

전자 공명을 이용한 저온 플라즈마 식각에 관한 연구

이 석 현* · 김 제 성 · 황 기 용 김 원 규

* 서울大 大學院 電氣工學科

A Study on the Low Temperature Plasma Etching using Electron Cyclotron Resonance

Seok Hyun Lee* · Jae Sung Kim · Ki Woong Whang · Won Kyu Kim

Dep. of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract-A cryogenic electron cyclotron resonance plasma etching system has been built to study wafer-temperature in the silicon etching characteristics. The wafer temperature was controlled from -150 to $+30$ °C during etching using the liquid nitrogen cooled helium gas. Although silicon was etched isotropically in SF₆ plasmas at room temperatures, we found that it is possible to suppress the etch undercut in Si by reducing a substrate temperature without side wall passivation. In addition, the selectivity of silicon to photoresist was improved considerably at a low wafer temperature. Etch rates, anisotropy and selectivity to photo resist are measured as a function of the wafer temperature in the region of -125 ~ 25 °C and rf bias power of 20 W ~ 80 W.

1. 서 론

건식 식각 공정에서 웨이퍼 온도에 따른 식각 특성 연구는 온도 측정의 어려움 때문에 오랫동안 무시되어 왔다. 그러나 최근에는 이런 어려움을 극복하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Keaton 과 Hess는 알루미늄 식각에서 고도의 재현성유 실험하기 위하여 온도의 중요성을 강조하였다[1]. HussIn 등은 식각하는 동안 웨이퍼의 온도 변화에 대하여 연구하였으며 온도 감지 방법으로는 fluoro optic 측정 시스템을 사용하였다[2]. Nakamura 등은 웨이퍼의 온도를 조절하여 온도에 따른 식각 형상을 조사하였다[3]. Namatsu 등은 저압 레지스트 식각에서 전극 온도를 고려하여 개선된 비등방도를 얻었다[4]. Horioka 등은 저온 다결정 실리콘 식각에서 산화막에 대한 선택도의 개선을 보여주었다[5]. 그러나 위의 모든 연구는 수냉을 근거로 한 연구이다. 그러므로 플라즈마로부터 전달되는 에

너지를 충분히 흡수할 수 없다. 최근의 연구는 웨이퍼의 온도를 영하의 온도로 냉각시키는 새로운 개념을 도입하고 있다 [6].

본 연구에서는 액체질소를 사용하여 웨이퍼의 온도를 상온에서 -150 °C 까지 조절할 수 있는 시스템을 제작하였다. 웨이퍼 온도 변화에 따른 다양한 식각 특성을 연구하였으며 특히 식각에 중요한 영향을 미치는 이온에 대한 분석을 수행하였다.

2. 실험 장치

그림 1은 전자 공명을 이용한 저온 식각 시스템의 개략도이다. 실험 장치에 대한 일반적인 설명은 이전에 발표한 논문에서 설명하였다[7]. 본 시스템에서는 실리콘 웨이퍼의 온도를 -150 °C 까지 조절하기 위하여 특별히 제작된 기판 냉각 장치를 장착하였다. 기판 냉각 장치의 구성은 액체 질소를 강제 순환시키기 위한 펌프로서, 온도 조절을 위한 가열 장치 그리고 온도 조절부로 구성된다. 온도 감지는 웨이퍼 뒷면에 있는 스프링의 탄력을 이용하여 열전대(Pt 100 Ω)를 직접 실리콘 웨이퍼에 접촉시켜 측정하였다. 그리고 고주파 노이즈를 제거하기 위하여 저역 통과 필터를 설치하였다. 액체 질소에 의하여 극저온으로 냉각된 스테인레스 전극과 실리콘 웨이퍼 사이의 열전도를 향상시키기 위하여 소량의 헬륨 가스를 웨이퍼 아래로 도입하였다. 즉 액체 질소에 의하여 냉각된 가스 라인유 거친 극저온의 헬륨은 바로 웨이퍼를 냉각시킬 뿐만아니라 웨이퍼와 전극사이의 압력을 부분적으로 상승시켜 웨이퍼와 전극사이의 열전도류 크게 향상시킨다.

그림 2는 실제 실험 조건에서의 웨이퍼 온도 변화를 도시한 것이다. -100 °C인 경우 ± 5 °C 이내의 오차로 웨이퍼의 온도를 유지할 수 있다. 실험이 종료된 후에는 습기가 표면에 응결되는 것을 방지하기 위하여 상온 까지 가열한 후에 웨이퍼를 회수하였다.

3. 실리콘 식각 특성

3.1 기판 온도 변화에 따른 식각 특성

실리콘 식각에서 SF₆ 단일 가스만을 사용하는 경우에는 일반적으로 등방성 식각을 유도하는 것으로 보고 되고 있다[8,9]. SF₆ 플라즈마는 식각시에 측벽 보호막을 형성하지 않기 때문에 등방적으로 식각이 진행된다. 그러나 SF₆ 플라즈마를 이용한 식각은 식각 속도가 크고 감광막이나 산화막에 대한 선택도가 양호하기 때문에 그 이용 범위가 다양하다. 본 연구에서는 SF₆ 플라즈마의 장점을 유지함과 동시에 그 단점 즉 등방성 식각을 개선하기 위하여 저온 식각의 개념을 도입하였다. 저온 식각의 경우에는 높은 선택도와 완벽한 비등방 식각을 SF₆ 단일 가스만에 의하여 수행할 수 있다. 일반적으로 등방성 식각은 반응성이 강한 플루오린 라디칼에 의하여 실행된다. 라디칼은 중성이기 때문에 기판 바이어스 전위에 전혀 영향을 받지 않는다. 따라서 실리콘 웨이퍼 표면 위에서 등방적으로 반응한다. 그러나 저온 식각인 경우에는 웨이퍼의 온도를 저하시키면 표면에서의 라디칼 반응성이 감소된다. 웨이퍼 표면의 온도를 충분히 냉각시키면 라디칼과 실리콘과의 반응을 완전히 제거할 수 있다. 반면에 이온의 경우는 이온의 에너지를 기판 바이어스 전위에 의하여 조절할 수 있기 때문에 웨이퍼의 온도가 극저온이라 하더라도 반응에 필요한 에너지를 적절하게 공급할 수 있다. 또한 이온은 자기 바이어스에 의하여 가속되므로 표면에서 직진성을 갖는다. 따라서 식각의 진행은 방향성을 가지며 비등방 식각을 수행한다. 웨이퍼의 온도와 기판 바이어스 전위를 적절하게 조절하면 라디칼에 의한 영향은 최소로 하고 동시에 이온에 의한 영향을 최고로 하여 이상적인 식각을 달성할 수 있다 [10].

그림 3은 온도에 따른 실리콘 식각 단면을 주사 전자 현미경 (Scanning Electron Microscope : SEM)으로 촬영한 사진들이다. 식각 조건은 초고주파 출력 300W, RF 바이어스 출력(13.56 MHz) 40W, 압력 2×10^{-3} mbar, SF₆ 15 sccm 이며 웨이퍼의 온도를 상온에서 -125 °C 까지 변화시키면서 식각 실험을 수행하였다. 그림 4는 온도에 따른 비등방도를 도시한 그래프이다. -50 °C 이하에서는 거의 수직에 가까운 식각 단면을 보여주고 있다. -50 °C 이하에서는 라디칼이 식각에 거의 기여하지 못하고 대부분이 이온에 의하여 식각이 수행됨을 알 수 있다[11]. 그러나 온도가 감소함에 따라 식각속도가 감소함을 보여준다. 그림 5에 온도에 따른 식각 속도 및 감광막에 대한 선택도를 두 조건의 압력에 대하여 도시하였다. -100 °C 이하에서는 식각속도가 상당히 감소함을 볼 수 있으며 -125 °C 이하에서는 거의 식각이 진행되지 않는다. 즉 40W RF 바이어스 전위에 의하여 가속된 이온도 -125 °C 이하에서는 반응에 충분한 에너지를 공급하지 못함을 알 수 있다. 그림 5에서 온도 감소에 따라

서 감광막에 대한 선택도가 증가하는데 특히 1×10^{-2} mbar 인 경우에는 -100 °C 이하에서 선택도의 급격한 증가를 보여주고 있다. 온도 감소에 따른 선택도의 상승은 감광막의 온도 의존성이 실리콘보다 크기 때문이다. 즉 온도에 따른 감광막의 식각속도 감소가 실리콘 보다 크기 때문이다.

3.2 기판 바이어스 전위에 따른 식각특성

그림 6은 RF 바이어스 전력에 따른 식각 단면이다. 식각 조건은 초고주파 출력 300W, 압력 2×10^{-3} mbar, SF₆ 15 sccm, 웨이퍼 온도는 상온 일때이다. 그림 7은 두가지 경우의 압력에 대한 비등방도를 RF 바이어스 전력에 따라서 도시한 그래프이다. RF 바이어스에 대하여는 비등방도가 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 즉 이온의 방향성을 유도하기 위한 기판 바이어스 전위는 20W 로도 충분하다. 그림 8에 RF 바이어스 전력에 따른 식각속도 및 감광막에 대한 선택도를 도시하였다. RF 바이어스 증가에 따라서 식각속도는 증가하지만 선택도는 감소함을 보여주고 있다. 선택도가 감소하는 이유는 감광막의 식각이 이온 충격에 상대적으로 민감하기 때문이다. 그리고 압력 1×10^{-2} mbar 인 경우는 바이어스 전위에 따라 식각 속도가 계속 증가하는데 비하여 2×10^{-3} mbar 인 경우는 60W 이상에서 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 1×10^{-2} mbar 일때는 이온의 평균 자유 행정이 작기 때문에 기판으로의 이동이 비교적 자유롭지 못하다. 그러므로 바이어스 전위가 크면 클수록 끄러오는 이온의 양이 증가하여 식각속도가 증가한다. 반면에 2×10^{-3} mbar 인 경우는 평균 자유 행정이 이온의 이동에 충분하므로 60W 의 바이어스 만으로도 가능한 이온이 모두 이동하여 그 이상의 바이어스에서는 수렴하게 된다.

4. Actinometry 에 의한 플라즈마 특성 분석

Actinometry 란 반응성 플라즈마에 소량의 불활성 기체를 첨가한 후 분광 분석법에 의하여 불활성 기체에서 나온 스펙트럼과 원하는 반응성 기체의 스펙트럼의 상대적인 비값을 구하여 제 변수에 따른 플라즈마 반응성 기체의 상대적인 밀도를 구하는 방법이다[12,13]. 단 소량의 불활성 기체의 첨가에 따른 플라즈마의 물성 변화는 없는 것으로 가정한다. 본 연구에서는 SF₆ 플라즈마에 아르곤 가스를 첨가하여 조사하였다. 분광 분석은 OMA (Optical Multichannel Analyzer, EG & G)를 사용하여 플루오린과 아르곤의 상대적인 intensity 를 압력과 RF 바이어스 전위에 따라서 분석하였다. 그림 9는 OMA 의 개략적인 구조를 나타낸 것이다. 비교할 peak 의 파장은 플루오린에서는 703.7 nm, 아르곤에서는 750.4 nm 를 선택하였다. 그림 10에 OMA 로 분석한 데이터 중에서 하나를 도시하였다. 실험 조건은 초고주파 출력 300W, 압력 2×10^{-3} mbar, SF₆ 15 sccm, 아르

곤 5 sccm, RF 바이어스 40W 이다. 아르곤에 대한 플루오린의 상대적인 값은 약 0.24 이다. 압력에 따른 상대적인 값을 표. 1 에 나타내었다. 압력이 감소함에 따라 오히려 플루오린의 값이 증가함을 관찰할 수 있다. 즉 반응성 입자가 증가하였다. 이는 압력 감소에 따른 이온화율의 증가에 기인하며 ECR 플라즈마에서 나타나는 특별한 현상이다[7]. 일반적으로 반응성 이온 식각에서는 압력이 감소함에 따라 활성종의 수도 감소하며 따라서 식각속도도 감소한다. 그러나 ECR 플라즈마에서는 10⁻³ mbar 근처에서 밀도가 최대값이 되며 10⁻⁴ mbar 영역에서는 다시 감소한다. RF 바이어스 변화에 따른 OMA 시그널의 상대적인 값은 거의 변화하지 않는다. 따라서 RF 바이어스는 이온의 가속 에너지만을 공급할 뿐이고 플라즈마 여기에는 기여하지 못함을 알 수 있다.

5. 결론

SF₆ 단일 가스 플라즈마에 의하여도 높은 선택도 및 비동방도를 갖는 저온 ECR 식각 시스템을 개발하였다. 웨이퍼의 온도를 저하시킴에 따라 라디칼과 이온의 활성을 각각 극소 및 극대화 시켜서 원하는 식각을 수행하였다. 웨이퍼의 온도가 -50 °C 이하로 냉각되면 거의 수직에 가까운 비동방 식각을 유도할 수 있으며 -125 °C 이하에서는 거의 식각이 진행되지 않았다. 온도 감소에 따라 식각 속도는 감소하나 감광막에 대한 선택도 및 비동방도는 개선된다. RF 바이어스 증가에 대하여는 식각속도는 증가하지만 선택도는 감소한다. 그리고 Actinometry 에 의하여 압력 감소에 따른 반응성 기체의 밀도증가를 측정하여 식각 특성과 비교하여 경향성이 일치함을 확인하였다. 저온 ECR 식각은 손상과 오염을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 단일 가스만으로 좋은 식각 특성을 얻을 수 있으므로 초고집적 기억소자의 식각에 적용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] A. I. Kouton, and D. W. Hess, *J. Vac. Sci. Technol.*, B6, 72, 1988
 [2] I. Hussia et al., "In situ silicon-wafer temperature measurements during RF argon-ion plasma etching via fluoroptic thermometry", *J. Phy. D: Appl. Phy.* 20, 1987, pp. 889-896
 [3] M. Nakamura et al., *Proc. Dry Process*, 887, p.78, The Electrochem. Soc., Hawaii, 1987
 [4] H. Nishimatsu et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, 21, 672, 1982

[5] K. Horioka et al., "Highly selective and directional etching of phosphorous doped polycrystalline silicon with tri-level resist mask employing magnetron plasma", 1988 VLSI Technol., Digest of Technical Papers, 1988, pp.81-82
 [6] S. Tachi et al., "Low-temperature reactive ion etching and microwave plasma etching of silicon", *Appl. Phys. Lett.*, 52(8), 22 Feb. 1988, pp. 616-618
 [7] 이석현, 이호준, 황기용, "이온 분석기에 의한 ECR 플라즈마의 특성 분석 및 실리콘 식각에 관한 연구", 전기학회논문지, 권. 호, PP. -, 1992.5.
 [8] Stephen M. Rossnagel, Jerome J. Cuomo and William D. Westwood, *Handbook of Plasma Processing Technology*, Noyes Publication, 1990, pp. 196-232
 [9] Norman G. Einspruch and Dale M. Brown, *VLSI Electronics & Academic Press*, 1984, pp. 218-237
 [10] S. Tachi et al., "Low-temperature dry etching", *J. Vac. Sci. Technol.*, A9(3), May/June 1991, pp. 796-803
 [11] S. H. Lee, et al., "Cryogenic electron cyclotron resonance plasma etching", *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1992, (Accepted)
 [12] J. W. Coburn and M. Chen, "Optical emission spectroscopy of reactive plasmas: A method for correlating emission intensities to reactive particle density", *J. Appl. Phys.* 51(6), June 1980, pp. 3134-3136
 [13] R. A. Gottscho and V. M. Donnelly, "Optical emission actinometry and spectral line shapes in rf glow discharges", *J. Appl. Phys.* 56(2), 15 July 1984, pp. 245-250

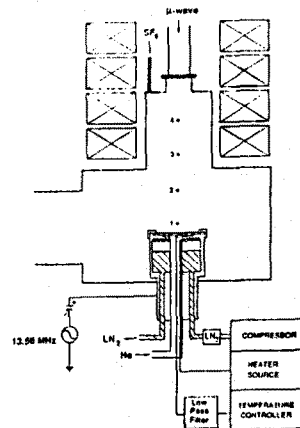


그림 1 저온 ECR 식각 장치의 개략도

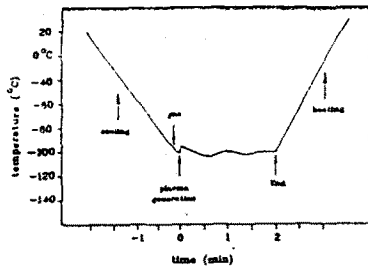


그림 2 식각 시간에 대한 실리콘 웨이퍼 온도 변화

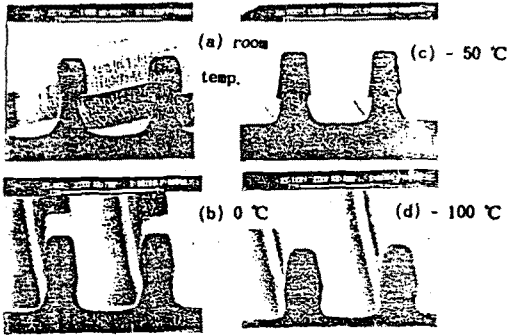


그림 3 실리콘 웨이퍼 온도 변화에 대한 실리콘 식각 단면

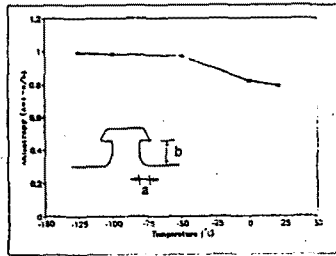


그림 4 기판 온도 변화에 대한 비등방도

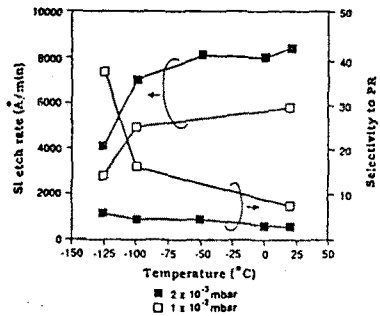


그림 5 기판 온도 변화에 대한 실리콘 식각 속도 및 감광막에 대한 선택도

표 1 OMA 로 측정된 입력에 대한 플루오린과 아르곤 intensity의 상대치

pressure(mbar)	2×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}	2×10^{-2}
F^+ / Ar^+	0.240	0.145	0.105	0.066

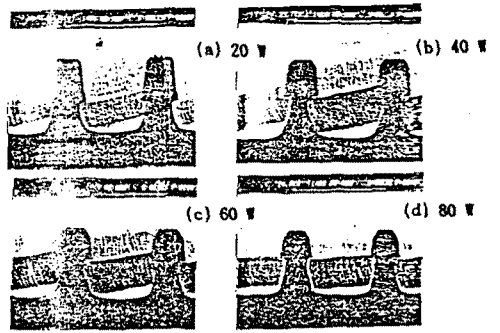


그림 6 RF 바이어스 전력에 대한 실리콘 식각 단면

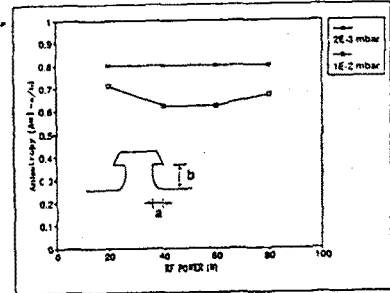


그림 7 RF 바이어스 전력에 대한 비등방도

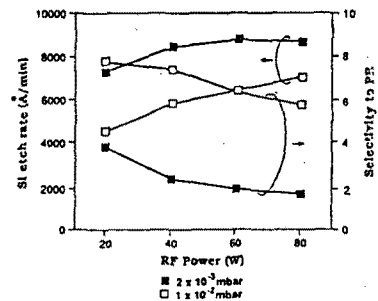


그림 8 RF 바이어스 전력에 대한 실리콘 식각 속도 및 감광막에 대한 선택도

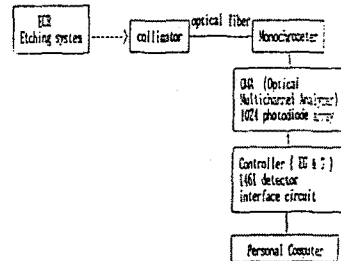


그림 9 OMA 의 개략도

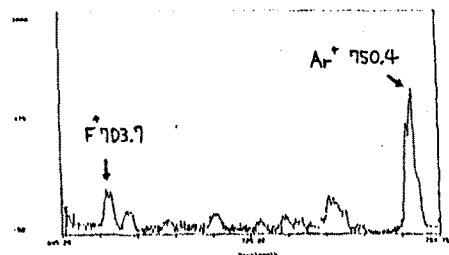


그림 10 OMA 로 측정된 플루오린과 아르곤의 시그널