

## 고효율, 회전대칭성 향상을 위한 유도결합 플라즈마 안테나

남형호, 이효창, 정진욱

서울시 성동구 행당동 한양대학교 공과대학 전기공학과

### 초록

회전대칭성을 향상시키기 위해서 3턴 교차 안테나를 제작하였다. 3턴의 구조는 안테나를 병렬 type 으로 제작하였으며, 플라즈마 밀도는 13.56MHz RF 전력에서  $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  고밀도 플라즈마가 발생되었으며 균일도는 200mm 기준 10% 이내로 나왔다. 병렬 구조로 낮은 인덕턴스로 인해 안테나 양단의 걸리는 전압이 알곤 압력 10mTorr, 100W에서 약 227V로 낮은 값을 가졌다. 축전결합 효과가 작을 것으로 기대된다. 그리고 회전대칭성은 최대 7% 이내로 매우 우수한 특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

### 1. 서론

플라즈마는 반도체나 디스플레이 공정에서 활발히 응용되고 있다. 반도체 공정에서 저압, 고밀도 플라즈마 소스가 필요한 공정에서는 유도 결합 플라즈마(ICP)가 가장 주목 받고 있다.[1-4] 그러나 기존의 ICP source를 대면적에 적용하기 위해서는 일반적으로 안테나의 감은 수가 비례적으로 증가하게 된다. 그렇게 되면 안테나의 인덕턴스가 높아지고 양단에 높은 전압이 형성된다. 그 결과로 축전 전기장(capacitive field)이 커져 유전체 스퍼터링 시키고 또한 sheath에 강한 전위차를 발생시켜 이온 손실을 유발하고 플라즈마의 밀도를 낮추는 역할을 하게 된다. 또한 이 전위차는 파워의 입력부분과 접지부분 사이에서 가장 커 플라즈마의 밀도 균일성에 치명적인 영향을 악영향을 미친다.

이런 단점을 보완하기 위해 구조적으로 인덕턴스를 줄일 수 있고 축전 전기장을 균일하게 배치시켜 회전 대칭성을 향상 시키는 형태의 안테나를 고안하였으며, 실제 제작한 안테나를 이용하여 특성을 실험하고 평가하였다.

### 2. 본론

#### 1. 실험장치

##### 1-1. 안테나의 구조

일반적인 Planer ICP 안테나의 구조는 그림 1.1 과 같다.

코일의 감은 횟수는 방전 조건에 맞게 조절할 수 있으며, 한 번 감은 경우와 여러 번 감은 경우에 있어서 발생된 플라즈마의 특성을 그리 크게 차이가 나지 않으므로 일반적으로 한 번 감은 경우를 사용한다.

일반적인 ICP 안테나는 모든 부분이 직렬 연결되었기 때문에 흐르는 전류가 모두 같다. 이런 형태는 안쪽 부분의 코일이 조밀하게 모여 있으므로 전류분포가 크다는 것을 의미하고, 이에 따라 발생하는 플라즈마의 밀도가 안쪽 부분이 불룩한 모양이 될 것이다. 바로 이런 구조적인 이유가 기존의 ICP의 대면적화에 있어서 한계이다. 또한, 대면적을 커버하기 위해서는 안테나의 크기가 더욱 커지게 되고 안테나의 임피던스 역시 비례적으로 증가하여 안테나 전압을 높여지게 한다.

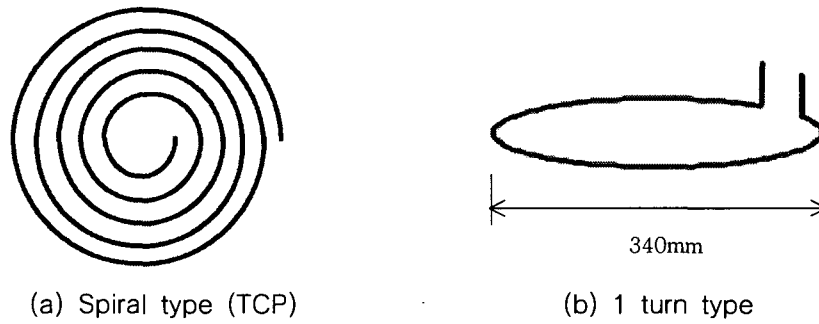
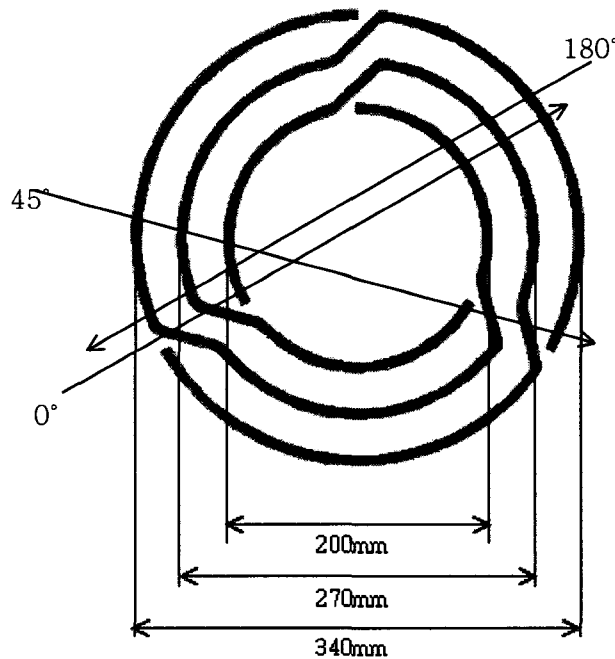


그림 1.1 일반적인 planar ICP source 의 구조

안테나 전압의 증가는 capacitive coupling을 만들어서 낮은 효율과 불균일한 플라즈마 생성을 하게하며 sputtering과 같은 공정에 문제점을 드러내게 된다. 따라서 대면적 플라즈마를 발생하기 위해서는 낮은 임피던스와 낮은 안테나 전압을 갖는 소스가 필요하다. 먼저 안테나의 인덕턴스를 줄이기 위해 그림 1.2와 같이 안테나를 병렬로 연결하는 방법을 사용하여 제작하였다. 이론적으로 13.56MHz 에서 계산한 안테나의 인덕턴스는 그림 1.1 (b)의 경우  $\omega L=101\Omega$  이, 그림 1.2의 경우  $\omega L=15\Omega$ 로 계산되었다.

그러나 안테나의 구조상 가운데 부분의 전류밀도가 크게 나타나게 된다. 그래서 전류분포에 의한 전자기장이 가운데 부분에 집중되고, 그에 따라 밀도 또한 중심에 몰리게 되는 분포를 가지게 된다. 그래서 전자기장의 분포를 최대한 균일하게 하기 위해 안테나의 구조를 변경할 필요가 있었고, 가운데 턴(turn)을 띄워서 제작하였다. 가운데 턴(turn)을 띄움으로써 가운데 안테나로 인해 형성되는 자기장의 누설을 증가시켜 결과적으로는 중심부에 집중되는 전자기장의 세기를 줄이는 것이다.

실제 제작된 3턴 교차 안테나의 구조는 총 3 turn 으로 제일 외곽 안테나부터 안쪽으로 지름은 각각 340mm, 270mm, 200mm이다. 재질은 지름 6.3mm의 구리 관으로 제작 하였으며, 냉각수를 흘려 주어 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 파워는 가운데에서 들어와서 spiral 형태로 바깥으로 균일하게 나가도록 하였다.



(화살표는 probe의 진행방향)  
그림 1.2 3턴 교차 안테나의 구조

1-2 플라즈마 용기

그림 1.3은 플라즈마 발생 장치와 진단 장치의 개략도 이다. Chamber는 원통형으로 알루미늄으로 제작했으며, 내부는 산화시켰다. 챔버는 직경 420mm, 두께 200mm의 dielectric quartz window가 있고, 그 위에 안테나를 올려 놓았다. 로타리 펌프(oil-sealed rotary vacuum pump)를 이용하여 초벌 배기하고, 터보 펌프(turbo molecular pump)를 이용하여 chamber 내를 고진공 상태로 유지시켰다.

Mass flow controller(MFC)를 이용하여 chamber 내부로 Ar gas를 유입시키며, gas 유입량과 배기량을 적절히 조절하여 chamber 내부 압력을 2~50mTorr까지 변화시켰다.

RF Generator를 이용하여 13.56MHz의 power를 공급하고, auto matching system을 이용하여 impedance matching시켜 안테나로 power가 전달된다.

Probe로 측정하는 곳은 dielectric quartz windows 아래에서 95mm 되는 지점에서 측정하였다.

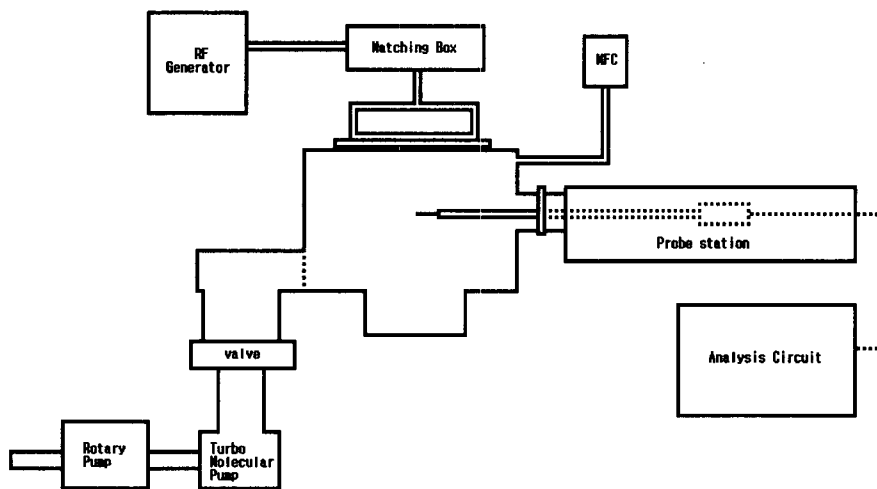


그림 1.3 실험장치 및 진단장치 개략도

1-3 진단장치

실험에 쓰인 진단장치는 single Langmuir probe를 이용하였다. Probe body는 세라믹 tube를 사용했으며, tip은 지름 0.1mm, 길이 10mm 텅스텐을 사용하였다. Tip 뒤에는 resonance filter가 장착되었으며, 또한 지름 1mm의 텅스텐으로 RF Compensation ring probe를 이용하여 I-V 특성곡선의 왜곡을 줄여주었다. 전자밀도( $N_e$ ) 및 전자온도( $T_e$ )는 I-V 특성곡선과 전자 에너지 분포함수 측정을 통해 산출하였다. [5]

2. 실험방법 및 결과

2.1 안테나 특성 측정

새로 제작한 플라즈마 source의 특성을 알아보기 위해 효율 및 coil voltage, 대칭성을 실험하였다.

그림 2.1(a)는 압력 5mTorr~20mTorr, 입력파워 100W~900W까지 변환하면서 효율을 측정하였다. 안테나와 챔버 사이의 거리가 25mm가 넘기 때문에 파워 효율은 그다지 좋은 결과를 얻지 못하였다. 게다가 중심부의 턴(turn)을 위쪽으로 옮겼기 때문에 파워 효율은 더욱 떨어진 결과를 얻게 되었다.

그림 2.1(b)는 1턴(turn) 소스와 3턴(turn) 소스에서 압력 5mTorr, Input RF power 100W~900W까지 변화하면서 측정한 안테나 전압을 나타내고 있다. 안테나 전압은 input RF power가 증가할수록 그 증가 폭이 점점 더 커지는 것을 알 수 있었으며, 3턴(turn) 소스는 안테나 전압을 획기적으로 줄일 수 있는 것을 확인하였다.

그림 2.1(c)는 제작된 안테나의 대칭성을 확인하기 위해 그림.2의 방향에 따라 0°, 45°, 180°로 안테나를 회전하면서 측정한 전자밀도( $n_e$ )이다. 실험조건은 압력 20mTorr, Input RF power 400W였으며, 데이터 상에서 확인할 수 있듯이 거의 완벽한 대칭성을 확인할 수 있었다. 최대로 대칭성이 깨

지는 부분은 45°와 180° 에서 중심으로부터 -100mm 떨어진 부분으로 약 6.8%로 측정되었으며 최소 0.01%의 값을 보여 우수한 특성을 보이는 것으로 나타났다.

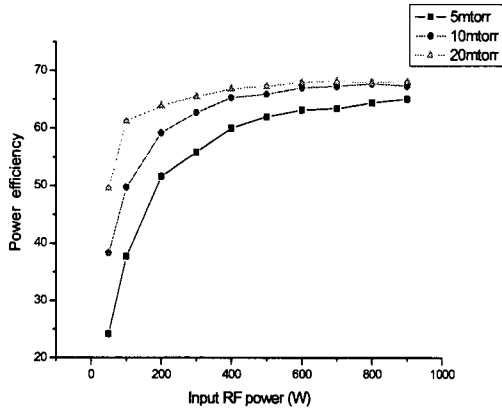


그림 2.1(a) 압력에 따른 파워효율 측정

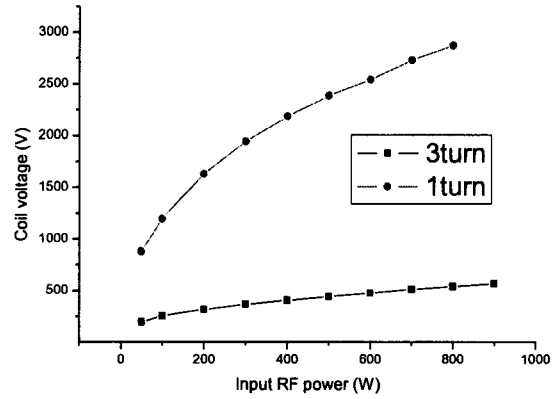


그림 2.1(b) 입력파위에 따른 coil voltage 측정

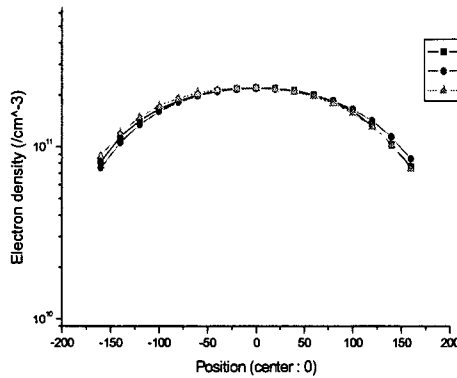


그림 2.1(c) 안테나 각도에 따른 대칭성 측정

### 2.2 플라즈마 변수 측정

새로 설계한 3턴 교차 안테나의 플라즈마 특성을 파악하기 위한 실험은 아르곤(Ar) 압력은 5mTorr ~ 20mTorr, Input RF power 는 100W~600W로 변화시키면서 측정하였다. 우선은 플라즈마 발생 효율을 측정하기 위해 외경 340mm의 1 턴(turn) 안테나와 비교하였으며, 실제적으로 3턴 교차 안테나가 우수한 플라즈마 발생 효율을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

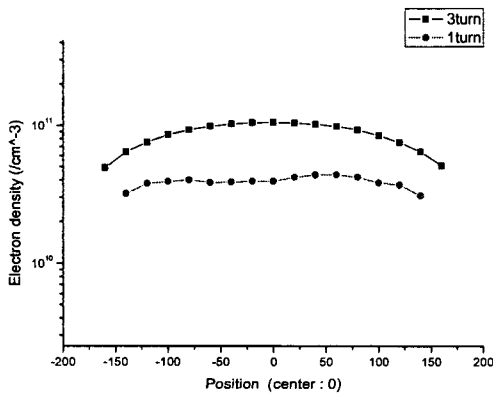


그림 2.2(a) 턴(turn)별 플라즈마 발생효율 비교

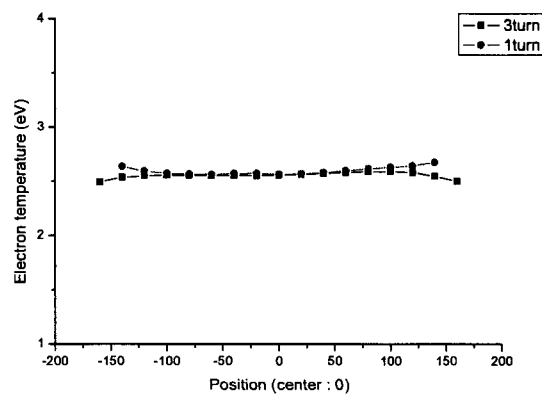


그림 2.2(b) 턴(turn)별 전자온도 비교

그림 2.2(a)는 압력 10mTorr, Input RF power 400W에서 1턴(turn) 과 3턴 교차 안테나에서 각각 구한 전자밀도( $n_e$ ) 이다. 최대의 차이를 보인 부분은 무려 2.68배의 차이를 보였으며, 평균 2.2배 정도의 차이를 보임으로서 플라즈마 발생효율 면에서 우수한 특성을 확인할 수 있었다.

그림 2.2(b)는 압력 10mTorr, Input RF power 400W에서 1턴(turn) 과 3턴 교차 안테나 소스에서 각각 구한 전자온도이다. 전자온도는 거의 비슷한 값을 가진 것으로 확인되었으나 전체적으로는 작게는 0.05eV 에서 크게는 0.2eV 정도 낮았다.

### 3. 결론

3턴(turn) 교차 안테나는 3턴의 안테나를 병렬 구성으로 제작하였다. 그래서 안테나 양단간 인덕턴스를 최소로 안테나에 걸리는 전압을 최소한으로 하고자 하였고, 실제 실험 결과에서도 확인할 수 있었다. 3턴의 안테나로 제작하면서 형성되는 magnetic field 의 세기는 자연스레 강해지게 되고, 그에 따라 높은 플라즈마 발생효율을 극대화 할 수 있을 것이라고 생각했고, 결과 또한 그렇게 나왔다. 직접 손으로 제작한 안테나지만, 우수한 회전대칭성을 보여줌으로써 향후 대면적 플라즈마 소스 개발에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] J. Hopwood, Plasma Source Sci. Technol. 3, 460-464, 1994
- [2] Keh-Chyang LEOU, Szu-Che TSAI, Chai Hau CHANG, Whe-Yi CHIANG, Tsang-Lang LIN and Chuen-horng TSAI, Jpn J.Appl. Phys. Vol. 38, pp. 4268-4274, 1999
- [3] S.S. Kim, H. Y. Chang, and C.S. chang, App. Phys. Lett. 77, 4, 2000
- [4] P. Scheubert, U. Fantz, P. Awakowicz, and H. Paulin, J. App. Phys. 90, 2, 2001
- [5] M.A. Liebermann and A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Wiley, New York, 1994