

저압 유도결합 플라즈마(ICP)의 연구동향

이홍식*, 노영수**, 김운택***

(*한국전기연구소 책임연구원,

**한국전기연구소 선임연구원,

***한국전기연구소 연구원)

집적회로 제조를 위하여 점차로 대면적, 고밀도 플라즈마 원이 요구됨에 따라 유도결합 플라즈마에 대한 관심이 다시 새로워지고 있다. 여기서는 몇가지 형태의 유도 결합 플라즈마원을 소개한다. 보통 0.5-28 MHz의 RF유도결합으로 mTorr 이하의 저압방전에서도 10^{12}cm^{-3} 이상의 이온밀도를 얻을 수 있다. ICP는 플라즈마 공정의 미래 요구에 부응할 방법 중의 하나임에 틀림 없으며 오래전부터 알려져 있었으나 아직 공정개발, 플라즈마 물성 및 모델링에 관한 연구가 많이 필요하므로 소개하고자 한다.

1. 개 요

유도결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasmas; ICP)는 이미 100여년 전부터 연구되어 왔는데 최근 IC 제조에서 고속 단일 웨이퍼 공정을 추구하는 추세이어서 플라즈마 재료가공 공정 응용을 위한 1 torr 미만의 저압 ICP 개발이 많이 이루어지고 있다. 가공용 플라즈마의 요구 사항은 전자, 이온, 래디칼이 고밀도일 것과 적어도 20cm의 직경에 걸쳐 균일도가 우수할 것, 이온 에너지가 작고 제어 가능하여야 할 것과 오염이 무시될 수 있을 정도일 것 등이다. 이미 ICP로 위의 요구사항을 대부분 만족하는 13.56MHz의 RF 가열 주파수를 사용하고, 장치설계가 간단한 것들이 많이 나와 있다. 플라즈마 공정을 제어하기 위하여는 ICP에 내재된 물리적 현상을 파악하는 것이 바람직하다. IC 가공

플라즈마용 저압 ICP 장치는 비교적 새로운 것이어서 ECR이나 Helicon과 플라즈마처럼 그리 널리 조사되어 있지는 않은 것 같다. 본고에서는 ICP의 특성에 관하여 간단히 살펴 보기로 한다.

2. ICP 기술

유도결합 플라즈마란 그 이름에서 알 수 있듯이 유도성 회로요소를 방전영역 근처(외부) 또는 내부에 두어 RF전원 에너지를 전리기체에 전달하여 발생시킨 플라즈마를 말한다. 유도성 회로요소는 보통 나선형 구조의 도체를 말하며 RF 구동주파수에서 공진회로를 구성하기 위한 다른 리액턴스 요소가 추가 사용되기도 한다. 적절히 구성된 공진회로의 인덕터에는 큰 RF전류가 흐른다. 이 전류에 의해 생성되는 RF 자속은 인접 방전 영역 속으로 침투해 들어 가며 파라데이 법칙에 의한 RF전계성분이 발생하는데 이것이 유도성 전계로서 방전내의 자유전자를 가속시켜 방전을 유지 시킨다. 유도결합요소는 공진조건에서 운전될 경우 큰 전압이 걸리므로 이 RF전압으로 인하여 용량결합 플라즈마 현상이 나타날 수도 있다. 용량결합 플라즈마의 특징은 고전압과 쉬쓰(sheath)영역의 존재이다. 이온은 쉬쓰에서 가속되어 벽에 부딪혀 스퍼터링을 일으키게 되고 벽면은 가열된다. 결합전력이 작을 때에 ICP에서 용량성 방전(E-방전)을 관찰하는 것은 어렵지 않다. 30 mTorr이상의 압력에서 RF 전력을 증가시켜가며 유도성 방전(H-방전)의 개시

를 나타내는 현상인 광도와 밀도의 급격한 증가를 관찰 할 수 있다. E방전이나 H방전이나 하는 것은 종종 논쟁거리가 되어 왔다. 어떤 ICP장치는 용량 결합의 정도를 줄이기 위하여 유도성 결합요소와 방전벽 사이에 Faraday shield를 둔 것도 있다. 유도결합요소에 전위차가 존재하므로 어떤 ICP도 완전한 유도결합이라고 말할 수는 없으나 원의상 부분적으로 유도결합된 플라즈마도 ICP로 부르기도 한다. 다음에 여러 형태의 ICP장치를 분류하였으나[1] 용어사용에는 약간의 임의성이 있음을 밝혀 둔다.

- 1) 나선형 유도결합(원통형 플라즈마)
- 2) 나선형 공진장치(원통형 플라즈마)
- 3) 평면 와선형 유도결합(평판 플라즈마)
- 4) 플라즈마 내부 코일형
- 5) 변압기형 유도결합

2.1 나선형 유도결합

Eckert[2]에 의하면 1884년 Hittorf가 저압 무전극 링(ring)방전을 시킨 실험이 ICP의 효시라 한다. 최근에는 100torr이상의 고압 유도결합 플라즈마(유도 아크)에 대하여 많은 연구가 이루어 졌다. 고압 ICP는 주로 물질합성, 결정성장, 플라즈마 썬에서 추진력을 얻기 위한 기체가열 등에 응용된다. 고압에서는 확산보다는 재결합과정에 의하여 전하가 소멸되므로 불균일하고 소체적의 플라즈마가 되기 쉬우며 또 고압 아크방전은 중성기체의 온도가 아주 고온(1000~10000 K)이다. 이런 특성으로 인하여 유도 아크는 웨이퍼 가공공정에는 적합하지 않다. 나선형 유도결합 장치의 예를 그림 1(a)에 보였다. 유기되는 전계는 방위각 방향으로 원동축을 감고 도는 루프를 형성한다. 일반적으로는 유도전계가 플라즈마 튜브 주변에서 최대가 되며 중심부를 향하여 단조감소하게 된다. 고압에서의 방전은 축방향으로 보면 고리모양을 하게되는데 저압방전에서는 확산작용으로 인하여 중심부근처의 플라즈마 밀도가 증가하며 또 중심부는 유도전계가 작아서 훨씬 공간적으로 균일한 방전을 얻을 수 있다. 유도 코일의 끝과 끝 사이에 걸리는 전압으로 인한 축방향 전계성분이 약한 용량성 방전을 일으킬 수도 있다. 이러한 축방향 전계 성분을 없애기 위하여는 원통형 도체 쉴드(Faraday shield)를 씌우면 된

다. 단 이 쉴드가 유도 코일을 일차측으로 하는 변압기의 단락 2차권선 역할을 하지 못하게 하여야 하므로 반드시 축방향으로 흡을 내어 루프 전류의 통로를 차단하여야한다. 64mTorr의 아르곤에서 유도성 방전으로 10^{12}cm^{-3} 이 넘는 이온 밀도를 얻은 것으로 보고 되고 있다[6]. 웨이퍼를 원통형 방전의 중심부에 넣으면 유도전계를 크게 왜곡시키게 되므로 나선형 유도 결합장치와 다음에 소개할 나선형 공진장치에서의 플라즈마 공정은 주로 플라즈마 발생지역 보다 아래쪽 챔버에서 행하게 된다.

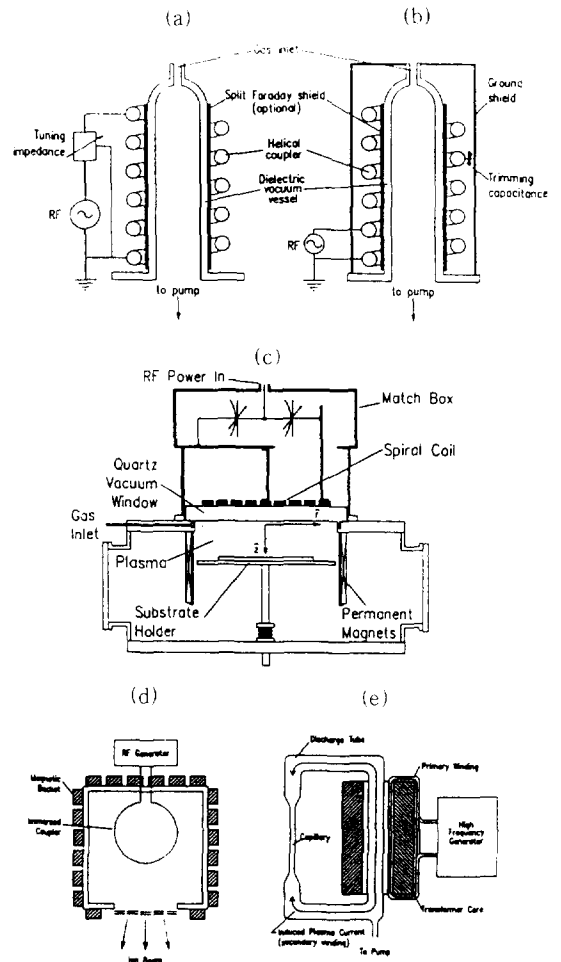


그림 1. 여러가지 유도결합 플라즈마 장치의 개략도.

- (a) 나선형 유도 결합
- (b) 나선형 공진장치
- (c) 와선형 유도결합
- (d) 내부 코일형
- (e) 변압기형 유도결합

2.2 나선형 공진 장치

나선형 공진 장치 플라즈마도 나선형 코일 안의 원통형 방진인 것은 같으나 코일의 전기적 길이가 구동 주파수의 1/4 파장의 홀수배 또는 반파장의 홀수배로 되어 있다. 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 코일은 도체함 속에 넣어져 있고 이 함과 코일 사이에 표유용량이 존재하게 된다. 보통 코일과 접지함 사이에 커패시터를 두어 이 장치가 공진이 되게 정전용량을 조정한다. 코일의 한쪽 끝은 접지하고 1/4파장 공진장치에서는 다른 한쪽 끝을 floating시키고 반파장 설계에서는 양쪽 끝을 모두 접지하고 RF power는 코일 중앙의 탭에 인가한다. 방전챔버와 플라즈마로 인하여 공진주파수에 교란이 있을 수 있는데 문헌[3]에서 이 문제를 다루고 있다. 현재에도 이 장치의 플라즈마가 정말 유도결합인지에 관한 논쟁이 있지만 코일과 플라즈마 사이에 Faraday shield를 두어도 고밀도의 플라즈마가 생성된다면 이것은 유도결합이라고 말할 수 있을 것이다. 상용화된 시스템에서 $10^{10} - 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 의 이온밀도가 보고되고 있어서 용량결합형의 10^{10} order를 증가하고 있다.

2.3 평면와선형 유도결합

대면적의 평면영역에 걸쳐 균일한 플라즈마를 얻는 것이 요구되는 가공공정이나 평면형 이온추출 그리드에서 균일한 이온 발생을 원하는 이온원 등을 위하여 평면상에 놓인 와선형 유도 결합장치가 개발되었다. 일반적인 평면형 설계를 그림 1(c)에서 보여 주고 있다. 와선형 코일은 quartz등의 유전체 진공용 창으로 방전 챔버와 격리되어 있다. 인덕터와 직렬로 연결된 커패시터를 조정하여 회로가 구동주파수에서 공진하게 된다. 이 장치에 때로는 영구자석으로 구성된 multipolar bucket을 방전 챔버 내에 두어 플라즈마를 가두고 uniformity와 방전밀도를 증가시키기도 한다. 코일과 플라즈마 사이의 용량성 결합은 두꺼운 창을 씌으로써 줄일 수 있다. 와선형 ICP장치는 wafer와 같은 평면을 가공하기에 특별한 이점을 가지고 있다. 13.56 MHz RF 유도의 표피깊이는 전자밀도 10^{11}cm^{-3} 정도에서 1-2cm 정도이므로 substrate를 코일 아주 가까이 둘 수 있다. 보통 코일은 플라즈마와 석영창을 사이에 두고 1-3cm 정도 떨어져 격리되어 있고

substrate는 창아래 5-10cm(표피깊이의 1.5-10배)에 위치하게 된다. 유도되는 전계는 플라즈마 내에서 지수함수적으로 감소하여 substrate에서는 적어도 12배(exp 2.5)정도 감쇄하게 된다. 플라즈마 발생지역 바로 근처에서 가공함으로써 재결합에 의한 플라즈마 손실등을 줄일 수 있게 되고 substrate 근처에서의 이온발생 효율도 개선된다. 플라즈마 발생지역에서 멀리 떨어진 곳에 substrate를 두는 장치들은 발생하는 플라즈마 밀도가 substrate 근처보다 1 order정도 높다. 이러한 높은 밀도의 플라즈마는 sputter에 의한 오염과 UV damage, substrate가열 등의 부작용을 일으킬 수 있다.

2.4 플라즈마 내부 코일형

지금까지 언급한 장치는 유도결합요소가 방전부 바깥쪽에 있는 것이었다. 내부 코일형은 유도코일이 플라즈마 용기 내부에 있다. 이 설계는 금속 스퍼터링 응용분야에서 특수한 이점을 가지고 있다. 외부 코일형 ICP의 경우 유전체 용기 벽에 금속이 증착되어 이것이 변압기의 single turn 2차 코일로 작용하여 플라즈마 발생을 억제하게 된다. 내부 코일형은 루프 안테나가 magnetic bucket진공용기(그림 1(d))속에 들어가 있는 이온 빔원에 사용되어 왔다. 유도 코일이 스퍼터 되는 것을 막기 위하여 유리 피막을 입혀 사용한다. 0.5-5mTorr의 He 가스, RF power 3-100 kw, 1MHz에서 $0.2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 의 이온 밀도가 보고된 바 있다.

2.5 변압기형 유도 결합

그림 1(e)에서 보는 바와 같이 고리모양의 플라즈마 챔버를 고주파(수 kHz-1MHz)패시트 코어 변압기의 2차측으로 사용하여 방전을 유지하는 장치를 말하는데 기계체이지 설계에 주로 사용되어 왔다. 이 장치는 유도전계가 다른 ICP와는 달리 튜브의 축을 따르는 방향으로 나타나는 것이 특징이다.

3. ICP의 모델링

ICP의 가장 간단한 모델은 그림2에서 보는 변압기 모델로 알려진 것으로 전기적 회로 요소로 모델링하는 것이다. 이 모델에서 유도결합 요소는 자기 인덕턴스 L_p 인 N 회 변압기 1차 권선으로 표현

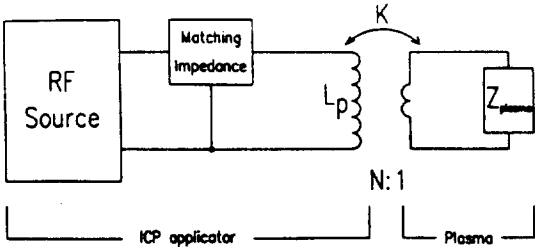


그림 2. 유도결합 플라즈마의 등가 변압기 모델.

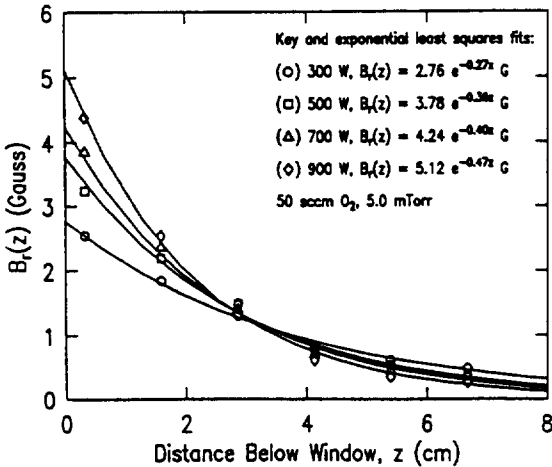


그림 3. 유도 자속밀도 B_r 의 Z축방향 변화추이.

되고 플라즈마는 임피던스 Z_{plasma} 가 직렬접속된 2차권선으로 모델링한다. 1,2차 권선간의 결합계수 K 는 나선형, 내부 코일형, 변압기형에서는 1에 근접하나 평면 와선형은 1보다 좀 작다. 플라즈마 임피던스에 대한 코일 전류, 전압과 같은 외부 회로 정수와 관련하여서는 변압기 모델로도 충분하나 플라즈마 내부의 전자계나 플라즈마 특성에 관하여는 직접 표현할 수 없다. 좀더 복잡한 전자기적 모델이 1927년 Thomson[4]에 의하여 개발되었는데 ICP에 관한 최초의 이론논문이 아닌가 한다. 여기에는 유도에 의하여 플라즈마를 유지하기 위한 최소전계에 관한 해석적 표현이 나와 있고 방전을 일으키기 위하여 그리 큰 자계가 필요하지는 않다고 결론짓고 있다. 그림 3에 평면와선형 ICP에 관한 자계계산 결과의 예를 나타내었다. 13.56 MHz의 자속밀도는 수 Gauss정도로 아주 작음을 알 수 있고 이

것에 대응되는 교번 전계강도는 4-8V/cm 정도이다. 또 여기서 플라즈마 전류에 의하여 유도전계가 차폐됨을 알 수 있다. 평면형 플라즈마 표면에 평행한 유도 전계는 z축 방향으로 지수함수적으로 감쇄하는데 감쇄정수는 $\delta \approx c/\omega_{pe}$ 로 주어진다. Thomson 모델은 나선형 ICP 방전이 균일하고 실수의 도전을 가정하고 있고 Eckert는 이 모델에 양광주 확산과 충돌의 효과를 고려하였다. Henrikson [5]은 전자분포를 반경 방향으로 포물선 형태로 가정하여 비슷한 결과를 도출하였다. 나선형 ICP에 관한 이런 모델들은 자장이 축방향임과 전계, 전류는 방위각 방향만 있음을 가정한 것이나 평면 와선형의 경우에는 이런 간략화 가정을 정당화하기 곤란한 경우도 많다. 플라즈마를 유한한 도전을 갖는 도체로 가정하여 평면 와선형 ICP장치의 전자계 특성을 해석한 예를 그림 4에 보였다. 결합코일과 플라즈마 관계식은[6] 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_x + \sigma \vec{E}) \quad (2)$$

$$\vec{E} = E_\phi \hat{\phi} = (E_{\phi 0} + E_{\phi 1}) \hat{\phi} \quad (3)$$

$$\vec{B} = (B_{r0} + B_{r1}) \hat{r} + (B_{z0} + B_{z1}) \hat{z} \quad (4)$$

코일의 전류에 의한 전자계는 첨자 0, 플라즈마나 챔버 벽에 유기된 전류에 의한 것은 첨자 1로 나타내었다. \vec{J}_x 는 결합코일에 흐르는 전류밀도이다. 이 식들은 다음과 같이 정리된다.

$$\vec{E}_0 = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} \frac{\vec{J}_x}{r} dV \quad (5)$$

$$\nabla^2 \vec{E}_1 - j\alpha^2 \vec{E}_1 = j\alpha^2 \vec{E}_0, \quad (\alpha^2 = \omega\mu_0\sigma) \quad (6)$$

경계조건으로는 도체인 챔버벽면의 수평전계함(E_ϕ)을 0으로 한다.

4. ICP 플라즈마 특성

문헌에 의하면 ICP에서 10^{12}cm^{-3} 을 넘는 이온 밀도가 보고되고 있다. 내부 코일형 펄스 RF 이온원(1-5 mTorr의 He plasma, 100kw pulse, 1% duty cycle, 10 Hz rep. rate)에서 $6 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$ 의 이온밀도를 얻고 있다. 이 방전을 magnetic buc-

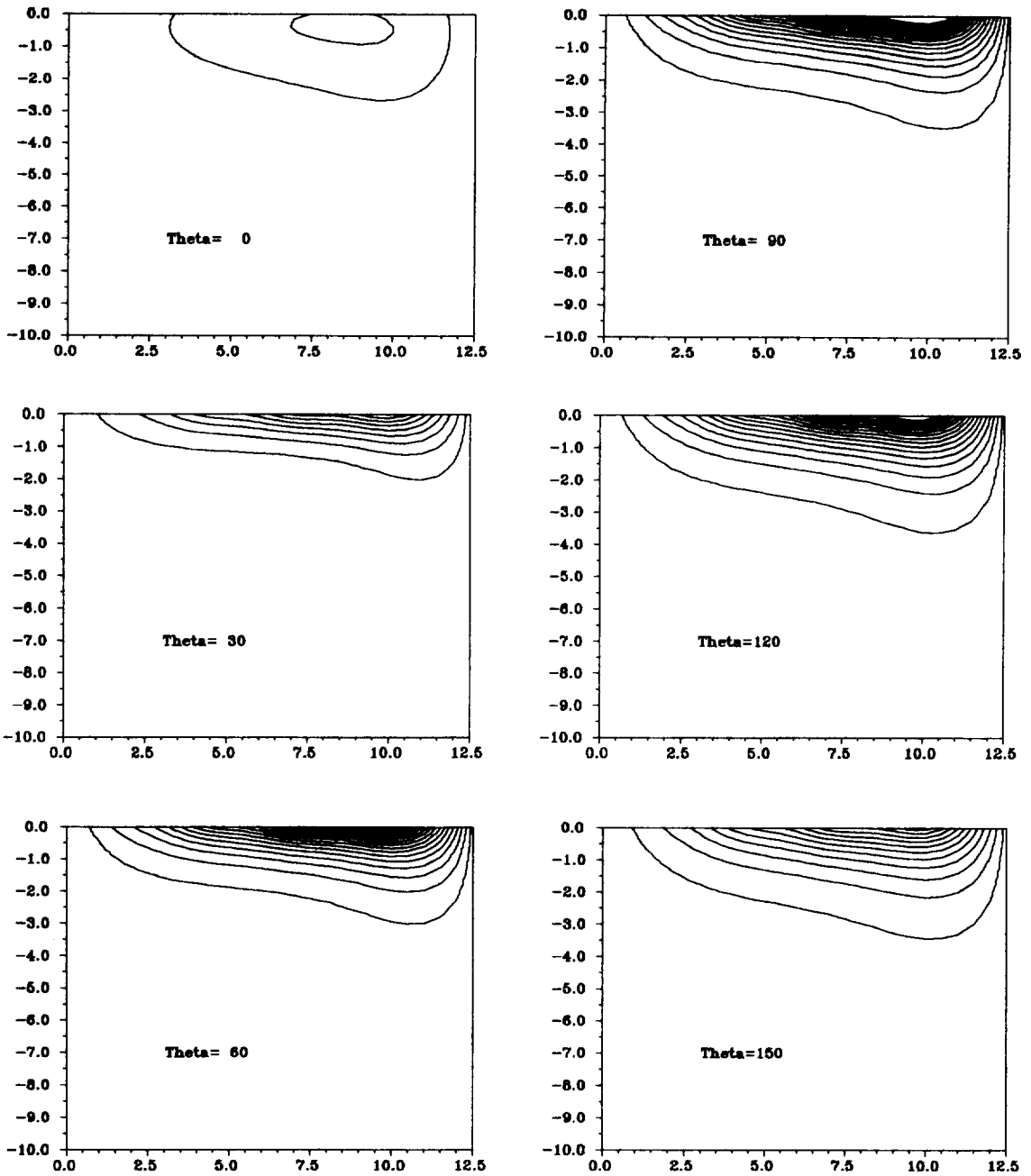


그림 4. 플라즈마 내의 자력선 분포 시간에 따른 변화($\theta = \omega t$)
 압력 = 5.0mTorr, RF 전력 = 500 W

ket이 둘러 싸고 있고 30 cm 직경의 이온 추출면에서의 uniformity가 10%이며 전자온도는 2-7 eV 범

위이고 이온온도는 0.4mTorr에서 0.8 eV까지 올라가는 것으로 측정되었다. 이온온도가 이렇게 높은

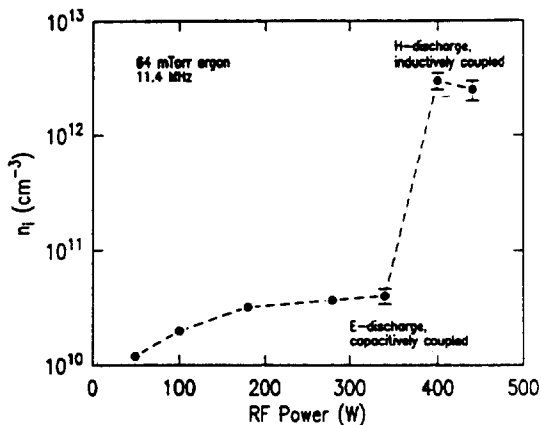


그림 5. RF power에 대한 이온밀도의 변화.

것은 RF 주파수(수 MHz)가 이온 플라즈마 주파수(수 100MHz)보다 아주 작으므로 나타나는 이온의 RF power 흡수로 보인다. Amorim 등[7]은 3.8cm 직경의 나선형 ICP에서 10eV의 전자 온도와 10^{12}cm^{-3} 의 이온밀도(64-130 mTorr, 11.4 MHz 370W)를 보고하고 있는데 전자 온도가 높은 것은 자장의 confinement가 없고 용기가 작아 확산 손실이 크기 때문인 것으로 보인다. 또 그림 5에서와 같이 Power에 대한 플라즈마 밀도가 어느 지점에서 10^{11} 대에서 10^{12} 대로 불연속적 비약을 하는 것을 볼 수 있는데 이것은 E방전에서 H 방전으로의 모드 전환으로 생각되며 30 mTorr 이하에서는 이러한 비약이 없다. 그림 1(c)의 장치에서 (챔버 폭 27cm) 전자온도의 압력 30 및 0.3 mTorr에서 각각 3 및 8eV 사이에서 변화하며 플라즈마 전위의 RF 변동폭은 RF power가 500 W 이상에서 보통 10V_{rms} 이내이다.

5. 결 언

최근 다시 관심을 모으기 시작한 ICP에 관하여 간략히 살펴 보았다. 기존의 ICP 모델링은 플라즈마 물리 관점에서는 매우 간단한 것들이며 전자계 모델은 플라즈마를 저항성 도체나 유전체로 보아 유기전자계와 전력의 흡수만 보는 것이다. 앞으로 플라즈마 물리 관점에서 본 보다 개선된 모델들의 개발이 절실히 요구되고 있다. 또 저압 ICP에 관한

플라즈마 진단기법의 개발도 더불어 요구되고 있으며 RF 전계에 의한 이온 진동이 이온 온도나 바이어스된 기판에 입사하는 이온 에너지 분포에 미치는 영향도 조사되어야 할 것이다. 설계가 간단하고 13.56 MHz의 신뢰성있는 RF 전원을 사용하기 때문에 저압 ICP 장치는 장래의 플라즈마 프로세싱에서 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] J. Hopwood, "Review of inductively coupled plasmas for plasma Processing", Plasma Sources, Science and Technology, Vol. 1, 1992, pp 109-116.
- [2] H. U. Eckert, "The Induction Arc: A State-of-the-Art Review," High Temperature Science, Vol 6, 1974, pp 99-134
- [3] R. F. Welton, E. W. Thomas, et al, "Simple Method to Calculate the Operating frequency of a Helical Resonator - RF discharge tube configuration", Measurement, Science and Technology, Vol 2, 1991, pp 242-246
- [4] J. J. Thomson, "The Electrodeless Discharge through Gases", Philosophical Magazine, Series 7, Vol. 4(25), 1927, pp. 1128-1160
- [5] B.B. Henriksen, "Electromagnetic Field in Electrodeless Discharge", J. of Applied Physics, Vol 42(13), 1971, pp 5460-5464
- [6] 김윤택, 이홍식, "RFI 플라즈마 장치의 전자계 특성연구", 한국진공학회 학술회의 논문집, 1994. 2., 73-75
- [7] J. Amorim et al, "High density plasma mode of inductively coupled RF discharge", J. Vacuum Science and Technology, B9(2), 1991, pp 362-365



이홍식(李弘植)

1953년 9월 13일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동대학원 졸업(석사). 1990년 서울대 대학원 졸업(공학). 현재 한국전기연구소 책임 연구원.



김윤택(金潤澤)

1965년 3월 29일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 박사 과정 수료. 현재 한국전기연구소 연구원



노영수(盧永秀)

1961년 4월 1일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 선임연구원.