

Experiment and characteristics for size of a planar rf-antenna in Inductively coupled plasma

이효창*, 방진영**, 정진욱*

한양대학교 전기공학과*, 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과**

Abstract

유도 결합 플라즈마의 안테나 크기에 따른 플라즈마 밀도와 온도 분포 등 플라즈마 변수들을 측정하였다. 플라즈마 진단을 위해서 단일 랑뮤어 탐침(Single Langmuir probe)을 사용했으며 전자 에너지 분포함수 측정을 통해 플라즈마 변수들을 측정하였다. 단일 감은 수의 세 개의 안테나를 준비하고 각각의 안테나에 파워를 인가하고 플라즈마 변수들을 측정하였다. 안테나 크기에 따른 플라즈마 분포의 변화는 압력에 따라 많이 변했는데, 낮은 압력에서는 안테나의 의존성은 크지 않았으며 높은 압력에서는 밀도 분포의 변화가 크게 나타났다.

1. 서론

고밀도 유도 결합 플라즈마(Inductively coupled plasma)가 반도체 공정 플라즈마 소스로 각광을 받고 있다. 이러한 유도 결합 플라즈마는 낮은 압력에 높은 플라즈마 밀도를 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 평판원형의 코일에 고주파 전압을 가하면 이에 따라 전류가 흐르고 이로 인한 자기장이 발생하게 된다 ($\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$ (Ampere's law)). 이와 같은 자기장으로 인해 챔버 내부에는 안테나를 따라서 원형의 형태로 전기장($\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$ (Faraday's law))이 발생을 하고, 이로 인해 발생된 원주(θ) 방향의 전기장은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [1].

$$\vec{E}_\theta = -j\omega\mu_0\delta\vec{H}_r, \quad (\omega: \text{고주파 주파수}, \delta: \text{코일에서 } z\text{방향 거리}) \quad (1)$$

자계의 세기는 전류주변이 가장 크므로, 이로 인한 2차 전류는 안테나 부근이 가장 세다.

이러한 사실을 바탕으로 안테나를 다른 크기로 3개를 제작하여 각각의 플라즈마 변수를 측정하였다. 안테나 코일은 원형의 평판 안테나이며, 총 3개의 안테나를 제작하여 실험하였다.

각각의 안테나의 크기는 챔버 사이즈(내경:400mm)를 고려하여 지름 180mm, 260mm, 340mm인 평판형 안테나이다. 안테나의 크기 차이에 따른 효율, 플라즈마 밀도, 전자온도 등을 측정, 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 Experimental set-up

실험 장치 및 안테나 구조는 Figure 1에 나타나 있다. Figure 1(a)는 본 실험에 사용된 안테나 구조이며, 안테나는 동관을 사용하여 내부에 냉각수가 흐를 수 있게 하였다. 또한 챔버 사이즈(400mm)를 고려하여 지름 180mm, 260mm, 340mm 안테나를 제작하였으며, SLP(Single Langmuir probe) 측정 방향은 기하학적 대칭성(geometric symmetry)을 위해서 수평으로 측정하였다.

Figure 1(b)는 실험에 사용된 플라즈마 생성 장비 및 측정 장비이다. 가스는 아르곤을 사용 하였으며, 파워의 구동주파수는 13.56MHz를 사용하였다. 통상적으로 13.56MHz를 사용하는 이유는 국제통신위원회에서 정해 놓은 이유도 있지만, 충돌주파수가 높아 전기장 주기 동안 전자들이 많은 충돌을 하기 때문이다. 인가 된 파워는 플라즈마트사의 auto matcher를 통해서 안테나에 인가된다. 안테나 아랫부분에는 석영판(Quartz plate)이 놓여있으며, 반응기의 지름은 400mm, 높이는 320mm이고 8인치

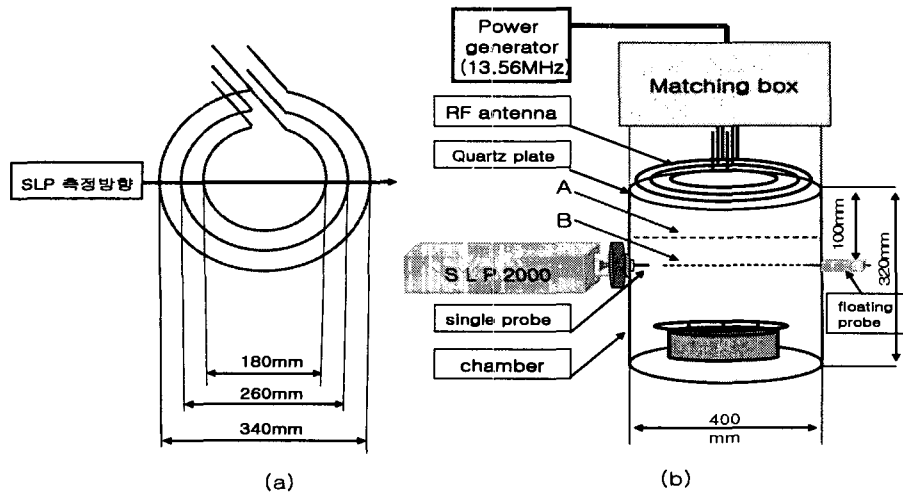


Figure 1. (a) Shape and diameter of antenna (b) Schematic diagram of the experimental set-up of ICP(inductively coupled plasma).

웨이퍼를 올려 놓을 수 있는 기관 홀더가 반응용기 내부 안쪽에 놓여있다. 측정 장비는 플라즈마트사에서 만든 SLP 2000을 사용하였으며, Single Langmuir probe를 사용하여 플라즈마 변수(Plasma parameter: 플라즈마 전위, 전자밀도, 전자온도, 부유전위 그리고 EEPF(electron energy probability function))를 측정하였다. Single Langmuir probe그림은 figure 2에 나타나 있다. figure 2에서 알 수 있듯이 프로브는 텅스텐 팁과 스테인레스 몸체 그리고 세라믹 튜브로 구성되어 있다. 팁의 길이는 10m이며, 지름은 0.1mm이다. 플라즈마가 생성 되는 위치는 표피깊이 (Skin depth) 부근(figure1(b)-A)이며[2], 본 실험은 표피 깊이 (Skin depth)보다 약간 아래에서 측정(figure1(b)-B)하였으므로 생성된 플라즈마의 약간의 확산(diffusion)이 예상된다.



Figure 2. Single Langmuir probe

2.2 실험 방법.

앞서 설명한 Single Langmuir probe를 사용하여 플라즈마 변수를 측정하였다. 인가한 파워는 100w부터 700w까지 100w씩 증가시키면서 측정하였으며, 아르곤 가스 압력은 3mtorr, 5mtorr, 10mtorr, 20mtorr에서 측정하였다. 실험 방향은 안테나 부근 유도된 전기장으로 인한 압력과 파워를 가변 시킴으로써, 안테나 크기에 따른 플라즈마 특성과 효율을 나타내는 것이 목적이다. 본 실험에서 측정된 non-uniformity는 200mm 웨이퍼를 기준으로 계산된 값이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

Figure 3.은 3mtorr에서 입력파워를 200w, 400w, 600w로 가변 시켜 측정한 안테나 지름 크기에 따른 밀도 분포이다. 가로축은 SLP 측정 방향이며, 0점이 챔버 중심이다. 0점을 중심으로 반지름이 9cm, 13cm, 17cm 안테나가 놓여 있다. 플라즈마 밀도 축의 눈금은 로그 스케일(Log scale)이다. 낮은 압력에서는 평균 자유 행정(mean free path)이 크기 때문에 non-uniformity

와 그래프에서 알 수 있듯이 10% 내외의 균등한 분포를 가지며, 안테나 크기에 따른 인가 파워의 증가는 전자밀도의 값을 증가 시킨다. 하지만 안테나 크기에 따른 밀도 분포의 변화에는 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

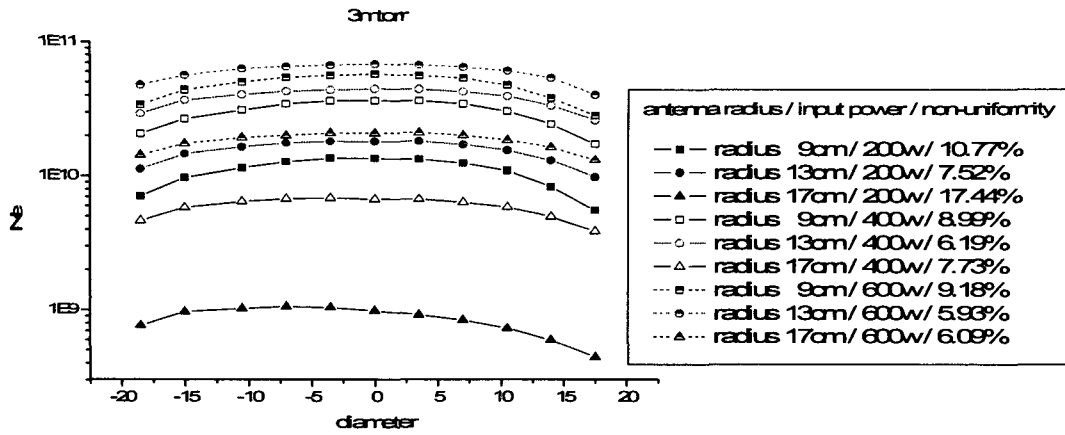


Figure 3. Electron density versus diameter at antenna as measured at 3-mtorr.

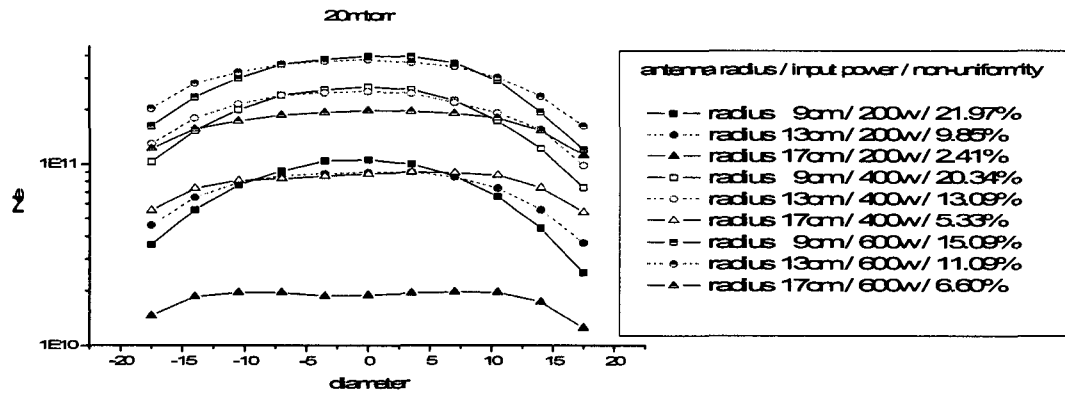


Figure 4. Electron density versus diameter at antenna as measured at 20 mTorr.

하지만, figure 4에서 볼 수 있듯이 20mtorr에서는 3mtorr와는 다른 몇 가지 특징이 나타남을 알 수 있다. 첫째로, figure 3에서 나타났었던 균등성 분포가 깨졌다. 둘째로, 안테나 부근에서의 전자 밀도 상승이 보이며 심지어 압력이 높은 상태에서는 밀도 분포가 최고점이 2개인 곡선도 보인다. 이러한 현상을 확연히 보기 위해 figure 5는 선형으로(Linear scale) 나타낸 것이다.

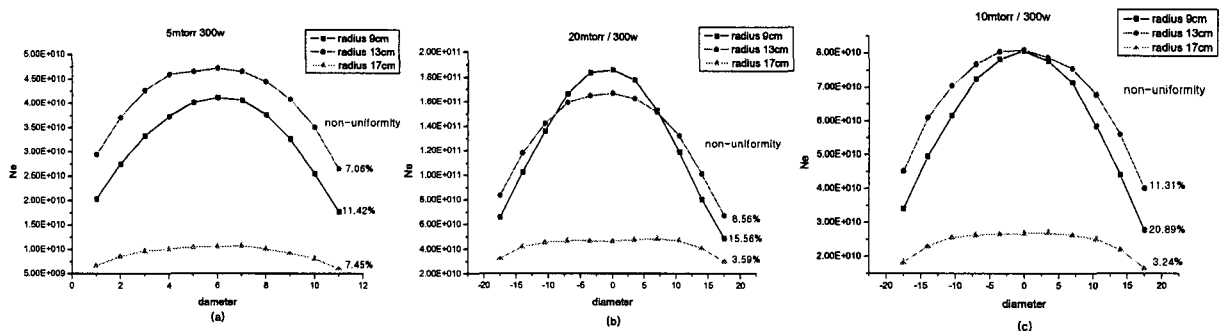


Figure 5. Electron density and uniformity versus diameter at antenna

낮은 압력에서 측정된 그림 5(a)는 figure 3에서의와 마찬가지로 안테나 부근에 집중된 전자밀도를 가지지 않으며, 안테나 모두 비슷한 형태의 베셀 함수(Bessel function) 모양의 밀도 분포(uniformity)를 보인다. 그림 5(b)는 10mtorr에서의 밀도 분포이다. 중심점을 보면 반지름 9cm 안테나의 전자 밀도가 반지름 13cm 안테나의 밀도 값까지 상승했음을 볼 수 있다. 또한 반지름 17cm안테나의 밀도 분포는 최대인 곳이 2개의 형태를 보인다. 이는 압력이 증가함에 따라 평균 자유 행정(mean free path)이

짧아지고 충돌 주파수가 커짐에 따라 에너지 전달이 안테나 주변에 국한되고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 그림 5(c)에서 더욱 잘 드러난다. 그림 5(c)는 20mtorr에서 측정한 데이터이다. 반지름 9cm 안테나가 반지름 13cm 안테나 보다, 중심점에서 더욱 큰 밀도 값을 보인다. 또한 처음에 균등한 밀도 분포를 보였으나 압력이 커지면서 점점 뾰족한 형태를 보임을 알 수 있다. 전자 온도 분포를 아래 그림(figure 6.)에 나타내었다.

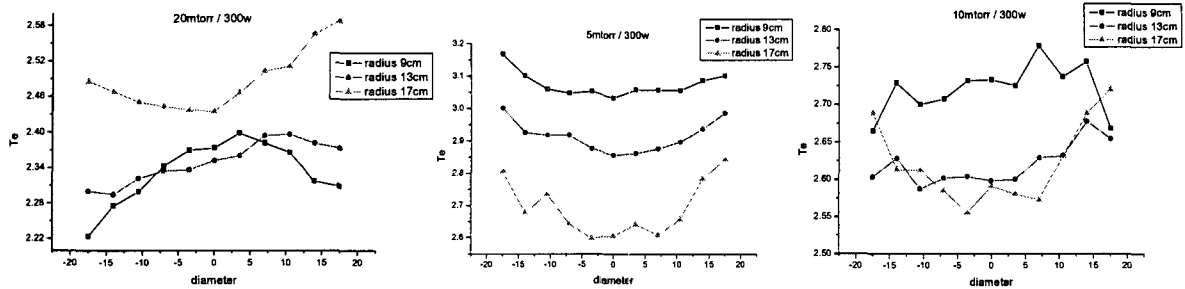


Figure 6. Electron temperature versus diameter at antenna as measured at 300 W.

위 그림에서 알 수 있듯이, 전자온도(Te)는 압력이 증가함에 따라 낮아짐을 알 수 있다. 입자 균형식(particle balance)에 의하여 압력이 증가함에 따라 중성 입자들이 전자 에너지를 빼앗기 때문이다. 또한 전자 온도(Te)의 감소폭에는 약간의 차이가 생긴다. 반지름 17cm 안테나의 경우에는 전자온도(Te)가 조금 감소하였으며, 반지름 9cm, 13cm 안테나는 17cm안테나에 비해서 많은 감소로 20mtorr에서는 17cm 안테나의 전자온도(Te)가 가장 높다. 이는 반지름 9cm 13cm안테나는 밀도가 상승함에 따라 Multi step ionization 많기 때문이다. 그리고 반지름 17cm 안테나에 비해 9cm, 13cm 안테나의 전자온도가 위치에 대해 비슷한 이유는 전자들 간에 에너지 교환이 활발히 이루어졌기 때문이다.[3]

3.2 고찰

유도 결합형 플라즈마(inductively coupled plasma, ICP)는 트랜스포머(Transformer)로 등가 모델링 할 수 있다. 먼저 평판형 안테나의 전자기파 침투 깊이를 δ 라 하고 단면적을 S, 원주 방향의 길이를 l 이라 할 때, 안테나를 변압기의 1차 권선으로 플라즈마를 2차 권선으로 하는 변압기 회로(Transformer circuit)로 가정할 수 있다. 또한 원통형 ICP인 경우 아래와 같은 관계의 결합 계수(coupling coefficient)로 안테나 효율을 기술할 수 있다. [4]

$$k \approx r_0^2 / r^2 \text{ (for } r > r_0\text{)} \text{ and } k \approx r^2 / r_0^2 \text{ (for } r < r_0\text{)} \tag{2}$$

r_0 는 코일 반지름이며, r 은 유효 방전 반경(effective discharge radius)이다.

비록 실험에 사용한 안테나는 평판형이지만, 위치 축만 다를 뿐이며 같은 식으로 기술 할 수 있다고 할 때, 본 실험의 안테나 효율을 생각해 볼 수 있다. 13cm 안테나가 3가지 안테나 중에서 효율이 가장 좋기에 13cm안테나 안쪽 부근에서 effective discharge radius, r 이 생성되었을 것으로 예상된다. 17cm가 가장 낮은 커플링 계수를 가진다. 이는 안테나 지름이 챔버 지름과 거의 비슷함으로 인하여 압력이 증가하여도 9cm, 13cm 안테나에 비해 생성된 전자와 이온이 벽으로 대부분 빠져나가는 것으로도 설명 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 평판형 안테나 크기 차이에 따른 플라즈마 변수를 단일 랑뮤어 탐침으로 측정하였다. 실험 결과의 정확성을 위하여 SLP결과와 P&A solutions의 wise probe로 측정된 결과와 비교하였으며

거의 일치하는 전자 밀도와 분포를 보였다. 본 실험에서 아래의 결론을 얻었다.

- 1) 안테나 주변에 생성된 안테나 형상에 의해 만들어지는 전기장은 위치에 따른 전자 밀도 분포에 영향을 주었으며, 압력이 낮아질수록 두드러진 경향을 보였다.
- 2) 전자 온도는 파워에 큰 영향을 받지 않았으며, 안테나 크기에 따른 특성을 볼 수 있다.
- 3) 안테나 효율은 반지름 13cm 안테나가 가장 우수하였으며, 13cm 부근이 유효 방전 반경임을 예상할 수 있다.

참고문헌

- [1] Michael A. Lieberman, "Principle of plasma discharges and materials processing", pp470-483, 2005.
- [2] 정진욱, "공정 플라즈마 기초와 응용", 청문각, pp152-162. 2003.
- [3] K. H. Lee, T. K. Lee, S. W. Cho and C. W. Chung, "Electrical and plasma parameters of side type ferromagnetic ICP", Gases Electronics Conference 59th(2006,U.S.)
- [4] R B Piejak, V A Dodyak and B M Alexandrovich, "A simple analysis of an inductive RF discharge", Plasma Sources Sci. Technol, pp179-186, 1992.
- [5] Lister G G and Cox M, Plasma Source Sci. Technol. 1.67, 1992.
- [6] Termin F E, Radio Engineer Handbook (New York : McGraw-hill), 1943.