

평면형 유도결합 플라즈마의 특성 및 선택적 산화막 식각 응용에 관한 연구

양일동 · 이호준 · 황기웅

서울대학교 공과대학 전기공학부
(1996년 9월 13일 접수)

A study on the characteristics of planar type inductively coupled plasma and its applications on the selective oxide etching

Il-Dong Yang, Ho-Jun Lee and Ki-Woong Whang

School of Electrical Engineering, College of Engineering, Seoul National University
Seoul 151-742, Korea

(Received September 13, 1996)

요 약 - 평면형 유도 결합 플라즈마의 전기적 특성을 측정하였고 Langmuir probe를 이용하여 전자의 밀도와 온도를 측정하였다. 코일과 플라즈마를 포함한 총 부하의 저항 성분은 1에서 4 Ω 까지 변화였고 인덕턴스는 1.5 μH 와 2 μH 사이의 값을 가졌다. $10^{11}/\text{cm}^3$ 이상의 고밀도 플라즈마를 발생시켰으며 전자의 온도는 공정 조건에 따라 3에서 5eV까지 변화였다. 산화막 식각시 선택도를 개선하기 위한 방법으로 바이어스 전압을 변조하는 방법을 모색하였다. C_4F_8 플라즈마에서 바이어스 변조 방법을 사용하였을 때 선택도는 크게 향상되었으나 산화막 식각율이 400 $\text{\AA}/\text{min}$ 이하였다. 선택도 향상을 위해 수소를 첨가한 실험에서 C_4F_8 플라즈마에 60% H_2 를 첨가하였을 때 선택도 50이상, 산화막 식각율 2000 $\text{\AA}/\text{min}$ 이상의 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract - The electrical characteristics and the plasma parameters of planar inductively coupled plasmas (ICP) have been measured. The resistance of the total load including the coil and the plasma varied from 1 to 4 Ω and the inductance from 1.5 μH to 2 μH when the power was changed from 100 to 1000 W and the pressure from 1 to 10 mTorr. The density of electron measured by Langmuir probe was over $10^{11}/\text{cm}^3$ and the temperature varied between 3 and 5 eV as the process conditions were changed. Bias modulation was adopted as a new method to improve the selectivity of SiO_2 on Si in C_4F_8 (octafluorocyclobutane) plasma. The selectivity was improved as the duty ratio decreased, but the etch rate of SiO_2 decreased below 400 $\text{\AA}/\text{min}$. H_2 addition to C_4F_8 plasma showed that the etch selectivity could be higher than 50 and the etch rate of SiO_2 over 2000 $\text{\AA}/\text{min}$ when 60% H_2 was added.

1. 서 론

산화막의 식각 공정에 있어서 직접도의 증가에 따른 형상 크기의 감소로 고이방성과 고선택도의 식각공정이 요구되고 있으며, ECR, Helicon, ICP 등의 고밀도 저압 플라즈마에서 고선택적이고 고이방적인 산화막 식각 공정을 개발하려는 연구가 진행되고 있다. 하지만 고밀도 저압 플라즈마에서 CF_4 , CHF_3 등과 같이 높은 F/C 비를

갖는 소스 가스를 쓸 경우 과도한 해리도로 인해 contact형성에 필요한 산화막 식각시 실리콘과의 선택도가 불량해지는 문제점을 안고 있다[1].

본 연구에서는 평면형 유도결합 플라즈마(Planar Inductively Coupled Plasma, ICP) 시스템[2][3]을 제작하고 기본 특성을 조사하였으며, 산화막 식각시 바이어스 변조와 공급가스($\text{C}_4\text{F}_8 + \text{H}_2$)의 혼합비가 실리콘과 산화막의 식각 선택도에 미치는 영향을 조사하였다.

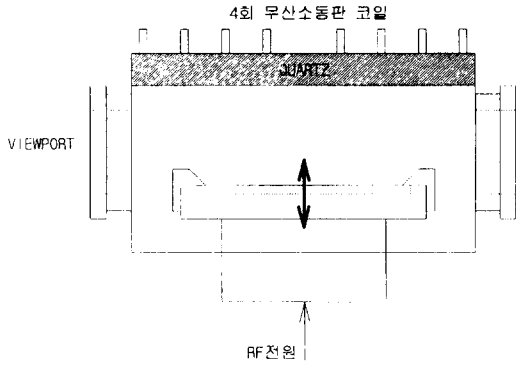


그림 1. 평면형 ICP 시스템 구성도.

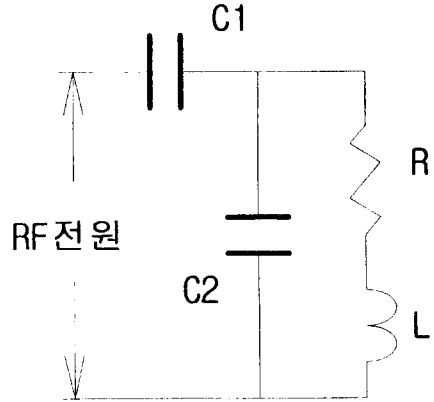


그림 2. 평면형 ICP의 전기적 등가회로.

2. 평면형 유도 결합 플라즈마의 특성

2.1 시스템의 구성

평면형 유도 결합 플라즈마는 반응실 위쪽에 코일이 놓여있고 코일과 반응실 사이는 퀴츠나 세라믹으로 분리되어 있다. 임피던스 정합상태에서 코일에는 큰 RF전류가 흐르고 이 RF전류는 시간적으로 변화하는 자장을 발생시킨다. 시간적으로 변화하는 자장은 다시 패러데이 유도법칙에 따라 시간적으로 변화하는 회전하는 전장을 발생시며 이 유도된 전장에 의해 전자가 가속되고 가속된 전자가 중성기체 분자들과 충돌하므로써 플라즈마가 발생되고 유지된다.

그림 1은 본 연구를 위해 제작한 평면형 ICP장비의 개략도이다. 아래전극은 4인치 웨이퍼용으로 제작하였고 저온 냉각과 퀴츠창(직경 210 mm, 두께 15 mm)과의 간격 조절이 가능하도록 하였다. 코일은 무산소 동판을 이용하여 직경이 170 mm인 3회 감긴 코일과 4회 감긴 코일을 제작하였다. RF전원의 주파수는 주방전 전원 및 바이어스 전원 모두 13.56 MHz이다.

2.2 전기적 특성 측정

그림 2는 평면형 ICP의 전기적 등가회로를 나타낸다. C1과 C2는 임피던스 정합회로의 load capacitor와 tuning capacitor를 나타내고 R, L은 코일과 플라즈마가 포함된 총부하의 저항성분과 유도성분을 나타낸다. C1, C2가 주어 졌을 때 부하의 R, L값을 계산하면 R, L값은 다음식과 같이 주어진다.

$$R = \frac{R_0 C_1^2}{(C_1 + C_2)^2 + (w R_0 C_1 C_2)^2} \quad (1)$$

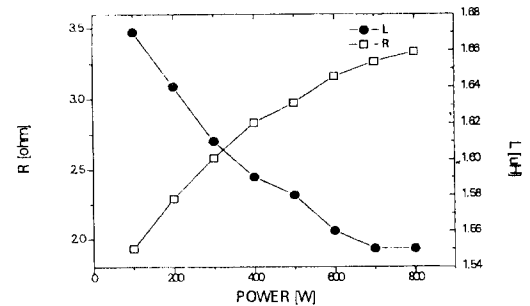


그림 3. 입력전력에 따른 부하임피던스의 변화: Ar 플라즈마, 5 mTorr, 4회 코일.

$$L = \frac{1}{w^2 C_2} \left[1 - \frac{C_1 + C_2}{(C_1 + C_2)^2 + (w R_0 C_1 C_2)^2} \right] \quad (2)$$

여기서 w, R₀전원의 각 주파수 및 input 임피던스(50 W)를 나타낸다.

이 실험을 위하여 임피던스 정합 회로는 capacitor의 값을 알 수 있도록 제작되었다. 그림에 도시된 실험조건에서 C1(load capacitor)은 15에서 23.62pF까지 주로 입력전력에 따라 변하였고 C2(tune capacitor)는 66.13에서 68.11pF까지 (4회 코일) 주로 압력에 따라 변하였다.

위의 방법으로 구한 R, L값의 입력전력과 압력에 따른 변화를 그림 3과 그림 4에 도시하였다. 입력전력(power)이나 압력이 증가하면 R값은 증가하고 L값은 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다. L값은 큰 변화가 없으므로, R값이 증가하면 Q(ωL/R)값이 줄어들어 정합범위가 더 넓어지고 안정되어 진다. 그림 5는 100 mTorr에서의 power에 따른 임피던스 특성을 도시한 것이다. Power가 증가함에 따라 R값이 증가하다 다시 감소하는 것을 볼 수 있다.

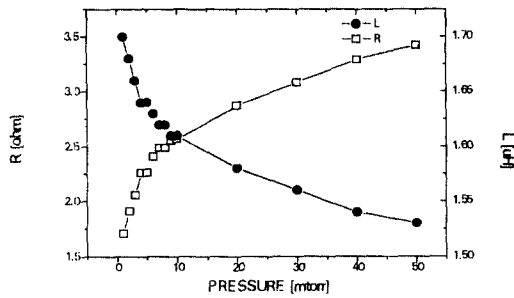


그림 4. 압력에 따른 부하임피던스의 변화 Ar 플라즈마, 300 W, 4회 코일.

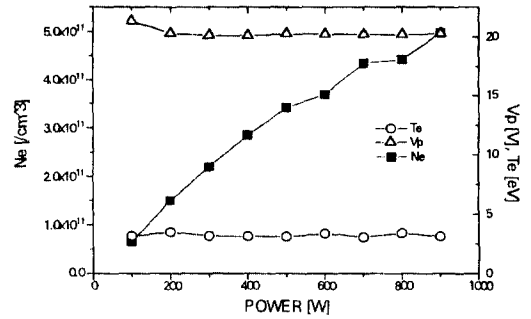


그림 6. Power에 따른 Vp, Ne, Te의 변화 Ar, 5 mTorr, 4회 코일.

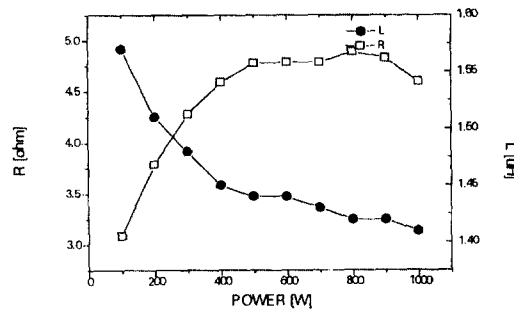


그림 5. 입력전력에 따른 부하임피던스의 변화; Ar플라즈마, 100 mTorr, 4회 코일.

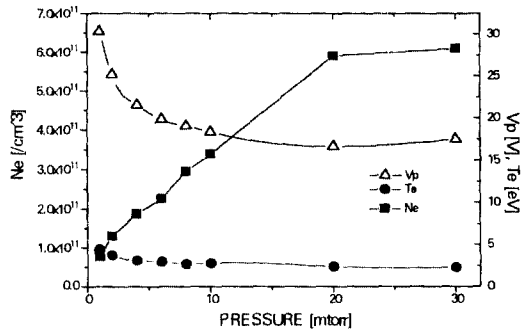


그림 7. 압력에 따른 Ne, Te의 변화 Ar, 300 W, 4회 코일.

R값이 최대가 될 때 전력 전달 효율이 최대가 되는 데 이것은 유도 결합 플라즈마의 일반적인 전력 전달 특성이다.

2.3 플라즈마변수 측정

Langmuir probe를 이용하여 쿼츠창으로 부터 5 cm 아래에서 밀도와 온도를 입력전력, 압력, 위치에 따라 측정하였다. 프로브 바로 뒤에 필터를 달아 RF성분을 제거한 후 프로브 전압과 전류를 A/D변환하고 noise를 제거하기 위하여 30주기의 I-V curve의 평균을 구한 뒤 데이터를 해석하였다.

그림 6에 입력전력(power)에 따른 전자의 밀도와 온도의 변화를 도시하였다. 입력전력이 증가함에 따라 전자의 밀도는 선형적으로 증가하고 온도는 거의 일정함을 볼 수 있다. 그림 7에 압력에 따른 전자의 밀도, 온도와 플라즈마 전위를 도시하였다. 압력이 낮아지면서 밀도는 감소하고 플라즈마 전위와 전자의 온도가 감소함을 볼 수 있다. 입력전력 300 W, 압력 5 mTorr에서 측정된 플라즈마 변수의 공간분포의 경우, 중심부에서 멀어

지면서 플라즈마 전위 및 밀도가 감소하였으며 r=8 cm에서의 값은 각각 중심 최대치의 35% 및 80% 정도로 관측되었다. 전자 온도의 경우는 반경 반향에 따른 변화가 미약하였다. 축 방향 변화의 경우, 전자 밀도의 최대점은 표피효과에 의해 중심보다 RF윈도우 쪽에 치우쳐 z=4 cm 정도에서 형성됨이 관측되었다.

3. 산화막 식각

산화막 식각에서 실리콘에 대한 선택도는 실리콘 표면에서의 플루오로 카본 폴리머의 증착과 원자상 플루오린에 의한 화학적 식각(Ion Assisted Chemical Etching)의 경쟁에 의해 결정된다[4]. 서론에서 언급한 고밀도 플라즈마 발생 장치는 모두 저압에서 고밀도의 플라즈마를 발생하고 이온화율이 높으며 이온의 에너지를 조절할 수 있다는 등의 장점이 있으나, 과도한 플루오린의 발생으로 폴리머막의 증착률이 낮고 증착된 폴리머내에 F이 많이 함유되기 때문에 Si에 대한 SiO₂막의 선택도가 저하되는 문제점을 지니고 있다. 폴리머막의 증착에

있어서 CF_x 래디칼이 선인자(precursor)로 작용하는 것으로 여겨지고 있으며 증착된 폴리머막 내에 F가 많이 함유될수록 폴리머막이 스퍼터링되는 속도가 빠르므로 고선택도의 산화막식각을 위해서는 CF_x 래디칼과 F의 발생비를 조절하여 최적화시키는 것이 필요하다[5][6][7][8][9]. F과 CF_x 래디칼들의 농도를 제어하기 위한 방법으로는 주방전을 적절한 on, off 시간으로 변조(modulation)하는 방법, 반응가스에 수소를 첨가하는 방법, 챔버벽을 가열하는 방법 등이 있다.

본 실험에서는 bias modulation을 통하여 폴리머의 증착 및 식각을 조절하여 산화막 식각시 실리콘에 대한 선택도를 개선하는 방법을 모색하였으며 반응가스 C₄F₈에 H₂를 첨가하여 F의 양을 줄이고 CF_x 래디칼의 농도를 증가시킴으로써 선택도를 향상시키는 실험을 수행하였다.

3.1 바이어스 변조(Bias modulation) 효과

주방전을 변조(modulation)하는 것은 CF_x/F의 비를 증가시켜 폴리머막의 증착속도를 높이고 스퍼터링되는 속도를 낮춤으로써 산화막을 식각할 때 선택도를 높이기 위함이나[5][6], 폴리머가 많이 형성되는 환경에서 식각이 이루어지므로 챔버 벽면이 폴리머증착에 의해 오염되고 particulate가 더 많이 형성되며 식각된 패턴에 남은 증착된 폴리머막을 제거하기 어렵다는 문제점이 있다.

Bias변조는 폴리머의 증착 속도와 스퍼터링 속도가 결정된 환경에서, 폴리머의 의도적인 증착과 식각의 반복을 통해 시평균적으로 산화막이 식각 되는 조건에서 실리콘위에서의 폴리머 증착점을 조절하기 위해 제안되었다. 증착과 식각의 반복 및 시간 조절은 기관 바이어스의 on-off 시간 조절로 가능하다. 우선 바이어스가 없는 상태에서는 입사이온들의 에너지가 플라즈마 전위 정도에 불과하므로 산화막이나 실리콘을 식각하지 못하고 주로 증착이 일어난다. 그 다음, 이온들이 비교적 높은 에너지로 입사될 경우, 증착된 막은 물리적 또는 화학적 식각이 일어나게 된다. 이때, 폴리머 막이 충분히 두꺼울 경우, 폴리머 막의 식각은 기관의 종류에 무관하게 진행된다. 그러나 폴리머의 식각이 진행되면서 계면과의 반응이 가능할 정도가 되면, 산화막 위에서는 산소 입자들이 이온충격에 의해 계면 플루오로카본 폴리머내의 탄소와 반응, CO, CO₂와 같은 휘발성 화학종을 형성하기 쉬우므로 실리콘 위에서보다 훨씬 효과적인 폴리머의 제거를 기대할 수 있다. 이러한 선택적인 폴리머 제거는 선택적인 산화막/실리콘 식각으로 이어지게 된

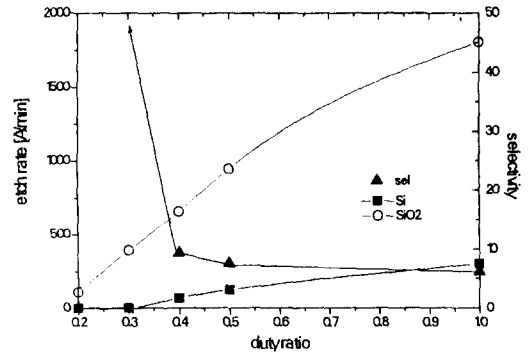


그림 8. duty ratio에 따른 선택도의 변화; C₄F₈플라즈마, 600 W, -200 V, 10 mTorr 전극간격 = 15 cm, 변조주파수 = 100 Hz.

다. 이때 식각 선택도와 식각 속도는 바이어스 전위의 최대치, 변조 주파수 및 duty ratio에 의해 결정될 것이다. 고밀도 플라즈마 발생장치의 경우에는 거의 주 방전에 의해 플라즈마 밀도와 래디칼들의 분포가 결정되므로 Bias를 변조하는 방법은 주 방전 상태에 영향을 주지 않으면서도 선택도의 식각을 가능하게 한다.

그림 8는 변조 펄스의 주파수를 100 Hz로 일정하게 한 상태에서 duty ratio를 변화시켜 가면서 식각 속도를 측정된 결과를 보여준다. 따라서 on-off 시간의 절대값은 변화하고 그 비율이 일정하게 유지되는 경우이다. duty ratio가 작아짐에 따라 선택도가 개선되고 0.3이하 일 때 선택도가 무한대가 됨을 볼 수 있다. 식각 선택도의 증가와 함께 산화막의 식각속도가 감소하는 문제점을 가지고 있으나 식각 초기에는 bias를 변조하지 않고 산화막의 대부분을 식각하고 마지막 단계에 bias를 변조하여 고 선택도 식각을 하는 다 단계 식각공정에 채용될 수 있는 공정으로 사료된다.

3.2 수소(H₂)첨가 효과

그림 9은 C₄F₈플라즈마에 H₂를 첨가하였을 때 수소 첨가비와 기관 위치에 따른 Si와 SiO₂의 식각률과 선택도의 변화를 도시한 것이다. 표시된 수소 첨가비는 수소의 분압에 해당된다. 전극간의 거리가 10 cm일 때에는 식각률은 가장 높으나 선택도가 수소가 50% 첨가되었을 때 8정도까지 향상됨을 볼 수 있다. 수소 첨가비가 증가함에 따라 SiO₂의 식각률은 계속 감소하고 Si의 식각률은 수소가 50% 첨가 되었을 때 최소값을 갖고 그 후 다시 증가함을 볼 수 있다. 전극간격이 12.5 cm일 때

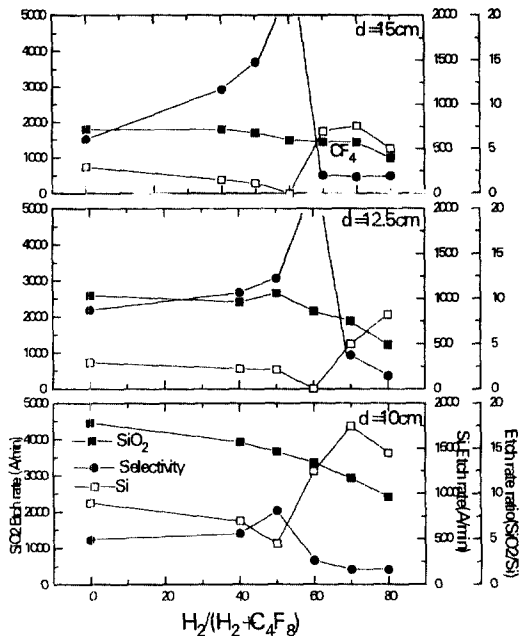


그림 9. 수소첨가비와 전극간격에 따른 식각률과 선택도의 변화, C₄F₈+H₂플라즈마, 600 W, -200 V, 10 mTorr, 총유량 = 43 sccm.

에는 전극간격이 10 cm일 때와 비슷한 경향을 보이나 선택도가 수소가 60%첨가 되었을 때 무한대가 되었다. 전극간격이 15 cm일 때는 전극간격이 12.5 cm일 때와 유사한 경향을 보였고 식각률이 조금 감소하였다. 전극간격이 어느정도 이상이 될 때 선택도가 향상되는 것은 평면형 ICP의 전력전달이 표피효과에 의해 쿼츠창 근처에 국한되어 첨가한 H가 F와 반응하여 형성된 HF가 확산영역(diffusive region)에서 재해리(redissociation)가 일어나지 않기 때문으로 생각된다. 생성물의 재해리는 ICP를 포함한 고밀도 플라즈마 발생 장치가 갖고 있는 공통적인 문제점인데 화학 반응이나 식각에 의한 생성물이 플라즈마 밖으로 빨리 배기되어야 재해리를 막을 수 있고 이는 확산영역에서 만족되므로 확산영역에서 고선택도를 얻을 수 있다[10]. 본실험에서는 전극간격이 12.5 cm 이상일 때 높은 선택도를 얻을 수 있었으나 공정압력, 유량, 챔버벽면의 상태 등에 따라 결과는 다르게 나타났다. 수소가 60%이상이 첨가되었을 때 Si의 식각률이 다시 증가하는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 아직 명확하지 않으나 H₂를 첨가함에 따라 HF와 F원자가 증가하고 HF + e → H + F + e, H + HF* → H₂ + F반응에 의해 F원자가 재형성되기 때문이라는 견해가 있다

[11]. 재해리 촉진의 중요한 이유로 생각되는 것은 수소 첨가에 따른 전자온도의 증가이다. 일정한 전력이 투입되는 상태에서 플라즈마내의 하전입자 균형을 고려하면, 임계 이온화 에너지가 큰 가스일수록 같은 전자온도에서 전자-이온쌍의 생성율이 감소하므로 하전입자의 상대적인 손실률이 커지게 된다. 따라서 플라즈마내에서는 전자온도의 증가를 통해 균형을 유지하려는 경향을 띤다. 이는 압력 감소에 따른 전자 온도의 증가(밀도는 감소)와 유사한 메커니즘이다. 전자의 온도가 증가하면 해리 과정이 더욱 활발해지므로 HF의 재해리 또는 F 생성율이 증가하고 실리콘의 식각속도는 증가하게 된다. 이러한 사실은 플라즈마 프로세스에서 적절한 비활성 기체의 사용을 통한 해리 과정의 제어 가능성을 시사해 준다. 예를 들어 전자온도 증가를 통해 모가스의 해리율을 증가시키거나 높은 문턱 에너지를 가지는 해리 반응을 원할 경우 헬륨과 같은 높은 이온화 에너지를 가지는 가스를 첨가하는 것이 한 방법이 될 수 있다. 수소 첨가는 활성종들의 벽면 손실에도 중요한 영향을 끼친다. 플루오로카본 라디칼들은 챔버나 전극표면에 흡착되어 F원자와 반응한 뒤 다시 탈착되는데 수소의 첨가는 H + F → HF반응을 통해 금속표면의 F를 감소시키므로 라디칼들의 표면으로의 손실을 감소시키는 역할을 한다[12,13].

4. 결 론

평면형 유도 결합 플라즈마 식각장치를 제작하고 전기적 특성과 플라즈마 변수를 측정하였다. 공정변수의 변화에 따른 부하의 변화를 측정하기 위하여 임피던스 정합회로의 capacitor값으로부터 부하의 R, L값을 계산하는 방법을 사용하였다. 공정변수 변화 영역(압력 1-50 mtorr, 입력전력 100-1000 W)에서 R값은 1 W에서 4 W까지 변화하였으며 L값은 1.5에서 2 mH사이의 값을 가졌다. Langmuir probe 실험을 통하여 밀도가 10¹¹/cm³이 상인 고밀도 플라즈마가 얻어짐을 확인하였고 전자온도는 3 eV에서 5 eV사이의 값을 가졌다. Bias변조를 통하여 선택도를 개선할 수 있었으나 식각률이 낮으므로 단일 단계의 식각공정보다는 식각의 마지막단계에서 bias 변조방법을 적용하는 다단계 식각공정에 적합하리라 사료된다. C₄F₈플라즈마에 H₂를 첨가함으로써 산화막 식각률 2000 Å/min에서 실리콘에 대한 선택도가 50:1이상인 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. K. H. R. Krimse, A. E. Wendt, G. S. Oehrlein, Y. Zhang, *J. Vac. Sci. Technol. A*12(4), 1287 (1994).
2. J. Hopwood, *Plasma Sources Sci. Technol.* 1, 109 (1992).
3. J. Hopwood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair, J. J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol. A*11, 152 (1993).
4. G. S. Oehrlein, Y. Zhang, D. Vender, O. Jourbert, *J. Vac. Sci. Technol. A*12(2), 333 (1994).
5. S. Samukawa and S. Furuoya, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, L1289 (1993).
6. S. Samukawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, 6080 (1993).
7. K. Takahashi, M. Hori and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, L1088 (1993).
8. S. G. Hansen and G. Luckman, *Appl. Phys. Lett.* 53(17), 1588 (1988).
9. K. Takahashi, M. Hori, K. Maruyama, S. Kishimoto and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, L694 (1993).
10. T. Fukasawa, A. Nakamura, H. Shindo and Y. Horiike, 1993 Dry Process Symposium, 103 (1993).
11. R. d'Agostine, F. Cramarossa, V. Colaprico and R. d'Ettore, *J. Appl. Phys.* 54(3), 1284 (1983).
12. Y. Hikosaka, H. Toyoda and H. Sugai, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, L690 (1993).
13. Y. Hikosaka, H. Toyoda and H. Sugai, *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, L353 (1993).