

헬리칼 공명 플라즈마의 기판플라즈마밀도에 미치는 축방향자계의 영향

김태현⁰, 김문영, 장상훈,태홍식

Influence of axial magnetic field on the plasma density on the substrate in helical resonator

Tae-Hyun Kim, Moon-Young Kim, Heung-Sik Tae
Depr. of Electrical Eng. Kyungpook National University

Abstract

Plasma density and its axial distribution and uniformity on the substrate in a helical resonator plasma in the external magnetic field have been measured using Langmuir probes. Net RF power is set to 200W and chamber pressure is varied from 1×10^{-1} Torr to 1×10^{-4} Torr.

There are three kinds of external magnetic field structure applied on the helical resonator plasma. One is a uniform magnetic field, another is a plus gradient magnetic field and the third is a minus gradient magnetic field.

Of the three magnetic field structure, the minus gradient magnetic field is found to show the highest increase in plasma density on the substrate compared with other magnetic structures. In order to avoid radial density ununiformity, weak magnetic fields under 100 Gauss are applied.

1. 서론

헬리칼공명플라즈마[1][2]는 방전을 위해 자계가 필요하지 않으며 비교적 저렴한 RF고주파전력을 사용하고 최대전력전달을 위해 정합회로가 따로 필요하지 않아 하드웨어구성이 매우 간단하다. 헬리칼공명플라즈마는 저압에서 고밀도의 플라즈마를 생성하고 기판의 바이어스전압을 독립적으로 조절할 수 있는 무전극방전의 기구[3]를 가지고 있다. 그러나 구조상 플라즈마가 생성되는 리액터부와 공정챔버가 분리되어 있어 기판으로 플라즈마를 전달하는 과정에서 챔버벽이나 리액터벽으로의 확산으로 인한 하전입자의 손실이 발생하여 기판상에 급격한 플라즈마밀도의 감소를 보이고 있다.

본 연구는 바람직하지 못한 플라즈마의 손실을 줄이고 기판상의 플라즈마밀도를 상승시키기 위해 축방향의 자장을 제안하여 플라즈마공정의 효율을 높이고자 하였다. 정자장은 방전에 직접 참여하여 플라즈마를 생성하며 에너지를 전달시키지는 않지만 플라즈마의 자계의 수직방향 확산[4]을 $1/(1+\omega_c^2 r^2)$ 비율로 제한하여 플라즈마의 손실을 줄일 뿐 아니라 전자기에너지를 플라즈마내부로 효율적으로 전달시키는 매개역할을 할 수 있다.

강한 자장은 플라즈마를 강하게 구속시키지만 공정에 있어 중요한 기판상의 비경방향 플라즈마밀도의 균일도를 확보하기 힘들기 때문에 본 실험에서는 100 Gauss 이하의 약한 자장을 중심으로 실험을 하였다.

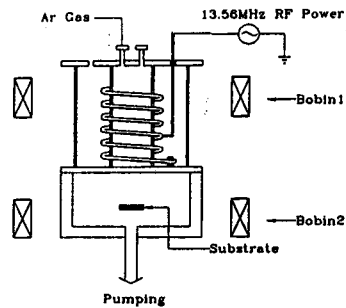
2. 장치 및 실험방법.

2-1 실험장치.

그림1은 실험에 사용된 장치의 개념도이다. 배기는 기계식로터 펌프와 터보분자펌프로써 이루어지며 진공도는 기저압력을 1×10^{-6} Torr를 유지했다.

방전튜브는 내경이 110mm, 두께 3mm, 높이 30mm의 원통형 석영(SiO₂)선박하였고 가열코일은 헬릭스 형태로 감겨있으며, 고주파 전류의 표피효과를 고려하여 표면적이 넓은 1/4 inch 동선을 선택했고 코일 간격을 1cm로 하여 균일하게 감았고 직경은 16cm이며 총11회를 감아 1/4안테나[5]를 구성했다.

실험에 사용된 가스는 순도 99.999%의 아르곤(Ar)을 사용하였고 확산 챔버는 자계가 잘 통과할 수 있는 알루미늄(Al)으로 제작되어 있다. RF전력은 모두 200W로 고정하였다.

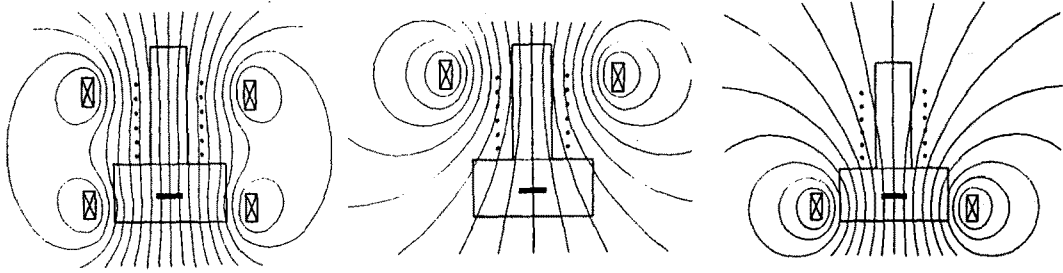


[그림1] 실험장치개략도

2-1. 자장의 구조

축방향자장을 생성하는 보빈은 직경 1.3mm의 동선으로 1500회 감았으며 공냉식으로 되어있고 내경 50cm, 외경 55cm, 높이 9cm이다. 한 쪽 보빈은 기판을 주위로 하여 설치하였고 다른 한 쪽은 기판보다 25cm높게 안테나 주위에 위치하여 헬름홀츠 코일 형태를 이루고 있다. 보빈을 통해 생성되는 자장의 구조는 전류를 인가하는 방법에 따라 3가지로 나뉘어 진다.

그림2에서 (a)는 헬름홀츠코일형태로 균일한 자장(uniform B)을 만들고 그림(b)는 자장의 기울기를 가지고 기판주위에 B_{min}가 생성되는 자장(+gradient B)을 만들고 그림(c)는 기판주위에 B_{max}가 생성되는 자장(-gradient B)을 만드는 자장구조이다.

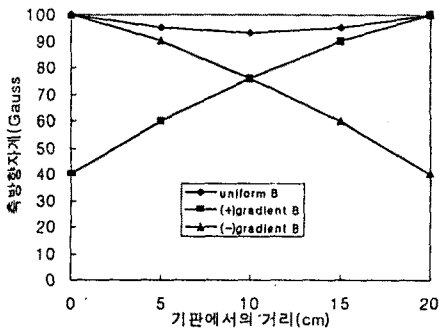


(a) 균일한 헬륨홀츠슈코일의 자계 (b) 기울기기를 갖는 $-\text{gradient B}$ 자계 (c) 기울기기를 갖는 $-\text{gradient B}$ 자계

[그림2] 축방향자계의 구조

3. 결과 및 고찰

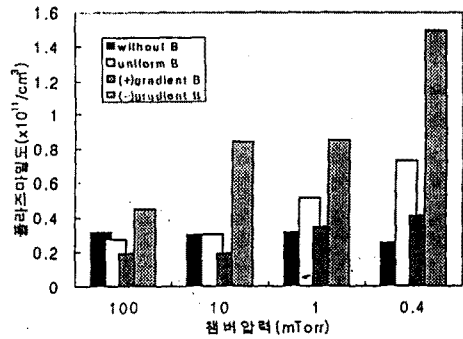
그림3은 균일한 100Gauss자장과 B_{max} 가 100Gauss이고 기울기기를 가진 자계를 인가했을 때 축방향자장분포를 나타낸다.



[그림3] 축방향자장의 분포

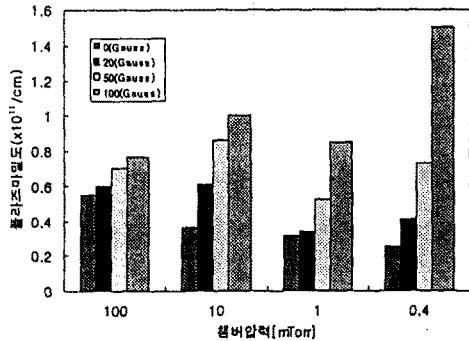
그림4는 압력에 따라 각각의 자장구조에서 100Gauss의 자장이 챔버에 인가되었을 때 기판상의 플라즈마밀도의 변화를 자장이 없을 때와 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 100Gauss의 자장을 인가하더라도 자장의 구조에 따라 기판상의 플라즈마밀도는 민감하게 변하며 플라즈마밀도의 개선에 가장 유리한 구조는 모든 압력범위에서 일관되게 기판방향의 기울기기를 가진 자장($-\text{gradient B}$)으로 나타난다.

자계의 영향은 입자사이의 충돌이 적은 저압에서 더욱 크게 나타나며 $-\text{gradient B}$ 자계를 인가할 때 0.4mTorr에서는 자장을 인가하지 않았을 때 보다 6배의 플라즈마밀도의 증가를 보이고 있다. 이러한 자장구조에서는 하전입자들이 기판으로 확산하면서 자속선을 따라 집속되며 기판에 가까워질수록 강한 자장에 의해 반경방향의 손실이 줄어들뿐 아니라 자기경($B/\nabla B$)을 형성하여 $-\mu\nabla B$ force에 의해 하전입자들이 기판으로의 입사속도가 제한되어 기판상에서 하전입자들이 효율적으로 가두어진 것으로 생각된다.

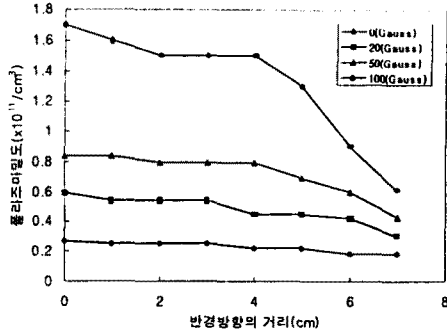


[그림3] 압력과 자계구조에 의존하는 플라즈마밀도

그림4는 기판방향의 기울기기를 가지는 $-\text{gradient B}$ 의 자장구조에서 기판주위에 B_{max} 의 변화에 따른 기판상의 플라즈마밀도의 변화를 도시하였다. 압력이 비교적 높은 영역에서는 자장의 영향이 작아지고 압력이 낮아지면 자장의 영향이 급격히 증가하여 0.4mTorr영역에서는 6배의 플라즈마밀도의 상승을 나타낸다.



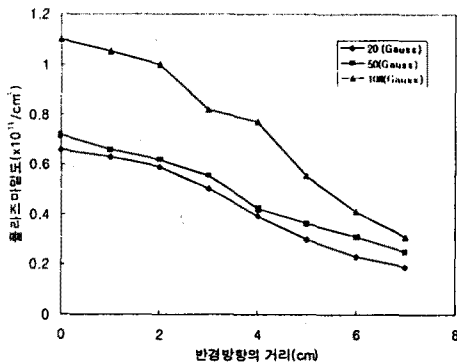
[그림4] 자장에 세기에 따른 플라즈마밀도의 변화 (200W)



[그림5] 자장의 세기에 따른 반경방향 플라즈마밀도분포의 변화(0.4mTorr,200W)

그림5는 기관에서 $-gradient\ B$ 의 자장구조와 0.4mTorr압력에서 기관주위에 형성된 자장(B_{max})의 변화에 따른 반경방향의 플라즈마밀도의 분포를 도시한 것이다.

반경방향의 플라즈마밀도분포가 반경4cm까지는 균일하며 그 이상의 영역에서는 서서히 밀도가 감소하며 특히 100Gauss의 자장을 인가했을 때 균일도가 확보되는 구간이 4cm로 제한되는 것은 리액터의 개구직경이 8cm임을 고려할 때 충분히 예상되는 문제이다. 일반적으로 플라즈마의 반경방향균일도가 확보되는 구간은 리액터의 개구직경까지로 제한되며 개구의 직경을 확장함으로써 균일도는 개선될 수 있으리라 예상된다.



[그림6] 자장의 변화에 따른 기관상의 밀도분포(0.1mTorr,200W)

그림6은 챔버압력이 0.1mTorr일 때 기관방향의 기울기를 가지는 자장을 인가했을 때 기관상의 플라즈마밀도를 도시하였다. 0.1mTorr압력범위이하($\sim 10^{-5}$ Torr)에서는 임피던스정합이 불안정하여 RF전력전달이 잘되지 않지만 20Gauss~100Gauss의 자장을 인가하면 임피던스정합이 완벽하게 일어나 RF반사전력이 없어진다. 그림에서 보이듯이 기관 중심에서는 높은 플라즈마밀도를 보이지만 반경방향으로의 밀도감소가 심하여 균일도가 좋지 않다. 이는 압력이 매우 낮기 때문에 리액터내부의 플라즈마의 RF표피층이 확장되어 상대적으로 플라즈마체적의 반경이 감

소하는데 기인하며 또한 저압에서 축방향자장역의 영향이 강하게 구속되어 반경방향의 밀도분포가 균일하지 못한 것으로 생각된다.

4. 결론

확산챔버를 필요로 하는 헬리칼공명플라즈마에 확산챔버내의 기관상의 플라즈마밀도를 개선하기 위해 축방향자계를 인가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기관상의 플라즈마밀도는 인가되는 자장의 구조와 세기에 따라 민감하게 변하며 밀도의 상승을 위해 균일한 자계보다 축방향기울기를 가지고 기울기의 방향이 기관방향의 자장구조가 가장 나란적함은 확인했다.
2. 100 Gauss이하의 약자장에서 반경방향의 플라즈마밀도의 균일도는 자장의 세기와는 무관하며 오히려 리액터의 개구직경과 챔버내부의 압력에 종속됨을 확인했다.
3. 약자장이 기관상의 플라즈마밀도의 상승과 균일도의 개선에 바람직한 챔버압력범위가 존재함을 확인했다.

참고문헌

- [1]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
- [2]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
- [3]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]Francis F. Chen, "Introduction to plasma physics and controlled fusion" 2nd Ed. Plenum, New York, 1984
- [5]Georgy K. Vinogradov and Shimao Yoneyama, "Balanced Inductive Plasma Source", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35 1996 pp. L1130-L1133