

불화탄소 플라즈마 식각시 바닥면으로부터 방출된 입자들이 벽면특성에 미치는 영향

민재호, 황성욱, 이겨래, 문상흡
서울대 공과대학 응용화학부

Effect of bottom-emitted particles on the sidewall property in fluorocarbon plasma etching

Jae-Ho Min, Sung-Wook Hwang, Gyeo-Re Lee, and Sang Heup Moon
School of Chemical Engineering, Seoul National University

서론

현대의 반도체 초집적회로가 $0.18\mu\text{m}$ 이하의 선폭과 10 이상의 높은 중횡비를 요구함에 따라 플라즈마 식각공정에서는 식각단면의 정확한 조절과 예측이 요구된다[1]. 불화탄소 플라즈마 식각시, 식각단면의 형태를 결정하는 중요한 요인들중의 하나는 벽면고분자막의 형성이다[2-4]. 실리콘 산화막의 식각시 높은 에너지의 충돌에 의해 스퍼터링 된 입자들은 벽면에 재증착하여 벽면고분자막을 형성시키며 이와 같은 재증착 현상은 몇몇 연구자들에 의해 연구되어왔다. Li[4]는 식각 생성물이 코사인 분포를 가지고 바닥면으로부터 스퍼터링된다고 가정하고 식각 생성물의 재증착이 패턴의 형태에 미치는 영향을 전산모사하였으며 Gray[2]는 Ar^+ 이온 빔과 F 및 CF_2 라디칼 빔을 사용하여 실리콘 산화막으로부터 방출되는 입자들의 각도분포를 보고하였다. Allred[5]은 Auger 이온 분광법을 사용하여 실리콘 산화막으로부터 스퍼터링되어 벽면에 재증착한 입자들을 분석하였다.

그러나 식각패턴내에서 재증착은 이온 및 라디칼에 의한 식각, 폴리머의 증착, 그리고 벽면에서의 이온반사로 인한 micro-trench 등의 식각현상과 동시에 일어나기 때문에 재증착만의 현상을 독립적으로 관찰하기 힘들고 수백 nm 크기의 작은 벽면은 분석의 한계가 있기 때문에, 재증착의 명확한 메카니즘과 재증착으로 인한 벽면특성의 변화에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 이번 연구에서는 다양한 식각현상의 독립적인 관찰과 효과적인 벽면의 표면분석을 위해 고안된 패러데이 상자와 특수하게 설계된 식각기판을 사용하여 CF_4 , CHF_3 , 그리고 C_4F_8 플라즈마 식각시 바닥면으로부터 방출되는 입자의 재증착이 벽면의 특성에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

실험

식각실험은 Fig 1(a)의 transformer coupled plasma (TCP) etcher에서 수행되었다. TCP etcher에 장착된 패러데이 상자는 도체 벽면과 grid로 만들어진 윗면으로 만들어졌으며 플라즈마 식각시 grid에 평행한 방향으로 전기장을 형성시켜 이온을 상자 내부로 수직으로 입사시키기 때문에 실제 식각공정과 비슷한 라디칼 환경에서 원하는 각도로 ion을 wafer에 입사시키는 식각실험을 가능하게 하여 식각후의 벽면과 바닥면의 특성을 쉽게 연구할 수 있게 해준다. Fig. 1(b)는 바닥면으로부터의 스퍼터링된 입자들의 재증착 현상을 관찰하기 위해 특별히 고안된 기판이 장착되어 있는 패러데이 상자의 내부를 나타낸다. Sidewall(A)는 plasma로부터 패러데이 상자내부로 확산되어 들어온 라디칼들의 영향 뿐만 아니라 이온의 충돌에 의해 bottom(B)로부터 방출된 입자들의 영향을 받는 반면에 sidewall(B)는 barrier plate 때문에 bottom(B)로부터 방출된 입자들의 영향을 받지 않는다. 따라서 식각후에 sidewall(A)와 sidewall(B)의 표면분석을 통해서 바닥면으로부터 스퍼터링된 입자들의 재증착의 영향을 관찰할 수 있다.

벽면과 바닥은 5000\AA 두께의 실리콘 열산화막이 입혀진 p-type 실리콘 웨이퍼를 사용하

였고 barrier plate는 0.1 mm 두께, 4 mm 높이의 스테인레스 철판을 사용하였다. 5 mTorr의 압력에서 4 sccm의 유량의 CF_4 , CHF_3 , 그리고 C_4F_8 가 식각가스로 사용하여 실험하였다. Source power 와 bias voltage는 각각 400W, 400V로, 전극온도는 25 °C로 고정시켰으며 8분간 식각하였다. 식각가스의 종류에 따른 플라즈마 상의 라디칼의 농도차이를 관찰하기 위해 optical emission spectrometer를 이용하였고 식각후의 벽면과 바닥면의 식각속도를 관찰하기 위해 thickness-meter를 사용하였다. 또한 벽면 실리콘 산화막의 식각정도와 벽면의 거칠기를 관찰하기 위해 Fourier transform infrared spectroscopy와 atomic force microscopy를 사용하였다.

결과 및 토의

Fig. 2는 CF_4 , CHF_3 , C_4F_8 플라즈마의 OES의 발광피크의 크기로부터 얻은 F (704 nm) 및 CF_2 (약 270 nm 의 broad band) 라디칼의 상대적인 농도를 나타낸다. 일반적으로 F 라디칼은 SiO_2 의 식각에 기여하고 CF_2 라디칼은 식각을 방해하는 불화탄소 고분자막의 형성에 기여한다고 알려져 있다[3]. 그림에서 볼 수 있듯이, F 농도는 CF_4 플라즈마가 CHF_3 , C_4F_8 플라즈마에 비해서 2배가량 높고, CF_2 농도는 C_4F_8 플라즈마가 CHF_3 , CF_4 플라즈마에 비해서 6배가량 높았다. 이와 같은 식각가스의 종류에 따른 F 및 CF_2 라디칼의 농도는 벽면과 바닥면의 식각특성에 중요한 영향을 미친다.

Fig. 3는 세가지 가스를 사용하여 식각한 후에 측정된, 바닥면으로부터 방출된 입자의 영향을 받는 sidewall(A)와 영향을 받지 않는 sidewall(B)의 증착속도를 나타내고 이는 식각후의 두께 변화를 식각 시간으로 나누어 결정하였다. 플라즈마의 종류에 상관없이 sidewall(A)의 증착속도는 sidewall(B)에 비하여 컸는데, 이는 이전의 연구에서 설명하였듯이[6], 바닥면으로부터 방출된 입자는 벽면에 재증착하여 불화탄소고분자막을 형성을 유도한다는 것을 의미한다. OES 결과에서 알 수 있듯이, sidewall(B)의 경우 F 농도가 상대적으로 큰 CF_4 식각의 경우에는 음수의 deposition rate, 즉, 식각이 일어났다. 반면에 F 농도가 상대적으로 작은 CHF_3 , C_4F_8 식각의 경우에는 반대로 증착이 일어났으며 특히 CF_2 의 농도 큰 C_4F_8 식각의 경우는 매우 큰 증착속도를 보였다. 이는 바닥면으로부터 재증착의 영향을 받지 않는 벽면의 경우, F은 벽면의 화학적 식각에, CF_2 radical은 고분자막의 증착에 큰 기여하였기 때문이다. 또한 Fig. 4를 통해서, 식각가스의 종류에 따른 sidewall(A)의 증착속도는 CF_2 라디칼의 농도에 의해 결정된다는 확인할 수 있었다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 바닥면에서 방출되는 입자의 재증착의 영향을 나타내는, sidewall(A)와 sidewall(B)의 증착속도의 차이인 'redep-effect'는 C:F 비율이 큰 가스 일수록 (CF_4 , CHF_3 , C_4F_8 의 순서) 작았는데 이는 바닥면(bottom(A))의 식각속도와 관련된다. 즉, 바닥면의 식각속도가 빠를수록 bottom으로부터 sputtering되는 particle의 양이 많기 때문에 벽면에서의 재증착 속도가 증가하여 redep-effect가 커지게 된다. 이는 바닥면의 식각속도와 redep-effect 사이의 관계를 보여주는 Fig. 5에서 검증할 수 있었다. CHF_3 의 경우는 CF_4 , C_4F_8 의 경우와는 다르게 바닥면의 식각속도에 비해 redep-effect가 작았는데 이는 바닥면으로부터 스퍼터링 되는 C_xF_y 입자들의 일부가 sidewall surface에서 H와 반응하여 휘발성이 강한 입자가 되어 재증착하지 못하기 때문이다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 벽면고분자막의 형성에 있어서 바닥면으로부터의 재증착의 기여정도를 나타내는, sidewall(A)의 증착속도에 대한 redep-effect의 비율은 C:F 비율이 큰 식각 가스일수록 작은 값을 보였다. 이는 C:F 비율이 큰 식각가스 일수록 바닥면으로부터 스퍼터링된 입자의 재증착보다는 플라즈마로부터의 라디칼의 증착이 벽면고분자막의 형성에 큰 비율을 차지한다는 것을 의미한다.

이와 같은 식각가스 종류에 따른 재증착과 증착의 다른 기여도가 벽면의 표면거칠기에 어떠한 영향을 미치는가를 알기 위해 AFM을 사용하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 세가

지 식각가스의 경우 모두 sidewall(A)가 sidewall(B)보다 표면거칠기가 컸는데 이는 이전에 연구에서 보고하였듯이[6], 바닥면으로부터 스퍼터링 된 입자의 재증착이 벽면고분자막의 형성을 가속시켜 표면을 거칠게 만들기 때문이다. 여기서 주목할 것은 C:F 비율이 큰 가스를 이용한 식각일수록 벽면고분자막의 두께가 두꺼워짐에도 불구하고 표면의 거칠기는 작아진다는 점이다. 이는 불화탄소 플라즈마 식각시 벽면의 거칠기는 증착된 벽면고분자막의 두께가 아니라 바닥면으로부터 스퍼터링된 입자의 재증착의 효과를 나타내는 redep-effect에 의해 결정된다는 것을 의미한다.

앞서서 설명한 thickenss-meter를 사용한 두께 측정결과는 식각후에 생성된 고분자막의 두께 변화와 고분자막 아래에 존재하는 실리콘 산화막의 식각 정도를 함께 포함하기 때문에 Fig. 3의 증착속도는 고분자막의 변화와 실리콘 산화막의 변화에 대한 정보를 독립적으로 제시해 주지 못한다. 따라서 우리는 FT-IR을 사용하여 식각후 Si-O 결합의 변화를 관찰하여 벽면 표면의 두가지 막의 독립적인 정보를 얻고자 하였다. Fig. 7은 sidewall(A)와 sidewall(B)의 1100 cm^{-1} 에서 나타나는 Si-O 신축진동 피크를 나타낸다. Background 샘플로 식각전의 벽면을 사용하였기 때문에 피크가 아래로 볼록하다는 것은 실리콘 산화막이 식각되었다는 것을 말해준다.

CF_4 식각의 경우에 sidewall(A)가 sidewall(B)에 비해서 피크의 강도가 작은 것은 이전의 연구에서 이미 보고하였듯이 바닥면으로부터 스퍼터링된 입자의 재증착이 고분자막 아래에 존재하는 실리콘 산화막을 F 라디칼에 의한 식각으로부터 보호해주기 때문이다 [6]. CF_4 와는 대조적으로 CHF_3 경우에는 sidewall(A)와 sidewall(B) 모두 Si-O peak가 보이지 않았는데 이는 F 라디칼이 존재함에도 불구하고 실리콘 산화막이 식각되지 않았다는 것을 의미한다. 이는 CHF_3 플라즈마의 H 라디칼이 벽면 표면에서 F 라디칼과 반응하여 F에 의한 실리콘 산화막의 식각을 막아주었기 때문이다. 결과적으로 바닥면으로부터 스퍼터링된 입자들에 의한 실리콘 산화막에 미치는 영향은 나타나지 않았다. 마지막으로 C_4F_8 플라즈마의 경우는 F 농도가 CHF_3 플라즈마에 비해 작지만 hydrogen 효과가 없기 때문에 아래로 볼록한 Si-O peak가 나타났고 이는 CF_4 에 비해 벽면고분자막이 7배나 두꺼움에도 불구하고 실리콘 산화막의 식각이 발생하였다는 것을 의미한다. 이러한 실리콘 산화막의 식각정도는 CF_4 경우에 비해 작았고 이는 표면에 두껍게 형성된 벽면고분자의 영향 때문이다. 이러한 두꺼운 벽면고분자막의 존재는 두께 측정결과 뿐만 아니라 1240 cm^{-1} 에 나타나는 CF_x absorption band로부터 확인할 수 있었다.

감사

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 (NRL) 사업과 초미세화학공정시스템 (ERC) 사업과제로서 수행되었다.

참고문헌

1. J. S. Han, J. P. McVitte, and J. Zheng, J. Vac. Sci. Technol. B **13**, 1893 (1995).
2. D. C. Gray, V. Mohindra, and H. H. Sawin, J. Vac. Sci. Technol. A **12**, 354 (1994).
3. Da Zhang, Mark J. Kushner, J. Vac. Sci. Technol. A **19**, 524 (2000).
4. Y. J. T. Lii, and J. Jorné, J. Electrochem. Soc. **137**, 2837 (1990).
5. Allred, S. Jäckel, C. Mazuré, H. J. Barth, H. Cerva, and W. Hösler, J. Vac. Sci. Technol. B **7**, 505 (1989).
6. J. H. Min, S.-W. Hwang, G.-R. Lee, and S. H. Moon, J. Vac. Sci. Technol. A **20**, in press, Sept./Oct. (2002).

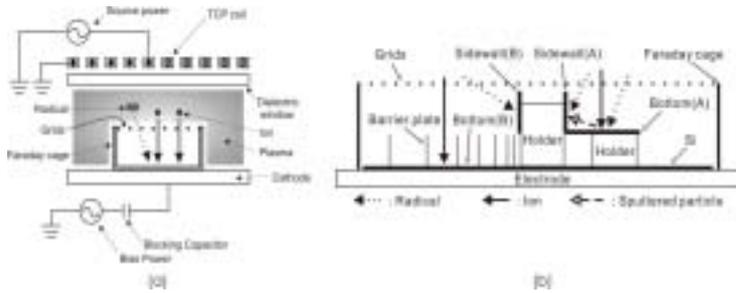


Fig. 1. (a) transformer coupled plasma (TCP) etcher (b) sidewall(A)와 sidewall(B)가 장착된 Faraday cage 내부

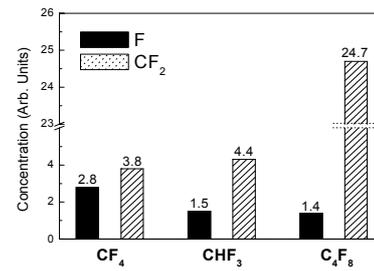


Fig. 2. F 및 CF₂ radical의 농도

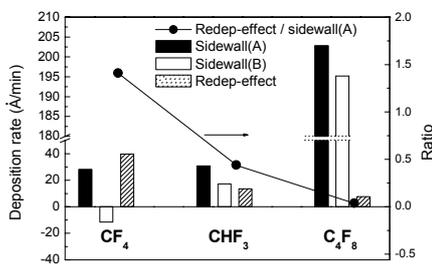


Fig. 3. Sidewall(A)와 sidewall(B)의 deposition rate 및 그 차이인 redep-effect

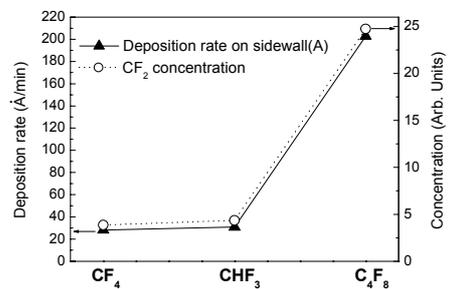


Fig. 4. Sidewall(A)의 deposition rate와 CF₂ radical concentration의 비교

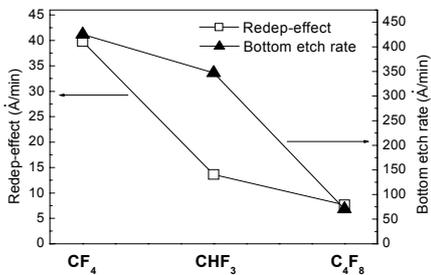


Fig. 5. Redep-effect 와 bottom etch rate의 비교

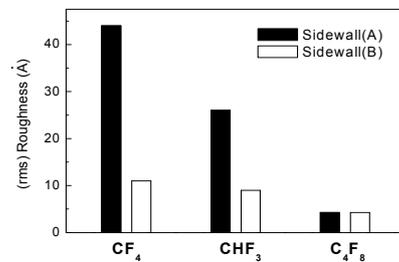


Fig. 6. Sidewall(A)와 sidewall(B)의 (rms) surface roughness

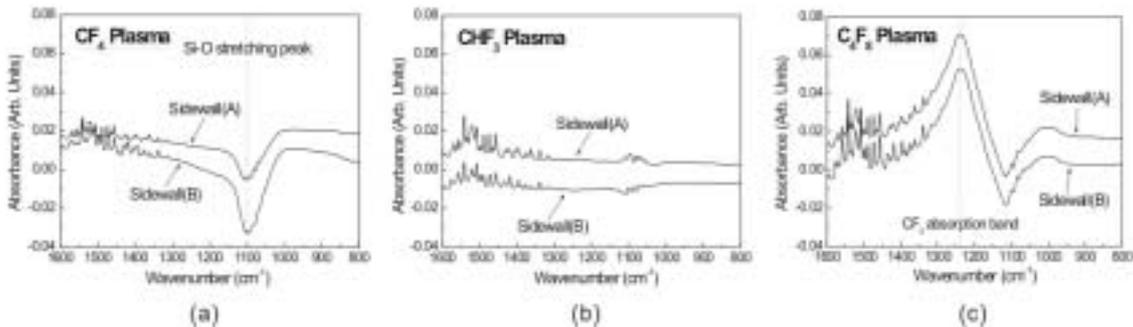


Fig. 7. Sidewall(A)와 sidewall(B)의 infrared spectra. (a) CF₄ (b) CHF₃ (c) C₄F₈