

CHF<sub>3</sub> 플라즈마에서 다공성 저유전율 물질 식각의 각도 의존성

황성욱, 이겨레, 민재호, 문상흡  
서울대학교 공과대학 응용화학부

Angular Dependence of Porous Low-k Material Etch Rate in a CHF<sub>3</sub> Plasma

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

## 서론

저유전율 물질은 0.15 $\mu\text{m}$  이후 세대의 집적회로 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 interconnect 부분의 RC delay에 의한 성능저하를 개선하기 위해 기존의 실리콘 산화막 대신 층간절연물질(ILD)에 도입되고 있다. 저유전율 물질의 도입과 함께 개발된 dual damascene process는 기존 interconnect 공정법과 달리 절연층에 trench와 via hole을 동시에 구현해야 하기 때문에 식각 단면을 정확하게 예측하고 제어하는 것이 중요하다.

식각 단면 형태의 예측을 위하여 기존 ILD 물질인 실리콘 산화막에 대해서는 식각 단면 형태를 전산모사하기 위하여 많은 연구가 이루어져왔다[1,2]. 그러나, 저유전율 물질 식각은 dual damascene process에서 필요로 하는 복잡한 패턴의 식각을 좁은 선포스로 구현해야 하므로, 식각 단면에 대한 전산모사가 훨씬 더 중요함에도 불구하고 이에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다. 이것은 전산모사를 위한 기초 데이터들이 저유전율 물질에 대해서는 거의 없기 때문이다. 그 데이터 중 가장 중요한 것이 식각 속도의 각도 의존성에 대한 정보로서[3], 이는 기판이 trench 및 via hole 등의 패턴을 형성하는 과정에서 sheath를 거쳐 입사하는 이온을 다양한 각도로 경험하며 식각되기 때문이다.

본 연구에서는 다공성 저유전율 물질에 대해 파라데이 상자 기법을 사용하여 식각 중인 패턴과 유사한 환경 하에서 식각 속도의 각도 의존성을 살펴보았으며, 이를 기존 IMD 물질인 실리콘 산화막의 경우와 비교하였다. 이 데이터는 다공성 저유전율 물질의 식각 단면 형태를 예측하고, 원하는 단면 형태로 얻기 위한 최적 공정조건을 도출하는데 큰 도움을 줄 것이다.

## 실험

다공성 저유전율 물질인 Nanoglass를 p-type Si wafer 위에 약 5000Å의 두께로 spin coating 하였고, 굽기 과정(baking)과 경화 과정(curing)을 거쳐 박막 내의 용매를 제거하고 충분한 기계적 강도를 얻었다. 비교를 위해 Si wafer위에 약 5000Å의 실리콘 산화막을 열적으로 성장시켜 준비하였다.

식각 실험은 TCP (transformer coupled plasma) 식각 장치에서 수행하였으며, 이 장치에 대해서는 이전 논문에 자세히 설명되어 있다[4]. 식각 가스로는 CHF<sub>3</sub>를 사용하였으며, 가스 분배기를 통하여 5sccm의 유속으로 공급하였다. 압력은 6mTorr, 소스 전력은 600W, 전극의 온도는 15°C로 고정하여 실험하였다. 바이어스 전압은 -100V (낮은 이온 에너지)와 -400V (높은 이온 에너지)의 두 경우를 살펴보았다.

식각 중 기판으로의 이온 입사 각도(표면에 수직인 방향과 이온 입사 방향 사이의 각도로 정의됨)는 그림 1과 같이 식각 장치 내부에 장착된 파라데이 상자를 사용하여 조절하였다. 파라데이 상자는 그 전기적 특성으로 인하여 내부에 장착된 시편 및 시편 지지대의 배치에 관계없이 이온들은 위쪽의 그리드에 수직으로 입사하게 한다[5]. 그러므로, 충분히 낮은 압력에서 시편 지지대의 각도를 조절함으로써 시편으로의 이온 입사각도를 조

절할 수 있다. 식각 중인 패턴 내부와 유사한 환경이 되도록 파라데이 상자 바닥면에 패턴의 바닥(bottom)에 해당하는 Nanoglass 시편을 위치하였고, 그 위에 위치한 다양한 각도를 지닌 지지대들 위에는 1.0cm X 1.5cm 크기의 Nanoglass 시편들을 두어 지지대 각도, 즉, 이온 입사 각도에 따른 식각 속도를 Spectra Thick 2000-Deluxe (K-MAC)을 사용하여 관찰하였다. 이 때 시편들은 파라데이 상자를 통해 특정한 각도를 지니고 입사하는 이온, 임의의 각도로 입사하는 라디칼, 그리고 바닥면으로부터 튀어나와 입사하는 재증착 물질들을 경험하게 된다. 본 연구에서 실험한 이온 입사 각도는  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$ 이다.

## 결과 및 토론

그림 2는 이온이 시편에 수직으로 입사할 때 Nanoglass와 실리콘 산화막의 식각 속도를 이온의 입사 에너지와 비례하는 바이어스 전압의 함수로 나타낸 것이다. 식각속도의 크기에 차이는 있지만 시편들의 식각속도는 Steinbruchel[6]이 보고한 것처럼 이온에너지의 제곱근에 비례하는 경향을 함께 보이고 있다. Nanoglass는 대부분의 영역에서 실리콘 산화막보다 빨리 식각되었다. 이러한 식각속도의 차이는 두 물질의 밀도 차에 의한 것으로, 큰 공극률로 인하여 작은 밀도를 지닌 Nanoglass가 더 빨리 식각되었다. 이렇듯 식각속도의 크기에는 차이가 있으나 Nanoglass와 실리콘 산화막은 바이어스 전압에 대하여 동일한 경향을 보였다.

그림 3과 4는 파라데이 상자를 적용하여 얻은 Nanoglass와 실리콘 산화막의 이온 입사 각도에 따른 식각속도 경향을 나타낸 것이다. 각 그래프에서 이온 입사 각도  $\theta$ 는 시편 표면의 수직방향과 이온 입사 방향 사이의 각도를 나타내는 동시에 바닥에 위치한 시편과 지지대에 위치한 시편사이의 각도를 의미한다. 그리고 y축에 사용된 Normalized Etch Rate는 이온이 수직으로 입사할 때의 식각속도에 대한 특정 각도  $\theta$ 에서의 식각속도 비이다(이후로부터 언급하는 식각 속도는 Normalized Etch Rate를 의미한다).

그림 3과 4에서 보듯이, 두 물질의 식각속도는 바이어스 전압에 대해 동일한 경향을 보였던 그림 2와 달리 이온 입사 각도에 대해서는 서로 다른 행태를 보인다. 이러한 차이는 그림 3과 4의 정보를 식각 단면의 전산 모사에 적용시켰을 때 동일한 공정 조건에서 서로 다른 식각 단면 결과로 나타나게 된다. 이러한 각도 의존성의 차이를 자세히 살펴보기 위하여 이온 에너지가 낮은 경우(-100V)와 높은 경우(-400V)에 대해 Nanoglass와 실리콘 산화막의 각도 의존성을 직접 비교하여 보았다.

그림 5는 바이어스 전압이 -100V인 낮은 이온에너지의 경우에 대해 Nanoglass와 실리콘 산화막의 식각 속도를 이온 입사 각도의 함수로 나타낸 것이다. 그림에 표시한  $\cos \theta$  곡선은 식각속도가 오직 각도에 의한 이온의 입사 유속 변화의 영향만을 받을 때를 의미한다. 실리콘 산화막의 경우, 각도에 따른 식각 속도는 거의  $\cos \theta$ 의 경향을 따랐다. 즉, 이온 에너지가 낮은 경우, 실리콘 산화막의 식각 속도가 이온의 입사 유속의 영향을 크게 받음을 의미하며, 동시에 CHF<sub>3</sub> 플라즈마를 사용하여 낮은 에너지로 식각 할 때 박막 표면에 형성되는 불화탄소 반응층의 두께는 이온 입사 각도의 영향을 거의 받지 않음을 의미한다. 여기서, 불화탄소 반응층은 불화탄소 플라즈마와 박막의 계면에 형성되어 식각 반응이 실제로 일어나는 층으로서 식각속도는 반응층의 두께가 두꺼울수록 작아지고, 얇을수록 커진다고 보고되어 있다[7]. 이러한 반응층의 두께는 이온에너지의 함수로서 에너지가 클수록 반응층의 두께가 얇아지는 것으로 알려져 있다[7].

한편, Nanoglass의 경우  $60^\circ$ 이하의 낮은 각도에서는 실리콘 산화막과 마찬가지로 식각속도가  $\cos \theta$ 를 따르지만,  $60^\circ$ 보다 높은 각도에서는  $\cos \theta$  곡선 아래로 빠르게 감소하는 경향을 보인다. 이처럼 높은 각도에서 식각속도가 급격히 감소하는 것은 이온 입사 각도가 증가하면서 식각 반응시 형성되는 불화탄소층의 두께도 함께 증가하고, 이로 인하여

이온의 입사 유속을 고려한 것보다 식각 속도가 더 감소하였기 때문이다. 실리콘 산화막과 달리 높은 각도에서 불화탄소층의 두께가 크게 증가하는 것은 Nanoglass 표면의 화학적 조성이 다르기 때문이다. CHF<sub>3</sub> 플라즈마와 같이 불화탄소 고분자 전구체(precursor)들이 풍부한 플라즈마 환경에서 다공성의 Nanoglass 표면에 다수 존재하는 -CH<sub>3</sub> 등의 유기 작용기는 불화탄소 전구체들의 흡착을 원활하게 한다. 따라서, 각도가 증가함에 따라 이온으로부터 시편 표면에 전달되는 에너지 양이 줄어들면서 표면의 -CH<sub>3</sub> 작용기 분해도 잘 일어나지 못하고, 이에 따라 표면에 다수 존재하는 -CH<sub>3</sub> 작용기에 의해 불화탄소층의 두께가 빠르게 증가하게 된다. 그리고 이는 90°에 가까운 각도에서는 불화탄소 고분자층의 증착이 일어나 박막 두께가 오히려 증가한다.

그림 6은 이온에너지가 큰 경우(-400V) Nanoglass와 실리콘 산화막의 각도에 따른 식각속도 경향 나타낸 그래프이다. 두 물질 모두 중간 각도 영역(30° <  $\theta$  < 70°)에서 식각 속도가 cos $\theta$ 보다 컸다. 이러한 over-cosine 경향은 이온과의 충돌에너지에 의해서 표면 입자가 떨어져 나오는 물리적 스퍼터링이 지배적인 영역에서 관찰되는 것으로 알려져 있으며[8], 따라서 그림 6의 결과는 이온 입사 에너지가 증가함에 따라 식각 속도에 물리적 스퍼터링이 기여하는 정도가 증가하였음을 의미한다. 이러한 물리적 스퍼터링의 영향은 실리콘 산화막보다 Nanoglass에서 작게 나타났으며, 이것은 Nanoglass의 경우 실리콘 산화막에 비해 화학 반응에 의한 식각이 차지하는 비중이 매우 크기 때문이다.

높은 각도 영역( $\theta > 70^\circ$ )에서는 두 물질이 거의 유사한 경향을 보이고 있으며, 특히 90°에서는 두 물질에서 모두 증착 현상이 관찰되고 있다. 이것은 높은 에너지를 지닌 이온에 의해 바닥면의 시편에서 스퍼터링되어 나온 입자들이 벽면 시편에 재증착하기 때문이다. 이런 재증착은 모든 각도 영역에서 일어날 수 있지만 낮은 각도에서는 큰 식각 속도로 인하여 그 영향이 무시되는 반면, 높은 각도 영역에서는 식각 속도가 작기 때문에 재증착 영향이 상대적으로 커진다.

## 감사

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL) 사업과 하이닉스 반도체의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

1. Richards, D. F., Bloomeld, M. O., Soukane, S., and Cale, T. S. : Vacuum, 59, 168 (2000).
2. Cale, T. S., Rogers, B. R., Merchant, T. P., and Borucki, L. J. : Comp. Mater. Sci., 12, 333 (1998).
3. Barklund, A. M., and Blom, H.-O., J. Vac. Sci. Technol. A, 11, 1226 (1993).
4. Cho, B.-O., Hwang, S.-W., Kim, I.-W., and Moon, S. H. : J. Electrochem. Soc., 146, 350 (1999).
5. Cho, B.-O., Hwang, S.-W., Lee, G.-R., and Moon, S. H. : J. Vac. Sci. Technol. A, 18, 2791 (2000).
6. Steinbruchel, Ch. : Appl. Phys. Lett., 55, 1960 (1989).
7. Schaepkens, M., Standaert, T. E. F. M., Rueger, N. R., Sebel, P. G. M., Oehrlein, G. S., and Cook, J. M. : J. Vac. Sci. Technol. A, 17, 26 (1999).
8. Lee, R. E. : J. Vac. Sci. Technol., 16, 164 (1979).

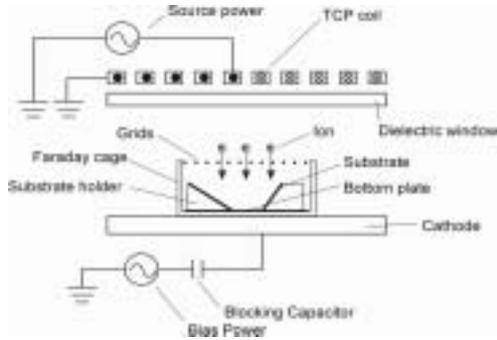


그림 1. 파라데이 상자를 장착한 TCP 식각 장치

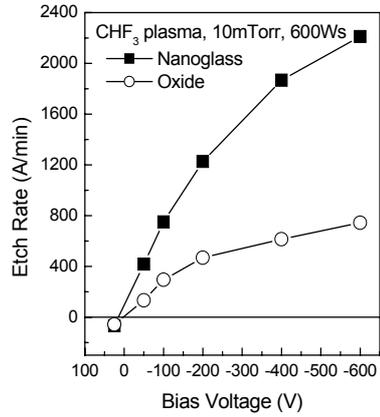


그림 2. 바이어스 전압에 따른 식각속도

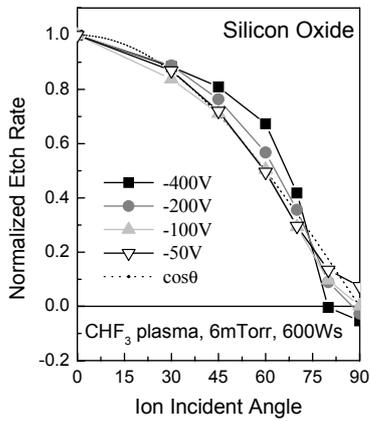


그림 3. 이온 입사 각도에 따른 식각 속도 (실리콘 산화막)

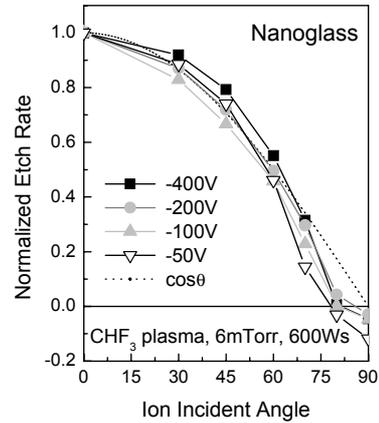


그림 4. 이온 입사 각도에 따른 식각 속도 (Nanoglass)

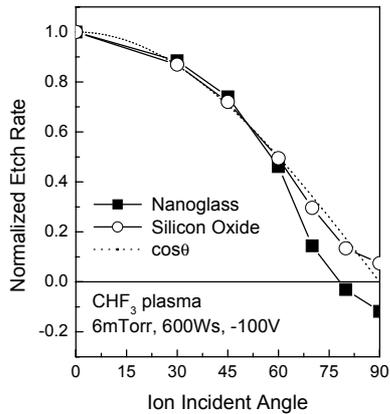


그림 5. 이온 입사 각도에 따른 식각 속도 (-100V)

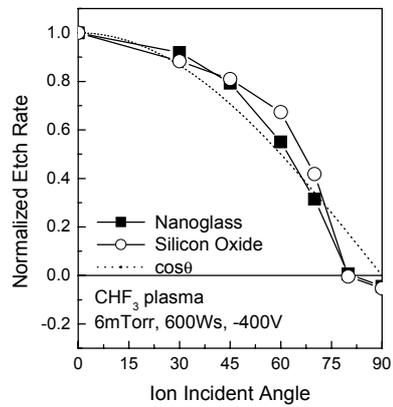


그림 6. 이온 입사 각도에 따른 식각 속도 (-400V)