

유도결합형 플라즈마원을 이용한 고선택비 산화막 식각에 관한 연구

논문
11-4-2

A Study on the High Selective Oxide Etching using Inductively Coupled Plasma Source

이수부*, 박헌건, 이석현*
(Soo-Boo Lee, Hun-Gun Park, Seok-Hyun Lee)

Abstract

In developing the high density memory device, the etching of fine pattern is becoming increasingly important. Therefore, definition of ultra fine line and space pattern and minimization of damage and contamination are essential process. Also, the high density plasma in low operating pressure is necessary. The candidates of high density plasma sources are electron cyclotron resonance plasma, helicon wave plasma, helical resonator, and inductively coupled plasma. In this study, planar type magnetized inductively coupled plasma etcher has been built. The density and temperature of Ar plasma are measured as a function of rf power, flow rate, external magnetic field, and pressure. The oxide etch rate and selectivity to polysilicon are measured as the above mentioned conditions and self-bias voltage.

Key Words (중요 용어) : High density plasma(고밀도플라즈마), Planar type magnetized inductively couple plasma(평판형자화유도 결합 플라즈마), Ar plasma(Ar플라즈마), Oxide etch(산화막 식각), Selectivity(선택도)

1. 서 론

반도체 소자의 제작에서 집적도의 증가에 따라 회로 설계에서 요구되는 최소 선폭은 계속하여 감소하고 있으며 이를 위해서는 극미세 패턴의 정확한 구현 및 이에 따른 손상 및 오염을 최소화시켜야 한다. 따라서 더 낮은 압력에서 더 높은 플라즈마 밀도를 갖는 플라즈마 발생 장치에 대한 요구가 증대되고 있다. 전자 싸이클로트론 공명(ECR), 헬리콘(Helicon) 플라즈마, 평판형 유도 결합 플라즈마(ICP) 등의 플라즈마 소스들은¹⁾ 모두 저압에서도 고밀도의 플라즈마를 발생시킬 수 있고 이온화율이 높으며 이온의 에너지를 조절할 수 있다는 장점을 갖고 있다.²⁾ 이러한 플라즈마 소스들 중에서 평판형

유도 결합 플라즈마^{3,4)}는 대면적화가 용이하고 장치의 구조가 매우 간단하다는 장점을 지니고 있어 최근 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 평판형 유도 결합 플라즈마(Planar ICP) 장치를 제작하고 축방향으로 자장을 인가하여 그 플라즈마 특성을 개선하고 Langmuir probe를 이용하여 Ar 플라즈마의 전자 온도와 이온 밀도를 측정하였다. 산화막을 식각하는데 있어서 C_4F_8 가스를 사용하여 산화막의 식각율과 폴리실리콘의 식각율을 각각 구하여 이들의 선택비를 구하였다. 특히 본 연구에서는 외부 자장의 효과 및 압력을 변수로 하여 contact hole 식각에서 요구되는 실리콘에 대한 산화막 식각의 높은 선택비를 얻고자 하는데 목적이 있다.

* 인하대학교 공대 전기공학과 플라즈마연구실
(402-751: 인천광역시 남구 용현동 253)FAX:(032) 863-5822
E-mail : g9711090@inhavision.inha.ac.kr
1997년 12월 26일 접수, 1997년 3월 26일 심사완료

2. 실험장치 및 실험결과

2.1 실험장치의 구성

그림 1.은 실험에 사용한 플라즈마 식각 장치의

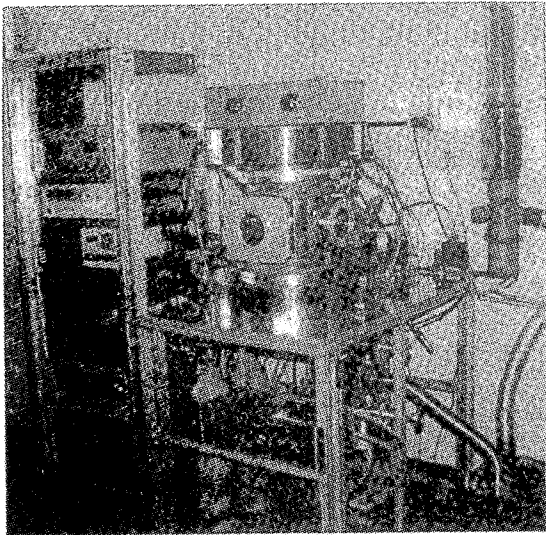


그림 1. 자화된 유도 결합 방식의 플라즈마 식각 장치
Fig. 1. A photograph of magnetized inductively coupled plasma etcher

사진이다. 플라즈마의 발생은 유도 결합 방식을 사용하였으며 외부에 magnet를 설치하여 자장을 인가할 수 있다. 반응실 위의 쿼츠창 위에 올려져 있는 안테나는 1/4 inch 동관을 사용하여 3 1/2-turn을 감았으며, 안테나의 과열을 막기 위하여 관내에 냉각수가 흐르게 제작하였다. 안테나에 13.56MHz의 RF source power를 인가하고 가변할 수 있는 진공 capacitor를 사용하여 정합상태를 만들면 코일에 큰

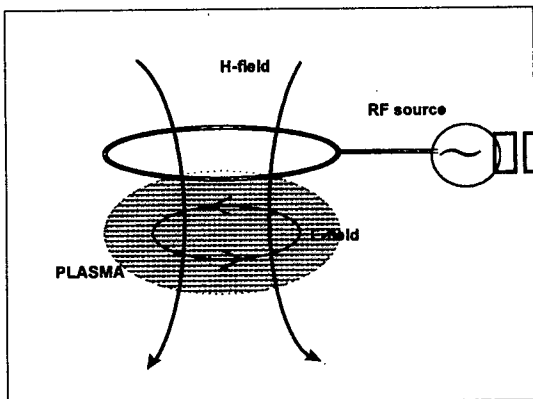


그림 2. 평판형 ICP에서의 전장과 자장의 개념도
Fig. 2. Schematic diagram of E-field and H-field in planar ICP

전류가 흘러 시변하는 자장을 발생시키게 된다. 이렇게 발생된 시변하는 자장은 페러데이 유도 법칙 (Faraday's induction law)에 의해서 시변하는 회전 전장이 발생되고, 이에 의해서 전자가 가속되어 기체 분자와 충돌하여 플라즈마가 발생되게 된다.⁵⁾ 이러한 기구를 그림 2에 나타냈다.

그림 3은 본 연구에 사용된 평판형 ICP 장비의 개략도이다. 자장을 축방향으로 인가하기 위해 반응실 상·하에 각각 310turn 으로 구성되는 magnet을 설치하였다. 벽면 온도는 따로 조절하지 않았으며 substrate는 냉각수를 흘려 일정온도를 유지하였다. Substrate는 4 inch로 제작하였고 실험에 사용된 시료는 조각 웨이퍼를 사용하였다. 진공 시스템은

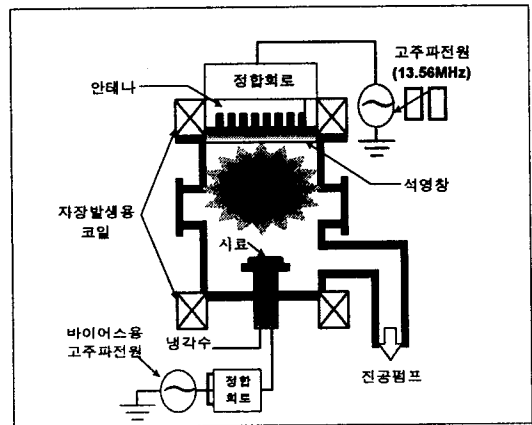


그림 3. 제작된 자화 유도 결합플라즈마 발생 장치의 개략도
Fig. 3. A schematic diagram of magnetized inductively coupled plasma etcher

rotary pump와 turbo molecular pump로 구성하였으며 압력 측정은 pirani gauge와 penning gauge 그리고 실험시 주 공정 압력 범위인 10^{-3} Torr의 압력을 정확하게 측정하기 위하여 capacitance manometer를 사용하였다.

2.2 Langmuir probe를 이용한 플라즈마 변수의 측정

평판형 ICP 형태의 플라즈마 식각 장치에서 double Langmuir probe^{6,7)}를 사용하여 Ar 플라즈마의 물성을 진단하였다. Probe를 쿼츠창으로부터 17 cm아래에 장착시키고 source power, 압력, 가스 유량, 외부 자장, 그리고 반응실의 반경 방향에 따라

전자 온도와 이온 밀도를 측정하였다. 측정 결과를 분석하기 위해서 몇가지 가정이 필요하다. 즉, probe 근처에서 collisionless 상태이며, 전자의 온도는 이온의 온도 보다 매우 높고, 이온은 singly charged이며, 그리고 전자와 이온의 농도는 같다는 것이다. 이러한 경우에 전자의 온도(T_e)는

$$T_e = \frac{e}{k} \left(\frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} \frac{dV}{dI} \Big|_{I=0} \right)$$

여기서 I_1 과 I_2 는 두 probe의 saturation 전류이다. 또한 전자 전류 밀도(J_e)는 두 probe의 면적($A_1=A_2$)이 같다는 조건하에 다음과 같다.

$$J_e = -\frac{1}{2} \left(\frac{I_1}{A_p} \right) \quad (A_1=A_2=A_p)$$

윗식과 이온의 질량(m_i)을 알면 다음식에서 전자의 밀도(n_e)를 구할 수 있다.

$$n_e = -1.22 \frac{J_e}{e (8k T_e / \pi m_e)^{1/2} (\mu_e / \mu_i)^{1.08}}$$

여기서 $\mu_e / \mu_i = 7.64 m_i^{0.46}$ 이다.

Ar 플라즈마에 대한 Langmuir 탐침 측정 결과인 그림 4는 전형적인 I_p - V_p 특성 곡선을 보여주고 있다. 안테나 코일에 걸리는 RF power의 크기에 따른 Ar 전자 온도와 이온 밀도의 변화를 그림 5에 나타내었다. RF power가 600 watt에서 1000 watt로 증가함에 따라 전자 온도는 4~5 eV 정도이며 이온 밀도는 $5.0 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 에서 $15.6 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 으로 증가하다가 900 watt 이상에서는 수렴하는 모습을 보이고 있

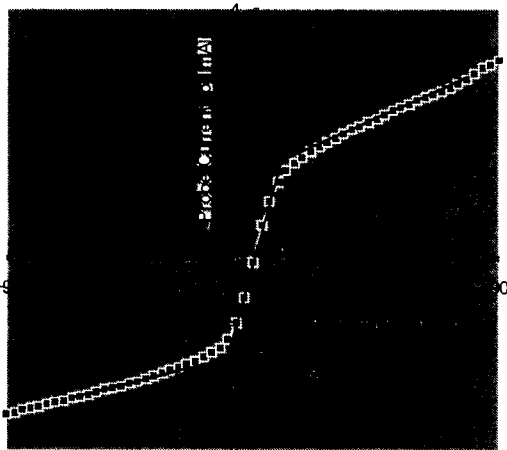


그림 4. Double Langmuir probe의 전형적인 I-V 특성 곡선
Fig. 4. I-V characteristics of double Langmuir probe

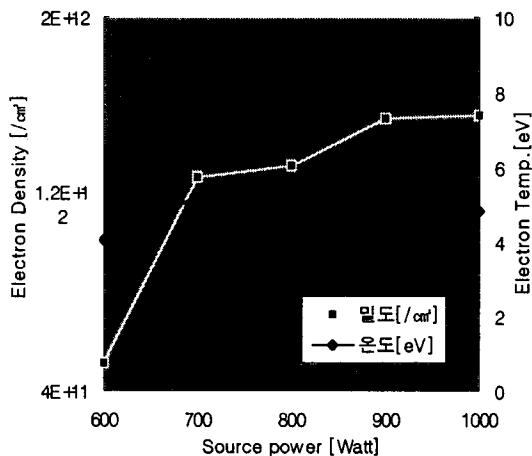


그림 5. RF power에 따른 전자 밀도와 온도의 변화
Fig. 5. Electron density and temperature vs. RF power (Press.: 1mTorr, B: 10Gauss, Flow Rate:5sccm)

다. 이는 RIE 방식과 비교하여 전자 온도는 낮고, 이온 밀도는 매우 높은 결과이다.⁸⁾ 따라서 본 연구에서 제작된 ICP 장비는 낮은 전자 온도의 저온 plasma로 식각시 웨이퍼의 손상이 작을 것으로 사료되며, 또한 고밀도의 plasma를 발생시키고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 외부에서 인가한 자장의 변화

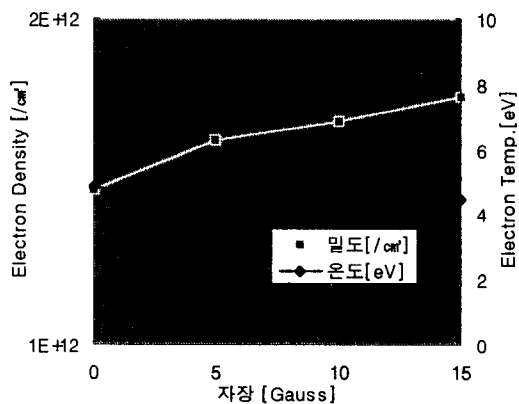


그림 6. 자장에 따른 전자 밀도와 온도의 변화
Fig. 6. Electron density and temperature vs. Magnetic Field (Press.: 1mTorr, RF power:800W, Flow Rate:5sccm)

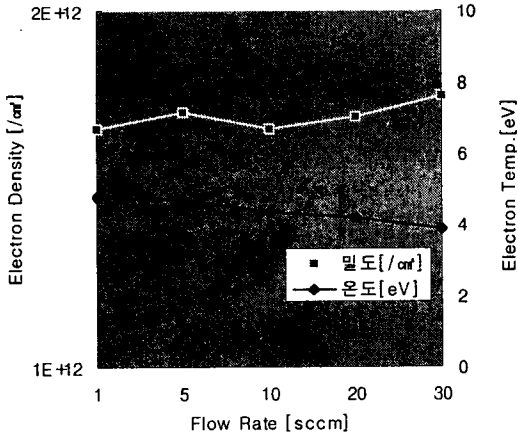


그림 7. 가스량에 따른 전자 밀도와 온도의 변화
 Fig. 7. Electron density and temperature vs. FlowRate (Press.: 1mTorr, RF power:800W, B:10Gauss)

에 따른 결과로서 자장의 크기가 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 증가함을 보이고 있다.

그림 7은 Ar flow rate에 따른 Langmuir probe data 로서 1 sccm에서 30 sccm으로 변화시켰으나 전자 온도와 밀도에는 큰 영향을 주지 않았다. 그림 8은 chamber pressure의 변화에 따른 전자 온도와 밀도의 변화이다. 압력이 증가하면서 전자의 밀도는

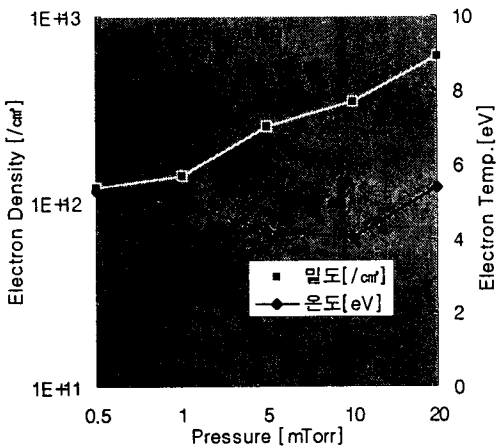


그림 8. 압력에 따른 전자 밀도와 온도의 변화
 Fig. 8. Electron density and temperature vs. Pressure (Flow Rate:5sccm, RF power:800W, B:10Gauss)

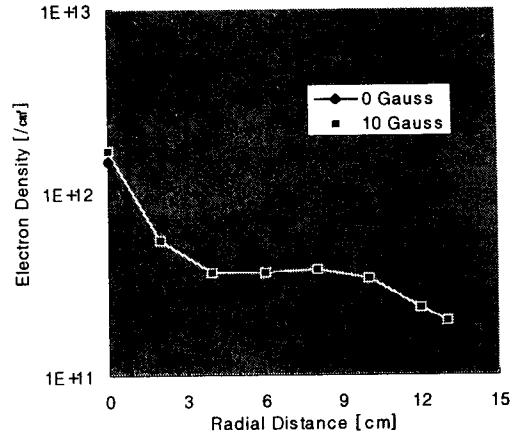


그림 9. 반경 방향에 따른 전자 밀도의 변화
 Fig. 9. Electron density vs. Radial Distance (Flow Rate: 5sccm, RF power: 800W, Press.:1mTorr)

$1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 에서 $6 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 으로 증가함을 나타내고 있다. 이는 압력이 증가하면서 중성기체분자의 수가 증가하기 때문에 플라즈마의 밀도가 증가하는 것으로 추정된다. 그러나 전자 온도는 압력 증가에 따라서 감소하다가 10 mTorr를 경계로 다시 증가하는 모습을 보이고 있다.

그림 9와 그림 10은 반경 방향으로의 probe 위치 변화에 따른 전자의 밀도의 변화와 온도 변화를 도시한 것이다. 그림에서 나타나듯이 중심부에서 멀

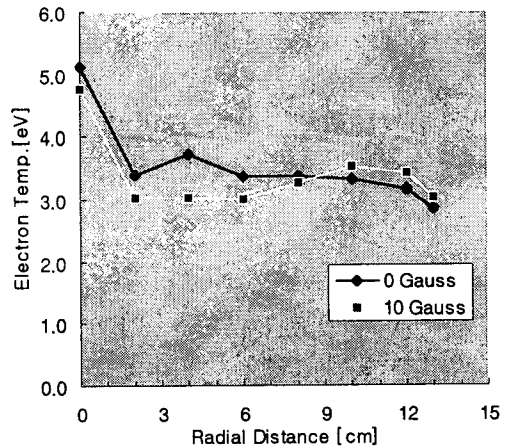


그림 10. 반경 방향에 따른 전자 온도의 변화
 Fig. 10. Electron temperature vs. Radial Distance (Flow Rate: 5sccm, RF power:800W, Press.:1mTorr)

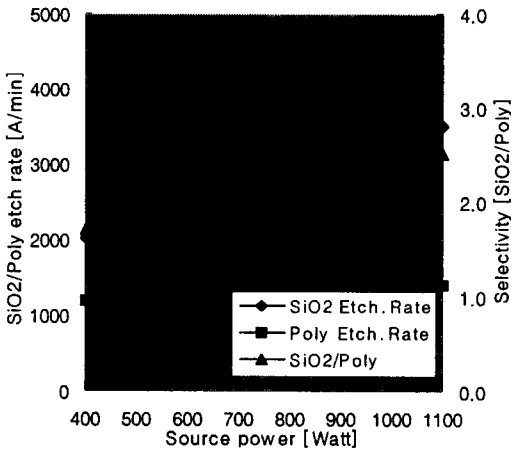


그림 11. RF power에 따른 산화막 식각속도와 선택도 변화

Fig. 11. RF power dependence of oxide etch rate and selectivity
(Flow Rate:17sccm, Self bias voltage:-100Volt., B:10Gauss, Press.:5mTorr)

어질수록 전자의 밀도가 낮아지고 온도 또한 감소함을 볼 수 있다. 외부 자장에 관계없이 중심부에서만 밀도가 높고 반경 방향으로 갈수록 밀도가 급격히 감소하여 균일도가 매우 나쁜 모습을 보이고 있다. 이를 해결하기 위해서는 antenna와 외부 자장 분포를 개선할 필요가 있을 것으로 사료된다.

2.3. 산화막 식각에의 응용

식각용 시료로는 산화막과 폴리실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 선택도를 측정하기 위하여 폴리실리콘을 사용한 이유는 실리콘 식각 속도 측정이 어렵기 때문이다. 산화막은 wet oxidation에 의하여 10,000 Å의 두께로, 그리고 폴리실리콘 웨이퍼는 1000 Å 두께의 산화막 위에 LPCVD에 의하여 3000 Å 두께의 폴리실리콘을 증착하였다. 식각 실험시 변수로는 RF power, magnetic field, operating pressure, dc self bias voltage, 그리고 외부 자장에 따른 식각 특성을 조사하였고, 식각 가스로는 C₄F₈ (Octafluoro-cyclobutane)을 사용하였다.

RF source power의 증가는 플라즈마의 밀도 및 이온 전류 밀도의 증가를 가져오며 중성 기체의 해리율을 증가시켜 라디칼의 밀도를 증가시킨다. 그림 11은 C₄F₈를 17 sccm, dc self bias voltage가 -100Volt., magnetic field가 10 Gauss, 그리고 공정

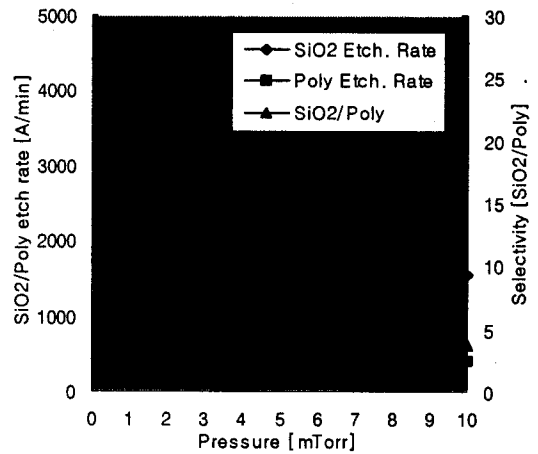


그림 12. Pressure에 따른 산화막 식각속도와 선택도 변화

Fig. 12. Pressure dependence of oxide etch rate and selectivity(Press.:1mTorr, Flow Rate:17sccm, Self bias voltage:-100Volt., B:20Gauss, RF power:600Watt)

압력이 5mTorr의 조건일때 RF source power를 변화시켜 실험한 결과이다. RF source power가 증가할수록 산화막 식각율이 서서히 증가하다가 900 watt에서 산화막 식각이 포화되었고, 선택비는 계속 증가하였다. RF source power가 900 watt에서는 4000 A/min 정도의 식각이 이루어 졌다. 이는 그림 5의 플라즈마 밀도 증가 경향과 일치하는 결과이다. 압력이 증가함에 따른(10 mTorr까지) 플라즈마의 물리적 성질 변화는 앞에서의 Langmuir probe의 결과(그림 8)와 같이 밀도의 증가, 전자온도의 감소, 그리고 플라즈마 전위의 감소로 요약할 수 있다. 그림 12는 magnetic field 20 Gauss, RF source power 600 watt 그리고 dc self bias power을 100 watt를 인가하여 dc self bias voltage를 dc self bias voltmeter 상에서 -5V로 유지하여 실험한 결과이다. 지금까지 발표된 다른 연구 결과는 dc self bias voltage가 -수 volt에서는 증착이 일어나는 것으로 발표되고 있었으나,⁹⁾ 본 연구 결과에서는 1 mTorr에서 산화막의 식각율이 4000 A/min 정도를 보이고 있다. 그리고 그림 8의 결과에서는 압력 증가에 따라서 밀도는 증가하나 식각 속도는 오히려 감소함을 보이고 있다. dc self bias voltage는 인가한 bias 교류 전원의 평균값으로 100 Watt를 인가할 때 matching이 불완전하여 실제로는 20 Watt 정도 전달된 상태이며 peak to peak voltage는 90 Volt로

음의 전위가 인가되는 순간에만 식각이 일어난 것으로 사료된다. 따라서 평균값을 거의 zero라 할지라도 음의 전위가 인가되는 순간에는 식각이 일어나는 것으로 판단된다. 그리고 압력 증가에 따른 식각속도 감소는 측정 위치에서 시료의 위치까지 이동하는 동안의 etchant의 소멸에 기인한 것으로 생각된다.

외부에서 인가되는 magnetic field의 영향은 라디칼의 생성 측면에서 전력 전달 효율의 증가와 전달 영역의 확대에 이온화율 및 해리율이 증가하며, 손실 측면에서는 반경 방향의 확산 계수 감소로 전자가 가두어지기 때문에 플라즈마 전위가 낮아지고, 이온들의 손실 역시 줄게 된다.⁹⁾ 그림 13은 magnetic field를 변화시켜 나온 결과로서 자장이 인가될수록 식각율이 증가하다가 15Gauss 이상에서는 오히려 감소하였다. 그러나 15Gauss 이상에서는 polysilicon의 식각 속도가 급감하여 선택비가 오히려 증가하여 20Gauss 에서는 12:1 이상의 선택비를 보이고 있다.

3. 결론

자장이 인가된 형태의 유도 결합 방식의 플라즈마 식각 시스템을 설계, 다양한 식각 조건을 구현할 수

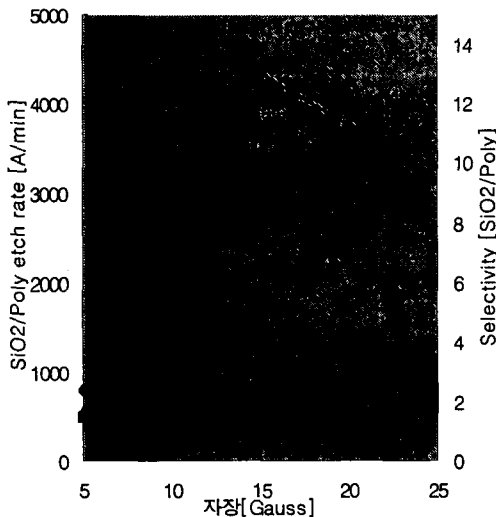


그림 13. 자장에 따른 산화막 식각속도와 선택도 변화

Fig. 13. Magnetic field dependence of oxide etch rate and selectivity (Flow Rate : 17sccm, Self bias power: -50Volt., Press. : 1.7mTorr, RF power: 600Watt.)

있는 Magnetized ICP 장치를 제작하였다. 플라즈마 진단은 Ar 플라즈마에서 double Langmuir probe를 사용하여 기본적인 물성인 전자의 온도와 밀도를 측정하였고, 실제 응용으로서 C₄F₈ 가스를 사용하여 산화막 식각 실험을 수행하였다. probe 진단에 의하여 플라즈마 밀도의 균일도는 측정하였으나, 식각 실험에 의한 균일도 측정은 차후 연구 과정에서 계속 진행될 예정이다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전자 밀도가 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 이상이 되는 고밀도 플라즈마를 형성하였다.
- (2) 인가 전력 증가에 따라서 플라즈마 밀도 및 식각 속도가 증가한다.
- (3) 외부 자장의 인가시 15 Gauss에서 4000 A/min 이상의 산화막 식각율을 보였고 20 Gauss에서는 12 이상의 선택비를 보였다.
- (4) 압력이 낮을수록 밀도 및 식각율, 그리고 선택비가 증가하였다.
- (5) dc self bias를 -5Volt로 할 경우에도 4000 A/min 정도의 산화막 식각율과 15:1 이상의 선택비를 보였다.

감사의 글

“ 본 연구는 서울대학교 반도체 공동연구소의 교육부 반도체분야 학술연구조성비 (과제번호 : ISRC 95-E-5002)와 1996년도 인하대 교내 연구비에 의해 수행되었습니다 ”

참고 문헌

1. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, John Willy & Sons inc. (1994)
2. S. Samukawa and S. Furuoya, Jpn. J. Appl. Phys. 32, L1289, (1993)
3. J. Hopwood, Plasma Sources Sci. Technol., 1, 109, (1992)
4. Oleg A. Popov, HIGH DENSITY PLASMA SOURCE, Noyes Pub., 76, (1995)
5. James A. O'Neil et al., J. Appl. Phys., 73, 4, 1621, (1993)
6. Alfred Grill, Cold Plasma in Materials Fabrication, IEEE PRESS, 134-136, (1995)
7. Russ A. Morgan, Plasma Etching in Semiconductor Fabrication, 150-157, (1985)
8. Stephan M. Rosnagel, Handbook of Plasma Processing Technology, Noyes Pub., 198, (1990)
9. 이 호준, 자화 유도 결합 플라즈마의 건식 식각 특성에 관한 연구, 박사 학위논문, 서울대학교, 85, (1996)