

고밀도 산소 플라즈마를 이용한 감광제 제거공정에 관한 연구

논문
11-2-3

A Study on Photoresist Stripping Using High Density Oxygen Plasma

정형섭*, 이종근*, 박세근*, 양재균**

(Hyoung-Sup Jung, Jong-Geun Lee, Se-Geun Park, Jae-Kyun Yang)

Abstract

A helical inductively coupled plasma asher, which produces low energy and high density plasma, has been built and investigated for photoresist stripping process. Oxygen ion density in the order of $10^{11}/\text{cm}^3$ is measured by Langmuir probe, and higher oxygen radical density is observed by Optical Emission Spectrometer. As RF source power is increased, the plasma density and thus photoresist stripping rate are increased. Independent RF bias power to the wafer stage provides a dc bias to the wafer and an ability to add the ion assisted reaction. At 1 KW of the source power, the coupling mechanism of the RF power to the plasma is changed from the inductive mode to the capacitive one at about 1 Torr. This change causes the plasma density and ashing rate decreases abruptly. The critical pressure of the mode change becomes larger with larger RF power.

Key Words(중요용어) : ICP, Plasma, Photoresist stripping, Ashing

1. 서 론

반도체 집적회로소자의 제조공정기술이 발전하고 복잡하여짐에 따라 패터닝을 위한 사진 식각공정 수도 많아지면서 식각 후 사용된 감광제를 제거하는 공정이 매우 중요하게 인식되고 있다. 매우 중요한 공정으로 대두되고 있다.¹⁾ 감광제 제거(ashing)는 축전결합형 플라즈마의 barrel반응로에서는 batch단위로 공정하는 방법이나, RF 마이크로웨이브 플라즈마의 down stream방식에서 단일 웨이퍼단위로 공정하는 방법들을 이용하여 왔다. 이들 방식에서 이온에 의한 결합생성이 우려되어 오존방식의 감광제 제거장비가 등장하기도 하였다.

반도체 집적회로 제조기술에서 식각공정에 이용될 차세대 플라즈마 소스중 유도결합형 플라즈마(Inductively Coupled Plasma, ICP)가 많은 관심을 받아왔다. 이는 8인치 이상 12인치의 대구경 웨이퍼를 식각함에 있어서 공정압력이 10 mTorr 이하이면서 고이방성(high anisotropy), 저결합형성(low damage), 고식각율(high etch rate)의 특성을 용이하게 얻을 수 있기 때문이다.²⁾ 이러한 유도결합형 플라즈마를 감광제의 식각에 적용한 사례는 아직 보고되지 않았다. Mattson의 ICP 감광제 제거장비는 공정압력이 1 Torr 이상이기 때문에 플라즈마발생의 에너지가 유도결합형이라는 것 이외에는 압력, 유입기체량, RF power 등에서 일반적인 ICP와는 다르기 때문이다.³⁾ 본 연구에서는 전자의 에너지가 작고 이온과 래디컬의 밀도가 높은 유도결합형 플라즈마를 이용한 asher를 제작하였으며, 압력, RF power, 유입산소량 등의 각종 공정 변수에 따른 감광제식각공

* : 인하대학교 반도체 및 박막기술연구소

** : 피에스케이(주) 부설연구소

(인천시 남구 용현동 253, Fax:032-875-5882

E-mail: sgpark@munhak.ac.kr)

1997년 8월 11일 접수, 1997년 12월 26일 심사완료

정을 조사하여 ICP 감광제 제거장비의 가능성을 확인하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용된 유도결합형 플라즈마는 RF 안테나가 헬리컬형태로 플라즈마 챔버의 주위에 감겨져 있는 것으로서, 식각장비의 구조도가 (그림 1)에 나타나있다.

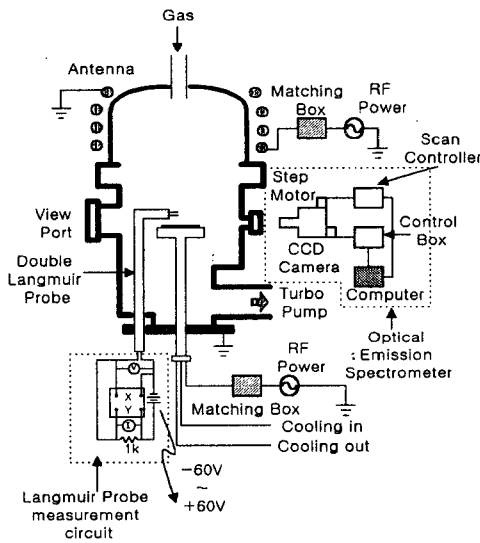


그림 1. 헬리컬 유도결합형 플라즈마 제거장비의 구조도

Fig. 1. Schematic diagram of an inductively coupled plasma with a helical antenna.

13.56 MHz의 RF power를 match network를 통해 안테나에 연결하여 석영 챔버에 유도결합형이 되도록 구성하였으며, 웨이퍼 스테이지에는 독립적으로 13.56 MHz의 RF power를 걸어 원하는 dc self-bias를 얻을 수 있게 하였다. 웨이퍼 스테이지의 높이는 조절이 가능하여 플라즈마와의 거리를 조절할 수 있도록 되어 있으며, 시료의 온도를 변화시키기 위해 발열 저항체가 웨이퍼 스테이지 내부에 장착이 되어 있고 웨이퍼의 냉각을 위한 냉각수도 흘릴 수 있게 하였다. 진공에서는 열 전달이 주로 방사 가열이므로 공정 중에 시료의 실제 온도는 온도 조절기의 입력 값보다 낮으므로 챔버벽에 있는 electrical feed through를 통하여 시료의 표면에 열전대를 밀착하여 실제온도를 측정하여 오차를 보정하였다. 기체의 유입은 MFC로 조절이 되고 진공 시스템은

mechanical pump와 turbomolecular pump로 구성되어 있으며 baratron 계기와 이온 계기를 사용하여 진공도를 측정하였다.

본 장비의 플라즈마 특성분석을 위해 double Langmuir 탐침을 이용하여 이온의 밀도와 전자온도를 챔버내의 위치에 따라 측정하였다. 플라즈마로부터 발산되는 빛은 이온이나 래디컬의 방출 특성에 기인하므로 그 스펙트럼은 플라즈마 특성분석에 있어 매우 중요하다. 광학적 다중채널 분석계(Optical multi-channel analyzer)를 이용하여 산소 플라즈마와 감광제 제거공정을 관찰하였다. 즉, 산소 플라즈마 내에서의 이온과 원자의 피크들 중에서 O^+ (파장은 777.5nm), O^* (844.5nm), O_2^+ (450~550nm)를 관찰하고, 감광제 식각중에는 그 외에도 반응 부산물인 CO (483nm, 519nm) 피크를 관찰하였다.

4 또는 8 인치 웨이퍼에 AZ-1518 감광제를 도포한 후 100°C에서 10분간 프리-베이크하였다. 그 후에 다시 도포하고 100°C에서 15분간 베이크하는 다중 도포방법으로 6 μm 의 두께를 얻었다. 감광제 제거율이 분당 2-4 μm 정도로 크기 때문에 두꺼운 두께가 필요하였다. 감광제 제거실험은 RF source power, RF bias power, 챔버압력, 공정기체의 유량 등의 공정조건을 변화시키면서 감광제 제거율을 관찰하였으며, 감광제 제거율은 NANO-Spec을 사용하여 감광제 제거 전후의 두께를 각각 측정하여 구하였다. 산소 플라즈마를 이용한 감광제 제거반응은 산소 래디컬과 유기물의 감광제와의 화학적 반응이 주이므로 시료의 온도에 exponential하게 비례하여 증가하는 감광제 제거율을 보인다고 잘 알려져있다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 특별한 언급이 없는 한 시료의 온도를 200 °C로 고정하여 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 토론

Double Langmuir 탐침을 이용한 측정결과를 분석하기 위해서는 몇 가지의 가정이 필요하게된다. 그것은 플라즈마가 비충돌상태이며, 전자의 에너지분포는 맥스웰 분포함수를 따르며, 전자의 온도는 이온의 온도보다 매우 높고 (즉 cold 플라즈마), 이온은 전하를 띠고있으며, 그리고 전자와 이온의 농도가 같다는 것이다.⁽⁵⁾

플라즈마 내에 삽입된 double Langmuir 탐침을 통한 I-V 곡선을 우선 구하였으며, 이때에 탐침 전류는 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} = \frac{e}{kT_e} \frac{I_{i1} I_{i2}}{I_{i1} + I_{i2}} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{e}{k} \left(\frac{I_{i1} I_{i2}}{I_{i1} + I_{i2}} \frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} \right) \quad (2)$$

으로 전자온도, T_e 를 구할 수 있다.

전자 전류밀도, J_e 는

$$J_e = -\frac{1}{2} \left(\frac{I_{i1} A_2 + I_{i2} A_1}{A_1 A_2} \right) \quad (3)$$

$$A_1 = A_2 = A_p \rightarrow \text{probe area}$$

$$J_e = -\frac{1}{2} \left(\frac{I_i}{A_1} \right) \quad (4)$$

그리고 전자밀도는 다음과 같다.

$$n_e = -1.22 \frac{J_e}{e(8kT_e/\pi m_e)^{1/2} (\mu_e/\mu_i)^{1.08}} \quad (5)$$

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

m_e, m_i 는 전자와 이온의 질량이며, μ_e, μ_i 는 전자와 이온의 이동도(mobility)이다.

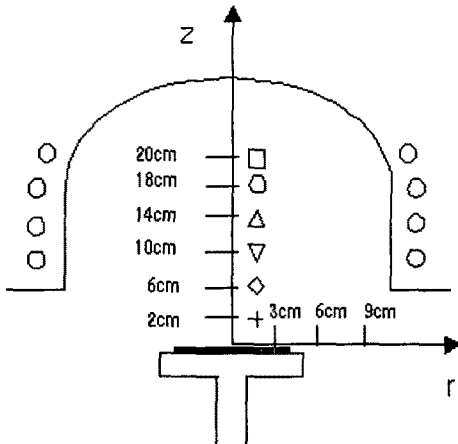


그림 2. 챔버의 크기 및 좌표

Fig. 2. Size and coordinates of the source chamber.

그림 2에 소스 챔버의 크기와 좌표 기준을 나타내었고, 그림 3에 챔버 내에서 방사방향(r 축)과 수직방향(z 축)의 위치에 따른 이온밀도 및 전자온도의 변화를 도시하였다. 1kW의 RF source power와 10

mTorr의 공정압력에서 측정된 것으로서, 소스 챔버의 밑으로부터 올라갈수록(Z 값이 증가할수록) 이온 밀도는 증가하며 RF 안테나 묶음의 중간인 18cm에서 최대가 되었다. 한편 방사방향으로는 스테이지의 중앙에서 챔버의 벽방향으로 비교적 균일하다가 챔버 벽 근처에서는 전하입자들의 분산과 재결합에 의하여 급격히 감소하였다. 전체적으로 산소이온 밀도가 $10^{11}/\text{cm}^3$ order로 매우 높고 8인치 웨이퍼 크기의 범위 안에서는 5% 이내로 균일하며, 전자온도는 4~6 eV로써 RIE나 축전결합형 플라즈마에서의 전형적인 10 eV 정도에 비하여 낮은 값을 보임으로써 전형적인 유도결합형 플라즈마의 특성을 보이고 있다. 산소 래디칼의 밀도는 일반적으로 이온밀도의 10배 이상으로 알려져 있으며,⁽⁶⁾ 감광제 제거공정에는 이러한 래디칼이 더욱 중요하다.

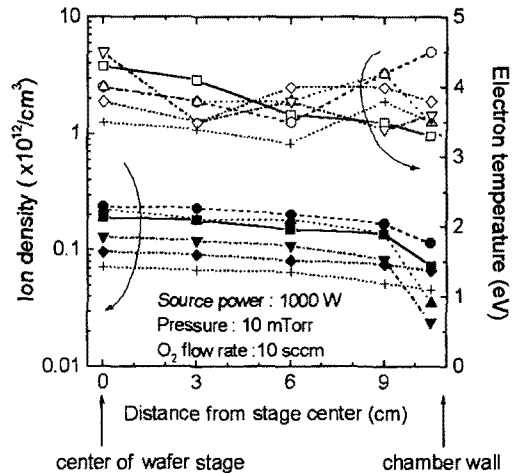


그림 3. 챔버내의 위치에 따른 산소 플라즈마의 전자온도와 이온밀도의 변화

Fig. 3. Electron temperature and ion density of O_2 plasma as a function of radial and vertical positions. (\square : 20 cm, \circ : 18cm, \triangle : 14cm, ∇ : 10cm, \diamond : 6cm, $+$: 2cm)

그림 4에 산소 플라즈마에 대한 400nm - 900nm 사이의 전체적인 스펙트럼이 나타나있으며, 매우 강한 래디컬 피크, O^* (777.5nm)와 이보다 약한 이온 피크인 O^+ (844.5nm), O_2^+ (450~550nm)가 관찰되었다. 감광제를 식각하는 동안에 발광 스펙트라를 관찰하면 유기물인 감광제와 결합하여 발생하는 부산물로는 H_2O, CH_4, CO, CO_2 등이 있으며⁽⁷⁾, 본 실

험에서는 CO 피크를 관찰하였다. CO 피크를 관찰함으로써 식각의 종말점을 결정할 수 있다. 감광제 제거공정시 $O^*(777.5\text{nm})$ 와 감광제와의 반응이 감광제 제거의 주반응이지만, O^* 또는 O_2^+ 등의 이온의 역할도 있다.⁽⁶⁾ 웨이퍼 스테이지에 RF power로 인한 dc self-bias에 의하여 가속된 이온들이 물리적 에너지를 화학반응에 추가할 수 있으므로 (그림 6)에는 RF bias power에 의한 감광제 제거율의 변화를 측정하여 도시하였다.

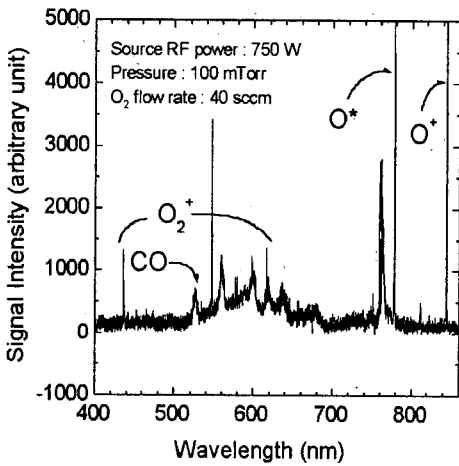


그림 4. 산소 플라즈마의 발광 스펙트럼
Fig. 4. Emission spectrum of O₂ plasma.

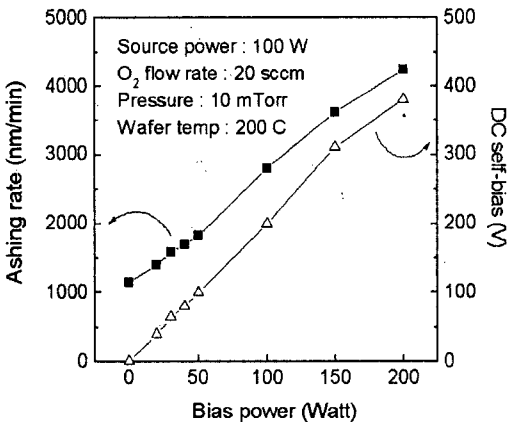


그림 5. RF bias power변화에 따른 감광제 제거율 및 dc self-bias
Fig. 5. Ashing rate and dc self bias as a function of RF bias power

이 실험에 의하면 RF bias power가 증가할수록 dc self-bias가 커지며 그로 인한 이온이 가속되어서 감광제 제거율이 증가함을 알 수 있다. 즉 산소분자의 해리가 더욱 많아짐에 따라 보다 높은 이온 에너지로 인한 이온도움 반응이 강화되었기 때문이다.

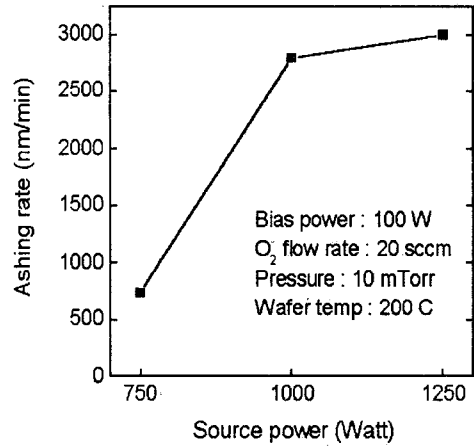


그림 6. RF source power변화에 따른 감광제 제거율 및 dc self-bias
Fig. 6. Ashing rate as a function of RF source power

그림 6은 RF source power의 증가에 따른 감광제 제거율이다. RF source power의 증가는 플라즈마의 밀도 및 이온 전류밀도의 증가를 가져오며 보다 많은 래디컬의 발생을 위한 산소 분자의 분해에 의한 것이다. 그리하여 감광제 제거율이 증가하는 것으로 보인다.

그림 7에서 일정한 압력에서 산소 가스 유량비를 변화시켰을 때의 감광제 제거율을 나타냈다. 압력을 고정시켰으므로 유량이 증가하면 진공펌프의 배기량도 많아져야하며 그 결과 입자들의 흐름도 빨라지므로 감광제 제거반응에 필요한 산소 래디컬의 공급과 반응부산물의 제거가 용이해지기 때문에 감광제 제거율은 증가하지만, 반면에 50 sccm 이상에서는 거주시간은 줄게 되어 감광제 제거율이 포화가 되는 것으로 믿어진다.

압력 증가에 따른 플라즈마의 물리적 성질 변화를 정리해 보면 플라즈마 밀도의 증가, 전자온도의 감소, 플라즈마 전위의 감소 등으로 요약할 수 있다.

그림 7은 압력에 따른 산소 래디컬농도의 변화를 보여준다. 압력에 따른 플라즈마 밀도의 증가는 전

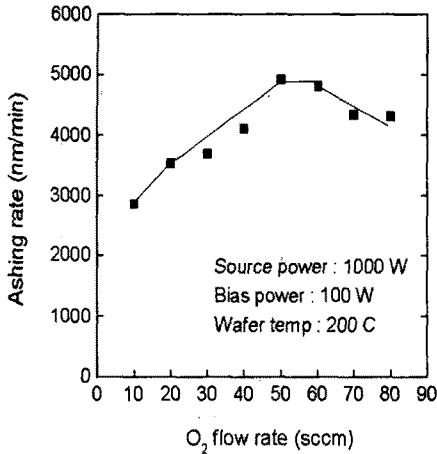


그림 7. 산소 가스 유량비에 따른 감광제 제거율
Fig. 7. Ashing rate as a function of O₂ gas flow rate.

전력 전달 효율 및 중성 입자 밀도의 증가에 기인한다. 그림 8에서 나타난 0.5 Torr의 압력근처에서 밀도가 감소하는 것은 유도결합형에서 축전결합형으로 변화하기 때문이다. 압력이 어느값 이상으로 증가하면 안테나에서 전달되는 수직방향의 유도자기장이 유도전기장을 나선방향으로 발생시키지 못하여 플라즈마와 유도결합이 되지 못하고 플라즈마와 안테나 사이에 직접적으로 걸리는 전기장에 의하여 축전결합형 방식으로 바뀌게 된다. 이로 인하여 플라즈마의 밀도가 급격히 낮아지고 감광제 제거율도 감소하게 된다. 그림 9에는 이러한 모우드 천이의 경계가 나타나 있다. 챔버 압력이 커질수록 보다 큰 RF source power에서 유도결합형으로 바뀐다. 1KW에서는 0.5 Torr를 경계로 유도결합형에서 축전결합형으로 바뀐다. 이는 그림 8의 0.5 Torr이상에서 밀도감소의 이유이다. 유도결합형의 경우가 보다 효율적인 결합을 하기 때문에 걸여주는 RF source power에 대하여 플라즈마 밀도가 높고 따라서 발광의 세기도 강하여지며, 모우드 천이의 순간에 발광의 세기가 커짐을 관찰할 수 있다. 반응성이온 식각, 또는 이온 도움 식각에서 반응 속도를 제한하는 요인을 이온과 중성 래디칼로 나누어 볼 때 식각속도의 최대점을 기준으로 낮은 압력에서는 중성 래디칼이, 높은 압력에서는 이온이 각각 식각 속도를 제한하는 변수가 된다.⁹⁾ 결국 낮은 압력에서 감광제 제

거를 수행 했을때, 중성 활성종인 산소래디칼에 의한 반응은 이온의 역할을 줄이게된다. 따라서 감광제 제거율의 증대를 얻고 웨이퍼의 손상을 최소화하게될 것이다.

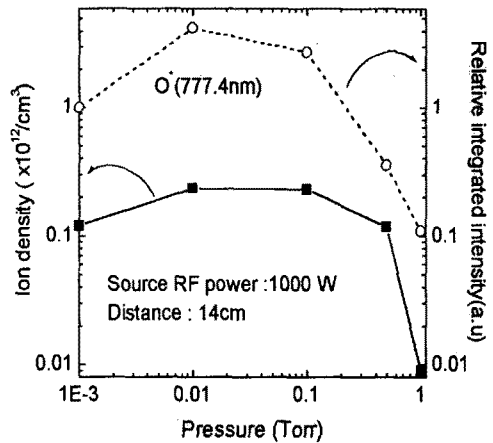


그림 8. 압력 변화에 따른 이온밀도및 산소 래디칼의 밀도

Fig. 8. Peak intensity of oxygen radical and ion density as a function of the chamber pressure

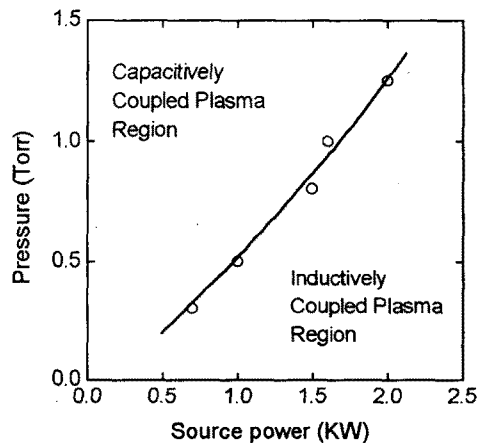


그림 9. 유도결합형과 축전결합형 모우드의 천이곡선
Fig. 9. Transition between inductive and capacitive coupling in terms of RF power and pressure.

4. 결 론

고밀도, 저 에너지 플라즈마를 발생하는 헬리컬 ICP 제거장비를 제작하여 감광제 식각공정에 적용하였다. 산소 이온농도가 $10^{11}/\text{cm}^3$ 정도로 높았으며, 산소 래디컬의 농도도 매우 높았다. RF source power의 증가에 따라 플라즈마의 농도는 증가하였고 감광제 제거율도 이에 따라 증가하였다. 웨이퍼 스테이지에 가해지는 RF bias power는 시료에 dc self-bias의 크기를 조절하게되며, 식각반응에 이온도움 반응의 역할을 추가함으로써 감광제 제거율을 증가시켰다. 이러한 독립적인 RF bias power는 방향성을 가진 이온의 역할을 식각반응에 추가하게 하므로, 이온주입으로 경화된 감광제처럼 단순한 산소 래디칼 분위기에서는 감광제 제거율이 적은 경우에 효과적일 수 있으며, RIE 식각이 필요한 dry development기술의 하나인 silylation공정에 응용할 수 있다.¹⁰⁾ RF power가 1 KW일 때에 챔버의 압력이 0.5 Torr 이상으로 증가하게 되면 결합 메카니즘이 유도형(inductive)에서 축전형(capacitive)으로 달라지게 되어 플라즈마의 밀도가 급격히 감소하며 감광제 제거율도 감소하므로 챔버의 압력은 0.5 Torr 이하이어야 한다.

감사의 글

본논문은 1995년도 인하대학교 교내연구비지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. C. C. Cheng and J. Oncay. "A down-stream plasma process for post-etch residue cleanin g", Semiconductor International, pp.185-188, 1995.
2. J. Hopwood, "Review of inductively coupled plasmas for plasma processing,"Plasma Sources Sci. Technol. vol. 1, pp. 109-116, 1992.
3. S. Savas, D. Dutton, B. Wood, R. Guerra, and M. L. Hammond, "Advanced photoresist strip with a high pressure ICP sources," Solid State Technol., Vol. 39, pp.123-128, 1996.
4. 박세균, 이종근. "감광제 건식제거공장의 최적화", 전기전자재료학회지, Vol. 9, pp. 928-924, 1996.
5. Alfred. G, Cold plasma in Materials Fabricationin, IEEE Press, ppl34-136, 1993
6. C. Lee, D. B. Graves, M. A. Lieberman, and D. W. Hess, "Global model of plasma chemistry in a high density oxygen discharge," J. Electrochem. Soc., vol. 141, pp 1546-1555, 1994.
7. F. Pasierb, A. Ghanbari, M. S. Ameen, and R. S. Heinrich, "Characterization of a novel microwave stripper," J. Vac. Sci. Technol., vol A 10, pp. 1096-1099, 1992.
8. S. W. Pang, K. T. Sung, and K. K. Ko, "Etching of photoresist using oxygen plasma generated by a multipolar electron cyclotron resonance source," J. vac. Sci. Technol., vol. B 10, pp. 1118-1123, 1992.
9. 이호준, "자화 유도결합 플라즈마의 건식식각 특성에 관한 연구," 박사학위 논문, 서울대학교, 1995.
10. P. Laporte, Y. Melaku, and M. Goethals, "Magnetically confined dry etching for silylated resist development," Solid State Technology, pp.69-72, April 1991.