

헬리컬 공명 플라즈마의 특성

장상훈⁰, 김태현, 김문영, 태홍식
경북대학교 전기공학과

The characteristics of helical resonator plasma

Sang Hun Jang, Tae Hyun Kim, Moon Young Kim, Heung Sik Tae
Dep. of Electrical Eng. Kyungpook National University

Abstract

An experimental helical resonator plasma system that can be applied to the next generation semiconductor processing was fabricated and its characteristics was investigated. Helical resonator plasma can operate both in a capacitive and an inductive mode. Such sources will produce an extended plasma for the capacitive mode and a plasma concentrated in the resonator for the inductive mode. Plasma parameters were measured with Double Langmuir Probes. Plasma densities of $10^{11} \sim 10^{12} \text{cm}^{-3}$ were produced in argon for pressure in the 2 ~ 120 mTorr range. From the results, we conclude that helical resonator plasma can be applied to the next generation semiconductor processing.

1. 서론

현재 반도체 공정에서 플라즈마를 이용한 증착 및 에칭기술은 미세가공 분야에서 많이 상용되고 있다. 반도체 공정에서는 여러 가지 재료를 보다 높은 안정성과 향상된 집적도를 갖도록 초미세 구조로 가공할 필요가 있고, 동시에 생산성 향상을 위한 대형화도 필요로 한다. 그리고 저압력에서 보다 넓은 면적의 균일한 플라즈마를 생성할 수 있는 새로운 고효율 플라즈마의 연구개발이 요구되었다. 이러한 요구에 따라 지금까지 연구되어 왔던 것으로서 헬리콘 플라즈마(Helicon Wave Plasma; HWP)[1], 전자 사이클로트론 공명 플라즈마(Electron Cyclotron Resonance; ECR)[2], 유도 결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma; ICP)[3], 헬리컬 공명 플라즈마(Helical Resonator Plasma; HRP)[4][5][6] 등이 있다.

이 중에서 헬리컬 공명 플라즈마는 양단코일 사이 인가된 RF의 웨이브가 $\frac{\lambda}{4}$ 의 정수배가 되면 코일 상단부에 높은 전압이 유기되어 축방향 전계에 의한 캐패시티브 모드 방전이 발생하고, 그리고 입력파워를 증가 시키면 축방향으로 시변자장이 강하게 되면 유기되는 원주 방향 전계에 의한 인덕티브 모드 방전이 발생하는 특징이 있다.

이 플라즈마원은 1) ECR이나 HWP와 비교하여 외부자장을 사용하지 않으므로 간단한 장치로 이루어져 있고 2) 플라즈마가 발생하기 전에 높은 quality factor Q(600~1500)를 가진다. 3) 그리고 matching network없이도 방전이 가능하고 4) 진공관내에 방전용 전극을 갖지 않으므로 불순물의 혼입이 적고 5) 입력파워와 주파수에 따라 플라즈마 형상이 달라지는 형태를 갖고 있고, 6) 지금까지의 고밀도 플라즈마 소스와는 달리 플라즈

마 생성 영역이 넓다(10^{-5} Torr ~ 10 Torr). 이러한 배경하에서, 본 연구에서는 헬리컬 플라즈마 시스템을 제작하여 램뮤어 탐침을 통해 플라즈마의 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 실험에 사용한 헬리컬 공명 플라즈마 발생장치의 개략도이다.

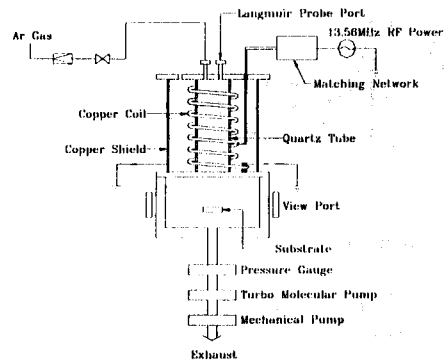


그림 1. 헬리컬 공명 플라즈마 발생장치의 개략도

플라즈마 반응실은 원통형 퀴츠 튜브(quartz tube)와 그 주위에 등간격의 helix 형태로 감겨 있는 동 코일로 되어있다. 이 동코일은 사용한 이유는 13.56MHz의 고주파에서 진류는 skin effect로 인하여 도선 주위로 흐르게 되므로 속이 비어있는 코일이 적합하고 또한 전기적 전도성이 우수하면서 내부에 물을 흘려 코일에서 발생된 열을 흡수할 수 있어서 동코일을 사용하였다. 반응실 주위로 플라즈마에서 나오는 전자파를 차폐할 수 있는 알루미늄판을 둘러 주변장비에 영향을 최소화 시키도록 하였다. 그리고 반응실 상단부에는 플라즈마 특성을 측정할 수 있도록 램뮤어 탐침용 플랜지가 설치되어 있고 가스를 주입할 수 있는 포트가 위치해 있다.

공정실은 반응실로부터 유입된 고밀도 플라즈마와 기관위 웨이퍼와의 반응이 유기되는 부분으로서 기관파 석영창 및 진공포트로 구성되어 있다. 진공공기는 터보분자펌프(Turbo Molecular Pump)와 기계식 펌프(Mechanical Pump)로 배기한다. 플라즈마의 동작범위를 넓게 하기 위해서 매칭박스를 이용하여 제너레이터와 플라즈마부하를 자동으로 정합시켰다. 아르곤 가스를 가스유량조절기를 통해 흘리고 압력은 피라니와 쿨

드캐소드 게이지를 이용하여 측정하였다.

실험은 축방향과 반경방향으로 움직일 수 있는 Double Langmuir Probe[7][8]를 이용하여 전자온도 및 전자밀도를 측정하여 플라즈마 특성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 코일의 하단을 집지하고 코일 윗 끝단을 개방한 상태에서 기판을 $z=0$ 으로 하고 기판 부근을 5cm 범위로 설정했으며 고밀도 플라즈마 영역을 $z=25$ 로 정하였다.

3.1 압력변화에 따른 플라즈마 밀도의 축방향 공간 분포

그림 2에서 플라즈마가 2mTorr에서 120mTorr까지 넓은 범위에서 동작함을 알 수 있고, 전반적으로 z축의 25cm 영역에서 상대적으로 높은 전자밀도를 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 압력이 120mTorr인 경우 축방향으로 기판과 코일도 영역의 전자밀도의 차가 현저하게 나고 압력이 차츰 낮아짐에 따라 두 영역간의 전자밀도 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다.

여기서 플라즈마는 100W에서 원주 방향의 시변전계가 $z=25$ cm 근방에서 매우 높은 것을 알 수 있고 압력이 감소하면 분포하는 중성입자의 수도 감소하기 때문에 공간상의 확산의 정도가 커지게 된다. 그래서 저압으로 갈수록 축방향의 전자밀도 분포가 완만하게 나타나게 된다.

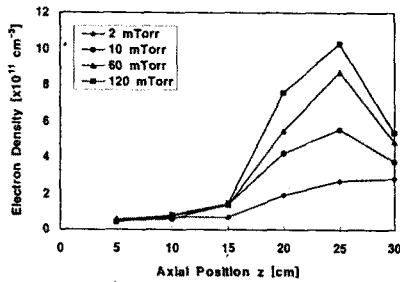


그림 2. 압력변화에 따른 플라즈마 밀도의 축방향 분포

3.2 입력파워에 따른 플라즈마 밀도의 변화

고밀도 영역인 $z=25$ cm에서 각각의 압력에서 rf파워를 증가시킨 경우의 전자밀도를 그림 3에서 보여주고 있다. 2mTorr인 경우 rf파워의 증가에 따라 완만하게 변하고 상대적으로 전자밀도도 적음을 알 수 있다. 60 mTorr에서 50W와 100W사이에서 전자밀도 차이가 많이졌고, 120 mTorr에서는 30W와 50W사이에서 전자밀도가 크게 변화해 된다. 60mTorr이상의 압력에서는 플라즈마의 양상도 급격하게 쿼츠튜브진체에 걸친 퍼진형태에서 한 곳에 국한된 형태로 진이하게 된다.

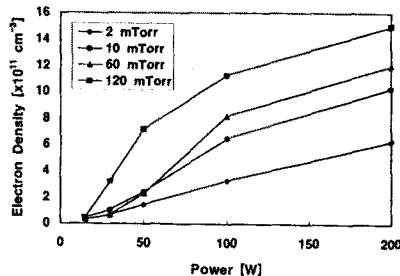


그림 3. 입력 파워에 따른 플라즈마 밀도의 변화

이것은 낮은 압력에서는 중성기체 분자 수가 적기 때문에 rf파워를 증가시켜도 확산에 의해 전자밀도가 서서히 증가하게 된다. 그러나 압력이 높아지게 되면 상대적으로 입자분포가 증가하여 축방향 전계에 의한 에너지전달이 한계가 있게 된다. 이와 동시에 코일에 흐르는 rf 전류에 의한 시변자장이 강해지면 유지되는 원주방향의 전계에 의해 전자가 가속되므로 파워가 효율적으로 전달되게 되어 전자밀도의 급격한 증가가 있게 된다.

3.3 플라즈마 밀도의 반경방향 분포

그림 4는 $z=25$ 에서 100W의 rf파워를 인가하여 반경 방향으로의 전자밀도를 살펴본 것이다. 60 mTorr인 경우가 30 mTorr인 경우보다 중성기체 분자 수가 많으므로 전자밀도가 높게 나타나지만 균일도는 떨어진다. 이는 압력이 낮은 경우에 상대적으로 입자가 적기 때문에 확산에 의해 균일도가 향상되는 것을 알 수 있다.

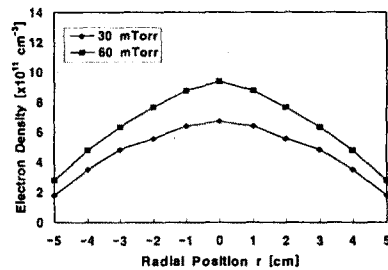


그림 4. 플라즈마 밀도의 반경방향 분포

3.4 압력변화에 따른 플라즈마 밀도의 변화

그림 5는 rf 파워 100W에서 축방향으로 기판부근 5cm와 고밀도 영역인 $z=25$ 에서 전자밀도를 비교하였다. 일반적으로 플라즈마에서는 압력이 증가하게 되면 중성 기체 분자의 수가 증가해서 전리에 의한 전자밀도의 증가가 있게 된다. 그래서 $z=25$ 에서는 압력의 증가에 따라 전자밀도가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 $z=5$ 에서는 Ar가스가 직접에너지를 받지 못하고 단지 확산에 의해 내려오므로 압력이 증가하더라도 전자밀도는 거의 변함없는 것을 알 수 있다.

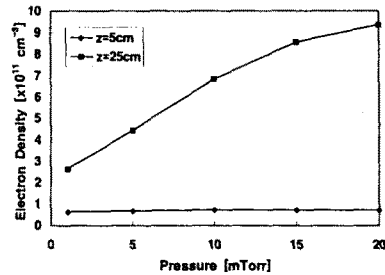


그림 5. 압력변화에 따른 플라즈마 밀도의 변화

3.5 압력변화에 따른 전자온도의 변화

그림 6은 앞의 그림 5와 같은 조건에서 전자온도를 비교한 것이다. 일반적으로 전자온도는 압력의 증가에 따라 충돌로 인하

여 평균자유행정이 작아져서 낮은 값을 갖게 된다. $z=5$ 에서 이와같은 경향을 보여주고 있다. 그러나 $z=25$ 에서는 높은 rf 전류에 의한 원주 방향의 전계가 전자를 효율적으로 가속시킴으로써 압력증가에 따른 전자온도가 증가하게 된다.

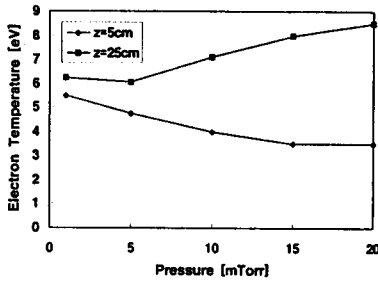


그림 6. 압력변화에 따른 전자온도의 변화

3.6 텅 변화에 따른 플라즈마 밀도의 반경방향 분포

그림 7은 텅 변화에 따른 플라즈마 밀도의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 입력파워를 200W로 하였을 때 기판 위 5cm에서 반경방향의 전자 밀도를 보여주고 있다. 기존 형태대로 아래 코일이 접지이고 윗 코일이 개방이 된 것을 B라고 하고, 아래 코일이 개방이고 윗 코일이 접지인 것을 A라고 한다. 코일 구성이 A인 경우가 B인 경우 보다 높은 전자밀도를 보이고 있다. 이것은 기판부근이 플라즈마의 고밀도 영역과 가까워짐에 따라 전자밀도가 높아진 것으로 생각된다. 그러나 균일도는 좋지 못하기 때문에 추가적인 균일도 향상 방법이 요구되어진다.

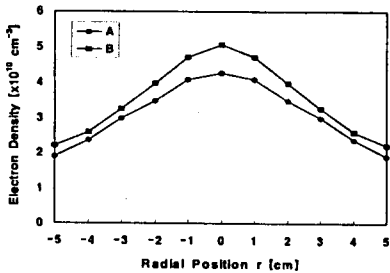


그림 7. 텅 변화에 따른 플라즈마 밀도의 반경방향 분포

(A: 윗 코일이 접지, 아래 코일이 개방
B: 윗 코일이 개방, 아래 코일이 접지)

4. 결론

A형 rf antenna를 설계하여 헬리컬 공명 플라즈마 시스템을 제작하였고 램류어 더블 프로브를 제작하여 다양한 조건의 변화에 따른 헬리컬 공명 플라즈마의 전자밀도 및 전자온도를 측정하였다.

헬리컬 공명 플라즈마는 2 mTorr에서 입력파워에 따라 전자밀도가 완만하게 증가하였고, 60 mTorr 이상부터는 30W와 50W 사이에서 전자밀도가 많이 변하는 것을 관측하였다. 또한 측방향의 전자밀도의 공간분포에 있어서도 2 mTorr에서는 기판부근과 고밀도 영역의 전자밀도차가 많지 않으나 압력이 높아질수록 두 영역간의 전자밀도의 차이가 커지는 것을 알 수 있었다. 그래서 헬리컬 공명 플라즈마는 압력과 rf파위에 의해서 플라즈마의 형상이 달라지고, 실제적으로 전자밀도의 분포측정에

서도 알 수 있다.

100W의 rf파위에서 압력의 증가에 따라 고밀도 영역에서는 전자밀도의 증가가 뚜렷했지만 기판부근에서는 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있었다.

전자온도의 경우에는 기판부근에서는 압력증가에 따라 감소했지만, 고밀도 영역에서는 전자온도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 100W의 rf파위에서 반경방향의 공간분포는 고밀도 영역이 기판부근과 비교할 때 반경 r이 커질수록 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있었고, 대체적으로 압력이 높아짐에 따라 전자밀도도 증가함을 보였다. 전자온도인 경우에 고밀도 영역에서는 r=0에서 전자온도가 다른 반경에 비해 상대적으로 높았고, 기판부근에서는 반경방향이 클수록 높아진다는 것을 알 수 있었다. 그리고 코일상에 접지와 개방위치를 달리함에 따라 기판부근에서의 전자밀도차가 나는 것을 볼 수 있었다.

지금까지의 실험결과들을 바탕으로 정리해 보면, 헬리컬 공명 플라즈마는 1)저압역인 수 mTorr에서 고밀도 플라즈마 ($10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)를 보였고, 2)압력이나 입력 rf 파위에 따라 플라즈마 밀도가 달라지는 것을 볼 수 있었고, 또한 파워 인가 시 코일의 접지와 개방을 달리 했을 경우에도 플라즈마의 고밀도 영역이 공간적으로 이동하는 것을 볼 수 있었다. 즉, 다른 장비와는 달리 플라즈마를 제어 할 수 있다는 것에서 큰 의미가 있다고 할 수 있다. 3)100W 이상의 rf파위에서 고밀도 영역과 기판부근사이에 입자의 공간적 분포의 차이를 이용해서 높은 에너지의 이온이 고밀도에서 기판으로 유입되는 것을 차단하여 기판의 손상을 방지할 수 있다. 향후 기판상의 균일도 향상을 위해 시스템의 추가적인 방법을 적용해야겠고, 플라즈마의 제어성을 높이기 위해 입력 주파수를 가변하는 실험이 수행되어야겠다.

참고문헌

- [1] J. E. Stevens, "Helicon Plasma Source Excited by a Flat Spiral Coil", J. Vac. Sci. Technol. A 13(5), Sep/Oct 1995
- [2] 태홍식, "초고진공 전자 사이클로트론 공명 플라즈마 화학 기상 증착에 의한 지온 실리콘 단결정성장 특성에 관한 연구", 서울 대학교 공학 박사 학위 논문, 1994년
- [3] J. Amorim, H. S. Maciel, and J. P. Sudano, "High density plasma mode of an inductively coupled radio frequency discharge", J. Vac. Sci. Technol. B 9(2), Mar/Apr 1991
- [4] K. Niazi, A. J. Lichtenberg, M. A. Liberman and D. L. Flamm, "Operation of a helical resonator plasma source", Plasma Sources Sci. Technol. 3 (1994) 482 ~ 495
- [5] Georgy K. Vinogradov and Shima Yoneyama, "Balanced Inductive Plasma Source", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35 1996 pp. L1130-L1133
- [6] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, and D. L. Flamm, "Theory of a helical resonator plasma source", Univ. of California, Berkeley, Memo. UCB/ERL M 90/10, 1990
- [7] R. H. Huddleston and S. L. Leonard, "Plasma Diagnostic Technique", Academic Press, Chapter 4, 1965
- [8] I. H. Hutchison, "Principles of Plasma Diagnostics", Cambridge University Press, Chapter 3, 1987