ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 10, pp. 1706~1711, 2016
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.10.1706

Cutoff Probe를 이용한 자화유도결합 플라즈마의 특성 연구

A Study on Magnetized Inductively Coupled Plasma Using Cutoff Probe

손 의 정* · 김 동 현* · 이 호 준†
(Eui-Jeong Son · Dong-Hyun Kim · Ho-Jun Lee)

Abstract - Electromagnetic wave simulation was performed to predict characteristics of manufactured cutoff probe at low temperature magnetized plasma medium. Microwave cutoff probe is designed for research the properties of magnetized inductively coupled plasma. It was shown that the cutoff probe method can safely be used for weakly magnetized high density plasma sources. Cutoff probe system with two port network analyzer has been prepared and applied to measure electron density distributions in large area, 13.56MHz driven weakly magnetized inductively coupled plasma source. The results shown that, the plasma frequency confirmed cut-off characteristics in low temperature plasma. Especially, cut-off characteristics was found at upper hybrid resonance frequency in the environment of the magnetic field. In case of a induced weak magnetic field in inductively coupled plasma, plasma density estimated from the cutoff frequency in the same way at unmagnetized plasma due to nearly same plasma frequency and upper hybrid resonance frequency. The plasma density is increased and uniformity is improved by applying a induced weak magnetic field in inductively coupled plasma.

Key Words : Inductively Coupled Plasma, Cutoff Probe, 전자파 시뮬레이션, Plasma diagnostics, Plasma parameters

1. 서 론

반도체 식각 공정에서 유도결합 플라즈마는 다양한 분야에 응용되고 있다. 최근 반도체 소자가 소형화 되면서 생산성 향상 및 비용 절감이 필요한 시점이다. 이런 점들을 기존보다 향상시키기 위해서 플라즈마 장치에 요구되는 특성은 450[mm] 대면적 wafer 제조 공정에서 균일하고 높은 밀도의 플라즈마를 생성해야 하며 높은 전력 전달 효율 가져야 한다. [1] planer type의 유도결합플라즈마의 경우 대면적이 용이하지만 저압에서 전력전달 효율이 떨어진다. 하지만 이러한 단점을 보완한 자화유도결합플라즈마에서 공정 결과와 소자 품질에 결정적인 역할을 하는 플라즈마 변수 진단에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 일반적으로 플라즈마 진단에 많이 사용되는 langmuir probe는 RF 전위 진동에 의한 보상으로 인해 정확한 플라즈마 변수를 측정하기 어려우며, cutoff probe에 비해 비교적 구조가 복잡하다[2].

본 연구에서는 고밀도 플라즈마 장치인 자화유도결합 플라즈마의 진단을 위해 Microwave Cutoff Probe를 제작하고, 플라즈마장치의 운전조건에 따른 밀도변화와 공간분포를 조사하였다. probe 제작에 앞서 자기장이 인가된 저온플라즈마 매질에서 전자파의 cutoff 특성을 시뮬레이션 하였다. 특히 자기장이 인가된 저온플라즈마 매질에서의 probe의 특성을 시뮬레이션 하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.
E-mail: hedo@pusan.ac.kr
* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.
Received : June 17, 2016; Accepted : August 29, 2016

2. 본 론

2.1 시뮬레이션 구성 및 방법

그림 1은 전자파 시뮬레이션에 적용된 챔버 개략도이다. 실제 챔버 사이즈는 반경 270[mm], 높이 360[mm]이지만 경향성을 살펴보기 위한 목적으로 크기를 1/3 줄여서 시뮬레이션을 수행하였다. 플라즈마는 기본적으로 Drude model을 사용하였으며 이때 유전상수는 아래와 같은 수식으로 표현된다.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - i\nu_m)} \right] \tag{1}$$

이때 입력 변수는 플라즈마주파수(ω_{pe}), 충돌주파수(ν_m)이며 균일한 자기장(B_0)이 존재하는 경우에는 Gyrotopic model을 사용함으로써 사이클로트론 주파수(ω_{ce}) 및 바이어스 방향(x.y.z)이 추가 된다. 이때 플라즈마의 특성은 Gyrotropic Tensor에 의해 설명될 수 있으며, 만약 z방향으로 균일한 자기장이 존재한다고 가정했을 시 유전율은 아래와 같이 주어진다.

$$\overleftrightarrow{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & 0 \\ -\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \tag{2}$$

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2(\omega - i\nu_m)}{\omega(\omega - i\nu_m)^2 - \omega\omega_{ce}^2} \tag{3}$$

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{-\omega_{pe}^2\omega_{ce}}{\omega(\omega - i\nu_m)^2 - \omega\omega_{ce}^2} \tag{4}$$

$$\varepsilon_3 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - i\nu_m)} \tag{5}$$

$$\omega_{ce} = \frac{qB_0}{m} \tag{6}$$

그림 2는 탐침을 노출시켰을 때 (a)와 세라믹튜브를 이용하여 보호하였을 때 (b) 각각의 cutoff probe를 모델링 한 것이다. cutoff probe로 사용된 동축케이블은 SF-085 모델로써 반경은 각각 core 0.52[mm], inner shield 1.67[mm], outer shield 2.18[mm]이며 inner shield의 유전상수는 2.07이다. 그리고 cutoff probe와 플라즈마 사이의 경계는 쉬스로 구별하였으며, 쉬스의 두께는 debye 길이(λ_d)의 약 6배인 0.2[mm]로 고정하였다.[3]

본 연구에서 cutoff probe의 노출된 탐침의 길이는 10[mm]이며, 간격은 약 2[mm]로 고정하여 전자파 시뮬레이션을 수행하였다. 탐침을 노출 시켰을 때(Bare type)(a)와 세라믹튜브를 이용하여 보호했을 때(Protective type)(b) 각각의 낮은 주파수 영역과 높은 주파수 영역의 cutoff 지점을 S-parameter인 정방향 전달계수(S_{21})를 통하여 확인하였으며. 인가되는 자기장의 크기 및 방향에 따른 cutoff 지점의 변화를 계산결과와 비교하였다.

Protective type의 경우 직경 약 1.6[mm], 두께 0.5[mm]의 세라믹튜브를 플라즈마에 노출되는 탐침부분 즉, core부분만 보호한 형태이며. 이것은 높은 전력을 인가했을 때 탐침이 가열되어 transmission spectrum이 왜곡되는 현상을 방지하기 위한 것이다.

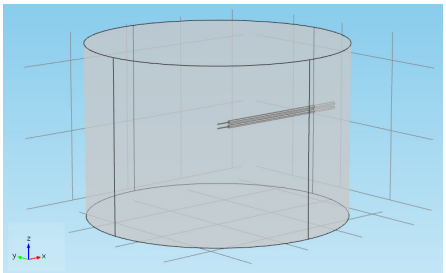
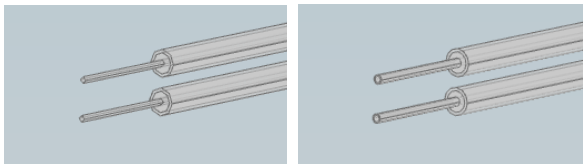


그림 1 cutoff probe를 적용한 챔버 개략도

Fig. 1 schematic diagram of Applied to cutoff probe



(a) Bare type (b) Protective type

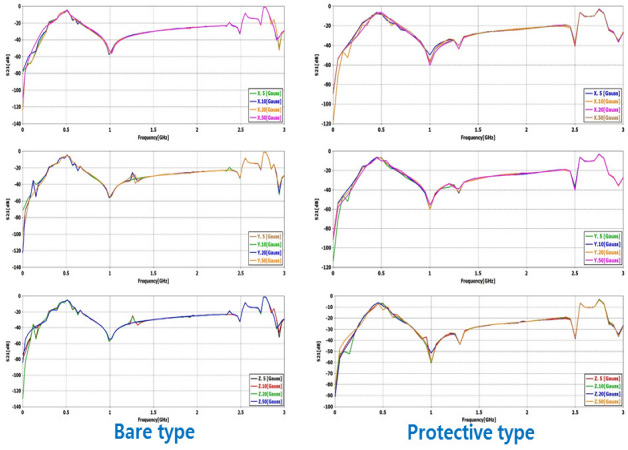
그림 2 cutoff probe 모델링

Fig. 2 cutoff probe modeling

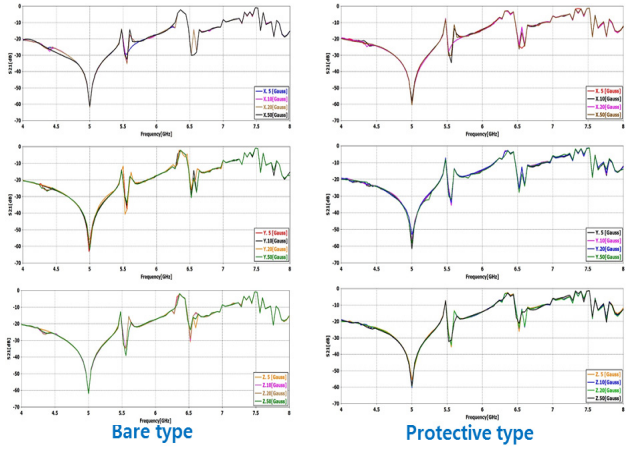
2.2 시뮬레이션 결과

그림 3은 두 가지 cutoff probe의 특성을 자기장 크기 및 방향에 따라 나타낸 S_{21} spectrum 결과이다. 이때 입력 변수인 플라즈마주파수(ω_{pe})는 각각 1[GHz], 5[GHz]이다. 그리고 수식 (6)에 의해 사이클로트론 주파수(ω_{ce})를 입력함으로써 인가되는 자기장의 세기(B_0)가 정해진다.

S_{21} spectrum 영역별로 분석이 가능하다. 낮은 주파수 영역에서는 쉬스 커패시터 성분(C_s)과 플라즈마의 인덕턴스(L_p) 성분이 직렬 공진을 함으로써 임피던스가 최소가 되므로 투과율(S_{21})은 높아진다. 반면, cutoff 지점이 플라즈마 주파수가 되는 영역



(a)플라즈마주파수(ω_{pe})=1[GHz]



(b)플라즈마주파수(ω_{pe})=5[GHz]

그림 3 cutoff probe 모델링 및 자기장 크기, 방향에 따른 S_{21} spectrum

Fig. 3 S_{21} spectrum according to cutoff probe modeling, magnetic field and direction

에서는 플라즈마 커패시터 성분(C_p)과 플라즈마의 인덕턴스(L_p) 성분이 병렬 공진을 함으로써 임피던스가 최대가 되므로 투과율(S_{21})은 작아진다. 그리고 높은 주파수 영역에서는 챔버 내의 공동공진(cavity resonance)에 의해 결정된다.

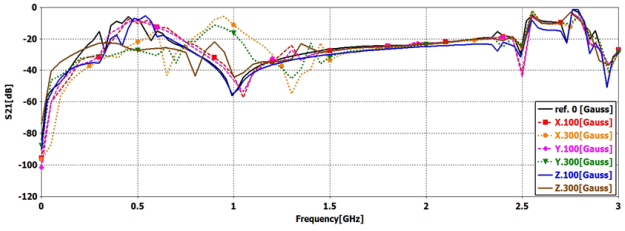
$$w_{low} = \frac{1}{\sqrt{L_p C_s}} \tag{7}$$

$$w_c = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} \tag{8}$$

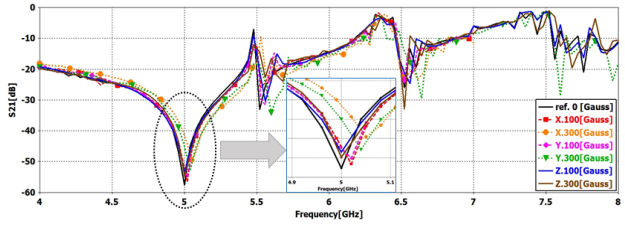
인가되는 자기장(B_0)을 5[Gauss]에서 50[Gauss]로 증가 했을 때 X, Y, Z 방향에 따른 cutoff 지점은 두 가지 cutoff probe 모두 플라즈마주파수(ω_{pe})와 일치하였으며, 투과율도 약 -60[dB]로 비슷한 결과를 얻었다.

그림 4는 cutoff probe를 Bare type으로 고정하고 인가되는 자기장의 크기를 100[Gauss]와 300[Gauss]로 증가시켰을 때의 S_{21} spectrum 결과이다. wave mode는 wave의 진행방향(k) 및 전기장(E), 자기장(B_0)의 방향에 따라 정해진다. 본 연구에서 cutoff probe는 그림 1과 같이 Z방향으로 삽입되어져 있으므로 $k \parallel E$ 관계를 갖는다.

자기장이 존재 하지 않는 경우 cutoff 지점이 입력한 플라즈마주파수(ω_{pe})와 동일하였다. 그리고 $E \parallel B_0$ 관계를 갖는 자기장 인가했을 때(B_z) cutoff 지점은 변화가 없었다. 하지만 $E \perp B_0$ 관계를 갖는 자기장이 존재할 경우(B_x, B_y), 100[Gauss]일 때 1.05[GHz]로 조금 증가하였으며 300[Gauss]일 때는 플라즈마주파수(ω_{pe})의 30% 상승한 1.3[GHz]로 cutoff 지점이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 플라즈마주파수(ω_{pe})가 5[GHz]일 때도 같은 경향성을 나타내었다.



(a) 플라즈마주파수(ω_{pe}) = 1[GHz]



(b) 플라즈마주파수(ω_{pe}) = 5[GHz]

그림 4 자기장 크기 및 방향에 따른 S_{21} spectrum

Fig. 4 S_{21} spectrum according to magnetic field and direction

표 1 플라즈마 주파수에 따른 시뮬레이션 및 ω_{UH}계산 결과 비교

Table 1 Results of simulation and ω_{UH} calculation according to plasma frequency

자기장[Gauss]	ω_{pe}=1[GHz]		ω_{pe}=5[GHz]	
B_x, B_y	Simulation 결과	ω_{UH}계산 결과	Simulation 결과	ω_{UH}계산 결과
100	1.05	1.04	5.02	5.01
300	1.3	1.306	5.05	5.07

표 1은 그림 4의 결과를 토대로 플라즈마주파수(ω_{pe})에 따른 cutoff주파수의 변화를 수식 (9)를 이용해 비교한 것이다. 시뮬레이션을 통한 cutoff주파수가 수식 (9)를 이용하여 계산한 결과와 일치하는 것을 확인하였다. 그리고 $E \parallel B_0$의 경우 정상파(ordinary wave)를 통해 $\omega_{pe} \approx w_{cutoff}$ 관계를 확인하였으며, $E \perp B_0$의 경우 이상파(extraordinary wave)를 통해 $k \perp B_0$ 관계를 만족하는 공진주파수인 상부혼성주파수(ω_{UH} : upper hybrid frequency)가 나타나는 것을 확인하였다.

$$\omega_{UH}^2 = \omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2 \tag{9}$$

2.3 실험구성 및 방법

그림 5은 본 연구에 사용된 자화유도결합플라즈마 발생장치이다. 챔버는 stainless steel(sus304)로 제작되었으며 내경 540[mm], 높이 360[mm]의 크기를 갖는 원통 형태이다. 챔버 상단에 외경 300[mm]의 알루미나가 위치해 있으며 그 위에 2턴 spiral 형태의 안테나를 설치하여 13.56[MHz]의 RF파워를 인가하였다. 그리고 외부의 Helmholtz 코일에 DC전원을 공급하여 Z방향으로의 균일한 자기장을 발생시켰으며, 플라즈마를 진단하기 위한cutoff probe는 r방향으로의 공간분포 측정이 용이하도록 챔버 중심에 설치하였다.

그림 6은 전자파 시뮬레이션과 동일하게 두 가지 type으로 제작한 cutoff probe이다. SF-085 동축케이블을 사용하였으며, 탐침 길이는 10[mm], 탐침 간 간격은 약 2[mm]로 고정하였다. 그리고 cutoff probe의 몸체는 내열설이 강한 세라믹을 사용하여

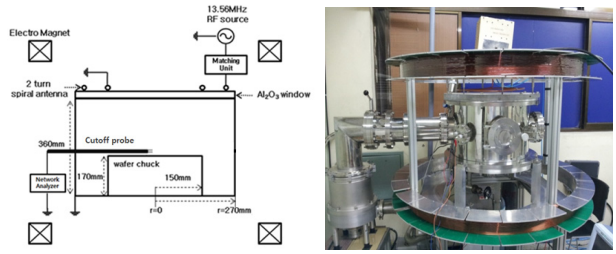


그림 5 자화유도결합플라즈마 실험 장치

Fig. 5 Magnetized inductively coupled plasma experimental equipment

(a) Bare type

(b) Protective type

그림 6 제작된 cutoff probe

Fig. 6 Manufactured cutoff probe

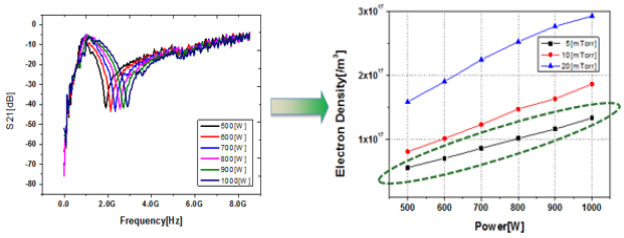


그림 7 S_{21} spectrum 및 RF파워 따른 전자밀도

Fig. 7 Electron density according to S_{21} spectrum and RF power

내부의 동축케이블을 보호하였으며, (b)의 경우 고밀도 영역에서 전자와 이온의 influx로 인해 탐침의 손상되는 것을 방지하기 위해 몸체와 동일하게 보호하였다.[4]

cutoff probe를 이용한 진단법은 플라즈마 내부에 도체부가 노출된 2개의 동축케이블과 네트워크 분석기로 구성되어 진다. 이때 동축케이블은 각각 wave를 방사하는 안테나 역할 및 탐지 안테나 역할을 한다.

본 연구에서는 이러한 시스템에서 S_{21} spectrum을 통해 cutoff주파수를 측정하여 전자밀도를 계산하였다.[5]

2.4 실험결과

그림 7은 Bare type의 cutoff probe를 사용하여 측정한 S_{21} spectrum 및 RF파워, 압력 따른 전자밀도를 나타낸 것이다. RF파워가 증가할수록 cutoff주파수도 점점증가 하였으며, 투과율은 -45[dB] 정도의 일정한 값을 가지는 것을 확인하였다. 그리고 S_{21} spectrum을 통해 측정된 cutoff주파수를 수식 (10)에 대입하여 전자밀도를 계산하였다. RF파워 및 압력이 증가할수록 전자밀도는 선형적으로 증가하였으며, 이때 전자밀도는 ~10^{17}[$/m^3$]이다.

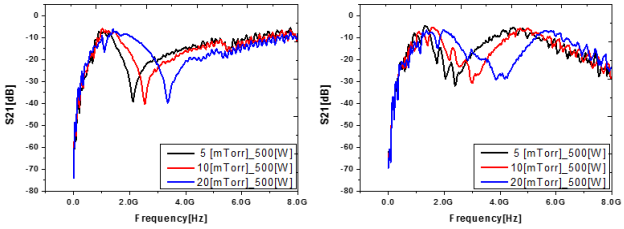
$$w_{pe} = \left(\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (10)$$

ω_{pe}(플라즈마주파수), n_e(전자밀도)

ε_0(유전율) : 8.854×10^{-12}[F/m]

m_e(질량) : 9.1×10^{-31}[kg]

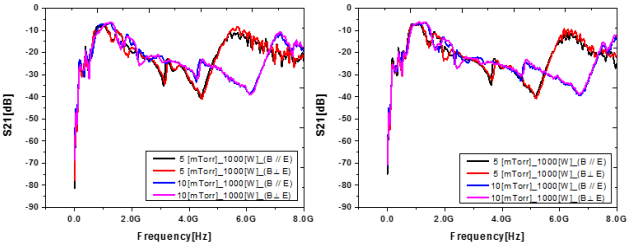
e(전하량) : 1.602×10^{-19}[C]



(a) Bare type (b) Protective type

그림 8 두 가지 cutoff probe에 따른 S_{21} spectrum 비교

Fig. 8 S_{21} spectrum comparison according to cutoff probe of two type



(a) 0[Gauss] (b) 12[Gauss]

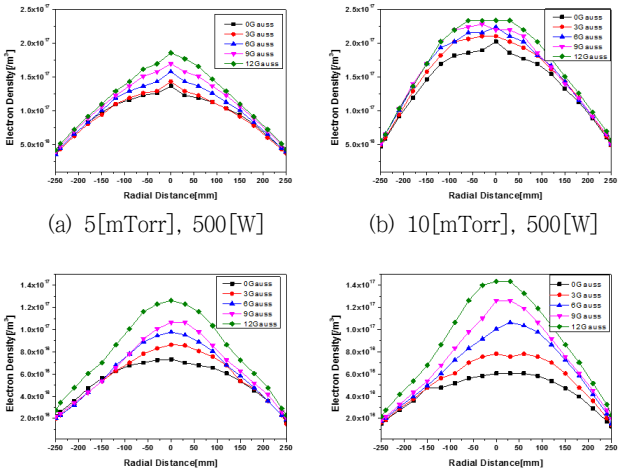
그림 9 외부 자기장에 따른 $E \parallel B_0$와 $E \perp B_0$ 비교

Fig. 9 Comparison $E \parallel B_0$ with $E \perp B_0$ according to external magnetic field

그림 8은 압력 및 RF파워에 따라 탐침을 노출 시켰을 때(a)와 세라믹튜브를 이용하여 보호했을 때(b) 챔버 중심부에서 측정한 S_{21} spectrum을 비교한 것이다. (a)와 같이 탐침을 플라즈마에 노출하였을 때 명확한 cutoff주파수를 측정할 수 있었으며, (b)의 경우 높은 주파수 영역으로 갈수록 고밀도 플라즈마가 되므로 sheath영역이 좁아져서 wave가 투과되는 거리가 충분하지 않고, cutoff probe 제작 시 탐침과 세라믹튜브 사이에서 발생하는 공간적 오차로 인해 차단지점이 명확하게 측정되지 않는 것으로 판단된다.[3][4] 그리고 탐침 길이 및 간격을 동일하게 하였음에도 불구하고 두 가지 cutoff probe 모두 시뮬레이션 결과에 비해 투과율이 약 20[dB] 증가하는 것을 확인하였다.

그림 9는 RF파워는 1000[W]로 고정하고, 압력은 5[mTorr], 10[mToor] 각각의 조건에서 외부자기장 유무에 따른 $E \parallel B_0$와 $E \perp B_0$ 경우 S_{21} spectrum을 비교한 것이다. 이때 cutoff probe는 챔버 중심에 고정하고 방향을 90° 회전했을 때 전기장의 방향(E)과 외부자기장(B_0)의 방향이 수직하게 된다. 외부자기장을 12[Gauss]인가했을 때의 경우 cutoff 주파수가 자기장이 인가되지 않았을 경우보다 조금 높게 측정되었으며, 투과율은 -40[dB] 정도로 거의 동일하였다. 그리고 비교적 약한 외부자기장을 인가함에 따라 $E \parallel B_0$와 $E \perp B_0$ 경우에서 동일한 cutoff주파수가 측정되었다.

그림 10은 압력, RF파워, 외부자기장 변화에 따른 반경방향의 전자분포를 나타낸 것이다. 각각의 조건에 대하여 반경방향으로



(a) 5[mTorr], 500[W] (b) 10[mTorr], 500[W]

(c) 5[mTorr], 1000[W] (d) 10[mTorr], 1000[W]

그림 10 압력, RF파워 및 외부자기장에 따른 전자밀도분포

Fig. 10 The distribution of electron density according to pressure, RF power and external magnetic field

30[mm] 간격씩 bare type의 cutoff probe를 scanning하여 측정하였다.

RF파워 증가 시 플라즈마에 소비되는 파워가 증가함으로 인해 이온화율이 증가하므로 전자밀도는 증가하였으며, 외부자기장 증가 시 반경방향으로의 전자 확산 계수 감소로 인해 전자가 국부적으로 챔버 중심부로 구속되어 전자밀도가 증가하는 경향성을 확인하였다.[6] 그리고 압력 증가 시 300[mm] wafer 영역에서의 전자밀도의 불균일도가 개선되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 두 가지 type의 cutoff probe를 모델링 하여 외부자기장 및 방향에 따른 결과를 전자파 시뮬레이션을 통하여 예측하고 자화유도결합플라즈마에 적용하여 RF파워, 압력, 외부자기장의 변화에 따른 cutoff probe의 신뢰성을 확인하고 각각의 특성을 분석하였다.

약한 자기장을 인가하였을 때 X, Y, Z 방향에 따른 cutoff 주파수(ω_c)는 플라즈마주파수(ω_{pe})와 정확하게 일치 하였다. 그리고 그 이상의 자기장을 인가 시 $k \perp B_0$ 관계를 갖는 경우(B_x, B_y) 상부 혼성주파수(ω_{UH} : upper hybrid frequency)가 나타났으며 이 시뮬레이션 결과는 계산 결과와 일치하였다. 하지만 현 시스템에서 자화유도결합플라즈마의 동작영역이 $\omega_{pe} \approx \omega_{UH}$ 때문에 $E \parallel B_0$와 $E \perp B_0$에 따른 cutoff probe의 외부자기장에 의한 영향은 없었으며, protective type의 경우 시뮬레이션 결과와 달리 bare type에 비해 고밀도 영역으로 갈수록 cutoff probe 탐침간의 간격 및 구조적인 문제로 인해 cutoff 지점이 정확하게 측정되지 않는 것을 확인하였다.

또한 외부자기장을 인가하였을 시 전력전달 효율 증가 및 임피던스 정합 안정성 향상과 전자가 국부적으로 챔버 중심부로 구속되어 전자밀도가 증가하였으며, 압력 증가 시 300[mm] wafer 영역에서의 전자밀도의 불균일도가 개선되는 결과를 얻었다.

감사의 글

"본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (No. 2013H1B8A2032267)."

References

[1] Chen-Fu Chien, J.K. Wang, Tzu-Ching Chang, Wen- Chin Wu "Economic Analysis of 450mm Wafer Migration" IEEE, Semiconductor Manufacturing, 1-4 (2007)

[2] Isaac D Sudit and Francis F chen, Plasma Sources Sci. Technol, 3,162 (1994)

[3] Byung-Keun Na, Dae-Woong Kim, Jun-Hyuk Kwon, Hong-Young Chang, Jung-Hyung Kim et al, "Computational characterization of cutoff probe system for the measurement of electron density", Phys. Plasmas 19, 053504(2012)

[4] K. H. You, S. J. You, D. W. Kim, B. K. Na, B. H. Seo, J. H. Kim, Y. H. Shin, D. J. Seong, H. Y. Chang, "A cutoff probe for the measurement of high density plasma", Thin Solid Films 547, 250-255(2013)

[5] Jung-Hyung Kim, Kwang-Hwa Chung and Yong-Hyeon Shin, "Analysis of the uncertainty in the measurement of electron densities in plasmas using the wave cutoff method", Metrologia 42, 110-114(2005)

[6] Yun-Gi Kim, Study on Diagnostics and Simulation on a Large Area Inductively and Magnetized Inductively Coupled Plasma(2014)

저 자 소 개

손 의 정 (Eui-Jeong Son)

1986년 6월 2일생. 2005년 동의대학교 공대 전기공학과 졸업. 2012년 부산대학교 대학원 공대 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.

Tel : 051-510-1544

Fax : 051-510-1498

E-mail : vhxmwkd2@naver.com

김 동 현 (Dong-Hyun Kim)

1961년 1월 9일생. 1984년 부산대학교 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 부산대학교 PDP연구소 연구원.

Tel : 051-510-1544

Fax : 051-510-1498

E-mail : dhkim11@pusan.ac.kr

이 호 준 (Ho-Jun Lee)

1966년 10월 14일생. 1989년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학부과 졸업(공박). 현재 부산대학교 공대 전자전기컴퓨터공학과 정교수.

Tel : 051-510-2301

Fax : 051-513-0212

E-mail : hedo@pusan.ac.kr