

자장의 배열 및 형태가 유도결합형 플라즈마에 미치는 효과에 관한 연구

황순원, 이영준, 유지범, 이재찬, 염근영

성균관대학교 재료공학과

A study on the effects of variously configured magnets on the characteristics of inductively coupled plasma

S. W. Hwang, Y. J. Lee, J. B. Yoo, J. C. Lee, and G. Y. Yeom

Dept. of Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

Abstract

In this study, we investigated the effects of variously configured magnets on the characteristics of the plasmas to enhance plasma uniformity and density of an inductively coupled plasma source. As the magnets, Helmholtz type axial electromagnets and various multi-dipole magnets types around the chamber wall were used.

To characterize the plasma as a function of the combination of the magnets and magnetic field strengths, ion density, electron temperature, and plasma potential were measured using an electrostatic probe along the chamber diameter for Ar plasmas.

The measured maximum ion densities were $8 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ with 600W inductive power and at 5mTorr of operational pressure and the uniformity of ion density was less than 5.9% at 2mTorr of operational pressure. The combination of an optimized multi-dipole magnet type and an axial electromagnet showed the lowest electron temperature (3eV) and plasma potential (34V_p).

1. 서 론

현재 반도체 공정에서 사용하는 건식식각은 고밀도 플라즈마를 사용한 플라즈마장비를 사용하는 경향이 증가되고 있으며 이와 같은 고밀도 플라즈마 장비의 사용은 반도체소자의 최소 선폭(CD)이 deep sub-micron으로 감소하는 반면 실리콘웨이퍼의 크기는 8인치 직경이상으로 증가하여 가고

있어서 낮은 공정압력에서 높은 식각속도로 식각을 하여야 할 필요성이 증대하여 가고 있다. 특히 TFT-LCD를 비롯한 PDP, 그리고 FED 등과 같은 여러 가지 형태의 평판 디스플레이의 제조공정에 있어서도 실리콘 기판에 비하여 대면적의 기판을 이용하고 또한 사각형 형태의 시편 공정이 요구되므로 평판디스플레이용 건식식각장비 개발에 있어서 사각형 챔버내 중앙부분 뿐만이 아니라 모

서리 부분에서도 고밀도의 균일한 플라즈마 유지가 매우 중요하다.^{1, 2)}

따라서 기존의 capacitively coupled plasma 장비보다는 고밀도 플라즈마 장비를 사용하여야 하는 것이 필연적이며, 평판디스플레이용 건식식각 기술의 연구개발에 필요한 여러 가지 연구내용중 대면적 기판에서 고밀도 플라즈마의 균일도를 증가시키는 소스에 대한 연구개발이 가장 중요한 인자라고 할 수 있다.^{3, 4)} 고밀도 플라즈마 소스로는 전자 회전 공명을 이용하는 ECR (electron cyclotron resonance) 플라즈마,⁵⁻⁷⁾ 헬리콘 또는 휘슬러 파 (whisler wave) 를 이용하는 헬리콘 플라즈마 (helicon plasma),⁸⁾ 느린 파 (slow wave) 를 여기시키는 헬리칼 공진기 (helical resonator),⁹⁾ 그리고 유도결합형 플라즈마 (inductively coupled plasma)¹⁰⁻¹³⁾ 등이 있다.

이러한 고밀도 플라즈마원의 특성으로는 기판에 독립적으로 전력을 전달함으로써 기판으로 입사되는 이온의 에너지를 조절할 수 있으며 낮은 공정 압력에서 반응성가스의 높은 분해율을 가지며 높은 이온밀도를 얻을 수 있는 장점 등이 있다. 이들 여러 소스들 가운데 대면적으로 확대하기가 가장 쉬우며 또한 많이 연구되고 있는 고밀도 플라즈마소스는 챔버 윗 부분에 나선형 코일을 감은 형태의 유도결합형 플라즈마 (inductively coupled

plasma) 원이다.

본 연구에서는 사각형시편처리가 요구되는 평판 디스플레이의 응용을 위해 210mm×210mm 크기의 사각형의 유도결합형 플라즈마 원을 제작하고 이 소스의 플라즈마 균일도 및 플라즈마 밀도의 더욱 큰 향상을 위하여 다양한 multi-dipole 형태의 연구자석^{8, 9)} Helmholtz 형태의 axial electromagnet 을 사용하였을 때 유도결합형 플라즈마의 플라즈마 밀도 및 균일도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

본 실험을 위해 사용된 장비를 그림 1(a)에 나타내었다. 챔버내부가 210mm×210mm 크기의 사각형의 챔버로서 표면이 양극 산화된 알루미늄을 사용하였다. 유도결합 플라즈마를 발생시키기 위해 13.56MHz의 rf power를 4turn의 사각형태의 금 코팅을 한 평판 Cu plate에 인가하였으며 바이어스 전압을 발생시키기 위해 기판쪽에 역시 별도의 13.56MHz rf power를 인가하였다. 또한 인가되는 rf power에 따라 자동으로 matching이 되도록 하였으며 reflect power는 5W 이하로 유지하였다. 코일과 챔버를 분리시키는 rf 윈도우 (석영창) 는 두께 24mm의 퀴츠 (quartz) 를 사용하였고 rf 윈

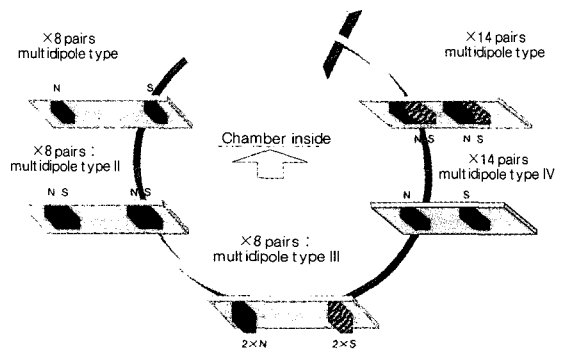
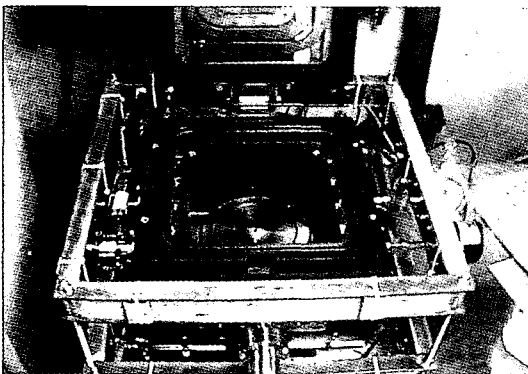


Fig. 1. (a) The inductively coupled plasma equipment and (b) various multi-dipole magnets types used in the experiment.

도우와 기관과의 거리는 12cm로 유지시켰으며 이 간격은 조절할 수 있도록 하였다. 또한 기관 냉각은 냉각수 냉각과 헬륨 냉각을 동시에 할 수 있도록 제작하였다. 챔버내의 압력은 thermocouple gauge 및 capacitance manometer로 측정하였고 터보 분자펌프(400 l/s)를 사용하여 기저 진공도를 5×10^{-5} Torr이하로 유지하였으며 공정압력은 variable throttle valve를 이용하여 자동으로 유지시켰다.

여러 가지 형태의 영구자석의 자장과 배열, 전자석, 그리고 이들의 조합이 유도결합형 플라즈마에 미치는 효과를 연구하기 위해서 챔버내부에 magnetic cusping을 위한 영구자석용 하우스를 제작하여 설치하였고, 다극형 자석으로는 표면에서 3000 Gauss의 자장세기를 갖는 $6\text{mm} \times 8\text{mm} \times 14\text{mm}$ 크기의 소형영구자석을 사용하여 그림 1(b)와 같이 여러 가지 형태의 자석배열을 사용하였다. 자석 type I 과 IV, type II와 V, 그리고 type III은 각각 같은 형태의 자석으로 같은 자장의 세기를 가지며 챔버내의 배열이 서로 다르다.

Type I, II, III는 자석중심과 중심간 거리가 5.6cm의 간격으로 N극과 S극 8쌍을 챔버내에 교대로 배열하였으며, type IV, V는 자석중심과 중심간 거리가 2.8cm의 간격으로 모두 14쌍을 배열하였다. 자장 발생용 전자석은 챔버와 같이 사각형태로 40회 감겨진 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 의 크기로 챔버 상하에 1개씩 Helmholtz 코일형태로 설치되어 있다. 자장의 형태는 플라즈마의 특성에 매우 중요한 요소로 작용하는데, 본 장치에서는 플라즈마가 발생하는 영역내에서 뿐만이 아니라, 챔버내부 전체에서 균일한 자장을 얻을 수 있도록 하였다. 자장의 세기는 가우스 미터를 사용하여 측정하였다.

유도결합 플라즈마의 특성 분석으로는 우선 Ar 플라즈마를 발생시킨 후 electrostatic probe (ESP, Hiden Analytical)를 이용하여 분석하였다. 탐침으로는 직경 0.15mm, 길이 10mm의 tungsten tip을 사용하였다. 플라즈마 균일도 및 밀도는 probe를

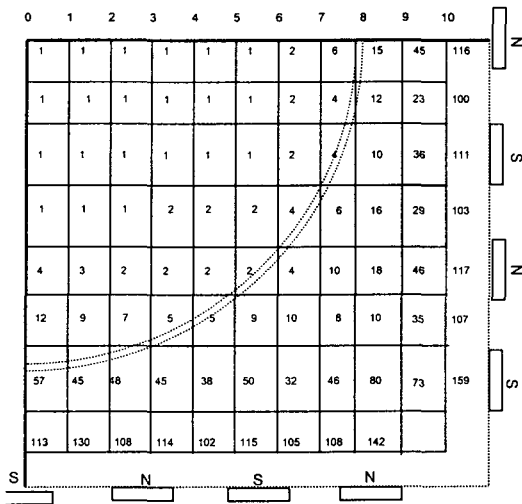
기관으로부터 1.5cm 위, 퀴츠(석영창)로부터 10.5cm 아래에서 챔버 중앙 및 중앙으로부터 6cm 떨어진 측면에서 각각 수평방향을 따라서 이온 밀도, 플라즈마 전위, 그리고 전자온도 등의 플라즈마 변수의 특성을 위치의 함수로서 측정하였다. 또한 대부분의 플라즈마 특성분석은 rf source power 200 W에서 1kW, 공정압력은 2 mTorr에서 10 mTorr 그리고 기관온도 25°C에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

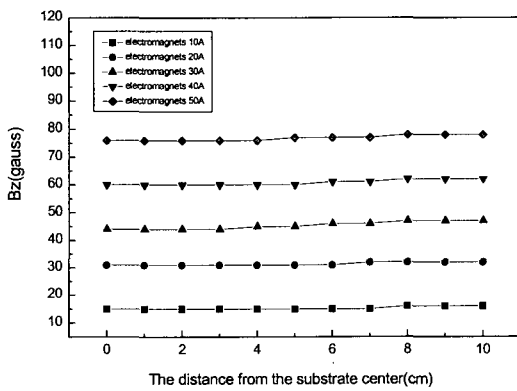
그림 2(a)는 기관 중심위 1.5cm 위치에서 챔버 반경을 따라 가우스 미터를 이용하여 측정된 영구자석의 자장의 세기 및 분포를 나타낸 그림이다. 사용된 영구자석의 type은 자장이 없는 상태와 비교를 위해 추후 실험결과로 나타난 type IV로서 가장 좋은 플라즈마 균일도를 보인 자석을 선택하였다. 영구자석의 표면에서의 자장의 세기는 3000 Gauss이다. 자장의 세기는 챔버중앙으로 갈수록, 자석과 자석사이의 중앙부분으로 갈수록 감소하는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 기관위에서의 강한 자장은 균일한 공정 균일도를 얻는데 있어서 어려움이 있다고 보고되고 있는데 본 실험에서 가장 좋은 플라즈마 균일도를 보인 영구자석 형태 IV의 경우에 있어서도 기관위의 자장의 세기는 약한 자장만이 존재함을 알 수 있다.¹¹⁾

그림 2(b)는 설치된 전자석에 의한 반경방향으로의 Bz값의 변화 및 분포를 보여준다. 자장의 세기는 각각의 코일에 전류값을 10A에서 50A까지 가하였을 때 약 15 Gauss에서 77 Gauss정도까지 선형적으로 증가되는 axial 자장을 나타내었으며 자장 분포의 균일도 $\left[\frac{(B_{\max} - B_{\min})}{(2 \times \text{average})} \times 100 \right]$ 는 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 챔버 내부에서 2%미만으로 유지되고 있음을 알 수 있다.

본 실험에서는 먼저 전자석이 없는 상태에서 여러 형태의 영구자석이 플라즈마 균일도에 미치는



(a)



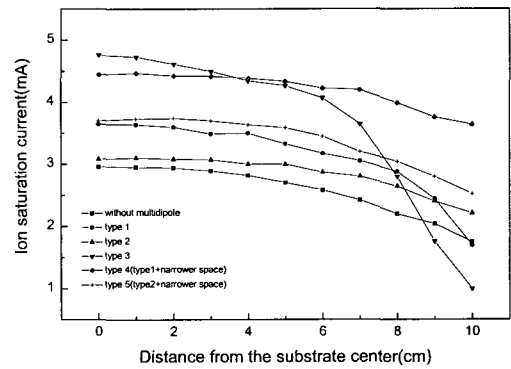
(b)

Fig. 2. (a) The distribution of magnetic field strengths for type IV magnets and (b) the distribution of axial electromagnetic field strengths (B_z) inside the chamber.

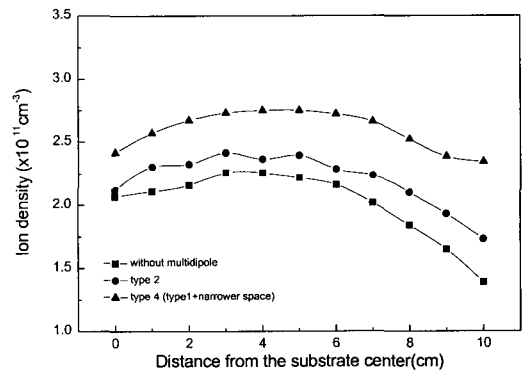
효과를 보기 위해 ESP를 사용하여 이온 포화 전류를 측정하였다.

그림 3(a)는 ESP를 이용하여 여러 가지 영구 자석 type변화에 따른 이온 포화 전류의 균일도를 측정하기 위해 기판 중심위 1.5cm에서 챔버 반경을 따라 측정한 결과이다. 이때 ESP에 가해진 직류전압은 -60V이고, 공정조건으로 압력은 각각 Ar 5 mTorr로 동일하였으며, 소스파워는 600 W였다. 자장을 가한 경우가 자장을 가하지 않은 경

우보다 이온 포화 전류가 높다는 것을 알 수 있다. 챔버내 반경방향을 따라 측정한 플라즈마 균일도에 있어서 type I, III, V의 경우에는 오히려 자장을 가하지 않은 경우보다 균일도가 좋지 않음을 보였고, 나머지 type에 대해서는 자장을 가한 경우보다 균일도가 향상됨을 알 수 있다. 특히 이들 여러 가지 형태의 영구자석중에서 type IV가 가장 좋은 균일도를 보였다. type I(자석중심과 중심간 거리:5.6cm)의 경우 type IV(자석중심과 중심간 거리:2.8cm)와 자장의 세기가 같으나 배열에 있어서 전자를 가두는 효과보다는 오히려 전자



(a)



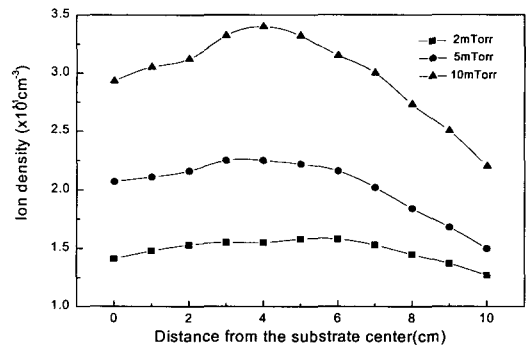
(b)

Fig. 3. (a) Ion saturation current and (b) ion density of various multi-dipole magnets measured at 1.5cm above the substrate along the radial direction for 5mTorr Ar, 600W inductive power using an electrostatic probe..

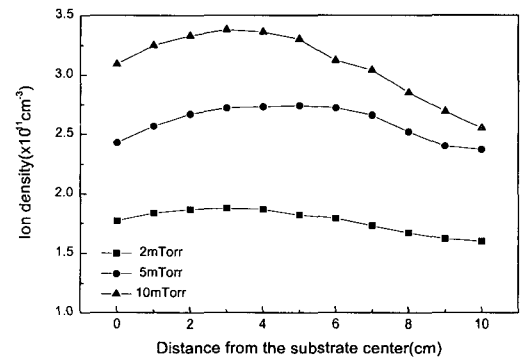
의 챔버벽쪽에서의 손실을 증가시켜 플라즈마 균일도를 떨어뜨린 것으로 사료되며, type III(자석 표면에서의 자장의 세기:약 4300 Gauss)의 경우 배열에 있어서는 type I(자석표면에서의 자장의 세기:약 3000 Gauss)과 같으나 약 1.5배정도의 강자장으로 챔버내부로의 강한 자장의 침투로 인해 더욱 플라즈마 균일도를 떨어뜨린 것으로 사료된다.

이러한 결과로 비추어 자장의 세기와 배열이 고려된 적합화된 자장을 가함으로써 챔버 벽으로의 전자 손실을 줄이고 더욱 균일한 플라즈마를 발생시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그림 3(b)는 가장 좋은 플라즈마 균일도를 보인 영구자석 type II, type IV를 자장을 가하지 않은 경우와 비교하기 위해 위와 같은 조건에서 ESP를 사용하여 측정된 Ar 플라즈마의 이온밀도이다. 역시 이온 포화전류의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

그림 4(b)는 챔버내에서 가장 좋은 플라즈마 균일도를 보인 영구자석 type IV에 대하여 Ar 압력에 따라 ESP를 이용하여 이온밀도를 측정하였으며, 비교를 위하여 영구자석을 부착하지 않은 경우에 대해서도 마찬가지로 실제 이온밀도를 측정하여 그림 4(a)에 나타내었다. 이때 ESP에 가해진 전압은 -60V에서 60V이고, 공정조건으로 rf power는 600W로 동일하고, 압력은 2 mTorr, 5 mTorr, 그리고 10 mTorr로 변화를 주었으며 기판중심에서 챔버벽까지 1cm 간격으로 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 자석이 있는 경우가 자석이 없는 경우에 비해서 플라즈마 밀도 및 균일도가 모두 증가하였으며 또한 자석의 유·무와 상관없이 압력이 낮아짐에 따라 이온밀도의 균일도가 향상됨을 볼 수 있다. 이는 압력이 낮아짐으로써 이온들의 평균 자유 행로가 증가함으로써 반경방향으로 확산계수 증가로 인한 것으로 사료된다. 자석을 부착하였을 때 2 mTorr에서 플라즈마 밀도의 균일도 $\left[\frac{(n_{max} - n_{min})}{(2 \times average)} \times 100 \right]$ 는 $200\text{mm} \times$



(a)



(b)

Fig. 4. The radial distribution of Ar ion density for (a) without multi-dipole magnets and (b) with multi-dipole magnets of type IV with 600W inductive power and at various operational pressures.

200mm내에서 5.9%를 나타내었으며, 공정압력을 낮춤으로써 균일도는 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

그림 5(a), (b)는 자석(type IV)이 있는 경우 챔버의 중앙부분과 중앙으로부터 6cm 떨어진 측면쪽에서 중심에서와 같은 방법으로 반경방향으로 1cm 간격으로 측정된 이온밀도의 균일도를 비교한 것이다. 소스파워 600 W, 공정압력은 5 mTorr, 2 mTorr에서 실험을 수행하였다. 자석이 있는 경우와 없는 경우 그리고 모든 공정압력에 있어서 이온밀도의 균일도는 챔버 중심에서 측정된 결과보다 측면에서 측정된 결과(2.8%)가 다소 우수한

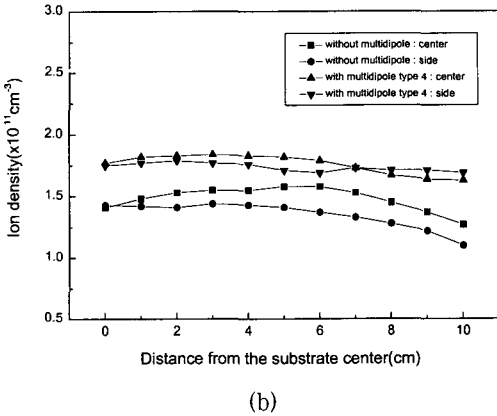
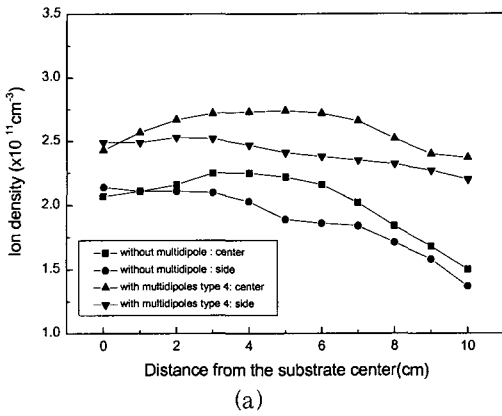


Fig. 5. The radial distribution of Ar ion density of the center and the side of the chamber with/without the multi-dipole magnets (a) at 5mTorr and (b) 2mTorr with 600W inductive power. The side is 6cm away from the substrate center.

값을 나타내고 있다.

그림 6은 적합화된 전자석 유·무에 있어서 전자석의 자장변화에 따른 Ar이온 밀도의 변화를 나타낸다. rf power는 600 W, 공정압력은 5 mTorr, 10 mTorr였다. 전자석의 자장이 증가함에 따라 영구자석의 유·무와는 상관없이 모두 점차적으로 증가하는 경향을 보이나 특정한 자장위치에서 helical excitation으로 추정되는 큰 증가가 관찰되었다.

그림 7(a), (b), (c)는 영구자석(자석type IV)

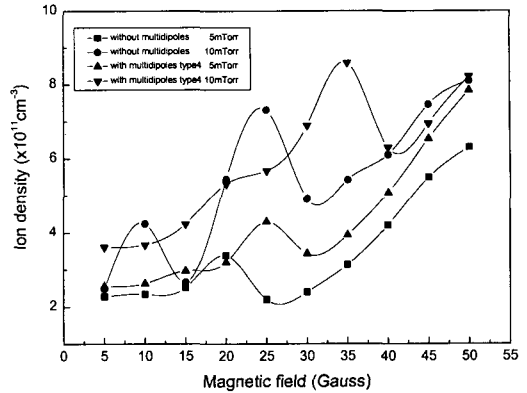
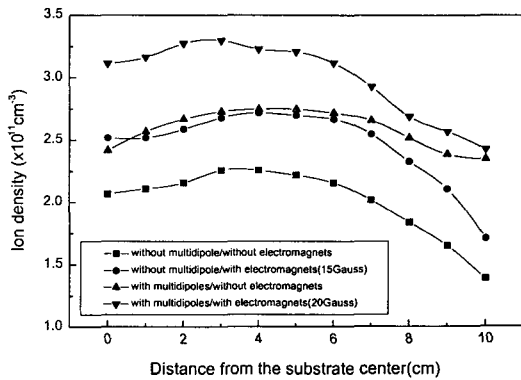
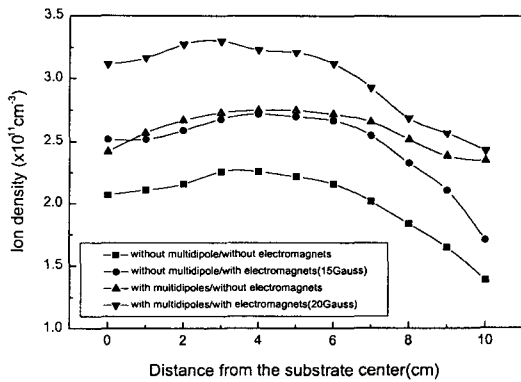


Fig. 6. on density as function of axial electromagnetic field strength(Bz) measured at 1.5cm above the substrate center the with/without the multi-dipole of type IV at 5mTorr/10mTorr and 600W inductive power.

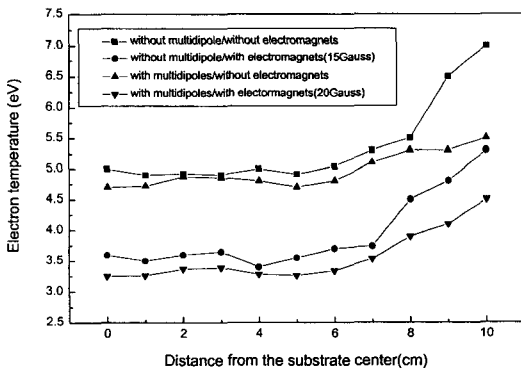
과 전자석의 유·무에 따른 플라즈마 밀도의 균일도, 전자온도, 그리고 플라즈마 전위의 변화를 나타낸다. 이 변수들의 변화를 측정하기 위해 기판 중심에서 챔버벽까지 1cm간격으로 측정하였고 이때 ESP에 가해진 전압은 -60V에서 60V이고, 공정조건으로 rf power 600 W, 공정압력은 5 mTorr로 동일하고, 가해진 전자석의 자장은 15 Gauss, 20 Gauss이다. 그림에서 보듯이 축방향의 전자석과 영구자석을 조합한 경우 ($3.12 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$)가 영구자석만을 사용한 경우 ($2.42 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$)보다는 플라즈마의 균일도는 약간 감소하였지만 이온밀도의 증가를 보였다. 200mm×200mm내에서의 플라즈마 균일도는 전자석을 가했을 경우와 전자석을 가하지 않았을 경우 6.9%에서 9%로 감소되었고, 영구자석을 가하지 않은 상태에서 전자석을 가했을 경우에는 10%에서 12.5%로 균일도의 감소를 나타내었다. 그림 7(b), (c)는 영구자석과 전자석을 조합하였을 경우의 플라즈마 전위와 전자온도의 변화를 측정된 결과이다. 플라즈마 전위는 기판 중앙에서 챔버벽까지 측정하였을 때 큰 변화는 보이지 않았으며, 그림에서 볼 수 있듯이 영구자석과 전자석을 조합하였을 때 가장 낮은 플라즈마 전위를 나타내었다. 전자온도의 경우에 있어서도



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. The radial distribution of (a) Ar ion density, (b) plasma potential, and (c) electron temperature for with/without the multi-dipole of type IV and axial electromagnets at 5mTorr and 600W inductive power.

영구자석과 전자석을 조합한 경우가 가장 낮은 전자온도를 나타내었으며 플라즈마 전위와 유사한 경향을 보였다.

4. 결 론

210mm×210mm크기의 사각형태의 유도결합 플라즈마 원을 제작하였고 여러 가지 자석배열 및 형태와 Helmholtz 형태의 전자석이 플라즈마 균일도와 밀도에 미치는 영향을 연구하였다.

본 연구에서 사용된 여러 가지 형태의 영구자석의 세기 및 배열중 일부의 형태가 영구자석을 가하지 않은 상태보다 챔버 내부 및 side에서 우수한 플라즈마의 균일도를 나타내었으며 210mm×210mm 크기의 챔버중심에서 벽면 1cm전까지 측정된 플라즈마의 균일도는 2 mTorr Ar, 600 W 하에서 영구자석을 가하지 않은 경우 10%에서 적합화된 영구자석을 가한 경우 5.9%로 균일도가 향상되었다. 또한 전자석을 가한 경우 플라즈마의 균일도는 영구자석의 유·무와 관계없이 플라즈마의 균일도가 약간 감소하였으나(5 mTorr, 600 W에서 1.2%정도) 전자석의 사용으로 플라즈마의 밀도가 크게 향상됨을 알 수 있었다. 또한 영구자석의 사용은 플라즈마 전위와 전자밀도를 약간 감소시켰으며, 영구자석과 전자석을 조합한 경우 가장 낮은 플라즈마 전위(34V_p)와 전자온도(3eV)를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 영상기기조합의 차세대 평판 표시장치 기반기술 개발사업의 연구비 지원과 정보통신부의 지원(98-134 및 IJRP971BOV-2)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. D. B. Graves: IEEE Trans. Plasma Sci. 22 (1994) 31.
2. T. Fukaswa, A. Nakamura, J. Shindo and Y. Horike: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) 2139.
3. W. Z. Collison, T. Q. Ni, and M. S. Barnes, J. Vac. Sci. Technol. A 16, 100 (1998).
4. F. Heinrich, U. Banziger, A. Jentsch, G. Neumann, and C. Huth, J. Vac. Sci. Technol. B 14, 2000 (1996).
5. K. Suzuki, S. Okudaira, N. Sakudo, and I. Kanomata, Jpn. J. Appl. Phys. 16, 1979 (1977).
6. O. A. Popov, J. Vac. Sci. Technol. A 7, 894 (1989).
7. J. Asmussen, J. Vac. Sci. Technol. A 7, 883 (1989).
8. F. F. Chen, Plasma Phys. Contrlled Fusion 33, 339 (1991).
9. G. N. Steinberg, and A. R. Reinberg, U.S. Patent No. 4, 368, 092, 11 January 1983.
10. J. Hopwood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair, and J. J. Cuomo, J. Vac. Sci. Technol. A 11, 152 (1993).
11. John H. Keller, J. C. Forster, and M. S. Barnes, J. Vac. Sci. Technol. A 11, 2487 (1993).
12. J. Hopwood, Plasma Sourecs Sci. Technol. 1, 109 (1992).
13. R. W. Boswell, A. J. Perry, and M. Emami, J. Vac. Sci. Technol. A 7, 3345 (1989).