

<연구논문>

전자 사이클로트론 공명 플라즈마 화학적 기상 증착 장치에서의 수소 플라즈마 특성연구

김우준·구자춘·황기웅

서울대학교 공과대학 전기공학과
(1994년 8월 12일 접수)

A Study on the Properties of Hydrogen Plasma in the Electron Cyclotron Resonance Plasma Chemical Vapor Deposition System

Woo-Jun Kim, Ja-Chun Ku and Ki-Woong Whang

Dept. of Electrical Eng, Seoul National Univ., Seoul
(Received August 12, 1994)

요 약 - Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition(ECRPCVD) 장치에서 공정변수에 따른 수소 플라즈마 특성을 조사하였다. 균일한 플라즈마 밀도를 얻기 위하여 전자공명층이 기판과 평행하게 형성되도록 정자장 코일을 설계하였으며, 기판근처에 부가적으로 형성된 multicusp field에 의해서 기판 근처에서의 플라즈마 균일도를 개선시킬 수 있었다. 또한, 절연된 공진실과 기판에의 독립적인 DC bias에 의해서 기판으로 입사하는 하전입자들의 에너지와 유량을 조절할 수 있었다. 이러한 플라즈마 특성을 갖는 ECRPCVD장치를 다양한 특성을 갖는 박막 합성에 응용할 수 있으리라 사료된다.

Abstract - The characteristics of the hydrogen plasma were investigated as functions of the process parameters in the electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition(ECRPCVD) system. The external magnet coils was designed such that ECR layer is parallel to the substrate to obtain a uniform plasma density, and the uniformity was improved by the additional multicusp field near the substrate. By the applications of independent DC biases to the cavity and the substrate, the energy and the flux of the charged particles in the plasma could be controlled. It is thought that this ECRPCVD system can be applied to the large and uniform coating having various properties.

1. 서 론

최근 저온 플라즈마 기술이 material processing에 적용된 이후 저온 플라즈마를 이용한 Chemical Vapor Deposition(PECVD : Plasma Enhanced CVD)가 박막성장공정에서 신기술로서 각광받고 있는데[1-4], 본 연구에서는 이 중에서도 대면적, 균일한 박막을 형성시킬 수 있는 ECRPCVD장비를 제작하여, 공정변수에 따른 전자공명 플라즈마(ECR plasma)특성을 조사하였다. 전자공명 플라즈마는 낮은 압력에서 고밀도, 넓은 면적의 플라즈마를 얻을 수 있기 때문에

대면적, 균일한 박막 증착에의 응용성이 높다. 또한 낮은 압력에서 발생하는 고밀도 플라즈마는 저온 합성공정을 가능케 하며[5], 플라즈마 내의 하전입자들(전자나 이온)의 에너지 및 유량은 공진실 혹은 기판에의 DC bias에 의해 조절될 수 있으므로, 기판 표면으로 입사하는 전자 및 이온들이 성장하는 박막 결정성에 미치는 영향을 쉽게 연구할 수 있다.

본 연구에서는 ECRPCVD장비에서의 4인치 이상의 대면적 박막합성을 위하여 정자장 형성 코일의 위치 및 인가전류를 최적화하였고, 전자와 이온의 물리적 특성을 각각 single Langmuir probe법과 ion

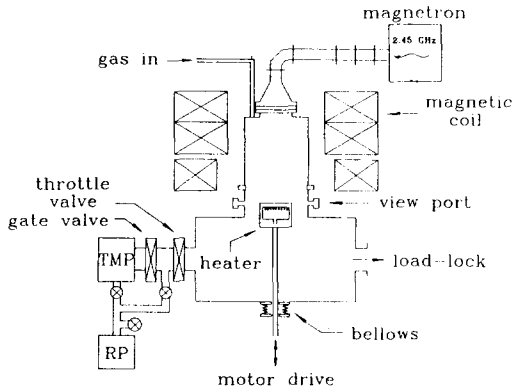


그림 1. ECRPCVD장치의 개략도.

energy analyzer법으로 측정하여, 균일도 향상을 목적으로 형성시킨 보조자장(multicusp field)효과를 조사하였다.

2. 실험방법

전자공명 플라즈마 특성 조사에 사용된 ECRPCVD장비의 개략적 모습이 그림 1에 나타나 있다. ECRPCVD장비는 마이크로파 전원부, 공명실, 기판 가열장치, 반응실 등으로 나뉘어 진다. 2.45 GHz의 마이크로파 발진장치는 최고 3 KW까지 출력을 낼 수 있으며, low ripple continuous wave 형식이다. 공명실은 전자공명 플라즈마를 발생시키는 부분이고, 크기는 직경 200 mm, 높이 200 mm이다. 기판가열장치는 4인치 크기의 실리콘 웨이퍼를 장착할 수 있으며, 기판의 바로 윗 부분에서 형성되어 있는 플라즈마를 분광분석하기 위해서 직경 15 mm의 석영시창을 반응실 상단부에 전후좌우 4개 설치하였다. 공진실과 기판 가열장치는 독립적인 직류전압을 인가할 수 있도록 접지된 반응실에 대하여 각각 절연하였다.

전자공명층을 만들어 주기 위한 정자장은 직렬로 연결된 3개의 전자식 코일에 의해 형성되며, 인가전류를 조절함으로써 전자공명층의 위치를 변화시킬 수 있다. 그림 2에 코일의 전류가 80A일 때의 z축상의 자장분포를 모의실험 결과와 실측 결과를 비교하였다. 공진실 내의 자장 측정은 gauss meter로 하였고, 실측값이 모의 실험값과 거의 일치하였다. 또한 반경 방향 플라즈마 밀도의 균일도를 향상시키기 위

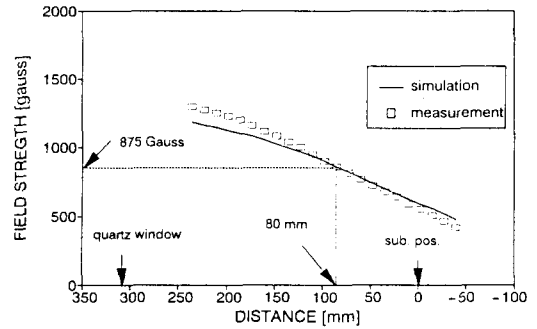


그림 2. z축상 자장 세기 분포(I=80 A).

하여 기판 주위 외벽에 12개의 Nd-Fe-B 영구자석(표면자장 최대 2000 gauss)을 축대칭으로 배치, 보조자장을 형성시켜서 기판 주위에서의 하전입자들의 관벽손실을 줄였다.

진공시스템은 380 l/sec의 배기속도를 갖는 터보분자펌프(Alcatel, 5401CP)와 765 l/min의 배기속도를 갖는 로타리 펌프(Alcatel, 2033 PLUS)가 직렬로 구성되어 초기진공 10^{-6} torr까지 배기한 후 mass flow controller를 경유하여 반응실 내로 수소기체 100 sccm을 주입, butterfly밸브로 일정압력으로 조절하여 전자공명 플라즈마를 진단하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. Single Probe에 의한 전자 온도 및 밀도 측정 결과

플라즈마내의 전자 온도 및 밀도는 single Langmuir probe법으로 측정하였다. 박막합성 기체로는 일반적으로 두 가지 이상의 혼합기체를 이용하지만, 플라즈마 진단에서는 혼합 기체 플라즈마 내의 화학적 분해, 결합 등의 복잡성을 피하고, 박막합성 원료 기체에 의한 탐침의 오염으로부터 발생하는 오차를 줄이기 위하여 수소 단일기체를 사용하였다. 탐침은 직경 0.3 mm, 길이 5 mm의 텅스텐 선을 이용하였고, 자장 방향과 수직하게 위치하도록 하였다. 또한 박막합성실험할 때의 실제상황에 접근하기 위해서 probe의 고정은 기판가열장치 크기의 모의기판 위에 설치하였다. 독립변수로는 마이크로파 전력, 반응실 압력, 공간상 위치, 기판가열장치에의 직류전압 인가 등을 설정하였으며, 각각의 조건으로부터 얻어진 전류-전압 특성곡선으로부터 전자의 온도 및 밀도를

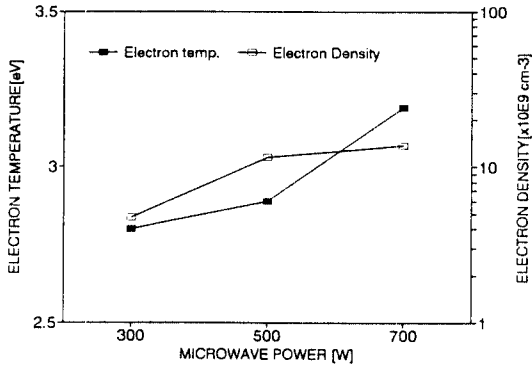


그림 3. 마이크로파 전력에 따른 전자 온도 및 밀도 변화. (H_2 100 sccm, 0.075 torr, magnet current $I_c = 80\text{A}$, $z = 0 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$)

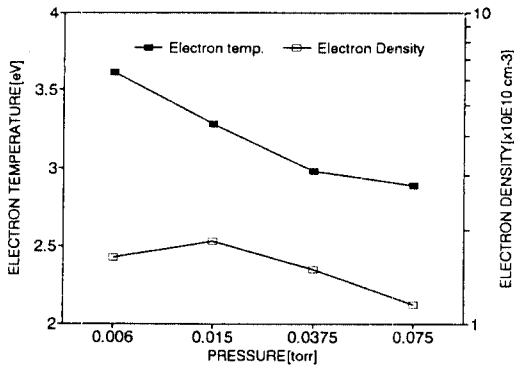


그림 4. 반응실 압력에 따른 전자 온도 및 밀도 변화 (H_2 100 sccm, 500W, $I_c = 80\text{A}$, $z = 0 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$)

구하였다[6, 7].

그림 3에 마이크로파 전력변화에 따른 전자온도와 밀도변화를 나타내었다. 전자의 온도와 밀도가 마이크로파 전력이 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 반응실내로 입사하는 마이크로파 전력의 증가로 마이크로파 전장에 의한 전자의 운동에너지가 증가하고, 이에 의한 중성입자들의 이온화율이 증가하는 것으로 볼 수 있다.

그림 4는 반응실 압력변화에 따른 전자온도와 밀도변화를 보여준다. 전자온도의 경우 압력이 감소하면서 전자와 중성입자들간의 충돌 주파수가 감소하여 충돌을 통해 잃어버리는 에너지가 감소하기 때문에, 압력이 감소할수록 전자온도는 증가한다. 그러나, 전자밀도의 경우, 압력이 감소함에 따라 전자밀도가 증가하다가 1.5×10^{-2} torr에서 최고치를 보이고, 그

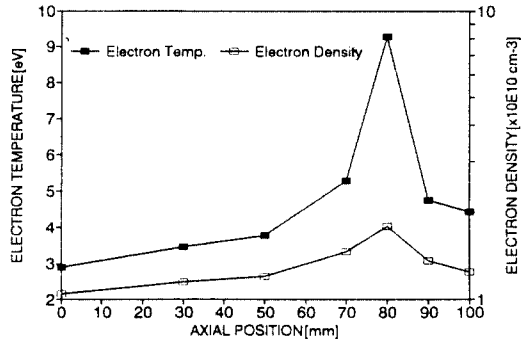
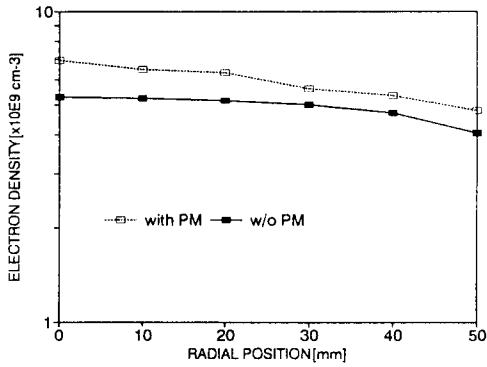


그림 5. 축방향에 따른 전자 온도 및 밀도변화. (H_2 100 sccm, 500W, 0.075 torr, $I_c = 80\text{A}$, $r = 0 \text{ mm}$)

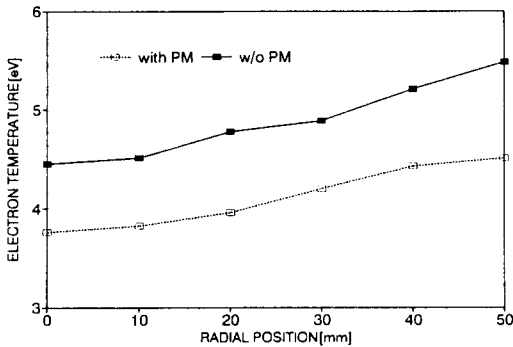
이하의 압력에서는 다시 감소하게 되는데, 이는 압력의 감소함에 따라 감소된 중성입자들과 전자 사이의 충돌횟수가 줄어들기 때문에 플라즈마 밀도가 감소하게 된다.

그림 5는 축상 탐침 위치변화에 따른 전자온도와 밀도의 변화를 보여준다. $z = 0 \text{ mm}$ 는 기판이 위치하는 곳으로 플라즈마의 빛방출을 관측할 수 있는 석영시창이 반응실 외벽에 설치되어 있고, $z = 80 \text{ mm}$ 는 모의자장 계산시 정자장 형성코일의 전류가 80A일 때 전자공명층이 위치하는 부분이다. z 값이 증가할수록 전자밀도와 온도가 함께 증가하며, $z = 80 \text{ mm}$ 근처에서 두 값 모두 최고값을 갖는다. 최고 밀도를 갖는 부분이 전자공명층으로 생각되는데, single Langmuir probe 측정에 의해 구하여진 전자공명층의 위치와 그림 2의 모의자장계산에서 구한 전자공명층의 위치가 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 전자공명층을 지나 z 축을 따라 계속 probe 측정을 해 보면 전자밀도와 온도가 다시 감소하였다. 즉 2.45 GHz의 마이크로파를 이용한 전자공명 플라즈마는 자자의 세기가 875 gauss되는 곳에서 마이크로파의 에너지를 최대 흡수하여 원판형 플라즈마층이 형성되어 이 부분에서 전자밀도와 온도가 가장 높은 값을 가지며, 전자공명층에서 멀어질수록 중성입자들과의 충돌 및 관벽손실을 통하여 각각의 값들이 감소하게 된다.

그림 6의 (a)와 (b)는 각각 기판 주위 외벽에 보조자장에 의한 반경방향 전자밀도와 온도의 균일성 향상을 보여준다. 기판 주위 외벽에 12개의 영구자석을 방사형으로 배치하여 형성시킨 보조자장에 의해



(a) 반경 방향 전자밀도 분포



(b) 반경 방향 전자온도 분포

그림 6. 보조자장에 의한 반경방향 전자 밀도 및 온도 변화.

(H₂ 100 sccm, 500W, 0.075 torr, I_c=80A, z=0 mm; with PM : multicusp field 있는 경우, w/o PM : multicusp field 없는 경우)

전자밀도는 증가하였고, 전자온도는 감소하였다. 이는 전자석에 의해 형성된 축방향 자장 뿐만 아니라 기판 주위에 추가적으로 형성된 multicusp field에 의해 관벽으로 소멸되는 전자들이 이러한 자장 내부에 가두어져 운동 하면서 중성입자들과의 충돌횟수가 증가하기 때문에 전자밀도는 전체적으로 높아지고, 운동에너지를 잃은 전자들의 온도는 낮아지게 된다. 또한 전자밀도는 중심부(r=0)에서 가장 높고, 반경방향으로 갈수록 감소한다. 그러나, 기판지대 반경 내(r<5 cm)에서는 전자밀도의 감소가 그다지 심한 편은 아니어서, 보조자장이 없는 경우 반경방향 전자밀도의 균일도는 13%이고, 있는 경우 10%로 향상된다.

전자온도는 중심으로부터 반경방향으로 갈수록

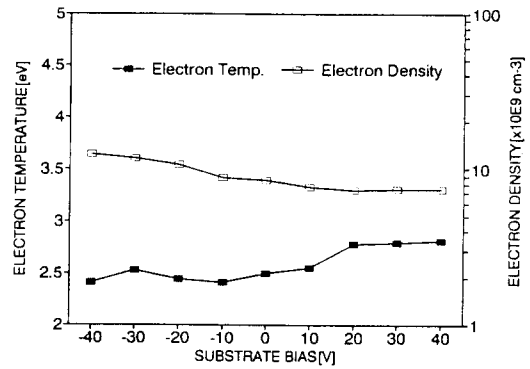


그림 7. 기판 바이어스에 따른 전자 온도 및 밀도 변화. (H₂ 100 sccm, 500W, pressure 0.075 torr, I_c=80A, z=5 mm, r=0 mm)

증가하는 경향을 띤다. 석영판을 통하여 입사하는 마이크로파는 공진실을 거쳐 기판방향으로 진행하면서 반응기체에 에너지를 전달하는데, 마이크로파의 전장은 플라즈마 중심부로 잘 투과하지 못하므로 플라즈마 중심부보다 관벽부분의 전장의 세기가 크기 때문에 이에 의하여 전자온도는 관벽부분에서 증가한다. 반경방향의 전자온도의 균일도는 보조자장이 없는 경우 10%이고, 보조자장이 있는 경우 6.8%로 향상되었다.

그림 7에 기판 바이어스에 따른 모의기판 중심부 상단 5 mm에서의 전자온도 및 밀도변화가 보여진다. 이때 공진실의 전위는 0 V이고, 모든 경우에 있어 플라즈마 전위와 기판 전위의 차(V_p-V_s, V_p: 플라즈마 전위, V_s: 기판 전위)는 항상 양의 값을 갖는다[8, 9]. 기판전위가 음의 값에서 양의 값으로 증가할 수록 플라즈마 밀도는 감소[10]하고, 전자온도는 증가하는 경향을 보이고 있다. 기판의 전위가 높아지게 되면, 이에 의해 플라즈마 내의 전자들이 기판으로 가속됨에 따라 전자온도가 증가하게 되고, 기판에 충돌하여 손실되는 전자들이 많아짐에 따라 공진실 내의 플라즈마 밀도는 따라서 감소하게 된다.

3.2. 이온에너지 분석기에 의한 이온온도 및 전류 밀도 측정

이온 에너지 분석기에 의해서 이온의 특성을 조사할 때의 분석기체로는 A절의 single Langmuir probe 측정에서와 마찬가지로 수소기체를 이용하여 각각의 실험변수에 따른 이온전류밀도와 이온온도를 측정하였다. 이온에너지 분석기는 이온 추출면적이

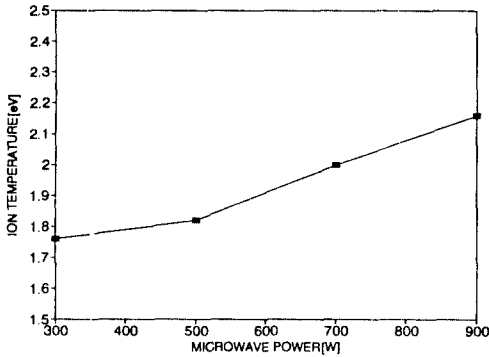


그림 8. 마이크로파 전력에 따른 이온 온도변화.
(H₂ 100 sccm, 0.075 torr, I_c=80A, z=0 mm, r=0 mm)

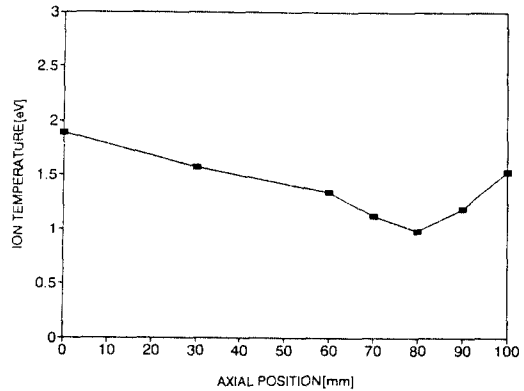


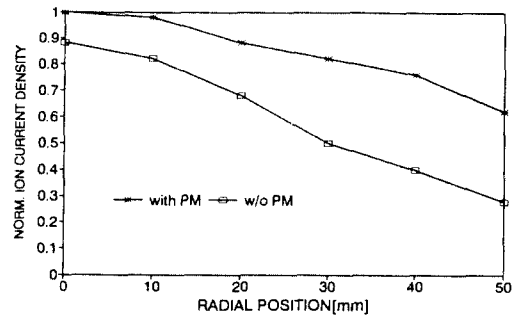
그림 9. 축방향에 따른 이온 온도 변화.
(H₂ 100 sccm, 500W, 0.075 torr, I_c=80A, r=0 mm)

약 50 mm²이고, 전자 저지 그리드(electron retarding grid)와 이온 에너지 분석 그리드(ion discriminator), 그리고 이온 추출 전극(ion collector)로 구성된다. 플라즈마와 직접 경계를 이루는 전자 저지 그리드는 전기적으로 floating 되어 있고, 이 부분에서 높은 에너지를 갖는 일부 전자들을 제외하고 대부분의 전자들이 이 floating 전위에 의해 저지된다[11]. 다음에 위치하는 이온 에너지 분석부에 제어 직류전압을 가변하면, 그 전위장벽을 넘는 이온들만이 이온 추출 전극에 도달하게 되어 전류형태로 검출된다. 이온 추출 전극에는 이온 에너지 분석 그리드를 통과한 이온들을 가속하기 위해서 직류 -30 V를 인가하였고, 각각의 그리드는 350 LPI(Lines Per Inch)의 스테인레스 메쉬로 구성되어 있고, 이온추출 전극은 구리평판을 이용하였다.

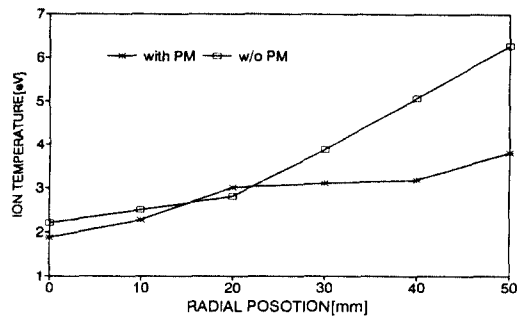
그림 8은 마이크로파 전력에 따른 이온온도 변화를 보여준다. 마이크로파 전력이 증가함에 따라 이온온도가 증가하였다.

그림 9는 축방향에 따른 이온온도 변화를 보여주고 있는데, 전자의 경우와는 반대로 경향성이 나타나고 있다. 대다수의 이온들의 전자공명층에서 생성되는데, z방향으로 형성되는 공간전하에 의한 전위에 의해 가속됨과 동시에 중성입자들과의 충돌 혹은 플라즈마 내에 존재하는 E×B drift에 의하여 이온들의 운동 방향이 무질서화(randomization)되기 때문에 전자공명층에서 멀어질수록 이온온도는 증가하게 된다[12].

그림 10의 (a)와 (b)는 플라즈마 가둠효과의 반경 방향 플라즈마 균일도를 향상시키기 위해 기판 주위에 형성된 보조자장에 의한 반경방향 표준화된 이



(a) 반경 방향 표준화된 이온 전류 밀도 분포



(b) 반경 방향 이온 온도 분포

그림 10. 보조자장에 의한 반경방향 이온 전류 밀도 및 온도변화
(H₂ 100 sccm, 500W, 0.075 torr, I_c=80A, z=0 mm; with PM: multicusp field 있는 경우, w/o PM: multicusp field 없는 경우)

온 전류밀도와 이온 온도변화를 각각 보여준다. 이때 이온에너지 분석기는 실제 증착실험과 유사한 조건을 만들어 주기 위해 실제 기판가열장치 크기로 제작된 모의기판 위에 장착하여 실험하였다. 한편 기판 주

위의 보조자장에 의해서는, 전자의 경우와 마찬가지로 전체적으로 이온전류밀도는 높아지고, 이온온도는 낮아지는 것을 볼 수 있다. 반경방향의 이온전류밀도의 균일도는 보조자장이 있을 때 48%에서 35%로 향상되었고, 반경방향 이온온도의 균일도는 50%에서 23%로 향상되었다. 관벽으로의 하전입자의 손실은 반경방향 플라즈마 밀도를 분균일화 시키는데, 자장 내에서의 하전입자의 관벽손실은 전자의 경우보다 이온의 경우가 더 심하다. 전자들은 자장선에 가두어져 유동(drift)하지만 이온의 경우 이러한 자장선을 가로질러 관벽으로 손실되는 율이 전자의 경우보다 더 크기 때문이다. 그러므로 A절의 보조자장에 의한 반경방향 전자밀도 및 온도결과와 비교해 보면 반경방향 이온 전류밀도와 이온온도의 균일도는 상당히 떨어지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기관에서의 균일한 플라즈마 밀도를 얻기 위해서 정자장 코일의 전류 및 위치를 최적화하였고, 기관 근처에 보조자장(multicusp field)을 형성시켜 하전입자들의 관벽 손실을 줄일 수 있었으며, 보조자장 형성시 전자밀도 및 이온전류밀도의 반경방향균일도는 각각 13%에서 10%, 48%에서 35%로 향상되었다. 전자밀도 및 온도는 인가되는 마이크로 파 전력이 증가할수록 증가하였고, 전자공명층에서 모두 최고치를 나타내었다. 한편 이온온도의 경우는 전자공명층에서 가장 낮았으며 멀어질수록 높아졌다.

본 연구를 통하여 결합이 없는 결정형 박막 합성을 위해서는, 기관을 플라즈마 밀도가 가장 높고 이온

온도가 가장 낮은 전자공명층에 위치시켜야 하고, 이때 박막의 성장속도는 가장 높을 것으로 사료된다. DC바이어스는, 공진실 내에서의 플라즈마 밀도를 증가시키기 위하여 공진실에 음의 바이어스를, 기관으로 고에너지의 이온 입사를 방지하기 위하여 기관에 양의 바이어스를 인가하는 것이 양질의 결정성 재료합성에 유리하다.

참고문헌

1. A. K. Sinha, *Solid State Technol.*, **23**, 133 (1980).
2. M. Kamo, Y. Sato, S. Matsumoto and N. Setaka, *J. Cryst. Growth*, **62**, 642 (1983).
3. J. H. Comfort, L. M. Garverick and R. Reif, *J. Appl. Phys.*, **62**, 3388 (1987).
4. S. Matsumoto, M. Hino, T. Kobayashi, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 737 (1987).
5. A. Hraki, H. Kawarada, J. Wei and J. Suzuki, *Surf. Coat. Technol.*, **43**, 10 (1990).
6. R. A. Morgan, *Plasma Etching in Semiconductor Fabrication*(Elsevier, Amsterdam, 1985) chap. 7.
7. O. Auciello, D. L. Flamm, *Plasma Diagnostic*, vol. **1**(Academic press, San Diego, 1989) chap. 3.
8. K. Shirai, T. Iizuka and S. Gonda, *Proc. Jpn. Symp. Plasma Chem.*, vol. **2**, 299 (1989).
9. 김우준, 서울대학교 공학석사 학위논문, 14 (1993).
10. John, B. O., Caughmann II and W. M. Holber, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A9**, 3113 (1994).
11. A. Y. Wong, *Introduction to Experimental Plasma Physics*, vol. **1**(Plasma Physics Laboratory, UCLA, 1977) chap. 3.
12. Y. Horiike, *Proc. 4th Intern. Symp. ULSI Sci. Technol.*, **93-13**, 263 (1993).