



선형 유도결합 플라즈마 시스템에서 자장에 의한 플라즈마의 Confinement 효과에 관한 연구

임종혁, 김경남, 염근영*

신소재공학과, 성균관대학교

Development of Plasma Confinement by Applying Multi-Polar Magnetic Fields in an Internal Inductively Coupled Plasma System

Jong Hyeuk Lim, Kyong Nam Kim, Geun Young Yeom*

Department of Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University,
 Suwon, Kyunggi-do, 440-746, Korea

(Received 25 May 2006 ; accepted 15 June 2006)

Abstract

A novel internal-type linear inductive antenna, which we refer to as a double comb-type antenna, was developed for a large-area plasma source with substrate size of 880 mm × 660 mm (4th generation glass size). In this study, effect of plasma confinement by applying multi-polar magnetic field was investigated. High density plasmas of the order of $3.18 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ could be obtained with a pressure of 15 mTorr Ar at an inductive power of 5000 W with good plasma stability. This plasma density is higher than that obtained for the conventional double comb-type antenna, possibly due to the plasma confinement, low rf voltage, resulting in high power transfer efficiency. Also, due to the remarkable reduction in the antenna rf voltage and length, a plasma uniformity of less than 3% could be obtained within a substrate area of 880 mm × 660 mm as rf power increased.

Keywords: Plasma, Large area, Impedance, Display

1. 서 론

반도체 소자산업과 평판형 디스플레이 공정은 기판의 크기가 커짐에 따라 높은 수율과 효율을 위하여 고밀도의 대면적 플라즈마 소오스의 개발이 이루어지고 있다¹⁻⁴. 실제로 TFT-LCDs의 경우(thin film transistor-liquid crystal displays), 880 mm×660 mm (4세대)의 기판 사이즈에서 1850 mm×2250 mm(7세대)의 사이즈로의 연구가 급속히 진행되고 있다⁵.

유도 결합형 플라즈마 소오스는 플라즈마 공정에서 많은 장점을 가지고 있는데, 플라즈마를 여기 시키기 위해 높은 전압을 필요로 하지 않기 때문에 유도 결합형 플라즈마에서의 이온 에너지는 정전

결합형 플라즈마의 경우보다 상당히 낮다⁶. 또한 유도 결합형 플라즈마 소오스는 다양한 고밀도 플라즈마 소오스 중에서도 대면적으로의 확장성이 용이함 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다. 반도체 공정의 경우 많은 연구자들이 유도결합형 플라즈마 소오스에 대한 연구를 하고 있지만 기존의 외장형 유도 결합형 플라즈마 소오스를 사용하여 극단적으로 넓은 기판 크기를 갖는 평판형 디스플레이 공정의 적용시 유전물질 두께의 증가 및 비용에 대한 문제와 안테나에 유기되는 큰 임피던스 등의 문제가 발생한다. 이로 인한 안테나의 높은 임피던스는 큰 전압을 안테나에 유기시키고 증가된 정전결합으로 인하여 플라즈마로의 비효율적인 전력전달을 야기시킨다⁷⁻⁹.

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위하여

*Corresponding author. E-mail : gyyeom@yurim.skku.ac.kr

"double-comb type antenna"라는 내장형 선형 안테나를 고안하였고, 플라즈마 특성을 극대화하기 위하여 자장을 인가하였다.

2. 실험장치 및 방법

평판형 니스플레이 공정을 위해 사용되는 내장형 유도 결합형 플라즈마 연구를 위하여 1,020 mm×830 mm 크기의 공정 챔버를 직사각형의 보형으로 제작하였고 기판의 크기는 880 mm×660 mm(4세대)로 고안하였다. 내장형 선형 안테나는 기존의 외장형 나선형 안테나와 달리 직경 10 mm의 구리관으로 이루어져 있으며, 안테나의 외부는 직경이 15 mm이고 두께가 2 mm인 석영관으로 구성된다. 챔버 내부의 내장형 선형 안테나는 5개로 이루어져 있으며 각각의 안테나는 13.56 MHz(rf power supply)에 연결된 L-type 배청 시스템에 "double-comb antenna"의 양단이 연결되어 있다. 그리고 선형 안테나의 평행한 방향에 위치한 석영관 내부에 3000G를 갖는 영구자석을 배열시켰다. 내장형 ICP 소스의 플라즈마 밀도, 플라즈마 전위, 플라즈마 균일도를 알아보기 위해 Ar 기스를 사용하였고, 플라즈마 특성 분석을 위하여 챔버의 수직 중심선을 따라 안테나 아래 4 cm에 위치한 랑뮤어 프로브(Hiden Analytical, ESP)로 플라즈마 전위와 전자온도를 측정하였다. 또한 안테나의 전기적 특성분석을 위하여 임피던스 프로브(MKS Inc.)를 사용하여 평균전류와 평균전압을 알아 보았고 SiO₂가 증착된 시편의 식각 균일도를 측정하기 위하여 기판의 바이어스 전압을 인가하기 위해 12.56 MHz(rf power supply)를 소오스 및 필드로 설치하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 1은 본 실험에서 사용한 장비의 개략도이다. "double-comb type antenna" 위에 영구자석을 이용하여 자장이 인가되도록 설치되어 있으며, 그림 2는 안테나와 영구자석의 배열에 대한 단면도를 나타낸 것이다. 그림 3은 15 mTorr의 Ar에서 랑뮤어 프로브를 이용하여 플라즈마의 밀도를 측정한 것이다. 입력전력을 1000 W에서 5000 W까지 증가시키면서 플라즈마 밀도의 변화를 살펴본 결과, 자장의 유무에 상관없이 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한, 자장을 인가하지 않았을 때, "double-comb type antenna"에서는 $2.4 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 의 밀도를 얻을 수 있었으나, 자장을 인가하였을 때는 $3.18 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 의 상대적으로 높은 고밀도 플라즈마를 인

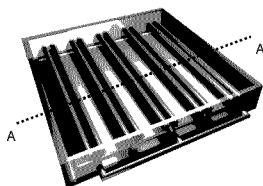


Fig. 1. Schematic diagram of the linear internal-type inductively coupled plasma system used in the experiment.

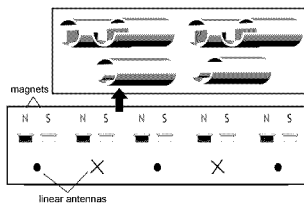


Fig. 2. Arrangement of the permanent magnets used in the experiment to form multi-polar magnetic fields.

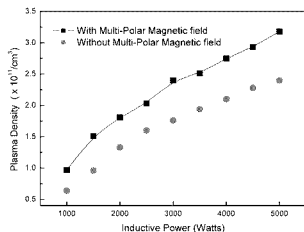


Fig. 3. Ar⁺ ion density measured by a Langmuir probe at 4 cm below the antenna as a function with/without multi-polar magnetic fields. RF input power to the antenna was varied from 1 kW to 5 kW and the operation pressure was maintained at 15 mTorr.

을 수 있었다. 이것은 자장을 인가한 자화된 플라즈마에서는 그렇지 않은 플라즈마와 비교해서 전자

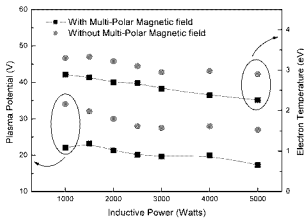


Fig. 4. Plasma potentials and electron temperatures as a function with/without multi-polar magnetic fields measured using a Langmuir probe as a function of RF power from 1 kW to 5 kW at 15 Torr Ar.

와 이온이 각각 다른 gyrofrequency와 gyration radius를 가지고 있기 때문이다.

$$f_{cc} = \frac{\omega_{cc}}{2\pi} \approx 2.80 \times 10^6 B_0 \text{ Hz (} B_0 \text{ in gauss)}$$

$$r_{cc} \approx \frac{3.37\sqrt{E}}{B_0} \text{ cm (} \epsilon_0 \text{ in volts, } \epsilon_0 \text{ is the)}$$

플라즈마 유지 및 이온화에 가장 큰 역할을 하는 전자의 경우, 위의 값을 나타내게 되는데, 모두 B_0 의 영향을 받아 gyrofrequency는 커지고, gyration radius는 작아진다는 것을 알 수 있다. 이처럼 gyrofrequency의 증가와 gyration radius의 감소는 플라즈마의 밀도를 증가시키는 가장 큰 요인이며, 나중에 언급하겠지만, 이러한 자장의 효과는 플라즈마의 confinement 효과에 의해 균일도도 향상시키는 요인이 된다. 그림 4는 자장의 유무에 따른 플라즈마 전위와 전자온도를 측정된 그림이다. 입력 전력이 증가함에 따라 자장의 유무에 상관없이 플라즈마 전위는 감소하는 경향을 보였으며, 자장을 인가하였을 때 플라즈마 전위는 그렇지 않았을 때 보다 낮음을 관찰할 수 있었고, 5000 W에서 17 V라는 낮은 플라즈마 전위를 측정할 수 있었다. 또한, 전자온도도 자장을 인가하였을 때 그렇지 않았을 때보다 낮았으며, 5000 W의 입력전력에서 2.26 eV를 얻을 수 있었다. 이는 자장을 인가함으로써, 전자에 의한 시편의 손상이 보다 낮음을 알 수 있다.

그림 5는 15 Torr의 Ar에서 임피던스 프로브를 이용하여 안테나에 인가되는 평균전압과 평균전류를 측정된 그림이다. 평균전압은 입력전력에 따라 증가하였으며, 자장의 유무에 상관없이 증가하였다.

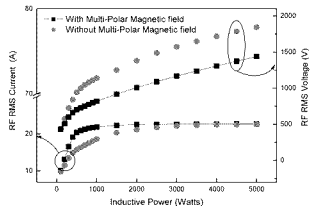


Fig. 5. RF rms voltage and current of the internal-type ICP measured by impedance analyzer on the antenna located close to the rf power input for the condition with and without the multi-polar magnetic field. 15 Torr of Ar was used and the rf power was varied from 1 kW to 5 kW.

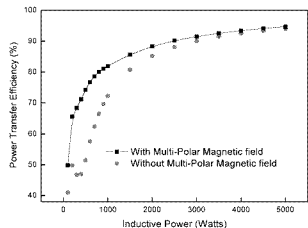


Fig. 6. Power transfer efficiency measured by an impedance analyzer as functions of inductive power from 1 kW to 5 kW at 15 Torr Ar.

또한, 5000 W의 입력전력에서 자장을 인가하였을 때 그렇지 않았을 때보다 500 V 정도 낮음을 관찰할 수 있었다. 안테나에 인가되는 평균전압은 σ (플라즈마 진도도, $\sigma \propto n_e \propto I/\text{antenna voltage}$)와 관계가 있으며, 그림에서 나타내지는 않았지만 자장을 인가한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 전자의 밀도가 증가하기 때문에 안테나가 느끼는 저항이 감소하여 플라즈마 임피던스는 감소하게 된다. 또한, 안테나와 플라즈마 사이의 전력 전달 효율을 증가시켜 결국 안테나에 인가되는 평균전압이 낮아진다고 사료된다. 안테나의 표면적 및 길이에 많이 의존하는 평균전류는 자장의 유무에 상관없이 입력 전력이 증가함에 따라 거의 비슷해짐을 알 수 있었다. 그림 6은 입력전력과 자장의 유무에 따른 전력 전달 효율을 측정된 그림이다. RF generator에서 나

은 입력전력은 배칭 시스템 또는 RF케이블에서 소모되는 양이 없고, 안테나를 통해 순수하게 플라즈마를 여기시키는데 사용이 된다는 가정을 하였다. 이러한 가정하에, 전위 전달 계수 측정을 위해 전달해준 입력전력에 대해 안테나의 지향에 의한 Joule Loss($P_{\text{Joule Loss}} = I_{\text{rf}}^2 \times R$)의 차에 대한 비율식을 이용하였으며, 다음과 같은 $\text{InputPower} = I_{\text{rf}}^2 / \text{InputPower} \times 100$ 방법을 사용하였다(1: 안테나에 흐르는 평균 전류, R: 안테나의 저항). 자장을 인가한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 2000 W까지는 전위 전달 계수가 컸으나 입력전력이 그 이상으로 증가할수록, 거의 비슷한 값의 경향을 보임을 알 수 있었고, 5000 W의 입력전력에서 약 95%의 전위 전달 효율을 나타내었다.

다른 연구자들의 실험에 의하면,¹⁰⁾ 자장을 이용하여 confinement 효과를 이용하면 hot electron을 효과적으로 제어하며, 자장이 존재하는 지역에서 확산을 억제되므로 대부분의 density gradient가 일어나는 챔버의 벽 쪽에서의 확산을 억제하게 되어 전체적인 균일도를 증가시킨다고 보고 되어지고 있다. 다음 수식 (1)은 전체, 자계, gradient가 존재할 때 운동량 보존에 관한 수식이다.

$$m n \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = q n (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \nabla \cdot \Pi + \mathbf{f}_c \quad (1)$$

m: 질량, n: 밀도, \mathbf{u} : 평균 입자 속도, $\partial \mathbf{u} / \partial t$: 시간에 따른 가속도 \mathbf{u} , \mathbf{f}_c : Krook collision operator.

여기서 두 가지의 측면으로 수식을 생각할 수 있다. 하나는, steady-state에서 플라즈마 내 자장과 수평인 성분과 관련된 $(\mathbf{u} \times \mathbf{B} = 0)$ 이동도(μ)와 확산 계수값을 알아내기 위해 gradient effect와 직계만을 고려한 경우이며, 그 다음 하나는, steady-state에서 플라즈마내 자장과 수직인 성분과 관련된, 이동도(μ)와 확산 상수값을 알아내기 위해 자계, 전계, gradient 효과 모두를 고려한 경우이다.

$$0 = q n \mathbf{E} - \nabla p - m n \mathbf{v} \cdot \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{|q|}{m v_m} m^2 / V \cdot s, \quad D = \frac{kT}{m v_m} m^2 / s \quad (3)$$

전자의 경우, 수식 (1)을 앞서 말했던 초기 조건을 만족시키는 형태로 변형하면, 위의 수식 (2)에서와 같이 변형되며, 이를 이용하여 이동도(μ)와 확산 계수를 구해보면, 수식 (3)이 된다. 즉, 이동도(μ)와 확산 계수가 상수가 된다는 것을 알 수 있다.

$$0 = q n (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}_0) - \nabla p - m n \mathbf{v} \cdot \mathbf{u} \quad (4)$$

$$\mu_{\pm} = \frac{\mu ||}{1 + (\omega_c \tau_m)^2}, \quad D_{\pm} = \frac{D ||}{1 + (\omega_c \tau_m)^2},$$

$$\left(\omega_c = \frac{q B_0}{m}, \quad \tau_m = \frac{1}{\nu_m} \right) \quad (5)$$

바탕가치로, 후자의 경우도 수식 (1)을 초기조건을 만족시키도록 변형시켜보면, 수식 (4)를 얻을 수 있다. 또한, 수식 (4)에서 수직성분의 이동도와 확산계수를 구해보면, 수평성분보다 $1 / (1 + (\omega_c \tau_m)^2)$ 만큼 작다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 살펴보았던 수평성분으로의 이동도와 확산계수는 상승했지만, 수직성분으로의 이동도와 확산계수는 $1 / (1 + (\omega_c \tau_m)^2)$ 만큼 작다는 것으로 보아 자장과 수직인 방향으로 자장의 confinement 효과가 발생하여 이러한 수식을 얻을 수 있었다고 사료된다. 이러한 자장의 confinement 효과에 의해 플라즈마 균일도는 향상된다.

그림 7은 15 mTorr의 Ar에서 랑뮤어를 이용하여 이온 포와 전류를 측정하여 플라즈마 균일도를 측정 한 그림이다. 그림에서 나타내지는 않았지만 자장을 인가하지 않았을 경우 안테나에 수직인 방향으로 프로브를 움직이며 입력전력을 3 kW에서 5 kW 까지 증가시킴에 따라 플라즈마 균일도를 측정해본 결과 9% 이내의 결과를 얻을 수 있었다. 하지만, 자장을 인가하였을 경우, 3 kW 이상의 입력전력 3% 이내의 좋은 플라즈마 균일도를 얻을 수 있었다.

그림 8은 SF₆ gas를 이용하여 SiO₂를 증착시킨 시편의 식각 균일도를 측정 한 그림이다. 안테나쪽에 5000 W의 입력전력과 기판 쪽에 2000 W의 입력전력을 인가하여 식각을 하였으며, 이때 기판에 유도

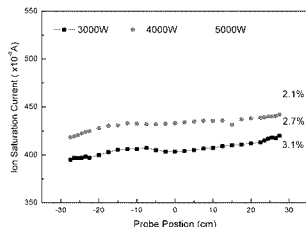


Fig. 7. Plasma uniformity of the double comb-type antenna with multi-polar magnetic field measured at 4 cm below the antenna as a function of rf inductive power from 3 kW to 5 kW with 15 mTorr Ar. Ion saturation current measured using a Langmuir probe biased at -60 V was used as the estimation of the plasma density.

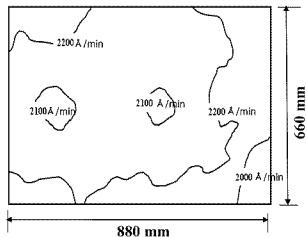


Fig. 8. Etch uniformity of SiO_2 film on the substrate area of $880 \text{ mm} \times 660 \text{ mm}$ measured at 5000 W of rf power, -34 V of dc-bias voltage, and 15 mTorr of SF_6 for double comb-type antenna with multipolar magnetic field.

되는 바이어스 전압은 -34 V 였으며, 전체적으로 5.4%의 좋은 균일도를 얻을 수 있었다.

4. 결론 및 후기

본 연구에서는 초대면적용 플라즈마 공정을 위한 안테나에 자장을 인가하여 플라즈마에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 자장에 의한 플라즈마 confinement 효과에 의해 플라즈마의 밀도 증가 및 플라즈마의 균일도 향상 효과를 관찰 하였으며, 실제 공정으로의 적용성을 위해 식각 균일도를 측정해본 결과

5.4%의 좋은 균일도를 얻을 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 국가지정연구실 사업의 일환으로 지원되었다.

참고문헌

1. Y. Setuhara, T. Shoji, A. Ebe, S. Baba, N. Yamamoto, K. Takahashi, K. Ono, S. Miyake, Surface and Coating Technology, 174-175 (2003) 33-39.
2. J. Holland, M. Barnes, A. Demos, T. Ni, P. Shuffelbotham, W. Yao, SID Sym. Digest, 27 (1996) 526.
3. F. Heinrich, U. Banzlger, A. Jentsch, G. Neumann, C. Huth, J. Vac. Sci. Technol., B 14 (1996) 2000.
4. H. Takei, H. Kawamura, Y. Ohta, R. Gardner, SID Digest, 1102 (1998).
5. J. Schmitt, M. Elyakoubi, L. Sansonnens, Plasma Sources Sci. Technol., 11 (2002) A206.
6. R. B. Picjak, V. A. Gody, B. M. Alexandrovich, Plasma Sources Sci. Technol., 1 (1992) 179.
7. Z. Yu, D. Shaw, P. Gonzales, G. J. Collins, J. Vac. Sci. Technol., A 13 (1995) 503.
8. J. H. Kim, H. J. Lee, Y. T. Kim, J. H. Joo, K. W. Whang, J. Vac. Sci. Technol., A 15 (1997) 564.
9. T. Meziani, P. Colpo, F. Rossi, Plasma Sources Sci. Technol., 10 (2001) 276.
10. K. N. Leung, G. R. Taylor, J. M. Barrie, S. L. Paul, R. E. Kribel, Physics Lett., 57A (1976) 145.