

건식식각장치에서 임피던스 측정과 비등방성 식각에 대한 연구

김종식 김홍락 강봉구 권오대
포항 공과 대학 전자전기공학과

A STUDY OF RF IMPEDENCE MEASUREMENT AND ANISOTROPIC ETCHING

KIM JONG SIK, KIM HUNG RAK, KANG BONG GU, KWON O'DAE
DEPT. OF ELECTRONIC & ELECTRIC ENG. POSTECH.

ABSTRACT

It is shown that fundamental plasma characteristic, which are sheath voltage and ion concentration, can be derived from measuring RF impedance. Plasma characteristics from this simple method are verified by direct measuring, to be reasonable. Using these values a new relation between isotropy and the ratio of sheath voltage to ion concentration is derived. For etch in which CF_4 is used, anisotropic etch can be achieved in its order $10^{-12} Vcm^3$ and isotropic etch in $10^{-12} Vcm^3$. These results are useful in every asymmetric diode type etch system.

1. 서 론

플라즈마 에칭은 반도체 제조 공정에서 에칭 공정으로 널리 사용되고 있다.[1] RF 전압의 방전에서 GAS는 이온과 전자를 가지는 플라즈마 상태로 되고 전자의 이동도가 이온 보다 매우 크기 때문에 플라즈마와 둘러싸고 있는 용기 사이에는 Sheath가 형성된다. 이온은 Sheath에 걸려있는 전압에 가속되어 에칭하고자 하는 기관위에 도달하고 기관의 원자와 결합하여 기체의 화합물을 만들어 펌프를 통해 방출된다.[2] 에칭 공정은 다음 3가지의 특성이 서로 연관되어 작용한다. 장비 특성은 사용자의 의지대로 조절할 수 있는 것으로서 RF 전력, 반응관의 압력, 반응관의 구조, 에칭 개스의 흐름은 양등이며, 플라즈마 특성은 장비의 특성에 따라 결정되는 플라즈마 이온의 밀도, 전자의 밀도, 온도, 그리고 Sheath 전압등이다. 에칭 특성은 에칭하고자 하는 기관과 플라즈마 특성에 의해서 결정되며 식각율, 비등방성등이다.

RF discharge 내의 플라즈마 특성은 일반적으로 Langmuir probe를 이용하여 구하였다.[3] 그러나 RF noise에 의해 I-V특성 곡선에 많은 왜곡이 나타나서 믿을만한 data를 구하기가 힘들고, 오차를 줄이기 힘들다. 본 연구에서는 반응관의 임피던스를 측정하고, 간단한 모델을 이용하여, 플라즈마 특성을 구하는 방법을 사용하였다.

13.56 MHz를 사용하는 건식식각 시스템에서는 Generator와 반응관사이에 Matching Network를 사용한다. 사용하는 목적은 Generator 출력단자와 반응관 입력단의 임피던스를 정합함으로써 최대 전력 전송을 하는 것이다. 회로이론에 의하면 matching network의 출력 임피던스는 반응관 입력단에서의 임피던스의 complex conjugate이다. 따라서 정합회로의 출력 임피던스를 측정함으로써 간접적으로 반응관의 임피던스를 구할 수 있다.

Keller와 Pennebaker는 discharge 임피던스가 이온의 sheath에 의해서 결정된다는 가정을 기반으로 전기적 모델을 구성하였다.[4] 모델에서 sheath는 sheath 두께에 반비례하는 캐패시터와 Sheath내의 이온 flux를 나타내는 저항의 병렬회로로 나타난다. 이때 sheath 내의 이온 flux가 매우 작다고 가정하면 저항은 무시할 수 있고 sheath에 흐르는 전류는 변위전류이다. 한편 13.56MHz에서는 전자가 충분히 교류전계에 응답할 수 있으므로, bulk 플라즈마는 저항 R를 가진 도체로 나타난다. 본 실험에서 사용된 RIE system은 상위 전극이 하위 전극보다 충분히 큼으로 상위 전극의 sheath에 의한 캐패시터는 무시한다. 따라서 반응관은 하위 전극의 sheath 캐패시터와 bulk plasma 저항의 직렬 연결로 모델링 할 수 있다.[5]

에칭 특성을 조절 하기 위해서는 플라즈마의 특성을 조절하여야 하고 플라즈마 특성을 조절하려면 장비의 특성을 조절하여야 가능하다. 따라서 에칭 특성의 연구에는 플라즈마에 대한 정보가 필수적이다. 그러나 이전의 연구들은 에칭 특성과 장비 특성과의 관계에 대해서 연구하여 왔다. 장비 특성과 에칭 특성과의 관계는 반응관의 구조나 재질, 기타 요인에 의해서 장비마다 그 관계가 틀리며, 이 관계에 대한 정보는 모든 장비에 보편적으로 사용할 수 없다. 이에 비해 플라즈마 특성의 변화에 따른 에칭 특성의 변화 관계는 장비에 따라 영향을 받지 않음으로 에칭 특성을 결정하는 보편적이고 새로운 기준이 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 간단한 방법을 사용하여 플라즈마 특성을 측정하고 에칭 특성과 플라즈마 특성과의 관계에 대해 고찰 하였다. 간략화한 모델을 사용하면 임피던스의 값을 이용하여 플라즈마 특성(sheath전압, 전자 밀도)를 구할 수 있다. 본 연구에서는 정합회로의 임피던스를 측정하여 반응관의 임피던스를 구하고, 그값에서 plasma특성을 구하였다. 그리고 Silicon위에 Poly Silicon을 에칭할때 plasma특성의 변화에 따른 Isotropy의 변화를 관측하였다.

II. 실험 장치

본 system은 RIE를 위해 제작되었으며 상위 전극이 하위 전극에 비하여 매우 크고 하위 전극의 면적은 600cm² 이다. 전극간의 간격은 40mm 이고, 전극과 반응관 벽면과의 간격은 150mm 이상임으로 반응관의 벽을 통한 이온의 손실은 무시한다. Generator는 13.56Mhz로 동작하고 출력의 임피던스는 50Ω 이다. 정합 회로는 미국의 eni의 Automatching Networking TH-1000을 사용하였다. 이 장치는 반사된 전력이 zero가 되도록 임피던스를 자동 조절한다. 정합 회로의 출력 임피던스의 측정은 입력단에 50Ω을 연결하고 출력단의 임피던스를 HP사의 Impedance Analyzer로 측정하였다. 계산된 플라즈마 특성의 검증을 위해 Self-DC-Bias는 Tektronix의 Oscilloscope를 사용하여 측정하였고, RF 전류는 High Current Probe를 사용해서 측정했으며 전자의 밀도와 온도를 구하기 위해 Double Langmuir Probe를 제작하였다. 샘플은 Si 기판 위에 undoped Poly를 얹은 것을 사용하였고 poly 에칭을 위해 CF₄ 단일 기체를 사용하였다. Isotropy은 Hitachi사의 SEM으로 profile를 관측 하여 수직방향의 에칭 깊이에 수평 방향의 에칭 깊이의 비로 구하였다.

III. 실험

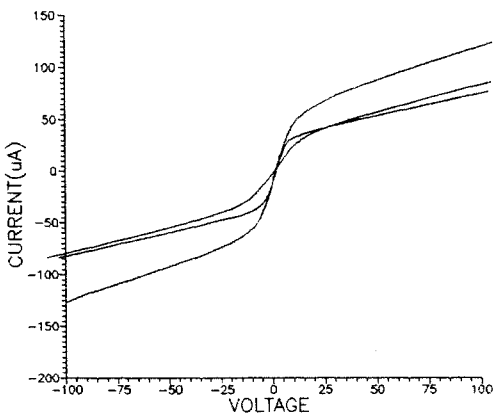
RF discharge는 bulk 플라즈마 저항 R_g와 하위 전극의 Sheath Capacitor C_{ds}의 직렬 연결로 모델링한다. 이때 전력 P가 모두 bulk 플라즈마내에서 소모된다고 가정하면 다음 관계식이 성립한다.

$$I_{rf} = (P / R_g)^{0.5}$$

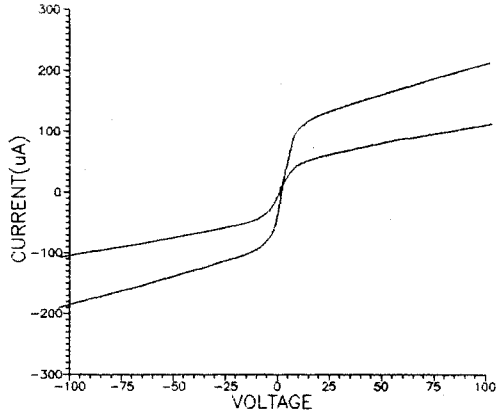
$$V_{dc} = \sqrt{2} I_{rf} / C_{ds}$$

$$E_{rf} = I_{rf} R_g / d$$

이때 bulk 플라즈마 내에서 전류는 전자의 전도 전류 뿐이라 가정하면 $I_{rf} = en_0 \mu E_{rf} A$ 이다. 이때 μ 는 σ_0 를 10⁻¹⁵ cm²으로 가정하면 Pressure에서 구할 수 있다. [6] 따라서 R_g와 C_{ds}를 이용하면 n₀를 구할 수 있다. 이때 I_{rf}는 RF 전류, P 전력, V_{dc} Self DC Bias, d 전극 간격, n₀ 전자 밀도, E_{rf} RF 전계, μ 전자 전속도, A 전극 면적이다.



< 그림 1 > 압력을 변화시킬때 Double Probe I-V 특성



< 그림 2 > 전력을 변화시킬때 Double Probe I-V 특성

RF 임피던스를 측정함으로써 유추한 전자밀도를 검증하기 위해 Double Langmuir Probe를 사용하였다. Double Langmuir Probe 실험에서는 I-V 특성 곡선의 기울기에서 이온의 온도를 구하고, 이온의 밀도는 $N_i = 4I_{is} / AV_+ e$ 에서 구할 수 있다. 이때 I_{is}는 이온의 포화 전류이고, A probe의 유효 면적, V₊ 평균 이온 속도이다. Ar의 방전 실험에서 그림 1은 전형적인 압력 변화에 의한 I-V 곡선의 변화를 나타내고, 그림 2는 전력을 변화시켰을 때이다. 이때 온도를 구해보면 표 1과 같다. 이온의 온도는 알려진 바와 일치하게 전력의 증가와 기압의 감소에 따라 온도가 증가함을 보이고 있다. CF₄의 경우는 표 2에서 표시하였고, 역시 같은 현상을 보이고 있다.

Ar 방전에서 전력과 압력의 변화에 따른 임피던스의 측정값과 여기서 구한 전류와 Sheath 전압, 이온 밀도와 각각의 측정된 값을 비교하면 표 3과 같다. 표 3에서 cal.로 표시된 값은 임피던스의 측정값에서 계산한 값이고 mea.로 표시한 값은 측정된 값이다. Sheath 전압의 data는 낮은 반응관의 압력과 높은 전력하에서 계산된 값과 관측된 값의 차이가 나타난다. 측정된 값은 하위전극에서 전압을 측정된 것, 즉 Self-DC-Bias이고, 계산된 값은 Self-DC-Bias와 플라즈마 포텐셜의 합이다. 플라즈마 포텐셜은 전력의 증가와 압력의 감소에 따라 증가한다. 따라서, 플라즈마 포텐셜을 무시하고 Self-DC-Bias를 Sheath 전압으로 가정하고 비교하였기 때문에 위의 오차가 발생한 것으로 생각된다. 전류의 data는 계산값과 거의 일치함을 보이고 있다. 전자밀도에 대해서 살펴보면 400mtorr에서는 double probe를 이용하여 측정된 값과 계산값이 약 factor 4의 차이를 나타내다 20mtorr에서는 거의

< 표 1 > AR의 전자 온도

23mtorr	150mtorr	400mtorr	100W	300W
5eV	4.7eV	2.96eV	3.4eV	3.6eV

< 표 2 > CF₄의 전자 온도

200mtorr	370mtorr	670mtorr	100W	300W
11.24eV	10.99eV	10.42eV	9.25eV	14.5eV

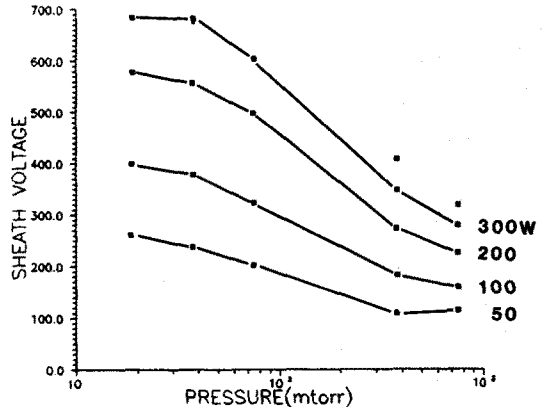
같은 값을 갖는다. 즉 압력의 감소에 따라 두값의 차이가 줄어들는데, 이는 Langmuir Probe를 사용할수 있는 가정이 전자와 이온의 자유 진행 거리가 Probe의 Sheath의 거리 보다 커야 한다는데 기인한다. 즉 저압으로 갈수록 Probe의 data가 실제의 값에 근접하므로, 저압에서 오차가 줄어들어 드는 현상을 설명할 수 있다. 표 3을 살펴봄으로서 RF 임피던스를 측정하고 KELLER의 모델을 사용하여 플라즈마 특성을 유추하는 본 연구의 방법이 정확하고 매우 효과적인 방법임을 증명할 수 있다.

Sheath 길이가 이온의 자유 진행 거리 보다 짧다고 가정하면 플라즈마 끝단에서 이온의 밀도가 기판에 도달하는 이온의 밀도와 같다. 한편 플라즈마 내에서는 전자와 이온의 밀도가 같다. 따라서 기판에 도달하는 이온의 밀도와 플라즈마내의 전자의 밀도가 같다고 할 수 있다. Isotropy와 플라즈마 특성과의 관계를 구하기 위해 예칭 게스로 CF₄만을 사용하였다. Isotropy δ 를 (lateral etch) / (vertical etch)로 정의하면 $\delta=1$ 일때 Isotropic하고 $\delta \neq 1$ 일때 anisotropic하다. CF₄를 사용한 방전에서 machine 특성과 플라즈마 특성과의 관계를 그림 3과 4에서 표시하였다. 그림 3에서 보면 Sheath 전압은 전력의 증가와 반응관 압력의 감소에 따라 증가한다. 그리고 압력이 낮으면 전력에 따라 그 변화폭이 증가한다. 압력의 증가에 따라 Sheath 전압이 감소하는데, 그 변화폭이 줄어들어 포화되려는 성질을 나타낸다. 그림 4는 전자 밀도에 대한 그림으로 밀도는 전력의 변화에 대해서는 거의 일정하고 반응관 압력의 증가에 따라 증가하는 현상을 보인다.

Sheath 전압의 이온 밀도에 대한 비율을 x 라 정의하면, Isotropy와 x 와의 관계는 그림 5에서 나타냈다. Isotropy는 x 에 지수 함수적으로 감소하는 현상을 보인다. 이와 같은 결과는 Isotropy가 전력의 증가에 반비례하고 반응관 압력에 비례하는 의미를 갖는다. 결과에 의하면 x 가 1 order 증가할 때마다 Isotropy가 0.2씩 감소함을 알 수있다. 여기서 유추하면 x 가 10^{-17} Vcm³에서 Isotropy가 약 1이 되며, 10^{-17} 이하에서는 Isotropic etch만이 나타난다. 한편 10^{-12} order에서 Isotropy는 약 zero가 되며, 그 이상에서는 Anisotropic etch만이 나타나게 될 것이다. 모델에 의한 오차와 측정 오차를 감안해도 Isotropy의 기준인 order 10^{-17} 은 변하지 않을 것이다. 위 결과의 의미는 CF₄를 사용할 때, 높은 압력에서도 공금 전력을 증가하여 Sheath 전압과 이온 밀도의 비율 10^{-12} Vcm³이하로 만들 수 있다면 Anisotropic 예칭을 얻을 수 있다는 것이다. 이는 etch profile을 결정하는 새로운 기준이라 생각된다.

< 표 3 >

전력	반응관 압력	R	X	Sheath 전압	전류	전자 밀도
W	mtorr	Ω	Ω	V	I	$10^{16}cm^{-3}$
		meical	meical	meical	meical	meical
100	400	5.6	43.9	300	340	5.4
100	150	7.2	44.2	260	350	5.4
300	150	6.4	44.2	490	640	9.1
100	20	5.2	59.0	417	440	5.4

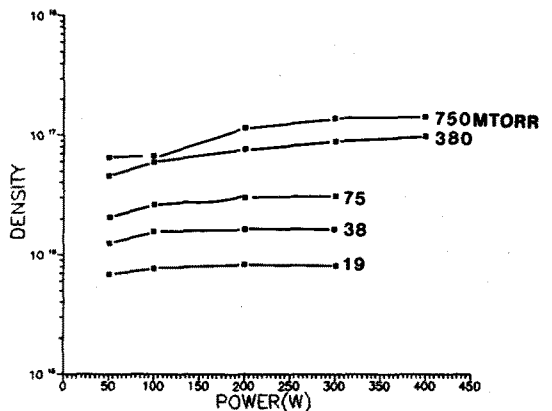


< 그림 3 > Plot of sheath voltage vs. pressure and power.

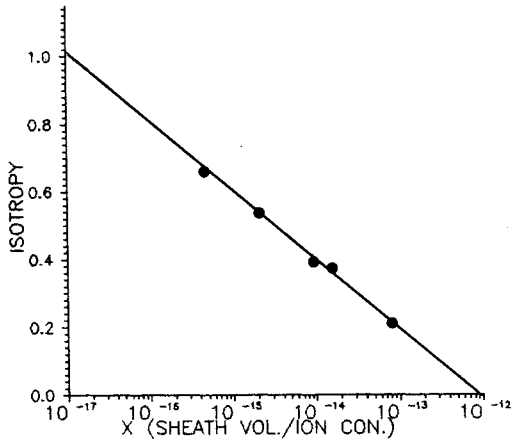
IV. 결 론

본 논문에서는 machine 특성(전력, 반응관 기압)와 플라즈마 특성(이온 밀도, sheath 전압) 그리고 예칭 특성(isotropy)의 관계를 실험적으로 구하여 보았다. machine 특성과 플라즈마 특성은 discharge 임피던스를 구함으로써 출발 하여, 간단한 모델을 통해서 쉽게 구할수 있으며, 측정된 값에 근접함을 보인다. 그러므로 임피던스의 측정은 플라즈마 특성을 구하는데 매우 간단하고 효과적인 방법으로 생각된다.

Sheath 전압의 이온 밀도에 대한 비와 Isotropy의 관계는 이전의 machine 특성과 예칭 특성과의 관계에 비하여 보편적이고 유용한 자료이다. CF₄를 사용한 예칭에서, 측정된 관계에 의하면 비율이 약 10^{-17} (Vcm³) 이하에서는 isotropic 예칭이 나타나고, 10^{-12} 이상에서는 anisotropic 예칭의 특성이 나타난다. 위의 결과에 대한 이론적인 고찰은 앞으로 계속 될 것이다.



< 그림 4 > Plot of electron concentration vs. pressure and power.



< 그림 5 > Plot of degree of isotropy vs. sheath voltage to ion con. ratio.

V. 참고 문헌

- [1]. B. Chapman Glow Discharge Process (Wiley, New York 1980)
- [2]. C. B. Zarowin and R. S. Horwath *J. Electrochem. Soc.* 130, 1144 (1983)
- [3]. J. S. Logan *J.Vac.Sci.Technol.* 14,92 (1977)
- [4]. J.W. Keller and W.B.Pennebaker *IBM J.Res.Develop* 23,3 (1979)
- [5]. A. J. van Roosmalen *Appl.Phys.Lett.* 42,5 (1983)
- [6]. J.W. Coburn *J.Appl.Phys.* 43,4965 (1972)