

## 보조 안테나를 이용한 측면형 페라이트 ICP의 플라즈마 변수 제어

방진영\*, 조성원\*\*, 김아람\*, 황형돈\*, 정진욱\*\*

\*한양대학교 전자컴퓨터통신공학과, \*\*한양대학교 전기공학과

### 초록

ICP(Inductively Coupled Plasma)는 높은 밀도를 가지는 플라즈마 소스로서 반도체 산업에 널리 이용되고 있다. 하지만 기존의 ICP는 축전결합(capacitive coupling), 낮은 역률(power factor), 전송선로의 영향 등의 결점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 강자성체인 페라이트(ferrite)를 이용하여 측면형 페라이트 ICP 소스를 개발하게 하였다. 측면형 소스의 경우 플라즈마의 생성 부분이 측면에 위치하기 때문에 높은 압력에서 플라즈마 밀도 분포는 가운데가 낮고 측면이 높은 오목한 형태가 된다. 다양한 환경에서 플라즈마 밀도의 균일도를 제어하기 위해 이 논문에서는 측면형 페라이트 ICP 챔버 윗부분에 평면형의 나선형 안테나를 부착하여 그 효과를 알아보는 실험을 수행하였다.

### 1. 서론

최근 반도체 공정에서 저온 플라즈마가 많이 이용되고 있다. 저온 플라즈마는 식각, 증착, 애싱(ashing) 등의 공정에 이용되고 있으며 이런 플라즈마의 소스로는 CCP, ICP, ECR(Electron Cyclotron Resonance), helicon 등이 주로 이용되고 있다. 이들 중 ICP 저압에서도 높은 플라즈마 밀도를 가질 수 있고 극판에 바이어스를 독립적으로 걸 수 있어서 이온 에너지를 자유롭게 제어 할 수 있다.

기존의 ICP의 경우 안테나와 플라즈마의 낮은 결합상수(coupling constant)를 가지기 때문에 낮은 역률에 의해서 안테나에 높은 전압과 전류가 흐르게 된다. 안테나의 높은 전압은 플라즈마와의 축전결합에 의해 유전체와 플라즈마 사이에 큰 쉬스 강하 전압(sheath drop voltage)을 발생시키고 이 때문에 유전체가 높은 이온 포격(ion bombarding) 에너지 받게 되어 점점 깎이어나가게 되는 현상이 발생한다. 높은 전류의 경우 안테나와 정합 회로망(matching network)의 저항에 의한 전력 손실을 가지고 와 플라즈마 발생 효율을 떨어뜨리게 된다. 그리고 안테나의 전송선로에 의한 효과는 대면적에서 플라즈마의 균일도 유지를 어렵게 만든다.

기존의 ICP의 결합을 보완하는 방법으로 최근 강자성체인 페라이트를 이용한 ICP가 제안되고 있다. 페라이트 ICP의 경우 안테나와 플라즈마 사이에 높은 결합상수를 가지게 함으로써 기존의 여러 가지 문제 점을 해결 할 수 있다. 그래서 페라이트 ICP를 이용하여 300mm 대면적 웨이퍼를 목표로 측면형 페라이트 ICP 소스를 개발하게 되었다. 이 소스의 경우 기존의 ICP 보다 높은 역률을 가지고 있어 안테나 걸리는 전압, 전류도 많이 낮추게 되었고 이에 따른 전력 손실을 줄일 수 있게 되었다. 전력 효율도 대부분의 범위에서 80% 이상을 유지하고 최고 98%의 높은 효율을 보여주었다.[1]

플라즈마 밀도 분포의 경우 300mm를 기준으로 봤을 때 2mTorr, 5mTorr에서 90% 이상, 10mTorr, 20mTorr에서 80% 이상의 균일도를 보인다. 압력이 높아질수록 측면에서 발생하는 플라즈마가 가운데 부분으로 확산하기 어려워지므로 가운데 부분이 낮은 밀도 분포를 가지게 된다. 이러한 문제 점을 해결하기 위하여 가운데 부분에 보조 안테나를 연결하여 균일도를 개선해 보려는 실험을 하게 되었다.

### 2. 실험 방법

실험에서 사용된 측면형 페라이트 챔버는 측면에 8개의 석영관(quartz tube)이 장착되어 있고 각 석영관에는 2개의 도너츠 모양의 페라이트가 끼워져 있고 서로 반대 방향으로 리츠선(litz wire)이 감

겨져 있어서 그림 1 과 같이 원형의 전기장을 유도해 낸다. 챔버 재질은 알루미늄으로 되어 있고 윗 부분은 석영창(quartz window)으로 덮여 있다.[1] 기존의 측면 식 페라이트 챔버의 윗 부분인 석영창 위에 15번 감긴 나선형 안테나를 챔버 중앙에 위치시키고 리츠선과 직렬로 연결하여 플라즈마 변수의 변화를 관찰했다.

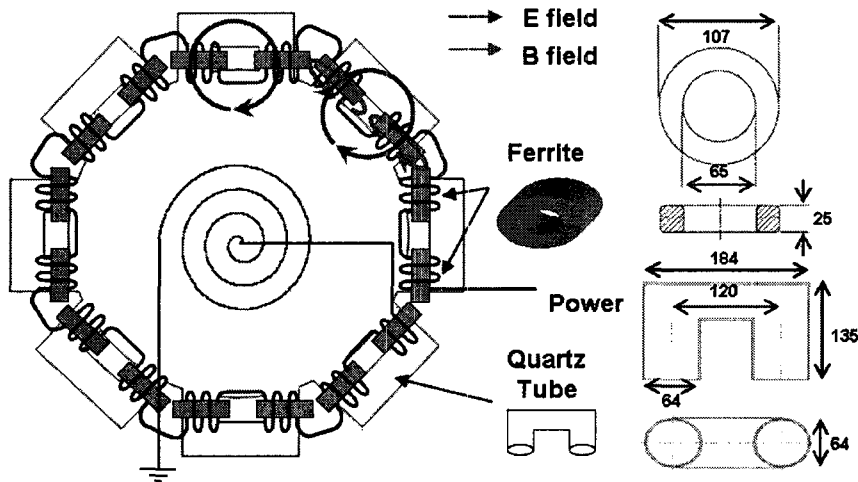


그림 1. 측면형 페라이트 ICP 챔버에 보조 안테나를 직렬로 연결

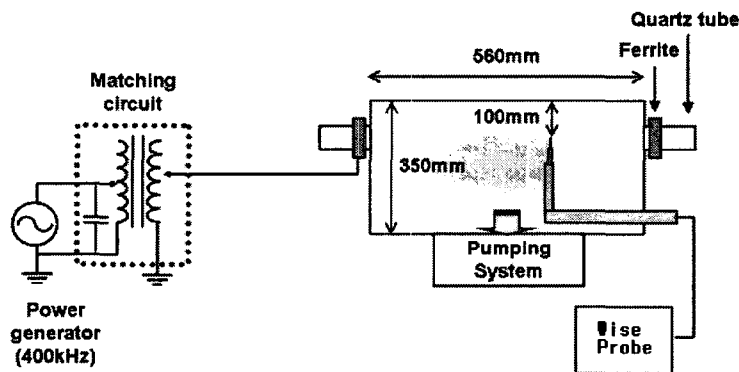


그림 2. 실험 구성도

전력 발생장치의 구동 주파수는 400kHz를 사용하여 전송선로 효과가 거의 무시된다. 안테나와 플라즈마의 강한 결합 때문에 누설 인덕턴스(leakage inductance)가 거의 없고 전체적인 임피던스는 거의 저항 성분만을 가진다. 이 때문에 가변 축전지(variable capacitor)를 사용하지 않고 변압기 형태의 회로만으로 임피던스 정합 회로를 구성할 수 있다.

실험에 사용한 가스는 아르곤을 사용하였고 플라즈마 발생 환경을 관찰하기 위해 꺾인 형태의 탐침을 이용해 석영창에서 100mm 아래 부분에서 플라즈마 밀도와 전자 온도를 측정하였다. 측정 변수가 반지름 방향으로 대칭이라는 가정 아래 가운데부터 측면까지 반지름 방향으로 탐침을 이동시키며 측정하였다. 플라즈마 변수 측정 장비로는 플라즈마 노이즈에 강하고 실시간으로 변수를 측정 할 수 있는 P&A solutions의 wise probe를 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

먼저 전력과 압력을 변화 시키면서 안테나가 없는 상태에서 플라즈마 변수들을 측정해 보았다. 그림 3 에서 보는 바와 같이 낮은 압력에서는 볼록한 형태의 밀도 분포를 가지다가 압력이 증가 할 수록 오

목한 형태의 밀도 분포를 가지게 된다. 측면형 페라이트 ICP의 경우 챔버 측면에서 유도되는 전기장에 의해 전자가 가열된다. 1mTorr의 경우 전자의 평균 자유행로(mean free path)가 챔버 크기보다 더 크게 되고 측면에서 가열된 전자는 챔버 전체에서 플라즈마를 발생 시킬 수 있게 되어 불룩한 형태의 밀도 분포를 가진다. 압력이 높아질수록 전자의 평균 자유행로가 점점 줄어들게 되고 플라즈마가 생성되는 부분이 측면으로 제한되게 된다. 측면에서 생성된 플라즈마가 확산(diffusion)에 의해 가운데 부분으로 퍼지게 되므로 오목한 형태의 밀도 분포로 변하게 된다. 압력이 높아 질수록 플라즈마의 확산이 어려워 지게 되어 그림 3 에서 볼 수 있는 바와 같이 오목한 형태가 커지게 된다.

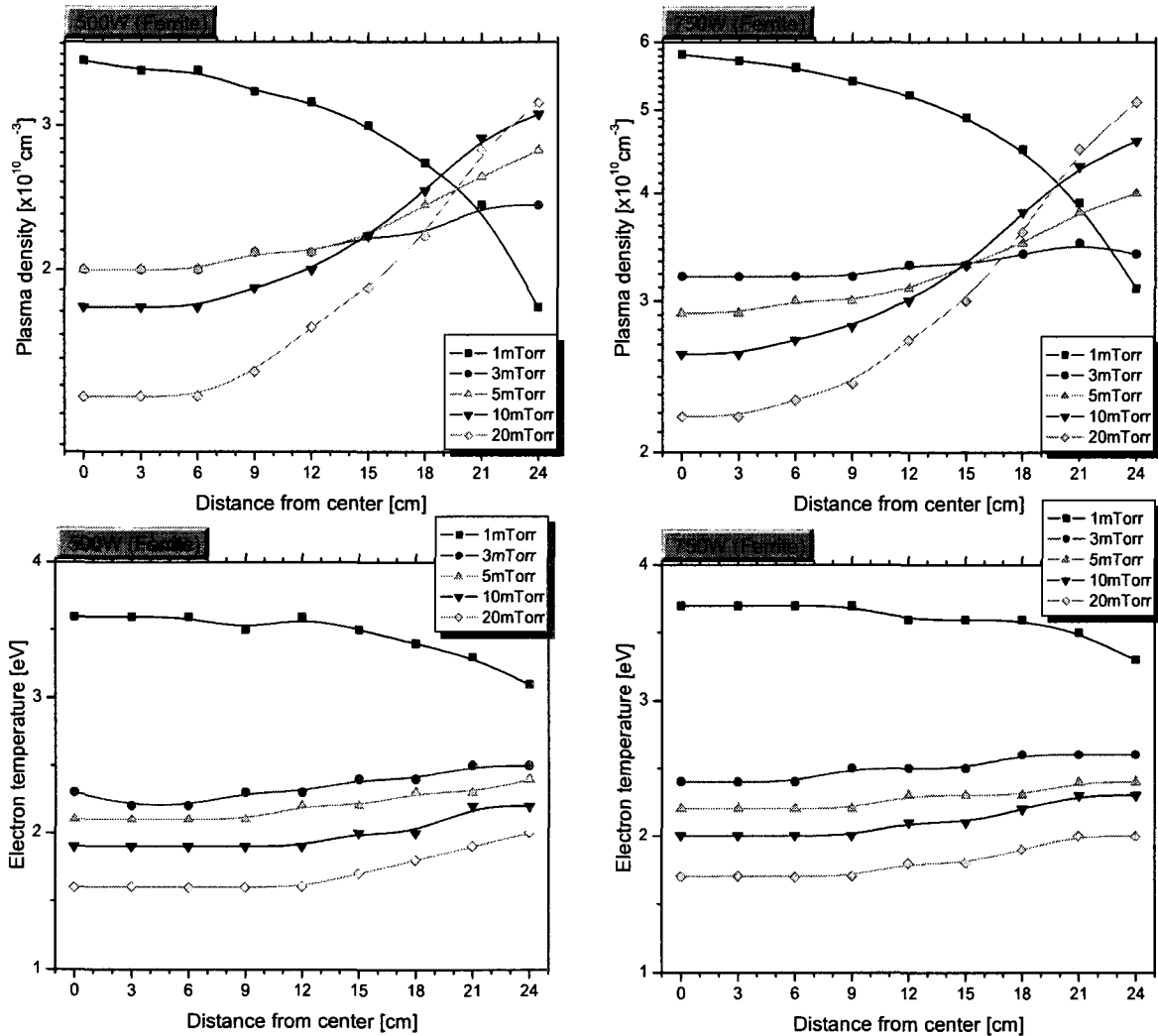


그림 3. 측면형 페라이트 ICP 플라즈마에서의 플라즈마 밀도와 전자 온도

전자 온도의 경우 반지름 방향으로 큰 차이를 보이지 않고 거의 일정한 값을 가진다. 입자 평형식 (particle balance equation)[2]에서 보면 전자 온도는 압력의 함수이고 압력이 증가할수록 전자 온도는 낮아지게 된다. 측정의 결과가 이러한 내용을 잘 반영하고 있다.

5mTorr 이상에서 나타나는 오목한 형태의 분포를 개선하기 위해 챔버 가운데에 보조 안테나를 연결하고 전력과 압력을 변화시키면서 플라즈마 변수를 측정해 보았다. 측정한 결과와 보조 안테나를 연결하지 않았을 때의 결과를 그림 4 에 나타내 보았다. 보조 안테나를 연결했을 때의 플라즈마 밀도 분포를 관찰 해 보면 500W에서는 안테나를 연결하지 않았을 때보다 전체적으로 낮은 밀도 분포를 가지고 있지만 공급 전력이 커지게 되면서 가운데 부분에서 밀도가 더 높아지게 된다. 측면에서의 플라즈마 밀도를 보면 대부분의 경우 안테나를 연결했을 때가 낮게 나왔다. 전력 공급기에서 공급되는 전력은 페라이트 부분과 보조 안테나 부분에서 나누어서 소모하게 된다. 보조 안테나의 경우 페라이트 부

분에서 보다 낮은 결합 상수를 가지게 되어 작은 양의 전력을 소비한다. 500W의 경우 안테나에서 소모하는 전력량이 작아서 플라즈마와의 유도 결합률이 낮기 때문에 아르곤의 이온화 에너지만큼의 에너지를 전자에게 공급하지 못하게 되어 전체적으로 플라즈마의 발생 효율만 떨어뜨리게 된다. 750W와 1000W의 경우 안테나와 플라즈마의 유도 결합률이 높아지게 되고 이에 따라 가운데 부분에서도 플라즈마가 발생되어 밀도가 높아지는 결과를 관찰할 수 있다. 안테나에서 소모하는 전력량만큼 페라이트 부분에서 소모하는 전력량이 줄어들고 측면에서의 플라즈마 발생 양이 줄어들어 밀도가 감소하게 된다.

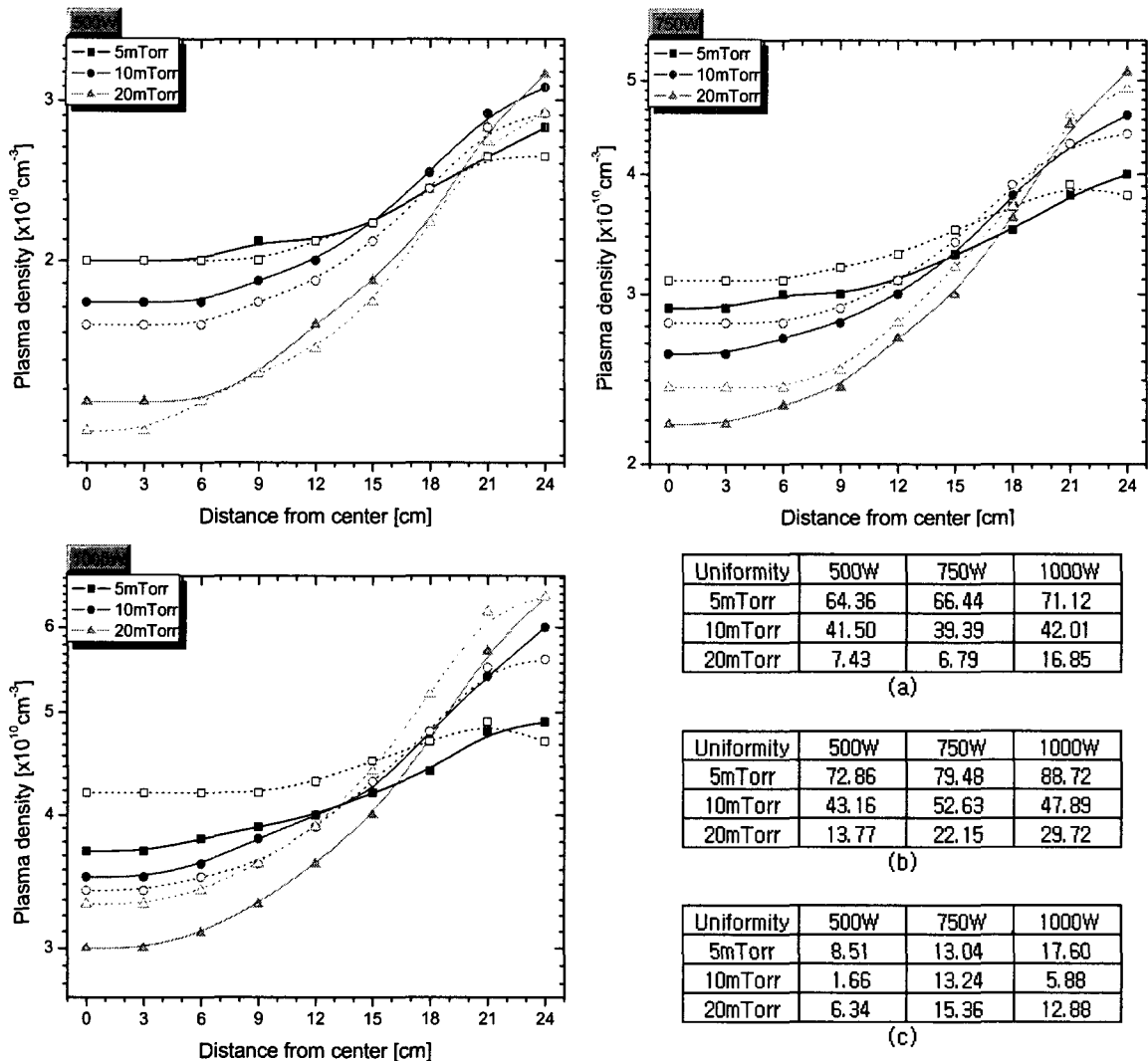


그림 4. 보조 안테나 연결에 따른 플라즈마 밀도 분포 변화와 균일도 변화. 그래프의 실선과 표의 (a)는 보조 안테나를 연결하지 않았을 때, 그래프의 점선과 표의 (b)는 보조 안테나를 연결했을 결과를 나타낸다. 표의 (c)는 (a)와 (b)에서의 균일도 개선 결과를 나타낸다.(단위 %)

그림 4의 표에는 보조 안테나에 따른 밀도 균일도 변화를 나타내었다. 보조 안테나를 연결했을 때 가운데 부분의 밀도가 높아지고 측면 부분의 밀도가 떨어져 균일도가 더 높게 나왔음을 알 수 있고 유도 결합이 작은 500W에서 보다는 높은 전력에서 균일도 개선 효과가 더 크게 나온 것도 관찰할 수 있다.

전자온도의 경우 보조 안테나를 연결 했을 때가 전체적으로 0.1~0.2eV 정도 높게 나왔고 온도분포에는 영향을 주지 못 했다. 앞에서 언급 했듯이 전자온도는 압력의 변화에 가장 크게 반응하기 때문에 온도 분포의 변화가 거의 없다.

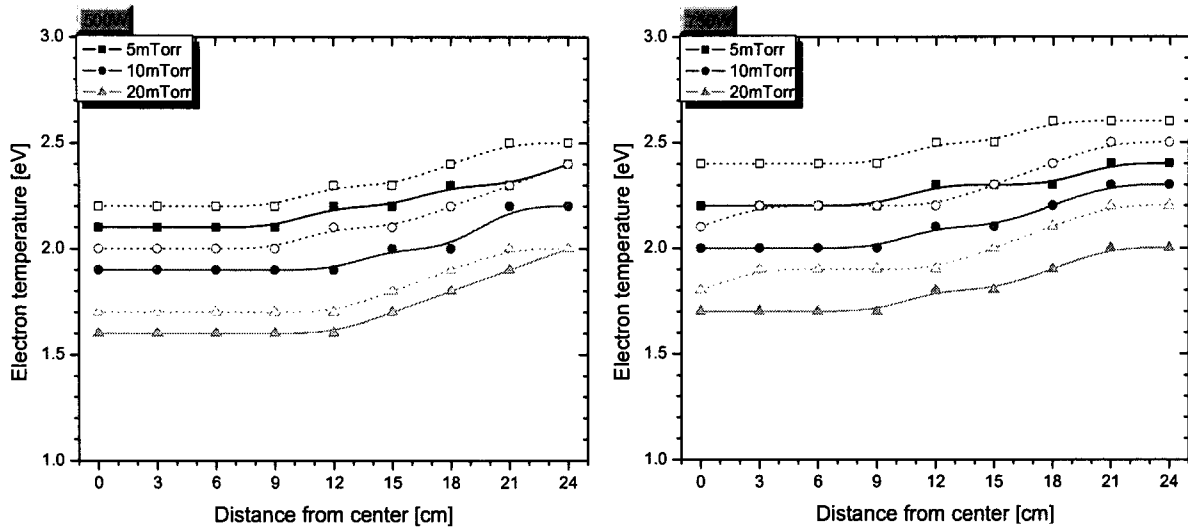


그림 5. 보조 안테나 연결에 따른 전자온도 분포 변화. 그래프의 실선은 보조 안테나를 연결하지 않았을 때, 그래프의 점선은 보조 안테나를 연결했을 결과를 나타낸다.

#### 4. 결론

측면형 페라이트 ICP에서의 균일도를 개선하기 위하여 보조 안테나를 사용하였고 실험 결과 보조 안테나가 균일도를 개선하는데 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다. 페라이트 ICP와 비교 했을 때 보조 안테나의 경우 유도 결합률이 낮아서 밀도 변화에 대한 영향이 그렇게 크지는 않았다. 만약 보조 안테나도 페라이트를 이용한 형태의 안테나를 사용한다면 플라즈마가 발생률이 가운데 부분에서 더욱 커지고 측면 부분에서는 줄어들어 높은 압력에서도 좋은 균일도를 가질 수 있을 것으로 예상된다. 공급 전력이 커지게 되면 안테나와 플라즈마의 유도 결합률도 커지게 될 뿐만 아니라 다단계 이온화 (multi-step ionization)[3]의 영향으로 더 많은 양의 플라즈마가 생성 될 것이라고 예상된다.

#### 참고문헌

- [1] 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 59<sup>th</sup>(2006,U.S.)
- [2] Michael A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg, "Principles of plasma discharge and materials processing", John Wiley & Sons Inc (29 Nov 1994) p. 334.
- [3] Lee Min-Hyong, Jang Sung-Ho, Chung Chin-Wook, "On the multistep ionizations in an argon inductively coupled plasma." Physics of Plasmas, Volume 13, Issue 5, pp. 053502-053502-7 (2006).