

자화된 헬리칼 공진기 플라즈마 소스를 이용한 고선택비 산화막 식각에 관한 연구

論 文

48C-5-5

A study on the high selective oxide etching using magnetized helical resonator plasma source

李水夫*·林昇完**·李哲賢***

(Soo-Boo Lee · Seung-Wan Lim · Seok-Hyun Lee)

Abstract - The magnetized helical resonator plasma etcher has been built. Electron density and temperature were measured as functions of rf source power, axial magnetic field, and pressure. The results show that electron density increases as the magnetic field increases and reached $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. The oxide etch rate and selectivity to polysilicon were investigated as the above mentioned conditions and self-bias voltage. We can obtain the much improved oxide etch selectivity to polysilicon (60 : 1) by applying the external axial weak magnetic field in magnetized helical resonator plasma etcher.

Key Words : high density plasma, helical resonator plasma, oxide etch, magnetized plasma

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. 또한 반도체 웨이퍼 규격이 200mm 위주에서 300mm 웨이퍼로 점차 대면적화 되어가고 있다. 따라서 넓은 면적과 더 낮은 압력에서 더 높은 플라즈마 밀도를 갖는 플라즈마 발생 장치에 대한 요구가 증대되고 있다. 전자 싸이클로트론 공진기(ECR), 헬리콘(Helicon) 플라즈마, 평판형 유도 결합 플라즈마(ICP), 헬리칼 공진기(Helical resonator) 등의 플라즈마 소스들은[1] 모두 저압에서도 고밀도의 플라즈마를 발생시킬 수 있고 이온화율이 높으며 이온의 에너지를 조절할 수 있다는 장점을 갖고 있다.[2] 이러한 플라즈마 소스들 중에서 헬리칼 공진기 플라즈마[3-5]는 플라즈마 발생 압력 범위가 넓고[6], 높은 식각율과 양호한 플라즈마 균일도를 얻을 수 있으며 장치의 구조가 매우 간단하다는 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 헬리칼 공진기 플라즈마(Helical Resonator Plasma) 장치를 제작하고 하부 전극을 중심으로 하는 축방향 자장을 인가하여 플라즈마 특성을 개선하였다. 인가한 자장의 크기는 10~50 Gauss 정도로 약자장을 인가하였으며 Helicon plasma와는 다른 mode의 wave가 발생되는 것

으로 추정되며 이에 대한 이론적 접근이 필요하다. Double Langmuir probe[7-8]를 이용하여 Ar 플라즈마의 전자 온도와 밀도를 측정하였다. 산화막 식각 가스로 C_4F_8 을 사용하여 산화막의 식각율과 폴리실리콘의 식각율을 각각 구하여 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.

2. 실험장치

Helical resonator etcher에서의 플라즈마 발생은 안테나의 길이가 입사파의 파장의 1/4이 되면 접지된 안테나의 하단과 높은 전압이 유지된 안테나 상단 사이에서 초기에는 축방향 전계에 의한 캐패시티브 모드 방전이 발생하고, 입력 파워의 증가로 축방향으로 시변 자장이 강하게 유지되어 원주 방향 전계에 의한 인덕티브 모드 방전이 발생하게 되어 결국 이 전계에 의해 가속된 전자가 중성입자를 이온화시켜 플라즈마를 생성하게 된다.[9,10]

그림 1은 본 연구 실험을 위해 직접 제작한 플라즈마 식각 장치의 사진이며, 그림 2는 그 개략도이다. 반응실 위의 방전부는 쿼츠 원기둥으로 되어 있으며 직경이 190mm, 높이가 300mm이다. 쿼츠 방전관에 감겨있는 코일에는 13.56MHz의 RF power가 인가되므로 다음의 식에 의해서 코일의 길이를 결정하였다.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{13.56 \times 10^6 / \text{s}} = 22.12 \text{ m}$$

결국 코일의 총 길이는 $\lambda/4$ 에 해당하는 5.53m 이다. 이 코

* 準 會 員 : 仁荷大 工大 電子·電氣·컴퓨터工學科部 碩士
** 準 會 員 : 仁荷大 工大 電子·電氣·컴퓨터工學科部 碩士課程
*** 正 會 員 : 仁荷大 工大 電子·電氣·컴퓨터工學科部 副教授·工博
接受日字 : 1998年 8月 28日
最終完了 : 1999年 4月 14日

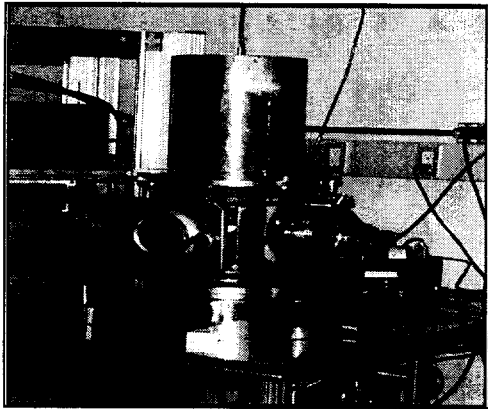


그림 1. 자화된 헬리칼 공명 플라즈마 식각 장치
 Fig. 1. A photograph of magnetized helical resonator plasma etcher

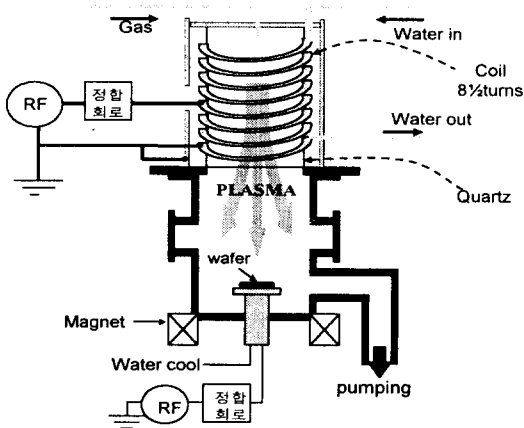


그림 2. Magnetized helical resonator plasma 발생 장치의 개략도
 Fig. 2. A schematic diagram of magnetized helical resonator plasma etcher

일로 코일 간격을 20mm로 하여 1/4 inch 동관을 helix 형태로 8½-turns를 감았다. 또한, 안테나와 방전관의 과열을 막기 위하여 관내에 냉각수가 흐를 수 있도록 제작하였다. 이때 안테나의 상부는 개방되어 있으며 하부는 접지되어 있는 상태이다. 코일 바깥쪽은 두께 2mm의 동관을 이용하여 차폐시켰다.[11] 가스 인입구는 방전관 상부에 위치하고 있으며, 자장을 외부에서 축방향으로 인가하기 위해 반응실내의 웨이퍼가 놓여지는 기판을 중심으로 310-turns 으로 구성된 magnet bobbin을 설치하였다. 벽면 온도는 따로 조절하지 않았으며 substrate는 냉각수를 흘려 일정 온도를 유지하였다. Substrate는 4 inch로 제작하였고 실험에 사용된 시료는 조각 웨이퍼를 사용하였다. 진공 시스템은 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.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Langmuir probe를 이용한 전자 밀도 및 온도의 측정

헬리칼 공진기 식각 장치에서 double Langmuir probe를 사용하여 Ar 플라즈마의 물성을 진단하였다. Probe의 위치는 반응실 옆쪽과 방전관 상부 중앙에서 삽입 장착하였으며, RF source power, 압력, 외부 자장, 그리고 반응실의 반경 방향과 축방향에 따른 전자 온도와 전자 밀도를 측정하였다.[12]

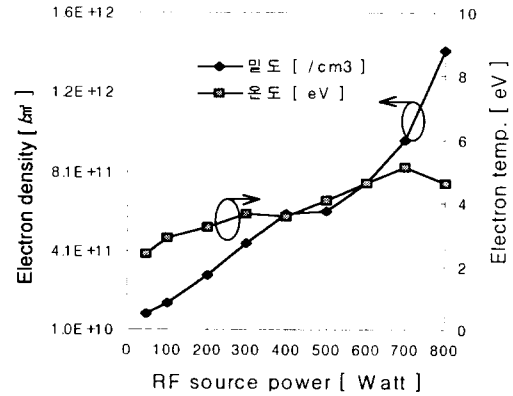


그림 3. RF power에 따른 전자 밀도와 온도
 Fig. 3. Electron density and temperature vs. RF power
 (Pressure : 5mTorr, Ar Flow Rate : 90sccm, Magnetic field : 10 Gauss)

그림 3은 안테나 코일에 인가되는 RF source power의 크기에 따른 Ar 플라즈마의 전자 온도와 전자 밀도의 변화이다. 이때 probe의 위치는 헬리칼 코일 중앙이다. RF source power가 50 watt에서 900 watt로 증가함에 따라 전자 온도는 2~5 eV 정도로 RF source power에 영향이 적으나, 전자 밀도는 2.0 × 10¹⁰/cm³에서 1.4 × 10¹²/cm³으로 증가한다. 이는 RIE 방식과 비교하여 전자 온도는 낮고, 밀도는 매우 높은 결과이며[13], 지금까지 발표된 helical resonator plasma 연구 결과와 같이 전자 밀도는 power에 지배적임을 나타내고 있다.[14]

그림 4는 외부에서 자장이 증가함에 따라 헬리칼 코일 중앙에서 측정된 결과로서 자장이 증가함에 따라 전자 밀도가 1.2 × 10¹²/cm³에서 2.0 × 10¹²/cm³로 증가함을 보이고 있다. 외부 자장을 인가하면 plasma 가동 효과에 의해 확산을 억제하여 하전입자의 손실이 줄어들고 방전 효율을 증가시켜 전자 밀도가 증가하는 것으로 사료된다.[15]

그림 5는 chamber pressure의 변화에 따른 전자 온도와 밀도의 변화이다. 압력이 증가하면서 전자의 밀도는 1 × 10¹²/cm³에서 2.0 × 10¹²/cm³으로 증가함을 나타내고 있다. 이는 압력이 증가하면서 중성기체분자의 수가 증가하기 때문에 전자의 밀도가 증가하는 것으로 추정된다. 그러나 전자 온도는 압력 변화에 대해서도 5 eV의 낮은 전자 온도를 유지함을 볼 수 있다.

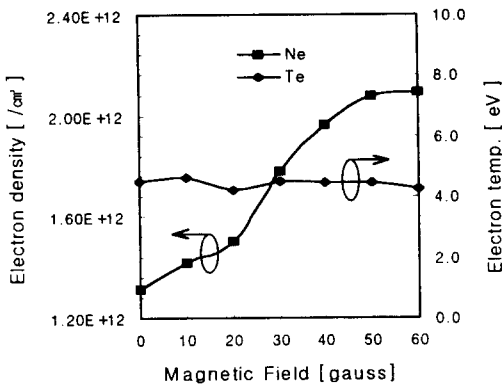


그림 4. 자장에 따른 전자 밀도와 온도
 Fig. 4. Electron density and temperature vs. magnetic field
 (Press.:5mTorr, RF power:800W, Ar Flow Rate:90sccm)

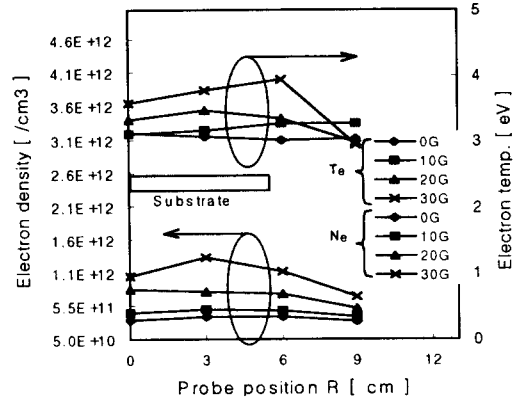


그림 6. 반경 방향에 따른 전자 밀도와 온도
 Fig. 6. Electron density and temperature vs. radial distance
 (Ar Flow Rate:90sccm, RF power:800W, Press.:5mTorr)

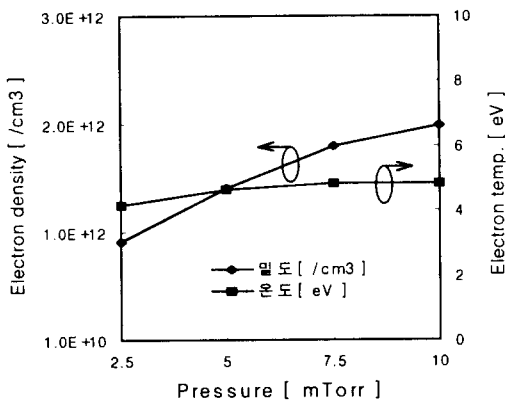


그림 5. 압력에 따른 전자 밀도와 온도
 Fig. 5. Electron density and temperature vs. pressure
 (Ar Flow Rate : 90sccm, RF power:800W, Magnetic field : 10 Gauss)

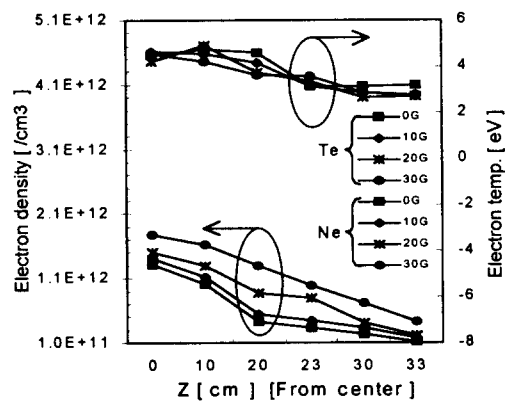


그림 7. 축 방향에 따른 전자 밀도와 온도
 Fig. 7. Electron density and temperature vs. axial distance
 (Ar Flow Rate : 90sccm, RF power : 800W, Press. : 5mTorr, Magnetic field : 10Gauss)

그림 6은 반경 방향에 따른 전자 밀도의 변화와 전자 온도 변화를 도시한 것이다. 이때 probe의 위치는 helical resonator 하부에 위치한 반응실의 우측면에서 삽입된 상태로 substrate 중앙 12cm 높이에 놓여 있다. 그림에서 나타나듯이 외부 자장의 증가시에는 전체 공정 챔버의 반경 방향에 걸쳐 전자 밀도가 증가하며 20 gauss 이상에서는 축방향 자장에 의한 플라즈마의 강한 구속으로 인해 반경 방향의 밀도가 균일하지 못한 것으로 사료된다.

그림 7은 헬리칼 코일 중앙부에서 축방향 거리에 따른 측정 결과로서 전자 온도는 4 eV에서 3 eV로 거의 일정하다. Z=0 지점은 기판중심에서 1cm 위에 위치한 지점이다. 전자 밀도는 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 에서 $1.3 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 로 다소 감소하고 있으나 식각 공정실 내에서도 $1.3 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 의 높은 전자 밀도가 생성되고 있다. 외부 자장에 따라 자장이 증가할수록 공진기와 식각 공정실 전체에서 전자 온도의 큰 변화 없이

전자 밀도가 증가함을 보여 주고 있다.

3.2 산화막 식각에의 응용

식각용 시료로는 산화막과 폴리실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 산화막은 wet oxidation에 의하여 15,000Å의 두께로, 그리고 폴리실리콘 웨이퍼는 1000Å 두께의 산화막 위에 LPCVD에 의하여 5000Å 두께의 폴리실리콘을 증착하였다. 식각 실험시 RF power, magnetic field, operating pressure, dc self bias voltage에 따른 식각 특성을 조사하였고, 식각 가스로는 C_4F_8 (Octafluoro - cyclobutance)을 사용하였다. dc self bias voltage의 측정은 substrate에 low pass filter를 통하여 연결한 voltage meter를 사용하였으며 oscilloscope로 실제 파형을 측정하여 확인하였다.

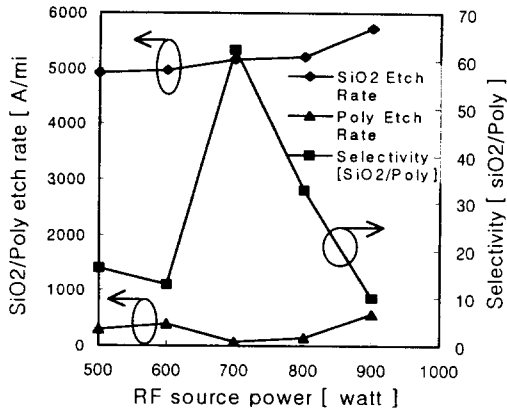


그림 8. RF power에 따른 산화막과 폴리실리콘 식각속도와 선택도

Fig. 8. Oxide and polysilicon etch rate and selectivity vs. RF power
(C₄F₈ Flow Rate : 16sccm, Self bias voltage : -100Volt., B : 10Gauss, Press. : 5 mTorr)

그림 8은 C₄F₈을 16 sccm, dc self bias voltage가 -100Volt., 그리고 공정 압력이 5mTorr의 조건일 때 외부 자장을 10 gauss 인가시에 RF source power를 변화시켜 실험한 결과이다. RF source power가 증가할수록 산화막 식각율이 증가하는 모습을 보이고 있다. 특히 700 watt의 RF power에서는 60:1 이상의 매우 우수한 선택도를 보이고 있다.

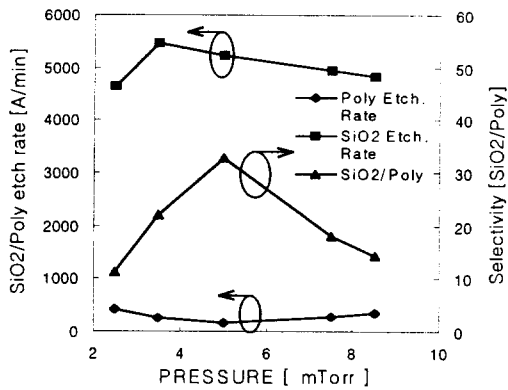


그림 9. Pressure에 따른 산화막과 폴리실리콘 식각속도와 선택도

Fig. 9. Oxide and polysilicon etch rate and selectivity vs. pressure
(C₄F₈ Flow Rate : 16 sccm, Self bias voltage : -100Volt., B : 10Gauss, RF power : 800Watt)

그림 9는 공정 압력에 따른 식각 결과로서 압력에 관계없이 5000A 정도의 산화막 식각 속도를 보이고 있으며 5 mTorr 에서는 32:1의 선택도를 보이고 있다.

그림 10은 하부 전극에 인가하는 bias voltage에 따른 산화막 식각 결과로 약 20 volt를 중심으로 그 이하에서는 오

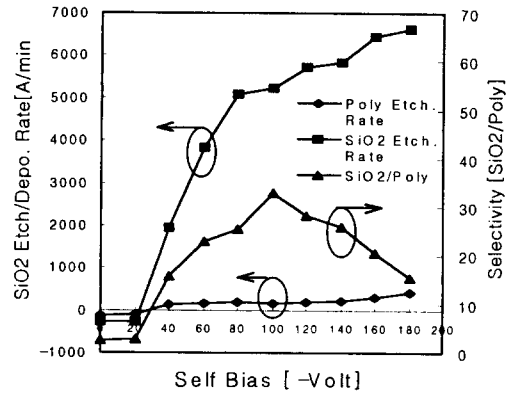


그림 10. dc self bias voltage에 따른 산화막과 폴리실리콘의 식각속도와 선택도

Fig. 10. Oxide and polysilicon etch rate and selectivity vs. dc self bias voltage
(Press.:5mTorr, C₄F₈ Flow Rate:16sccm, B:10Gauss, RF power:800Watt)

히려 증착 현상을 보이고 있다. Self bias voltage가 증가할수록 식각율 증가와 선택도 향상을 나타내고 있으며 -100volt 이상에서는 단위 시간 동안의 산화막 식각 증가율보다 폴리실리콘의 식각 증가율이 커서 선택비가 감소하고 있다.

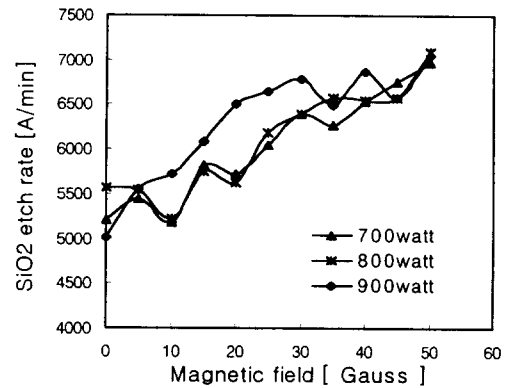


그림 11. 축방향 자장에 따른 산화막 식각속도 변화

Fig. 11. Oxide etch rate vs. axial magnetic field
(C₄F₈ Flow Rate:16sccm, Self bias power:-100Volt., Press.:5mTorr)

그림 11은 축방향 magnetic field에 따른 결과로서 자장이 증가할수록 식각율이 증가하고 있다. 그림 12는 자장에 따른 식각 선택도의 변화이다. 선택도가 최대가 되는 조건에서는 입사 power가 증가함에 따라 자장의 크기는 감소함을 보이고 있다. 자장의 영향은 magnetized inductively coupled plasma에 의한 식각 결과와 유사하다[15]. 외부에서 인가되는 magnetic field의 영향은 라디칼의 생성 측면에서는 전력 전달 효율의 증가로 이온화율 및 해리율이 증가하며, 손실 측면에서는 반경 방향의 확산 계수 감소로 전자가 가두어지기 때문에 플라즈마 전위가 낮아진다. 이로 인해 C₄F₈ 식각

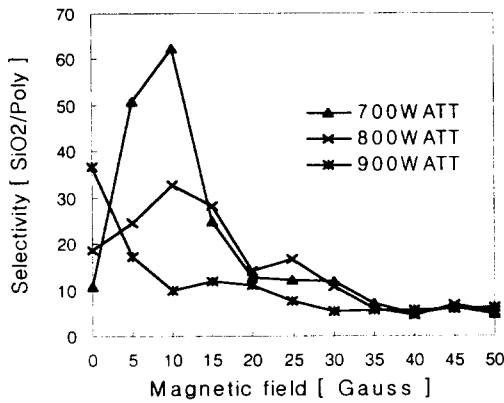


그림 12. 축방향 자장에 따른 산화막 식각 선택도
 Fig. 12. Oxide etch selectivity vs. axial magnetic field
 (C₄F₈ Flow Rate:16sccm, Self bias power:-100Volt., Press.:5mTorr)

가스에서 해리율이 증가하여 CF₂가 다량 존재하여 F의 포식자(fluorine scavenger)로 작용하여 CF₃를 형성함으로써 플라즈마내의 F 농도를 감소시켜 폴리실리콘막 위에 폴리머를 형성하여 식각 속도를 감소시킨다. 그러나 산화막에서는 산화막 식각시 발생한 산소 원자 때문에 산화막 위에서의 폴리머 형성이 어렵다. 따라서 선택도가 개선되는 것으로 추정된다. [15] 그림 8에 나타난 RF source power에 따른 결과도 이와 같다. 즉 power 증가에 따른 해리율의 증가에 기인한다. 그러나 700 watt를 기준으로 source power가 더 증가하면 F가 과도하게 증가하여 폴리실리콘 막위에서 폴리머 형성이 어렵게 된다. 따라서 식각속도는 증가하지만 선택도는 저하되는 것으로 사료된다.

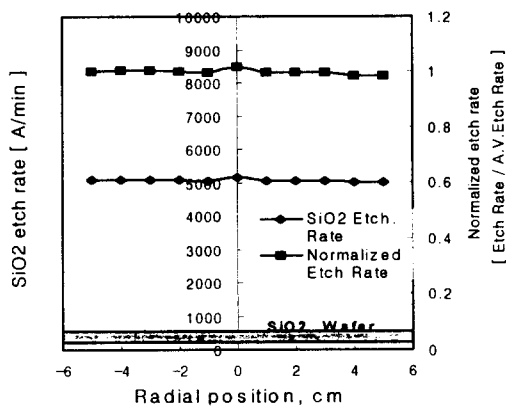


그림 13. Radial position에 대한 식각 균일도
 Fig. 13. Oxide etch rate uniformity vs. radial position
 (C₄F₈ Flow Rate:16sccm, Self bias power:-100Volt., RF power:700Watt, B:10 Gauss, Press.:5mTorr)

그림 13은 4 inch SiO₂ wafer를 폭 0.5 inch, 길이 4 inch로 잘라 식각 실험을 행한 후 식각 균일도를 구한 결과이다. 이때 식각 균일도는 다음 식에 의하여 구하였다.[14]

$$Uniformity(\pm\%) = \frac{\text{최대식각속도} - \text{최저식각속도}}{\text{평균식각속도}} \cdot \frac{100}{2}$$

10 Gauss 인가시 식각 균일도는 ±1.6%로 높은 균일도를 얻을 수 있었으며 이는 반경 방향의 probe 측정 결과에서 나타난 플라즈마 전자 밀도의 결과와도 일치한다.

4. 결 론

고밀도의 플라즈마 발생원으로 외부에서 자장을 인가할 수 있는 헬리칼 공진기 플라즈마(HRP) 식각 시스템을 설계 제작하였다. 그리고 외부 자장을 인가하여 helical resonator에서 magnetized plasma를 발생시킬수 있는 시스템을 처음으로 제안하고 제작하였다. 플라즈마 진단은 Ar 플라즈마에서 double Langmuir probe를 사용하여 기본적인 물성인 전자 밀도와 전자 온도를 측정하였다. 제작된 플라즈마 리액터는 전자 밀도가 1x10¹²/cm³ (Ar gas, 800Watt, 5mTorr) 이상이 되는 고밀도 플라즈마를 얻을 수 있었으며, 외부 자장을 인가함으로써 플라즈마 밀도를 증가시켰으며 10 Gauss의 축방향 자계를 가한 경우 충분한 균일도를 얻을 수 있었다. 이를 통한 식각 실험 결과 pressure, RF source power(기준 : C₄F₈ 16sccm, 800Watt, 5mTorr, 10gauss)의 변화에 따라서 5000 Å/min 이상의 식각율을 유지하였으며, ±1.6%(4" 기준)의 높은 식각 균일도를 얻을 수 있었고, 외부자장을 인가함으로써 60:1 이상의 높은 선택도(C₄F₈ 16sccm, 700Watt, 5mTorr, 10gauss)를 얻을 수 있었다. Magnetized helical resonator에서의 물성 분석 및 식각 실험은 기존에 수행되지 않은 새로운 연구로 플라즈마 식각 및 증착 장치로 응용될 수 있는 새로운 개념의 플라즈마 발생 방법이다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체 공동연구소의 교육부 반도체분야 학술 연구 조성비 (과제번호: ISRC-96-E-1033)과 인하대 1998년도 인하대학교 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, John Wiley & Sons inc. 1994.
2. S. Samukawa and S. Furuoya, Jpn. J. Appl. Phys. 32, L1289, 1993.
3. Oleg A. Popov, High Density Plasma Sources, Noyes Pub., 1995, pp. 122-134.
4. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, and D. L. Flamm,

"Theory of a helical resonator plasma" , Univ. of California, Berkeley, Memo. UCB/ERL M 90/10, 1990.

5. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, and D. L. Flamm, "Operation of a helical resonator plasma source", Plasma Sources Sci. Technol. 3, pp. 482-495, 1994.
6. P. Bletzinger, "Dual mode operation of a helical resonator discharge", Rev. Sci. Instrum. 65 (9), pp. 2975-2979, September 1994.
7. Alfred Grill, Cold Plasma in Materials Fabrication, IEEE PRESS, 1995, pp. 134-136.
8. Russ A. Morgan, Plasma Etching in Semiconductor Fabrication, 1985, pp. 150-157.
9. 김태현, 김문영, 장상훈, 태홍식, "헬리칼 공진기 플라즈마의 기관플라즈마밀도에 미치는 축방향자계의 영향", 정기총회 및 추계학술대회 논문집, pp.376-378, 1997.
10. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, John Willy & Sons inc. 1994, pp. 404-410.
11. R F Welton, E W Thomas, R K Reeney and T F Moran, "Simple method to calculate the operating frequency of a helical resonator-RF discharge tube configuration", Meas. Sci. Technol., 2, pp. 242-246, 1991.
12. 이수부, 박헌건, 이석현, "유도결합형 플라즈마원을 이용한 고선택비 산화막 식각에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, Vol.11, No.4, pp. 261-266, 1998.
13. Stephan M. Rossnagel, Handbook of Plasma Processing Technology, Noyes Pub., 1990, pp. 43-46.
14. J. T. C. Lee, N. Layadi, K. V. Guinn, H. L. Maynard, F. P. Klemens, D. E. Ibbotson, and I. Tepermeister, "Comparison of advanced plasma sources for etching applications. V. Polysilicon etching rate, uniformity, profile control, and bulk plasma properties in a helical resonator plasma source", J. Vac. Sci. Technol. B 14(4), pp. 2510-2518, Jul/Aug 1996.
15. 이 호준, "자화 유도 결합 플라즈마의 건식 식각 특성에 관한 연구", 박사 학위논문, 서울대학교, pp85, 1996

저 자 소 개



이 수 부 (李水夫)

1970년 10월 5일 생. 1996년 호서대 전기공학과 졸업. 1999년 인하대 대학원 전자·전기·컴퓨터공학부 대학원 졸업(공학석사). 1999년~현재 호서대 전기공학과 박사과정



임 승 완 (林昇完)

1976년 1월 8일 생. 1998년 인하대 전자·전기·컴퓨터공학부 졸업. 1998년~현재 동 대학원 전자·전기·컴퓨터공학부 석사과정

Tel : (032) 860-7402

E-mail : g1983660@inhavision.inha.ac.kr



이 석 현 (李哲賢)

1963년 2월 3일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~1995년 현대전자 반도체연구소 선임 연구원. 1995년~현재 인하대 전자·전기·컴퓨터공학부 부교수

Tel : (032) 860-7402

E-mail : plasma@dragon.inha.ac.kr