 특성 형성에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 예상되고 있다 [1]. 단순히 고정 자기장으로 자화된 플라즈마는 우원편광파로부터 형성되는 전계에 의한 전자 가열로 높은 전자온도를 가지게 된다는 점이 잘 알려져 있으나 [1] 자기장 변화에 따른 제반 특성 변화는 아직 그리 체계적으로 밝혀지지 못하였고, 특히 자기장의 주기적 단속이나 변화에 따른 특성 변화는 공정상의 효과만 보고되어 있다 [3]. 또한 우원편광파의 특성이 약 5 gauss 정도의 자기장에서 특이점을 갖는 이유는 RF 주파수와 축방향 자기장에 의한 cyclotron 주파수 공진에 기인한다. 약 5 gauss 정도의 축방향 자기장이 인가되는 경우 $\Omega/2\pi$ 는 약 13.99 MHz의 값을 갖게 되며, 이로 인하여 식 7-(b)의 분모에서 보이듯이 플라즈마의 cyclotron frequency 공진으로 투과깊이는 급격한 감소를 하게되며, 유효 굴절율을 주는 실수부도 급격히 증가하는 것이다. 이는 대부분의 전자기파가 효과적으로 표면에서 차단되는 동시에 유효 굴절율 변화에 따른 특성변화도 수반되고 있음을 암시한다.

자화 플라즈마와 전자밀도와의 상관관계를 확인하기 위하여 그림 3에 전자밀도를 변화시킨 세가지 경우에 대해 투과깊이와 유효 굴절율의 변화 양상을 비교하였다. 전자밀도의 큰 변화에 대해서도 자기장에 따른 특성 변화 형태는 유사하게 유지되고 있음을 알 수 있으나, 자화된 플라즈마의 전자밀도가 증가함에 따라 투과깊이는 전체적으로 감소하고 있으며, 유효 굴절율은 전체적으로 상승되었다. 이는 단순히 전자밀도 증가로 인

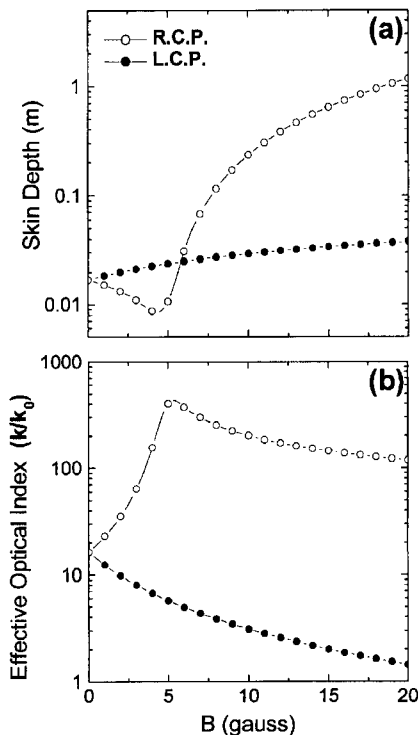


그림 2. 축방향 자기장이 인가된 경우의 투과깊이와 effective optical index.

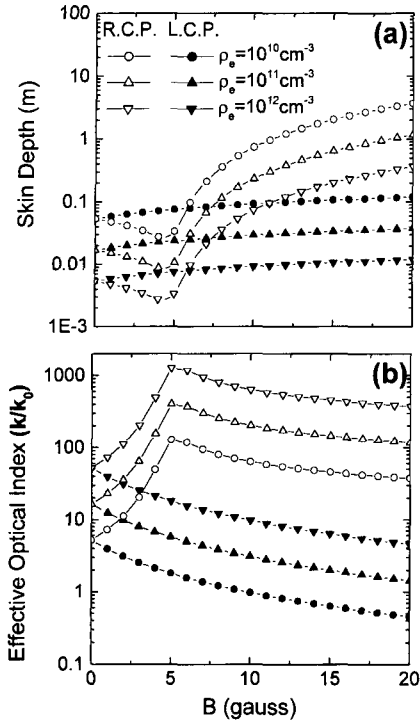


그림 3. 전자밀도 변화에 따른 자화 플라즈마의 특성 변화 ($\nu_m = 13.56 \text{ MHz}$). (a) 투과깊이, (b) effective optical index.

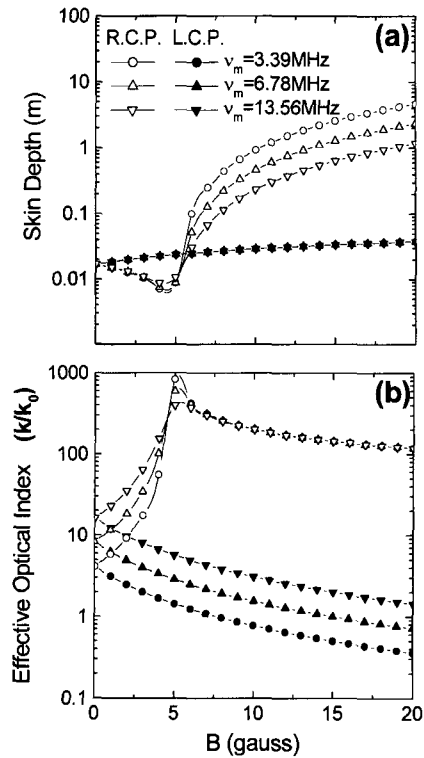


그림 4. 충돌주파수 변화에 따른 자화 플라즈마의 특성 변화 ($\rho_e = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$). (a) 투과깊이, (b) effective optical index.

한 플라즈마의 전도를 향상해 기인하는 것으로 생각되며, 이러한 점에 미루어 교번 자기장의 좋은 효과에 의한 플라즈마 특성 향상은 그 적용 범위가 넓을 것으로 기대되고 있다.

추가적으로, 충돌주파수 변화에 따른 투과깊이 특성 변화 양상을 그림 4에 비교하였다. 비자화된 경우라면, 충돌주파수가 증가함에 따라 투과깊이는 미미하지만 단

순히 증가되는 반면, 자화된 플라즈마는 좌원편광파와 우원편광파의 투과깊이 특성변화가 각각 다른 특성을 보이고 있다. 표 1에 충돌주파수와 자기장 변화에 따른 투과깊이를 정리하여 비교하였다. 그림 4(a)에 보듯이 일반적인 자기장에 따른 특성 변화 곡선 형태는 전반적으로 유사하게 유지되고 있으나, 좌원편광파의 경우 충돌주파수가 증가함에 따라, 투과깊이가 비자화 플라즈

표 1. 충돌주파수와 자기장변화에 따른 투과깊이

B(gauss)	ν_m	Skin depth for L.C.Pol(cm)			Skin depth for R.C.Pol(cm)		
		3.39 MHz	6.78 MHz	13.56 MHz	3.39 MHz	6.78 MHz	13.56 MHz
0		1.681438	1.684422	1.696262	1.681438	1.684422	1.696262
1		1.846520	1.848774	1.85774	1.498377	1.502592	1.519232
2		1.998052	1.999832	2.00692	1.289826	1.296425	1.322206
3		2.138901	2.140352	2.146137	1.041046	1.053548	1.100931
4		2.271047	2.272259	2.277096	0.714919	0.752672	0.875611
5		2.395927	2.396960	2.401081	0.882759	0.880790	1.069520
7		2.627965	2.628748	2.631873	25.20594	12.78968	6.761487
10		2.941935	2.942493	2.944722	92.83811	46.54043	23.51216
15		3.401458	3.401819	3.403262	256.4880	128.3305	64.33823
20		3.805930	3.806188	3.807218	467.5325	233.8371	117.0603

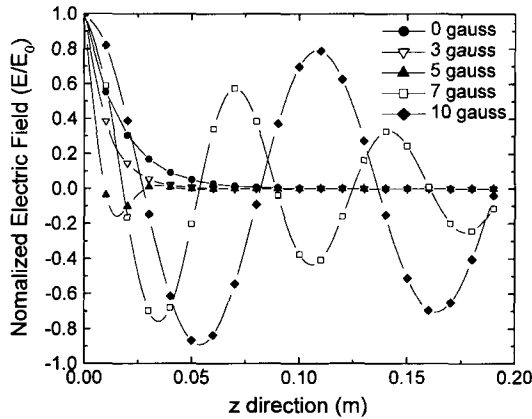


그림 5. 축방향 자기장이 인가된 경우 플라즈마내의 전계분포($\rho_e = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $\nu_m = 6.78 \text{ MHz}$)

마의 경우에서와 비슷하지만 아주 미미하게 증가하고 있으나, 우원편광파의 경우 축방향 자기장이 약 5 gauss보다 작은 경우에는 충돌주파수가 증가함에 따라 투과깊이의 최소치는 증가하고 있으며, 약 5 gauss 이상에서는 반대로 충돌주파수 증가에 따라 투과깊이가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 식 (4)와 식 (5)에 보듯이 좌원편광파와 우원편광파의 cyclotron 공진에 대한 특성이 다른 것에 기인하는 것으로 이해된다. 축방향 자기장이 4.8 gauss이면 gyration 주파수 Ω 가 RF인가 주파수 보다 큰 값을 갖게 되는데, 좌원편광파의 경우 Ω 와 ω 간의 합이 투과깊이와 유효 굴절율을 결정하는 변수로 작용하고 있는 반면에 우원편광파의 경우는 Ω 와 ω 간의 차이가 투과깊이와 유효 굴절율을 결정하므로, 분산 관계식의 특이점 형성 부분의 차이에 의한 것으로 이해된다. 또한, 플라즈마 내에 형성되는 전계의 분포를 보다 쉽게 시각적으로 비교되도록, 전계 투과깊이에 따른 전계변화를 규격화 하여 그림 5에 나타내었다. 이는 참고 문헌 2에 보인 전산 모사 결과와도 동일한 경향을 나타내고 있는데, 5 gauss 이상의 축방향 자기장에 대하여는 k의 허수부에 의해 지수적으로

감소하는 전계특성 외에도 k의 실수부가 커지면서 전계의 위상이 축방향을 따라 주기적으로 변화하고 있음을 확인시켜 주고 있으며, 이는 플라즈마 전자온도에 크게 영향을 미칠 것으로 고려되고 있다.

4. 결 론

자화 플라즈마의 특성을 파악하기 위하여 분산관계식을 복소공간에 나타내고, 유효 굴절율과 투과깊이의 변화 특성을 수치계산 하였다. 우원편광파의 경우 약 4.8 gauss의 축방향 자기장이 인가되면 cyclotron frequency 공진에 의한 제반 특이 특성을 나타내게 되며, 그로 인해 수반되는 자기장 인가에 따른 제반 특성 변화를 계산하였다. 충돌주파수와 전자밀도 변화에 따른 특성 변화 곡선의 차이를 확인하였고, 특히 흥미롭게도 충돌주파수 증가에 따라 최저 투과깊이는 높아지는 반면 평균 투과깊이는 낮아지는 것으로 파악되었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 과학기술부에서 지원하는 선도기술개발사업의 차세대 평판표시장치 기반기술개발사업과 한국 반도체 연구조합주관의 시스템 IC 2010 사업과 교육부 BK21 사업의 부분적인 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 이호준, 서울대학교 박사학위 논문, 1999. 8. 18.
 [2] Ho-Jun Lee, Heung-Sik Tae, Youn Taeg Kim, Ki-Woong Whang, IEEE Transactions on plasma science, Vol. 27, No. 1, 52-53, February 1999.
 [3] 정재성, 김철식, 김철호, 박세근, 오병환, '98 전자공학회 추계 종합학술대회 '98.11.21, 경북대학교, 대구, Korea. 1998. 11. 21.