

유도 결합 플라즈마에서 플라즈마 변수와 전자 에너지 분포에 대한 극판 전력 인가의 영향

이효창 · 정진욱*

한양대학교 전기공학과, 서울 133-791

(2012년 1월 25일 받음, 2012년 4월 17일 수정, 2012년 4월 19일 확정)

진공을 기초로 한 극판 전력이 인가된 유도 결합 플라즈마 소스에 관한 대부분의 연구는 자기 바이어스 효과에만 한정되어 있으며, 다양한 반도체 및 디스플레이 식각 공정에서 공정 결과와 소자 품질에 결정적인 역할을 하는 플라즈마 변수들(전자 온도, 플라즈마 밀도)과 극판 전력의 상관관계에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 극판 전력이 플라즈마 변수에 미치는 영향에 관한 내용을 다루고 있으며, 최근의 연구 결과에 대한 리뷰를 포함하고 있다. 플라즈마 밀도는 극판 전력 인가에 의하여 감소 또는 증가하였으며, Fluid global model에 의한 결과와 잘 일치하는 경향을 보였다. 전자 온도는 RF 바이어스에 의하여 증가하였으며, 전자 에너지 분포 측정을 통하여 전자 가열 메커니즘을 관찰하였다. 또한, 플라즈마 밀도의 공간 분포는 극판 전력에 의하여 더욱 균일해짐을 알 수 있었다. 이러한 극판 전력과 플라즈마 변수들의 상관관계와 전자 가열 메커니즘에 대한 연구는 방전 특성의 물리적 이해뿐만 아니라, 반도체 식각 공정에서 소자 품질 및 공정 개선을 위한 최적의 방전 조건 도출과 외부 변수 제어에 큰 도움을 주리라 예상된다.

주제어 : 유도 결합 플라즈마, 극판 전력, 전자 에너지 분포, 플라즈마 밀도, 전자 온도, 플라즈마 균일도

I. 서 론

유도 결합 플라즈마는 진공을 기초로 한 반도체 및 디스플레이 식각/ 증착 공정에서 낮은 중성종 온도, 이온과 라디칼의 시너지 효과 등으로 인하여 널리 사용되고 있다 [1,2]. 특히, 전극을 삽입하지 않아도 플라즈마 발생이 가능하기 때문에 고밀도 플라즈마 발생 장치로 많이 활용되고 있다.

최근에, 반도체 소자의 집적도가 급격히 높아지면서 가로세로비에서 선폭 미세화에 대한 기술이 절실히 요구됨으로써 비등방성 식각 특성을 갖고 있는 플라즈마 식각이 다양한 공정에서 필수 불가결한 기술이 되었다. 이러한 추세에 발맞추어, 유도 결합 플라즈마에 전극을 삽입하여 전력을 인가하는 구조의 플라즈마 발생 장치를 다양한 식각 공정에서 널리 사용하고 있다. 이는 무선 주파수(Radio frequency, RF) 전력이 비대칭 부유 전극에 인가됨에 따라, 전극에 인가되는 전압이 음의 값을 갖게 되는 특성, 즉, 자기 바이어스(Self bias) 전압을 이용한 것이다. 따라서 웨이퍼가 놓일 전극에 형성된 음의 전압에 의하여, 쉬스

(Sheath)를 통해 극판을 포격하는 이온에너지가 매우 커지게 되며, 수직 식각 특성을 높일 수 있다. 이러한 구조의 플라즈마 발생 장치를 극판 전력이 인가된 유도 결합 플라즈마(Biased inductively coupled plasma) 또는 이온 에칭 플라즈마(Ion enhanced plasma) 장치라 불리며, Coburn 등 [3]과 Keller 등 [4]에 의하여 처음 소개 되었다. 현재는 다양한 플라즈마 식각 공정에 적용되어 사용되어지고 있으며 [5-8], 이러한 전극 전력이 인가되는 플라즈마 장치는 이중 주파수 용량성 결합 플라즈마, 헬리콘 플라즈마, 전자 사이클로트론 공명 플라즈마 등의 다양한 고밀도 플라즈마 장치에도 적용되고 있다 [9,10].

앞서 언급하였듯이, 대부분의 극판 전력 인가에 관한 연구는 자기 바이어스 효과에 대한 응용이 주를 이루어왔다. 이는 유도 결합 플라즈마는 플라즈마 밀도를 조절하고, 극판 전력은 플라즈마 밀도와 전자 온도를 바꾸지 않고 이온 에너지만을 독립적으로 제어할 수 있을 것이라는 예상으로부터 시작된 것이다. 하지만, 극판 전력 인가의 구조는 비대칭 용량성 결합 플라즈마 장치와 유사한 구조이기 때문에, 추가적인 극판 전력 인가는 플라즈마 물성을 바꿀 수도

* [전자우편] joykang@hanyang.ac.kr

있다 [11,12]. 이러한 내용은 참조 논문 [12]에 잘 나와 있으며, Fig. 1은 플라즈마와 극판 전력과의 상관관계를 보여 준다. 예를 들어 첫째로, 전극에 인가되는 무선 주파수 전력은 쉬스를 진동시키며, 이는 비충돌 가열 메커니즘(Collisionless heating mechanism)에 의하여 전자를 가열시킬 수 있다. 또한 극판 전력에 의하여 플라즈마 내에 전류가 흐르게 되며, 이는 옴 가열 메커니즘(Ohmic heating mechanism or Collisional heating mechanism)에 의하여 전자를 가열시킬 수 있다. 이러한 전극 전력에 의한 전자 가열은 전자 에너지 분포와 전자 온도의 변화를 야기시킬 수 있다. 둘째로, 이온의 전극 포격에 의하여 이차 전자(Secondary electron)가 나올 수 있으며, 이러한 이차전자는 자기 바이어스 효과에 의하여 생성된 큰 음의 전압을 바라보고 가속되기 때문에 매우 큰 에너지를 가지고 플라즈마로 입사하게 된다. 이는 플라즈마 생성에 매우 큰 영향을 주며, 특정 영역에서는 이러한 이차 전자에 의해서 방전이 유지되기도 할 것이다. 셋째, 전극 위에 놓인 웨이퍼는 공정 가스와 화학 반응을 하게 되며, 이때 생성된 부산물은 플라즈마 물성에 영향을 주게 된다.

이러한 플라즈마 변수(전자 온도, 플라즈마 밀도, 그리고 전자 에너지 분포)의 변화는 공정 결과에 영향을 주며, 약간의 변화일지라도 소자 품질에 예상치 못한 결과를 초래할 수 있다. 전자 온도의 변화는 화학적 반응에 참여하는

라디칼의 조성비를 바꿀 수 있다. 예를 들어 CF_4 기체 방전에 의하여 플라즈마가 유지 되었을 때, 전자 온도 변화에 의해 바뀐 F와 CF_2 의 조성비에 의하여, 증착 또는 식각 공정이 우세할 수 있다 [13,14]. 또한, 이들의 생성량은 플라즈마 밀도와도 연관이 있으며, 플라즈마 밀도는 웨이퍼의 물리적 반응에도 영향을 준다.

이렇듯, 극판 전력 인가에 의하여 플라즈마 변수가 바뀌고 그에 따라서 공정 결과에 큰 영향을 줄 수 있음에도 불구하고, 기존의 많은 연구들은 극판 전력에 의한 이온 에너지 제어와 플라즈마 식각 결과에 관한 연구가 대부분이었으며, 극판 전력과 플라즈마 변수의 상관관계에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 논문은 극판 전력이 플라즈마 변수에 미치는 영향에 관한 내용을 다루고 있으며, 최근의 연구 결과에 대한 리뷰를 포함하고 있다.

II. 실험방법

1. 실험 장치

Fig. 2(a)는 실험에 사용된 극판 전력이 인가된 유도 결합 플라즈마 장치의 구조를 나타낸다. 내부 반지름이 13 cm, 내부 높이가 17 cm인 원통형의 챔버에 13.56 MHz의 RF 전력이 상부에 설치된 안테나를 통하여 인가되며, 최대 전력 전달을 위하여 임피던스 매칭 네트워크를 사용하였다. 12.5 MHz의 전력이 인가되는 반지름이 8 cm인 하부 극판은 상하로 이동이 가능하며, 임피던스 매칭 네트워크를 통하여 인가되었다. 챔버의 진공 시스템은 로터리 펌프와 터보 분자 펌프를 사용하였으며, 초기 진공 압력은 10^{-6} Torr 단위 이하까지 떨어트렸다. 실험에 사용된 기체는 아르곤이었으며, 유량 조절기(Mass Flow Controller, MFC)를 통하여 인가되었다.

안테나로부터 플라즈마로 전달된 전력을 측정하기 위하여, 전류 프로브(Pearson transformer 110, Pearson Electronics Inc.)를 사용하였다. 안테나를 통하여 플라즈마에 인가되는 RF 전력은 플라즈마뿐만 아니라, 안테나와 임피던스 매칭 네트워크를 포함하는 선로 부분에 전달되기 때문에, 플라즈마로 전달된 전력을 측정하기 위해서는 선로 부분의 시스템 저항을 측정해야 한다. 이를 위하여, 먼저 플라즈마가 발생되지 않는 초기 진공 압력에서 RF 전력을 안테나를

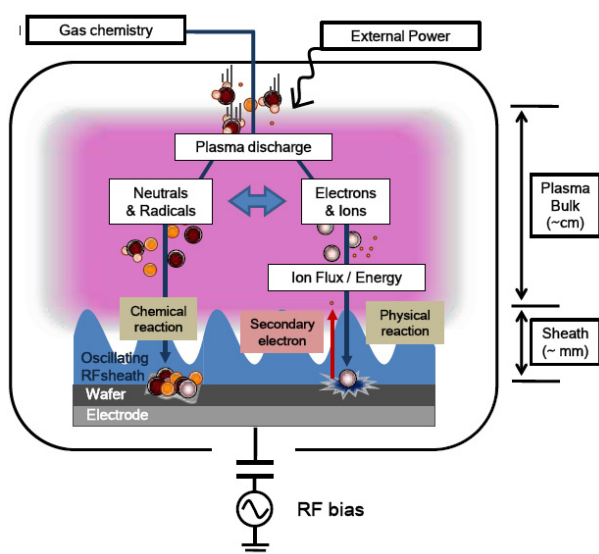


Figure 1. Simple picture of the plasma process.

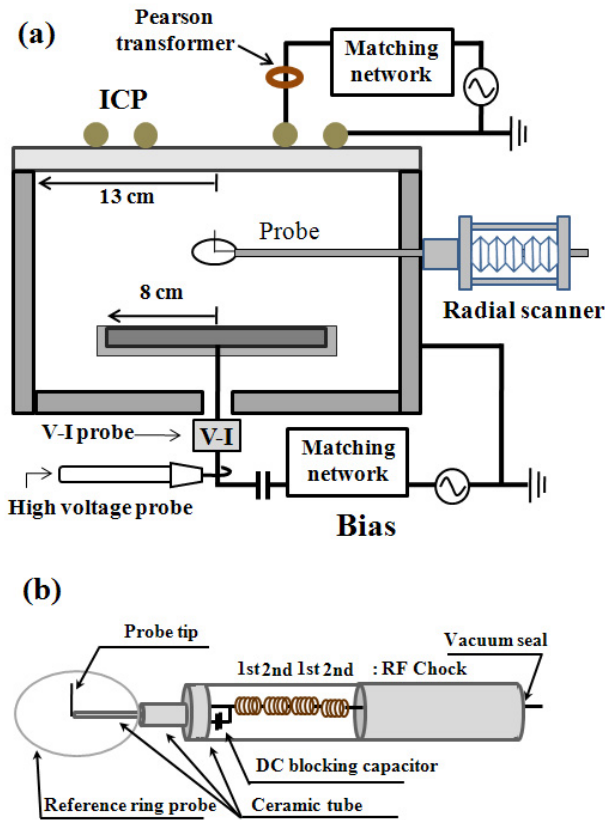


Figure 2. Schematic diagram of the experimental setup and Langmuir probe system.

포함하는 시스템 선로에 인가하였으며, 그 때 측정된 전력과 전류를 이용하여 시스템 저항을 구하였다. 본 실험 장치에서 측정된 시스템 저항 R_{system} 은 0.21Ω 이었다. 따라서 플라즈마로 전달된 전력 P_{abs} 은 다음과 같이 얻어진다.

$$P_{abs} = P_{rf} - I^2 R_{system} \quad (1)$$

여기서, P_{rf} 와 I 는 인가 전력과 측정된 전류이다. 극판 전력에 의하여 플라즈마로 전달된 전력을 측정하기 위하여, 전압-전류 프로브(V-I probe, ENI Inc.)를 극판에 연결하여 사용하였다. 또한, 극판에 인가되는 자기 바이어스 전압을 측정하기 위하여, 고전압 프로브(P6015A, Tektronix Inc.)를 동일한 위치에 설치하였다.

2. 플라즈마 변수 진단 방법

플라즈마 변수를 측정하기 위하여, 단일 랭뮤어 프로브

와 고조파 진단 프로브를 챔버의 가운데에 설치하였으며, 수평 방향의 플라즈마 변수를 측정하기 위하여 공간 이동 장치(Radial scanner)를 이용하여 프로브를 움직였다.

단일 랭뮤어 프로브의 구조는 Fig. 2(b)와 같다. 프로브 팁은 지름 0.1 mm 텅스텐 와이어를 사용하였으며, 고품질 측정을 위하여 보조 링 프로브(Reference ring probe)와 RF 보상 LC 공진 회로(RF chock)를 포함하고 있다. 이러한 프로브 구조에 대한 상세한 설명은 참조 논문 [15-17]에 잘 나와 있다. 측정된 전류의 2차 미분 형태가 전자 에너지 분포 함수(Electron energy distribution function, EEDF $g_e(\epsilon)$)와 연관이 있으며, 다음과 같다.

$$g_e(\epsilon) = \frac{2m}{e^2 A} \left(\frac{2\epsilon}{m} \right)^{1/2} I_e''(\epsilon) \quad (2)$$

여기서 ϵ , e , m , 그리고 A 는 각각 전자 에너지, 전하량, 질량, 그리고 프로브 면적이며, EEDF는 전자 에너지 확률 함수(Electron energy probability function, EEPF $f_e(\epsilon)$)와 다음과 같은 관계에 있다.

$$f_e(\epsilon) = \epsilon^{-1/2} g_e(\epsilon) \quad (3)$$

본 실험에서 측정된 EEDF를 통해서, 플라즈마 밀도와 전자 온도를 얻을 수 있다 [16].

고조파 진단 프로브 구조는 참조 논문 [18]에 잘 나타나 있으며, 플라즈마 밀도와 전자 온도의 진단 방법은 다음과 같다. 부유 전위를 갖은 프로브 팁에 작은 정현파 전압($V_0/T_e < 1$)을 인가하였을 때, 플라즈마로부터 들어오는 전류는 비선형성을 갖기 때문에 여러 고조파 성분들을 갖게 되며, 이러한 고조파 전류 신호를 분석하여 전자 온도 T_e 와 플라즈마 밀도 n_p 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_e \approx \frac{V_0}{4} \frac{i_{1\omega}}{i_{2\omega}} \quad (4)$$

$$n_p \approx \frac{i_{1\omega} \cdot T_e}{0.61 e u_B A V_0} \quad (5)$$

여기서, V_0 , $i_{1\omega}$, $i_{2\omega}$, 그리고 u_B 는 각각 프로브 팁에 인가된 전압, 기본 주파수에 해당되는 전류, 두 배수의 고조파에 해당되는 전류, 그리고 붐 속도(Bohm velocity)이다. 이 고조파 진단법은 플라즈마에 섭동을 거의 주지 않으며, 실시간 진단이 가능한 장점이 있다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 극판 전력에 따른 EEPF의 변화

Fig. 3은 고조파 진단법을 통하여 측정된 플라즈마 밀도를 나타낸다. 아르곤 기체를 사용하였으며, 압력은 20 mTorr였다. 각각의 고정된 극판 전력(50 W, 100 W, 200 W)에서 안테나 코일 전력(ICP power)을 증가시키에 따라서 플라즈마 밀도는 증가하였다. 흥미로운 점은 안테나 코일 전력이 인가되지 않았을 때에는, 극판 전력이 높을수록 플라즈마 밀도가 높았으나, 높은 코일 전력이 인가됨에 따라서, 극판 전력이 높을수록 더 낮은 플라즈마 밀도가 측정되었다. 이는 플라즈마에 더 큰 추가 전력이 인가되었음에도 플라즈마 밀도는 증가하지 않고 감소하였음을 나타낸다. 즉, 극판 전력 인가에 의하여 플라즈마 밀도는 변화한다는 것을 나타낸다. 이러한 흥미로운 사실을 보다 면밀히 관찰하기 위하여, 유도 결합 플라즈마에 극판 전력을 증가시키에 따라 EEPF를 측정하였으며, 다음과 같다.

Fig. 4는 5 mTorr의 아르곤 기체 압력에서 고정된 안테나 코일 전력에서 RF 바이어스 전력을 증가시키에 따라 측정된 EEPF를 나타내며, 본 Fig. 4는 참조 논문 [12]에 나와 있는 내용이다. 여기서 낮은 안테나 코일 전력(ICP 30 W)은 유도 결합 플라즈마에서 용량성 결합 모드(Capacitive mode, E mode)에 해당하며, 높은 안테나 코일 전력(ICP 60 W)은 유도성 결합 모드(Inductive mode, H mode)에 해당한다.

Fig. 4(a)와 (b)에서 보듯이, 극판 전력이 인가되지 않았을 때, 측정된 EEPF는 낮은 에너지와 높은 에너지의 전자

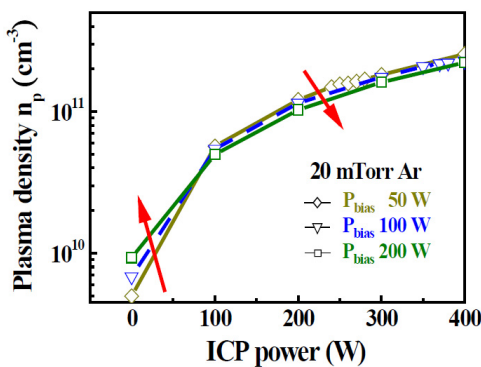


Figure 3. Measured plasma density with RF bias in inductively coupled plasma.

그룹을 가지고 있는 비평형 전자 에너지 분포(Bi-Maxwellian distribution)를 가지고 있었다. 이는 낮은 기체 압력에서 나타나는 비국부적 가열 역학(Non-local electron kinetics)의 대표적인 특징이다 [19,20]. 통상적으로 전자의 에너지 감쇠 길이(Electron energy relaxation length)가 챔버 크기보다 더 긴 비국부적 가열 역학 특성을 띠는 낮은 기체 압력에서는, 이온화로부터 생성된 낮은 에너지의 전자들은 플라즈마의 양극성 전위(Ambipolar potential)에 갇히기 때문에 전자 가열이 일어나는 챔버의 외곽 쪽으로 도달할 수가 없다. 따라서 낮은 에너지 그룹의 전자들은 비 충돌 전자 가열 메커니즘(Collisionless electron heating mechanism)에 참여하지 못하고 플라즈마 벌크에 갇히게 된다. 또한, 낮은 기체 압력, 램사우어 효과(Ramsauer effect), 그리고 낮은 전자 밀도로 인하여, 낮은 에너지 그룹의 전자들은 오믹 가열 메커니즘과 전자-전자 충돌을 통하여도 에너지를 얻지 못한다. 그러나 높은 에

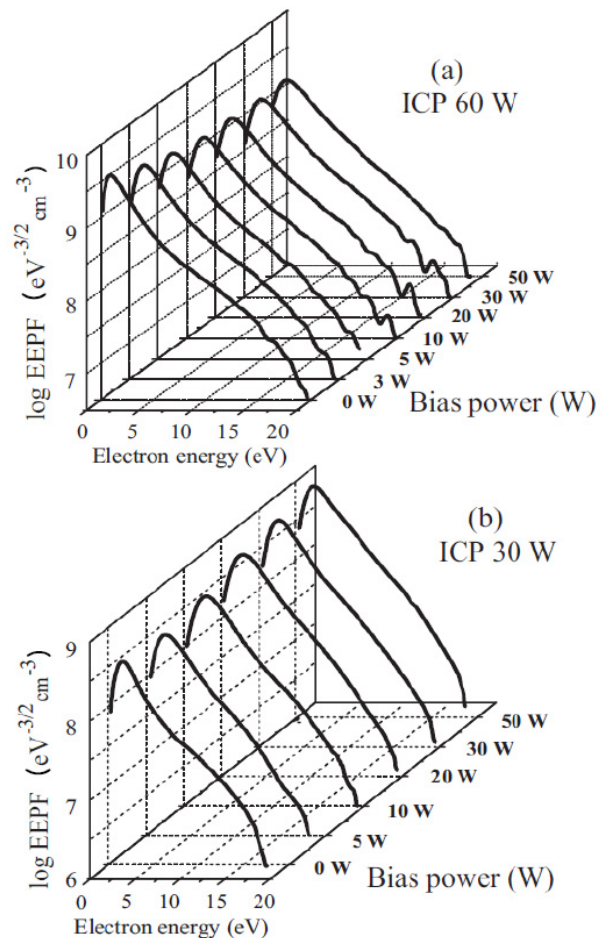


Figure 4. Measured EEPFs with the bias powers [12].

너지 그룹의 전자들은 플라즈마의 양극성 전위를 극복할 수 있으며, 전자 가열이 일어나는 안테나 근처의 표피층 (Skin layer)까지 도달할 수 있다. 따라서 높은 에너지의 전자들은 지속적으로 에너지를 얻을 수 있게 된다. 이러한 이유로 인하여 Bi-Maxwellian 분포가 나타나는 것이다.

하지만, Fig. 4(a)와 (b)에서 보듯이, 극판 전력이 증가함에 따라서 낮은 에너지 그룹에 해당하는 EEPF의 기울기가 급격히 짐을 볼 수 있다. 이는 낮은 에너지 그룹의 전자들이 극판 전력에 의하여 가열이 되어서 온도가 점차적으로 증가하는 것을 나타낸다. 이러한 낮은 에너지 그룹의 전자 가열은 극판 전력 인가에 의하여 플라즈마 내에 전기장이 커졌기 때문이다. 통상적인 RF 방전에서 플라즈마 내의 전류는 대부분 전도 전류이기 때문에 [16], 플라즈마 내의 전기장 E_0 은 다음과 같이 쓸 수 있다 [21].

$$E_0 \approx \frac{J_D m \sqrt{\omega_{rf}^2 + \nu_m^2}}{e^2 n_0} \quad (6)$$

여기서, J_D , ω_{rf} , 그리고 ν_m 은 각각 방전 전류, 인가 주파수, 그리고 전자-중성종 충돌 주파수이다. 극판 전력의 인가로 인하여 방전 전류가 증가하기 때문에, 플라즈마 내의 전기장은 커지게 되며, 플라즈마 벌크 내에 갇힌 낮은 에너지 그룹의 전자들은 증가된 전기장에 의하여 가열이 되게 된다. 그에 따라서, 낮은 에너지 그룹의 전자 온도는 상승하게 되며, Fig. 4 (a)에서 보듯이 EEPF가 Bi-Maxwellian 분포에서 Maxwellian 분포로 전이하게 된다. 여기서, 안테나에 인가되는 전력 60 W는 플라즈마에 인가되는 극판 전력에 대하여 상대적으로 높은 전력이기에, 높은 에너지 그룹의 전자 가열은 극판 전력이 큰 영향을 주지 못하는 상황으로 보이며, 유도 결합에 의하여 방전이 유지되는 상황이다. 하지만, 낮은 안테나 전력 30 W에서는 극판 전력이 플라즈마로 전달해주는 전력이 총 인가 전력의 주가 되기 때문에, Fig. 4(b)에서 보듯이 RF 바이어스가 높은 에너지 그룹의 전자 가열에도 영향을 주게 된다.

2. 극판 전력에 따른 플라즈마 밀도의 변화

플라즈마 밀도는 극판 전력 인가에 대하여, 증가 또는 감소하는 경향을 보였다. Fig. 5(a)에서 보듯이, 유도성 결합 모드에 해당하는 높은 안테나 전력에서는 극판 전력의 인가는 플라즈마 밀도를 감소시켰다. 하지만, 유도 결합 플라

즈마의 용량성 결합 모드에서는 극판 전력의 인가를 통하여 플라즈마 밀도는 증가하는 경향을 보였다. 이러한 다른 경향성은 극판 전력이 자기 바이어스 효과를 통한 이온 에너지 조절뿐만 아니라, 플라즈마 밀도 변화에 상당한 영향을 준다는 것을 의미한다.

이러한 플라즈마 밀도의 변화는 글로벌 유체 모델(Global fluid model)을 통하여 설명할 수 있다. 극판 전력이 인가되면, 자기 바이어스 효과에 의하여 전극에 큰 음의 전압이 형성되며, 이는 전극으로의 상당히 큰 이온에너지 손실을 발생시킨다. 이러한 조건에서의 글로벌 유체 모델은 다음과 같이 간략화 할 수 있다 [12].

$$n_0 \approx \frac{P_{ICP} + P_{bias}}{eu_B A_{eff,s} \epsilon_{T,s}} \quad (7)$$

여기서, P_{ICP} , P_{Bias} , $A_{eff,s}$, 그리고 $\epsilon_{T,s}$ 는 각각 안테나를 통하여 플라즈마에 전달된 전력, 극판 전력을 통하여 플라즈마에 전달된 전력, 전극 면적, 그리고 전극으로의 총 에너지 손실을 나타낸다. 또한, 전극으로의 에너지 손실 중에서, 이온 에너지 손실이 주가 되기 때문에 식 (7)은 다음과 같은 관계를 가진다 [12].

$$n_0 \propto \frac{P_{ICP} + P_{Bias}}{V_{dc}} \quad (8)$$

여기서, V_{dc} 는 자기 바이어스에 의해 형성된 DC 전압을 나타내며, 위의 식 (8)은 분모 분자의 차원이 다르지만 플라즈마 밀도 변화의 경향성을 알 수 있는 주요 인자를 나타낸다. Fig. 5는 식 (7)과 (8)을 이용하여 계산된 값을 나타낸다. Fig. 5에서 보듯이, 계산된 플라즈마 밀도는 측정된

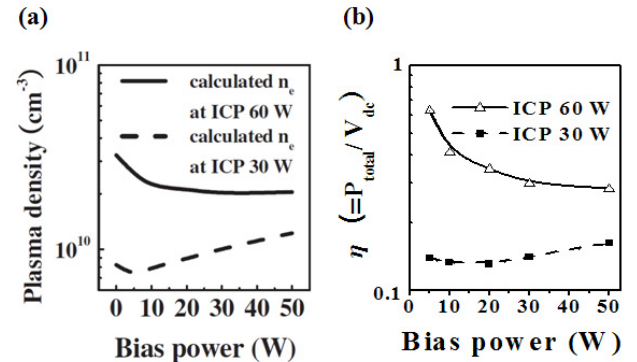


Figure 5. (a) Calculated plasma density and (b) ratio of the total absorbed power and DC self bias voltage [12].

결과(Fig. 4)와 일치하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 경향은 식 (8)과도 잘 일치한다. 다시 말하면, 적은 극판 전력은 높은 에너지 전자의 가열에 큰 영향을 주지 못하며, 낮은 에너지 그룹의 전자 가열이 추가 되었다. 즉, 유도 결합 플라즈마 형성 전력에 대하여 상대적으로 적은 극판 전력의 인가는 이온화 균형 변화에 큰 영향을 주지 못함을 나타낸다. 하지만, 이러한 극판 전력은 자기 바이어스 효과에 의하여 극판에 큰 음의 전압을 만들며, 이는 Fig. 3, Fig. 4(a), 그리고 Fig. 5에서 보듯이 플라즈마 밀도의 감소를 초래할 수 있다. 반면에, Fig. 4(b)에서 보듯이, 극판으로의 이온 손실보다 플라즈마로 흡수되는 전력이 높은 경우에는 플라즈마 밀도는 증가할 수 있다. 따라서 유도 결합 플라즈마에서 극판 전력의 인가는 플라즈마 변수를 변화시키며, 높은 플라즈마 밀도에서 극판 전력은 주로 이온 에너지 가속으로 전력이 쓰이며, 용량성 결합의 낮은 플라즈마 밀도에서는 이온 에너지 가속뿐만 아니라 플라즈마 밀도 증가에 전력이 주로 쓰임을 알 수 있다.

3. 극판 전력에 따른 플라즈마 밀도의 공간 분포

최근 공정 수율을 높이기 위하여, 대면적 웨이퍼에 균일한 플라즈마를 형성하는 방안에 대한 여러 연구가 진행되고 있으며, 극판 전력이 인가된 유도 결합 플라즈마에서도 균일한 플라즈마 형성에 관심이 집중되고 있다. 그에 따라서, 안테나 구조 및 위치를 바꾸는 등의 여러 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 극판 전력에 의하여 플라즈마 균일도가 변하게 된다면, 안테나 구조 변화 등의 외부 변수 제어에 관한 연구뿐만 아니라, 극판 전력과 플라즈마 균일도와와의 상관관계에 관한 연구가 선행되어야 한다고 생각한다. 그에 따라서, 이번 연구는 극판 전력에 따른 플라즈마 밀도의 공간 분포 변화와 연관된 전력 전달 메커니즘에 관한 내용을 다룬다.

최근에 본 연구 그룹에서 행한 실험 결과 [22]에 따르면, 높은 압력과 고정된 안테나 전력에서 극판 전력이 증가함에 따라서 플라즈마 균일도의 큰 변화를 관찰하였다. 챔버 중앙에서는 플라즈마 밀도가 감소하였으며, 챔버의 외곽에서는 큰 폭의 플라즈마 밀도 상승이 보였다. 하지만 낮은 압력과 고정된 안테나 전력에서는 극판 전력이 증가함에 따라서 플라즈마 균일도의 큰 변화가 관찰되지 않았다. 이러한 결과의 이유로써, 다소 높은 압력에서는 전자의 에너

지 감쇠 길이가 짧기 때문에 전자 가열이 일어난 부근에서 이온화가 주로 일어나게 되는 국부적 역학 특성(Local electron kinetics)을 따르게 되며, 전하들과 중성종의 빈번한 충돌로 인하여 확산도 제한되기 때문이다. 하지만, 낮은 압력에서는 비국부적 역학 특성(Non-local electron kinetics)을 띄게 되며, 특정 영역에서 전자 가열이 일어나더라도 전자가 챔버 전체에 에너지를 잃지 않고 움직일 수 있기에 공간상에 이온화가 크게 달라지지 않게 된다. 즉, RF 바이어스의 추가적인 인가에 의한 특정 영역에서의 플라즈마 밀도 증가는 그 부근의 바이어스 전력 전달이 증가함을 나타내며, 이러한 불균일한 전력 전달에 의한 공간상의 플라즈마 생성과 균일도의 변화는 높은 압력에서 주로 나타나게 된다.

그에 따라서, 안테나 전력(플라즈마 밀도)과 극판 전력

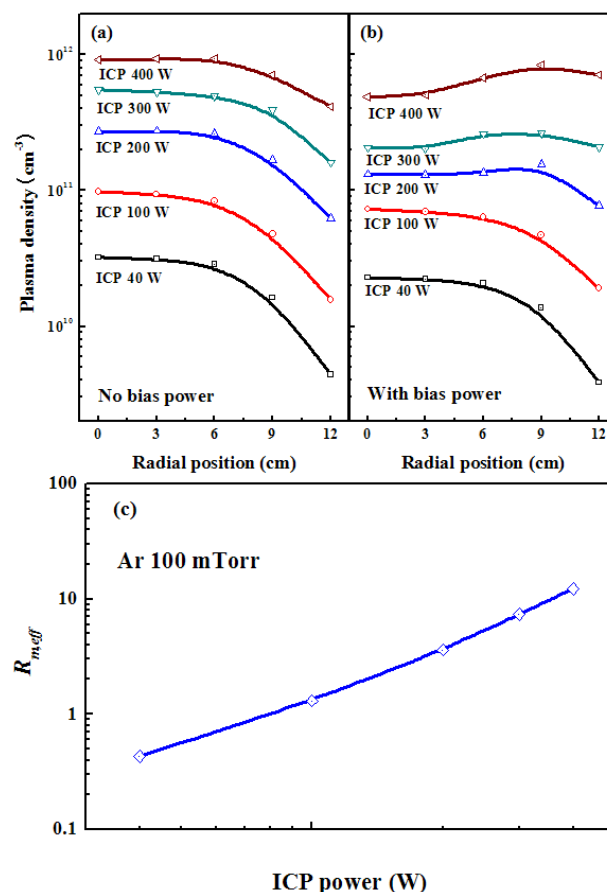


Figure 6. (a), (b) Radial profiles of the plasma densities with and without RF bias power of 60 W against various ICP powers and (c) calculated effective magnetic Reynolds number [23].

의 상관관계와 그에 따른 플라즈마 균일도를 알아보기 위하여 압력이 다소 높은 100 mTorr와 극판 간격 5.5 cm에서 플라즈마 밀도의 공간 분포를 측정하였다. 그 실험 결과는 Fig. 6과 같으며, 참조 논문 [23]의 일부 그림을 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 극판 전력이 인가되지 않은 상황에서 안테나 전력만을 증가시키며 측정한 플라즈마 밀도의 공간 분포를 나타낸다. 안테나 전력이 증가함에 따라서 플라즈마 밀도의 상승이 있을 뿐, 플라즈마 균일도의 큰 변화는 관찰되지 않았다. 하지만 60 W의 극판 전력이 인가된 상황에서는 플라즈마 밀도의 공간 변화가 안테나 전력이 증가함에 따라서 크게 변함이 관찰되었다. 안테나 전력이 증가함에 따라서 외곽의 플라즈마 밀도는 점차적으로 증가하는 경향을 보였으며, 플라즈마 밀도의 공간 분포가 더욱 균일해짐을 알 수 있었다. 이는 플라즈마 밀도가 증가함에 따라서 플라즈마가 점점 도체의 특성을 띄기 때문에, 극판 전력이 외곽 쪽으로 더욱 효과적으로 전달되는 표피 효과(Skin effect)가 주된 요인으로 볼 수 있다.

이러한 표피 효과에 대한 연구는 높은 구동 주파수 또는 대면적 챔버에서 많은 연구가 진행되어 왔다 [24]. 하지만, 최근에 상대적으로 작은 크기의 챔버와 13.56 MHz의 구동 주파수에서도 표피 효과가 플라즈마 밀도의 공간 분포에 중요한 역할을 할 수 있다는 이론적 접근에 관한 연구가 Mussenbrock 등 [25]을 통하여 보고되었다. 논문 [25]에서 표피 효과가 주된 요인이 될 수 있는 방전 영역의 지표로써, 유효 자기 레이놀즈수(effective magnetic Reynolds number, $R_{m,eff}$)를 다음과 같이 제시하였다.

$$R_{m,eff} = \frac{\mu_0 e^2 n_p L^2 / m}{\sqrt{1 + \nu_m^2}} \quad (9)$$

여기서, μ_0 와 L은 각각 투자율과 챔버 길이를 나타낸다. 위의 식 (9)에서 알 수 있듯이, 표피 효과는 플라즈마 밀도, 챔버 길이, 그리고 압력과 큰 연관관계를 갖고 있다. 이때, 표피 효과는 유효 자기 레이놀즈수가 1보다 큰 경우에 주도적이게 되며, 공간상의 플라즈마 밀도 불균일에 영향을 줄 수 있다. Fig. 6(c)는 식 (9)를 통하여 계산한 결과이며, 안테나 전력이 200 W 이상에서 유효 자기 레이놀즈수가 1보다 커짐을 알 수 있다. 이는 높은 플라즈마 밀도에서의 표피 효과에 의하여, 외곽으로의 전력 전달이 커짐을 나타내며, Fig. 6(b)와 같이 외곽에서의 플라즈마 밀도 증가에 중요한 역할을 하게 된다. 이러한 표피 효과에 대한 실험은

상대적으로 작은 크기의 챔버와 12.5 MHz에서도 표피 효과가 플라즈마 밀도의 공간 분포에 영향을 준다는 실험적 증거를 제시하는 것이며, 전극 전력이 플라즈마 균일도 조절에도 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 유도 결합 플라즈마에서 극판 전력과 플라즈마 변수와의 상관관계에 관한 실험적 내용을 다루고 있다. 극판 전력이 인가됨에 따라서, EEPF, 플라즈마 밀도, 그리고 플라즈마 밀도의 공간분포 변화를 관찰하였다. 낮은 압력 방전에서 RF 바이어스가 인가됨에 따라서, EEPF는 Bi-Maxwellian 분포에서 Maxwellian 분포로 전이하였으며, 적은 극판 전력 영역에서 낮은 에너지 그룹의 전자가 주로 가열되었다. 극판 전력에 따른 플라즈마 밀도는 안테나 코일 전력의 크기에 따라서 증가 또는 감소하였으며, 이는 Fluid global model에 의한 계산과 잘 일치하는 경향을 보였다. 플라즈마 밀도의 공간 분포는 극판 전력 인가에 의하여 더욱 균일해졌으며, 이는 극판 전력에 의한 공간상의 불균일한 전력 전달과 확산에 의한 영향이다. 본 연구를 통하여, 유도 결합 플라즈마에서 극판 전력 인가는 이온 에너지뿐만 아니라, 플라즈마 변수들의 변화에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이러한 극판 전력과 플라즈마 변수들의 상관관계에 관한 연구는 방전 특성의 물리적 이해뿐만 아니라, 반도체 식각 공정에서 소자 품질 및 공정 개선을 위한 최적의 방전 조건 도출과 외부 변수 제어에 큰 도움을 주리라 예상된다.

참고문헌

- [1] 공정 플라즈마 기초와 응용, Alfred Grill 원저, 정진욱 옮김, 청문각 (2003).
- [2] 플라즈마 식각기술, 염근영, 미래컴, (2006).
- [3] J. W. Coburn and H. F. Winters, *J. Appl. Phys.* **50**, 3189 (1979).
- [4] J. H. Keller, J. C. Forster, and M. S. Barnes, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, 2487 (1993).
- [5] G. A. Hebner and P. A. Miller, *J. Appl. Phys.* **87**,

- 7660 (2000).
- [6] D. S. Wu, C. R. Chung, Y. H. Liu, R. H. Horng, and S. H. Huang, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**, 902 (2002).
- [7] N. O. V. Plank, M. A. Blauw, E. W. J. M. van der Drift, and R. Cheung, *J. Phys. D* **36**, 482 (2003).
- [8] S. I. Imai, *J. Vac. Sci. Technol. B* **26**, 2008 (2008).
- [9] M. C. Chiang, F. M. Pan, H. C. Cheng, J. S. Liu, S. H. Chan, and T. C. Wei, *J. Vac. Sci. Technol. A* **18**, 181 (2000).
- [10] S. J. Pearton, C. R. Abernathy, and F. Ren, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2294 (1994).
- [11] M. A. Sobolewski and J. H. Kim, *J. Appl. Phys.* **102**, 113302 (2007).
- [12] H. C. Lee, M. H. Lee, and C. W. Chung, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 071501 (2010).
- [13] S. Samukawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 2133 (1994).
- [14] S. J. You, S. S. Kim, J. H. Kim, D. J. Seong, Y. H. Shin, and H. Y. Chang, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 221501 (2007).
- [15] V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technol.* **1**, 36 (1992).
- [16] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principle of Plasma Discharges and Materials Processing*, 2nd ed. (Wiley, New York, 2004).
- [17] F. F. Chen and J. P. Chang, *Lecture Notes on Principles of Plasma Processing* (Kluwer/Plenum, New York, 2002).
- [18] M. H. Lee, S. H. Jang, and C. W. Chung, *J. Appl. Phys.* **101**, 033305 (2007).
- [19] V. A. Godyak and R. B. Piejak, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 996 (1990).
- [20] H. C. Lee, M. H. Lee, and C. W. Chung, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 041503 (2010).
- [21] H. C. Lee and C. W. Chung, *Collisionless Electron Heating by rf Bias in Inductively Coupled Plasma* (submitted).
- [22] H. C. Lee, J. Y. Bang, and C. W. Chung, *Thin. Solid Films* **519**, 7009 (2011).
- [23] H. C. Lee, S. J. Oh, and C. W. Chung, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 035003 (2012).
- [24] P. J. Chabert, *Phys. D, Appl. Phys.* **40** R63 (2007).
- [25] T. Mussenbrock, T. Hemke, D. Ziegler, R. P. Brinkmann, and M. Klick, *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** 025018 (2008).

Effect of RF Bias on Electron Energy Distributions and Plasma Parameters in Inductively Coupled Plasma

Hyo-Chang Lee and Chin-Wook Chung*

Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

(Received January 25, 2012, Revised April 17, 2012, Accepted April 19, 2012)

RF biased inductively coupled plasma (ICP) is widely used in semiconductor and display etch processes which are based on vacuum science. Up to now, researches on how rf-bias power affects have been focused on the controls of dc self-bias voltages. But, effect of RF bias on plasma parameters which give a crucial role in the processing result and device performance has been little studied. In this work, we studied the correlation between the RF bias and plasma parameters and the recent published results were included in this paper. Plasma density was changed with the RF bias power and this variation can be explained by simple global model. As the RF bias was applied to the ICP, increase in the electron temperature from the electron energy distribution was measured indicating electron heating. Plasma density uniformity was enhanced with the RF bias power. This study can be helpful for the control of the optimum discharge condition, as well as the basic understanding for correlation between the RF bias and plasma parameters.

Keywords : Inductively coupled plasma, RF bias, Electron energy distribution, Plasma density, Electron temperature, Plasma uniformity

* [E-mail] joykang@hanyang.ac.kr