

다중 음극 전자빔을 이용한 대면적 플라즈마 소스

강양범 · 전형탁 · 김태영* · 정기형* · 고동균** · 정재국** · 노승정***

한양대학교 재료공학부
* 서울대학교 원자핵공학과
** 중앙대학교 물리학과
*** 단국대학교 응용물리학과

A Large Area Plasma Source Using Multi-cathode Electron Beam

Y. B. Kang, H. Jeon, T. Y. Kim*, K. H. Chung*, D. K. Ko**, J. K. Jung** and S. J. Noh***

Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, CPRC, Seoul 133-791

*Dept. of Nuclear Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742

**Dept. of Physics, Chungang University, Seoul 156-756

***Dept. of Applied Physics, Dankook University, Seoul 140-714

E-mail: sjnoh@dankook.ac.kr

(1998년 4월 27일 받음, 1999년 6월 4일 최종수정본 받음)

초 록 다중 음극 전자빔을 이용한 새로운 플라즈마 소스를 설계하고 제작하였다. 대면적의 플라즈마를 발생시키기 위해 다중 음극을 채택하였다. 다중 음극 전자빔 플라즈마 소스(multi-cathode electron beam plasma source, MCEBPS)를 이용하여 300 mm 또는 그 이상의 직경을 가진 웨이퍼에 안정한 플라즈마를 생성시킬 수 있었다. 텅스텐 필라멘트를 음극으로 사용하였다. 직경 320 mm의 넓이에서, plasma potential V_p 와 floating potential V_f 모두 균일하게 유지되었고 V_p 와 V_f 의 차이도 낮은 값으로 나타났다. 플라즈마 밀도는 약 10^{10} cm^{-3} 정도로 측정되었고 반경거리에 따른 편차는 작게 나타났다.

Abstract A new plasma source using the multi-cathode electron beam has been designed and manufactured. A multi-cathode was adopted to produce bulk plasmas in a large volume. Multi-cathode electron beam plasma source (MCEBPS) was found to generate stable plasmas over the wafer diameter of 300 mm or above. W(tungsten) filament was used as a cathode. Over a 320 mm diameter, both the plasma potential V_p and floating potential V_f were uniformly maintained and the difference between V_p and V_f was measured to be small. The plasma density was around 10^{10} cm^{-3} and its variation along the radial distance was small.

1. 서 론

최근 집적회로 제조 공정에서 플라즈마를 응용한 공정이 기존의 공정을 대체하고 있으며 식각 공정에서는 고집적화에 따른 선폭의 감소로 인해 플라즈마를 이용한 식각이 필수적인 요소가 되고 있다. 공정의 측면에서, 집적도의 증가는 생산성 향상을 위해 웨이퍼의 크기 역시 대구경화시키고 있다. 따라서, 대면적의 균일한 플라즈마를 발생시키는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다. 기존의 inductively coupled plasma (ICP), electron cyclotron resonance (ECR) plasma 그리고 helicon wave plasma (HWP) 등은 높은 식각 속도를 위해 고밀도의 플라즈마를 생성할 수 있는 플라즈마 소스로 제안되어 왔지만, 300 mm 이상의 대면적 웨이퍼를 대상으로한 공정에서, 기존 플라즈마 소스의 챔버 크기를 단순히 증가시킬 경우에 발생하는 문제점이 지적되어 왔다.^{1~3)}

본 논문에서는 직경 300 mm 또는 그 이상의 대면적에 균일한 플라즈마를 발생시키기 위해 다중 음극 전자빔 플라즈마 소스(multi-cathode electron beam plasma source,

MCEBPS)를 제안하고 연구하였다. MCEBPS는 대면적에 플라즈마를 생성하기 위해 7개의 음극을 사용하고, 자기장 인가로 인한 장치의 복잡성과 플라즈마 균일도(uniformity)에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 정전기적인 방식을 채택하였다. 전자빔 인출은 가열된 음극에서 방출되는 열전자방출 방식을 도입하고 방출된 전자와 중성 입자와의 직접적인 충돌에 의해 방전을 초기화하고 유지하였다. 인출 전극에 전압을 인가함으로써, 인출되는 전자빔의 에너지를 조절하여 전자에 의한 기체의 이온화 단면적(ionization cross section)과 기타 공정조건을 최적화하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1에 MCEBPS의 개략도를 나타내었다. MCEBPS는 음극 부분, 가속 부분 그리고 반응 챔버의 세 부분으로 나뉘어져 있다. 전자의 방출 면적을 증가시키기 위해 직경 0.55 mm의 텅스텐 필라멘트를 원판모양으로 감은 음극이 전자의 방출 원으로 사용되고 플라즈마를 넓은 영역에 발생시키기 위해 환형(annular)의 전자빔이 도입된다. 한 개의 음극은 중심에 위치되고 6개의 음극은 중심 음극으로부터

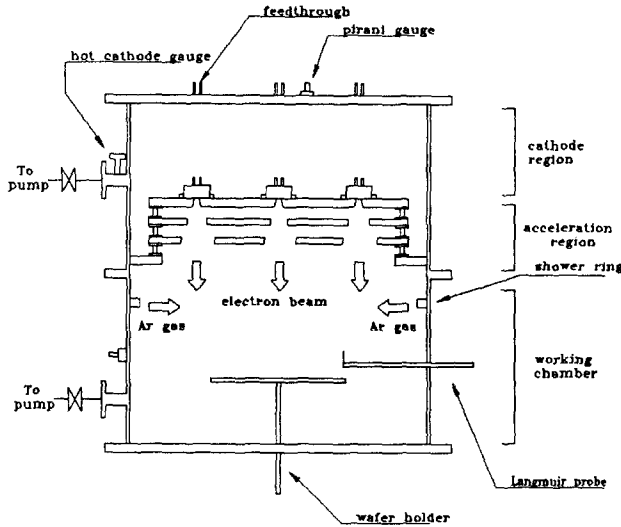


Fig. 1. Schematic illustration of MCEBPS equipment.

190 mm 거리의 원주상에 60°의 동일한 원주각 간격으로 위치됨으로써 총 7개의 음극이 동심원 형태로 배치된다. 이러한 배치는 직경 300 mm의 면적에 균일한 플라즈마를 생성시키는데 적절하다고 보고되었다.⁴⁾ 전자빔 인출과 인출된 전자빔의 에너지 조절을 위해 인출 전극이 장착되고 전자빔을 효과적으로 반응 챔버로 수송하기 위해 집속 전극⁵⁾이 장착된다. 반응챔버에서는 수송된 전자빔과 shower ring에서 공급된 중성 기체와의 충돌에 의해 방전이 이루어진다.

본 실험에서는 플라즈마를 발생시키기 위한 중성 기체로 Ar을 사용하였고 Ar을 이온화시키기 위한 전자빔의 에너지는 인출 전극에 인가된 전압에 의해서 조절되었다. Langmuir 탐침을 이용하여 I-V (전류-전압) 특성곡선으로부터 플라즈마 특성을 구하였다. 직경 0.5 mm, 길이 6 mm의 탄탈륨을 탐침 팁(tip)으로 사용하였고 팁은 반응 챔버의 축에 수평한 방향으로 놓여졌다. 축 방향거리에 따른 플라즈마 파라미터의 측정을 위해 음극에서 각각 150 mm와 250 mm 떨어진 지점에 탐침을 장착했다. I-V 특성을 얻기 위해 탐침에 3초 동안 -30 V에서 40 V까지의 전압이 인가되었고 DT-VEE 프로그램을 이용하여 I-V 곡선 및 플라즈마 파라미터를 측정하였다. 플라즈마 밀도의 결정은 측정 오차를 최소화하기 위해 얻어진 I-V 곡선의 평균값을 취하여 결정하였고, 그 이외의 플라즈마 파라미터는 평균값을 취한 I-V 곡선을 다시 polynomial fitting을 한 후 각각의 파라미터에 적절한 수학적 방식을 통해 결정하였다. 방전 전류 25 A의 조건에서 플라즈마 밀도 분포의 조절을 위해 중심 음극의 전원을 ON 또는 OFF시키고 압력 변화에 따른 실험을 수행하였고, 확산 효과에 따른 균일도(uniformity)의 변화를 관찰하기 위해 음극에서 축 방향으로 각각 150 mm와 250 mm 떨어진 지점에서 밀도 분포를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에서 사용된 MCEBPS는 3~6 mtorr의 압력과 약 1.5 kW의 음극 가열전력으로 320 mm의 대면적에 안정적인 플라즈마를 발생시켰으며, 방전 전류 25 A의 조건에서 $3 \times 10^{10} \sim 6.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 정도의 플라즈마 밀도를 나타내었다.

1. 플라즈마 진단

식(1)을 이용하여 플라즈마 밀도를 구할 수 있다.⁶⁾ n은 플라즈마 밀도 [m^{-3}], I는 이온 포화 전류 [A], μ 는 수소에 대한 Ar의 질량비, A_p 는 탐침의 면적 [m^2], V_p 는 플라즈마 전위 [V], V는 탐침에 인가된 전위 [V]를 말한다. 여기서

$$n = 1.42 \times 10^{15} \frac{I \sqrt{\mu}}{A_p \sqrt{V_p - V}} \quad (1)$$

A_p 와 μ 는 고정된 값이고 V_p 역시 거의 고정된 값으로 생각할 수 있다. 따라서 본 실험에서 플라즈마 밀도에 영향을 주는 변수는 탐침에 인가된 전위와 그때의 이온 전류가 된다. 본 실험에서는 이온이 충분히 포화되었을 때의 탐침 전위와 그때의 이온 전류를 이용하여 플라즈마 밀도를 계산하는 일반적인 방법을 이용하였다. 이온이 포집되는 영역에서 즉 V_p 에서 포화될 때까지 플라즈마 밀도는 이온 전류의 값과 관계없이 플라즈마 밀도가 일정하게 유지되는데, 이것은 식(1)에서 V가 음의 값으로 증가함에 따라 이온 전류 역시 증가하여 V의 증가 효과가 이온 전류의 증가로 인해 상쇄되기 때문이다. 그러나 실제의 경우에는 이온이 포화되는 이후의 영역, 즉 전위가 음의 값에서 양의 값으로 변화하는 영역에서 이온과 함께 전자도 탐침에 포집이 되기 때문에 순수한 이온 전류만을 구할 수 없으므로 충분히 이온이 포화된 영역에서의 이온 전류를 이용하여 플라즈마 밀도를 결정하였다. 본 실험에서는 -15 V 이하의 영역을 이온의 포화 영역으로 정하였다. Fig. 2는 탐침에 인가된 전위가 각각 -15 V와 -20 V 일 때 반경 방향을 따라 측정된 이온 포화 전류와 플라즈마 밀도를 나타낸다. 이온 전류의 경우 탐침 전위가 -15 V 일 때 보다 -20 V 일 때가 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이것은 탐침에 인가되는 전위에 따라 탐침 주위에 형성되는 sheath 영역의 두께가

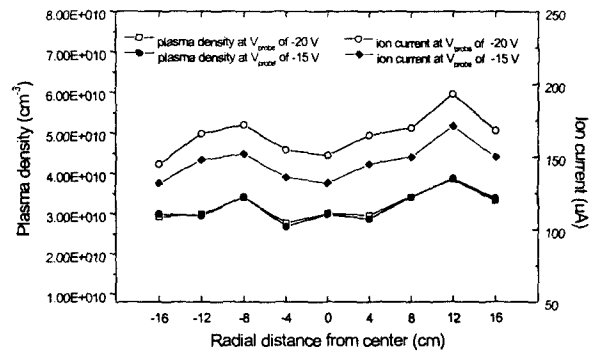


Fig. 2. Distribution of both plasma density and ion current as a function of the radial distance at two different probe potentials of -15 V and -20 V.

달라지기 때문이다. 플라즈마 전위 (V_p)와 탐침 전위 V 의 차를 V_s 라 할 때, sheath 영역의 두께는 대략 $V_s^{3/4}$ 에 비례하게 된다. 따라서 V 의 값이 음의 값으로 증가할수록 sheath 영역의 두께가 증가하므로 탐침에 포집되는 이온 역시 증가하게 된다. 그러나 플라즈마 밀도는 포화영역에서 탐침 전위에 관계없이 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

2. 플라즈마 특성 분석

Fig. 3은 방전 전류가 25 A 일 때 중심 음극 전원의 ON/OFF에 따른 플라즈마 밀도 분포를 나타내는 것으로, 축 방향으로 250 mm 떨어진 지점에서 측정되었고 압력은 3 mtorr로 유지되었다. 플라즈마 밀도가 모든 음극을 ON 시킨 경우에 중심부근에서 높게 나타나고 양끝으로 갈수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 생성된 플라즈마의 손실(loss)은 크게 두 가지로 구분될 수 있다. 하나는 전자와 이온간의 재결합(recombination)이고 다른 하나는 확산에 의한 챔버 벽으로의 손실이다. 본 실험에서의 플라즈마 밀도가 10^{10} cm^{-3} 정도를 나타내고 있기 때문에 주된 손실 기구(loss mechanism)는 확산에 의한 챔버 벽으로의 손실이라고 생각할 수 있다.⁷⁾ 챔버 중심에서 190 mm 떨어진 6개의 음극에서 발생된 플라즈마는 챔버 벽과 챔버 내부를 향하여 확산을 하며, 중심 음극에서 발생된 플라즈마는 주위의 음극에서 발생된 플라즈마를 향하여 확산을 하게 된다. 이는 중심 음극 부근에서 플라즈마 밀도가 높게 나타나고 벽 쪽으로 갈수록 감소하는 실험결과로 확인할 수 있다. 모든 음극을 동작시킨 경우에 얻어진 밀도 분포보다 챔버 중심에서의 밀도를 좀 더 낮추기 위해서 중심 음극을 OFF시키고 나머지 주위의 6개의 음극만을 동작시켜 축 방향으로 250 mm의 지점에서 측정하였다. 이 경우 그림에서 보듯이 전반적으로 플라즈마 밀도는 감소하나 밀도 분포는 매우 균일해지는 것을 볼 수 있다. 또한 중심 음극이 플라즈마를 발생시키지 않아도 중심부근에서의 플라즈마 밀도가 챔버 벽 쪽에 비하여 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 챔버 벽으로의 확산 효과가 더 큰 것을 알 수 있다.

일반적으로 확산의 경우 밀도는 시간적 공간적으로 변화한다.⁷⁾ 정상 상태(steady state)의 방전을 가정할 때 밀도는 공간적으로 변화할 것이다. 따라서 방전된 영역에서 축 방향으로 내려가면서 플라즈마의 밀도와 밀도 분포가 변화할 것이라고 예측할 수 있다. 본 장치의 경우 압력을 높이는 것은 방전 영역을 음극에 가까운 쪽으로 이동시키는 효과를 가져온다. Fig. 4는 모든 음극을 동작시킨 상태에서 압력을 6 mtorr로 증가시켰을 때의 밀도 분포를 나타내는 것으로 축 방향으로 각각 150 mm와 250 mm 떨어진 지점에서 측정되었다. Fig. 3과 비교할 때, 축 방향으로 250 mm 떨어진 지점에서 균일도는 떨어지지만 중심 부근의 밀도는 향상된 것을 볼 수 있다. 또한, 150 mm 떨어진 지점의 밀도가 250 mm 떨어진 지점보다 약 2배 가량 높게 나타나고 있으며 밀도 분포도 150 mm 지점이 좀 더 균일하게 나타나고 있다. 본 실험의 압력 범위 내에서는 압력 증가에 따라 플라즈마 밀도가 향상되는 것을 알 수 있다.

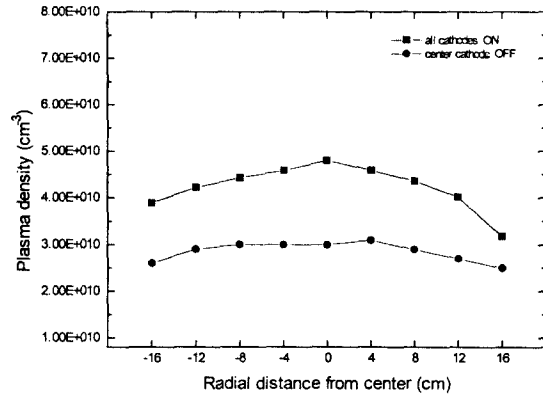


Fig. 3. Distribution of plasma density as a function of the radial distance at a pressure of 3 mtorr. Upper curve represents the plasma density when seven cathodes were ON-state. Lower curve represents the plasma density when one cathode at the center was OFF-state and six cathodes along the circumference were ON-state.

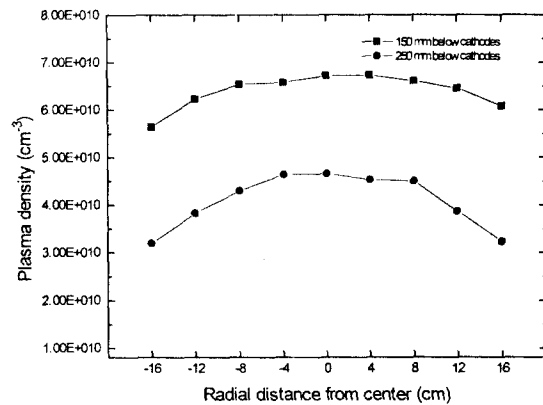


Fig. 4. Distribution of plasma density as a function of the radial distance at a pressure of 6 mtorr along the axial distances of 150 and 250 mm below cathodes.

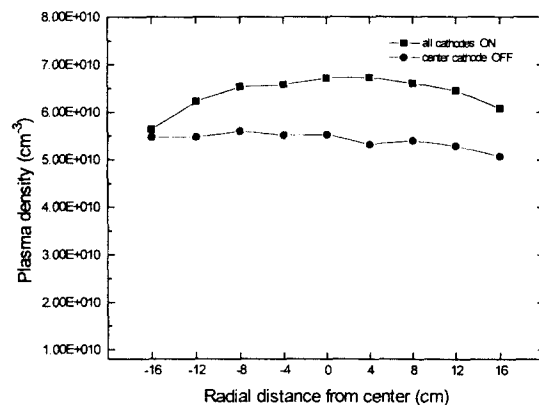


Fig. 5. Distribution of plasma density as a function of the radial distance at a pressure of 6 mtorr. Upper curve represents the plasma density when seven cathodes were ON-state. Lower curve represents the plasma density when one cathode at the center was OFF-state and six cathodes along the circumference were ON-state.

고밀도의 플라즈마를 발생시키고 동시에 밀도 분포를 균일하게 유지하는 것은 건식 식각을 위해 가장 중요한 요건이라고 할 수 있다. Fig. 5는 축 방향으로 150 mm 떨어진

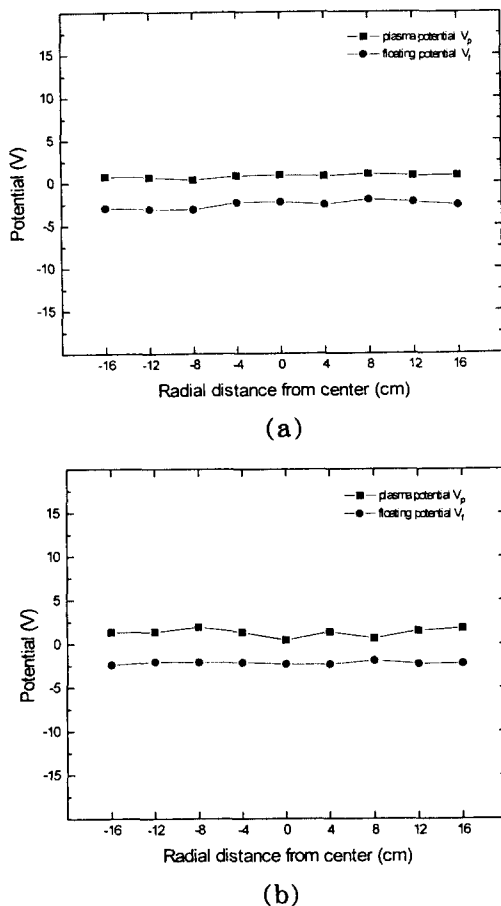


Fig. 6. Distribution of V_p and V_f as a function of the radial distance at a pressure of 6 mtorr (a) when all cathodes were ON-state and (b) when the center cathode was OFF-state and six cathodes along the circumference were ON-state.

지점에서 중심 음극 전원의 ON/OFF에 따른 플라즈마 밀도 변화를 나타낸 것으로 압력 6 mtorr의 조건에서 수행되었다. 모든 음극을 동작시킨 경우의 플라즈마 밀도 균일도가 $\pm 8.8\%$ 로 나타나는 반면에 중심 음극을 OFF한 경우는 플라즈마 밀도의 균일도가 $\pm 4.9\%$ 로 향상되어 매우 균일한 분포를 나타내고 있고 밀도는 약 $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 으로 측정됐다.

플라즈마 밀도와 분포 이외에 플라즈마의 특성을 조사하기 위해 플라즈마 전위 (V_p), floating 전위 (V_f)를 측정하였다. Fig. 6은 Fig. 5의 실험에서 V_p 와 V_f 의 분포를 측정한 결과이다. Fig. 6(a)는 모든 음극을 동작시킨 상태에서 반경 거리에 따른 V_p 와 V_f 의 분포를 나타낸다. V_p 와 V_f 는 각각 $0.69 \pm 0.3 \text{ V}$ 와 $-2.53 \pm 0.55 \text{ V}$ 를 나타내고 있으며 sheath 전위차인 $V_p - V_f$ 의 값은 4 V 이내로 유지되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 중심 음극을 OFF시킨 상태에서 반경 거리에 따른 V_p 와 V_f 의 분포를 나타낸다. V_p 와 V_f 의 값은 각각 $1.17 \pm 0.74 \text{ V}$ 와 $-2.15 \pm 0.35 \text{ V}$ 를 나타내고 있고 sheath에서의 전압강하 역시 4 V 정도로 유지되고 있다. 4 V 정도의 sheath 전위차는, 전자빔을 이용해 플라즈마를 발생시켰던 Ryoji et al.의 결과⁸⁾와 비교해 볼 때, 더 낮은 값을 나타내므로 식각 공정에서 높은 에너지를 가진 이온에 의한 손상을 줄이기에 충분하다고 생각되고 또한 V_f 가 국부적으로 크게 감소하지 않은 것은 음극에서 인

출된 전자빔이 고르게 퍼진다는 것을 나타낸다. 실제로 전자빔이 국부적으로 집중되는 현상은 V_f 의 감소로 알 수 있고⁸⁾ 측정된 I-V 곡선에 의해서도 나타나게 된다.⁶⁾ 그러나 본 실험에서는 V_f 가 균일하게 나타나고 있고 얻어진 I-V 곡선에서도 전자빔의 특성은 나타나지 않았다. 중심 음극 ON/OFF에 따라 플라즈마 밀도 분포는 차이가 많았으나 V_p 와 V_f 의 분포는 큰 차이를 보이지 않고 있고 중심 음극을 ON한 경우가 좀 더 균일한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

MCEBPS는 직경 320 mm의 대면적에 안정하고 전식 식각에 적합한 특성을 갖는 플라즈마를 발생시켰다. 방전 전류 25 A의 조건에서 압력 6 mtorr, 중심 음극 OFF, 음극으로부터 축 방향으로 150 mm 떨어진 지점에서 전식 식각에 적절한 특성이 관측되었다.

압력 3 mtorr, 음극에서 축 방향으로 250 mm 떨어진 지점에서 측정된 플라즈마의 밀도 분포는 중심 음극을 OFF한 경우가 중심 음극을 ON한 경우보다 균일하게 나타났고 밀도는 약 $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 정도를 나타내었다. 모든 음극을 동작시킨 상태에서 방전 영역을 음극 쪽으로 이동시키기 위해 압력을 6 mtorr로 증가시켰을 경우, 음극에서 축 방향으로 150 mm 떨어진 지점이 250 mm 떨어진 지점보다 플라즈마 밀도가 2배 가량 증가하였으며 밀도 분포 역시 향상되는 것을 알 수 있었다.

압력 6 mtorr, 음극에서 축 방향으로 150 mm 떨어진 지점의 밀도 분포에서, 중심 음극을 OFF 하였을 때 균일도가 $\pm 4.9\%$ 로 크게 향상되는 것을 알 수 있었고 밀도는 약 $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 정도를 나타내었다.

압력이 6 mtorr 일 때 음극에서 축 방향으로 150 mm 떨어진 지점에서 플라즈마 전위 (V_p)와 floating 전위 (V_f)는 균일한 분포를 나타내었고 sheath 전위차는 4 V 정도를 나타내었다.

이로써, MCEBPS는 직경 300 mm 또는 그 이상의 웨이퍼 공정에 적합한 플라즈마 소스중의 하나로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 교육부 학술연구조성비(물리학 BSR1 97-2452)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. D. B. Graves, IEEE Trans. Plasma Sci., **22** (1994) 31.
2. Seiji Samakawa, J. Vac. Sci. Technol., **A14**(3) (1996) 1002.
3. O. A. Popov, High Density Plasma Sources, 1995.
4. Han S. Uhm et al., IEEE Trans. Plasma Sci., **19** (1991) 535.
5. A. S. Gilmour, Jr., Microwave Tubes, 1986.
6. David N. Ruzic, Electric Probes for Low Temperature Plasmas, 1994.
7. F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 1984.
8. Makato Ryoji et al., Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 4357.