

원자층을 양파껍질 벗겨내듯 식각(蝕刻)한다

글 | 엄근영 _ 성균관대학교 신소재공학과 교수 gyyeom@skku.edu

1958년 잭 킬비 등의 연구진에 의해 최초로 반도체 집적회로가 개발된 이후 반도체 소자의 연구·개발은 급격하게 진행되고 있다. 이러한 반도체 집적회로의 발전 속도는 무어의 법칙 등에서 나타나는 바와 같이 1년마다 두 배의 집적화가 진행되고 있으며 이와 같이 반도체소자의 고집적화에 대한 요구가 계속됨에 따라, 최근 반도체 집적회로의 설계에서 디자인올이 더욱 감소되어 0.09 μm 이하의 임계치수가 요구되기에 이르렀다. 이러한 기술적 경향에 따라 식각 공정에 필요한 물질의 두께는 매우 정밀하게 조절되어야 하며, 식각 공정에 따른 손상은 최소화되어야 한다. 그러나 현재 사용되고 있는 식각 기술은 식각속도가 매우 빨라 원자층 단위의 식각 속도 조절이 불가능하고, 또한 다량의 수백 eV의 에너지를 가지는 이온을 이용하기 때문에 식각되는 반도체기판이나 특정 물질층에 물리적, 전기적 손상이 생긴다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하고 나노미터급 반도체소자를 구현하기 위해서는 새로운 개념의 식각 방법 및 식각 장치의 개발이 우선적으로 필요하다.

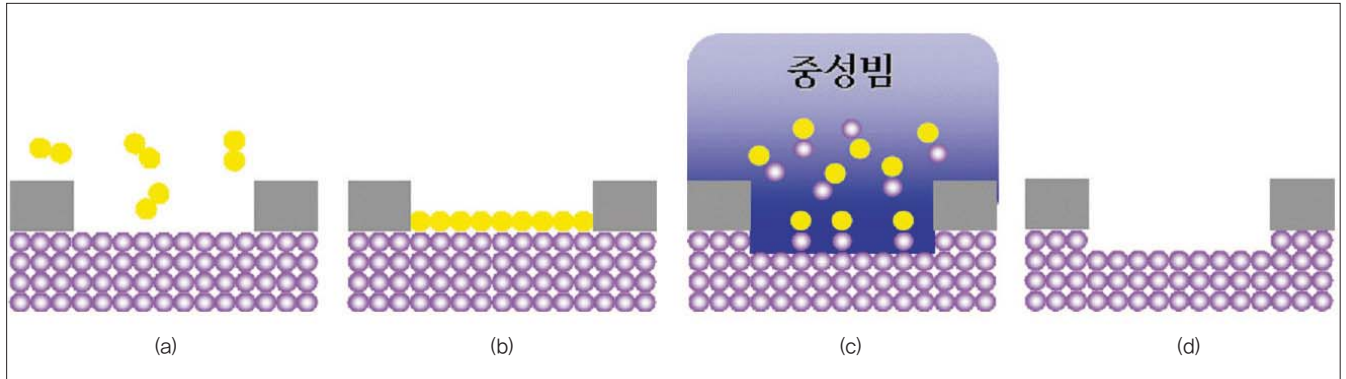
현재 식각 장비, 특정 물질층 손상시켜

반도체 집적회로 제조 공정에서 식각 공정은 웨이퍼 또는 웨이퍼 위에 증착된 박막의 일부분을 제거하는 공정으로서, 포토리소그라피 공정에 의해 형성된 포토레지스트 패턴을 마스크로 하여 포토레지스트로 덮여 있지 않은 부분을 선택적으로 제거함으로써 원하는 형태의 미세한 구조물을 형성하는 기술이다.

식각 공정에는 습식 식각과 건식 식각이 있다. 1970년대까지 반도체 집적회로 공정에서는 패턴을 형성하기 위하여 식각 용액에 웨

이퍼를 넣어 화학반응에 의해 식각이 일어나는 습식 식각을 주로 사용하였으나, 습식 식각은 등방성 식각이기 때문에 집적회로가 점차 미세화됨에 따라 그 한계를 맞게 되었다. 따라서 1980년대부터는 플라즈마내에서 반응성 기체 및 이온의 충돌을 이용하는 이방성 식각인 건식 식각이 일반화되었다. 건식 식각은 대부분 플라즈마를 사용하기 때문에 플라즈마 식각이라고도 부른다. 현재 주로 사용되는 건식 식각장비로는 고밀도 플라즈마 식각장치, 반응성이온 식각장치 등의 이온 강화용 식각장비가 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 식각장비에서는 식각 공정을 수행하기 위한 다량의 이온들이 존재하고, 이들 이온들이 수백 eV의 에너지로 반도체기판 또는 반도체기판상의 특정 물질층에 충돌되기 때문에 반도체기판이나 이러한 특정 물질층에 물리적, 전기적 손상을 일으킨다.

예를 들어 이러한 이온들과 충돌되는 결정성의 기판 또는 특정 물질층의 표면이 비정질층으로 전환되기도 하며, 입사되는 이온들의 일부가 흡착되거나 충돌되는 물질층의 일부 성분만이 선택적으로 탈착되어 식각되는 표면층의 화학적 조성이 변화되기도 하며, 표면층의 원자 결합이 충돌에 의해 파손되어 댕글링 결합으로 되기도 한다. 이러한 댕글링 결합은 재료의 물리적 손상뿐만 아니라 전기적 손상의 발생원인이 되기도 하며, 그 밖에 게이트 절연막의 차지업 손상이나 포토레지스트의 차징에 기인한 폴리실리콘의 노칭 등에 의한 전기적 손상을 야기시킨다. 또한, 이러한 물리적, 전기적 손상 이외에도 챔버 물질에 의한 오염이나 플루오로카본계 반응가스를 사용하는 경우 C-F 폴리머의 발생 등 반응성가스에 의한 표면의 오염이 발생되기도 한다.



〈그림 1〉 원자층 식각의 공정 개념을 나타내는 것으로, 원자층 식각은 (a)반응성 가스의 흡착 (b)여분의 반응성 가스 배출 (c)중성빔을 포함한 별도의 에너지 인가를 통한 식각 부산물 탈착 (d) 식각 부산물 배출의 4단계로 이루어진다.

따라서 나노미터급 반도체소자에 있어서 이러한 이온에 의한 물리적, 전기적 손상 등은 소자의 신뢰성을 저하시키고 나아가 생산성을 감소시키는 요인이 되기 때문에 향후 반도체소자의 고집적화와 그에 따른 디자인윌의 감소 추세에 대응하여 적용될 수 있는 새로운 개념의 반도체 식각장치 및 식각방법에 대한 개발이 필요하다.

원자층 식각도 ‘대면적화 공정’에는 한계

차세대 나노미터급 반도체소자에 적용하기 위해 개발되고 있는 새로운 개념의 반도체 식각방법 중 하나가 원자층 식각(ALD)이다. 원자층 식각 기술은 1990년대에 갈륨비소와 실리콘 등의 식각을 통하여 증명되었다. 이러한 원자층 식각은 〈그림 1〉에서 보이는 바와 같이 반응성 가스의 주입, 반응성 가스의 표면 흡착, 이온빔 또는 엑시머 레이저와 같은 별도의 에너지 인가를 통한 반응물 탈착, 반응물 및 잉여 가스 배기 등의 순서를 통해 이루어진다.

이 때 사용되는 반응성 가스로는 염소 또는 불소 gas와 같은 할로젠족 가스를 주로 사용하게 된다. 그러나 불소 가스를 반응성 gas로 사용할 경우 실리콘과의 자발적 반응을 억제하기 위하여 식각 물질의 온도를 -160°C 이하로 낮추어야 하는 문제점 등이 있으므로 대부분의 원자층 식각 공정에는 염소 가스를 사용한다. 피식각 물질이 상온에서 반응성 gas에 노출될 경우 반응성 gas는 랭뮤어 등온선 흡착에 의해 피식각 물질의 표면층에 단원자층 이상이 흡착되지 않으며, 단원자층이 흡착된 피식각물의 최외각의 표면층은 피식각물을 구성하는 원자간의 결합에서 반응성 gas와 결합된 피식

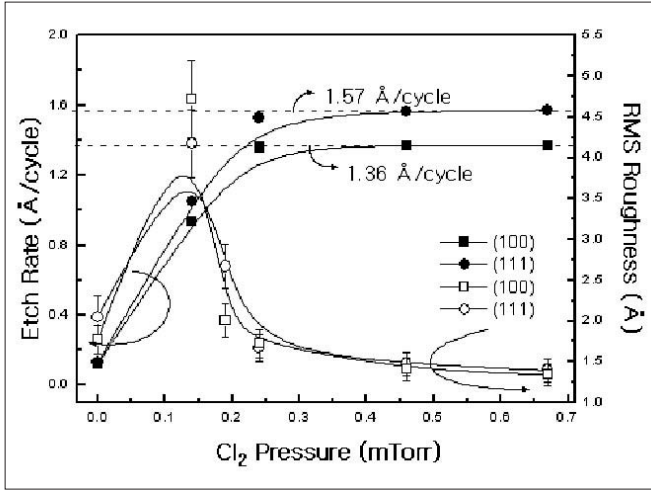
각물의 결합으로 전하가 이동되어 반응성 gas가 흡착되지 않은 피식각물의 원자간 결합을 상대적으로 약하게 만든다.

따라서 반응성 gas가 흡착된 표면에 이온빔 또는 엑시머 레이저와 같은 별도의 에너지를 인가할 경우 반응성 gas가 흡착된 피식각물의 최외각층 결합이 끊어지기보다는 하부층이 끊어지게 되며, 결국 반응성 gas의 흡착과 외부 에너지의 인가를 통한 흡착층의 제거가 이루어지는 한 사이클의 공정을 거침에 따라 원자층 단위의 식각공정을 수행하게 된다.

지금까지 개발된 원자층 식각 공정 기술은 반응성 gas가 흡착된 피식각물의 표면을 탈착시키기 위하여 플라즈마원을 그대로 사용하거나 엑시머 레이저 또는 피식각물에 온도를 순간적으로 높이는 방법이 사용되었다. 그러나 플라즈마원을 그대로 사용할 경우 플라즈마내에 존재하는 전하입자에 의해 공정 후 발생하는 전기적 손상 등을 피할 수 없으며, 피식각물의 온도를 높일 경우 열적 손상을 피할 수 없었다. 또한 엑시머 레이저를 이용할 경우 전기적 손상이나 열에 의한 손상 등은 피할 수 있다는 장점은 있지만 300mm 웨이퍼에 적용하기 위한 대면적화 공정에는 한계를 지니고 있다.

중성빔 이용해 원자층 식각기술 업그레이드

이상의 문제점을 고찰한 결과 원자층 식각이 실제 나노미터급 반도체소자 공정에 적용되기 위해서는 식각 후 발생하는 전기적·물리적 손상이 없어야 하고 대면적화가 가능해야 한다는 것을 알 수 있다. 이를 위해 대면적화가 가능한 중성빔 소스의 개발과 전기적 손상이 없는 중성빔의 이용 및 중성빔의 에너지를 매우 낮은 에

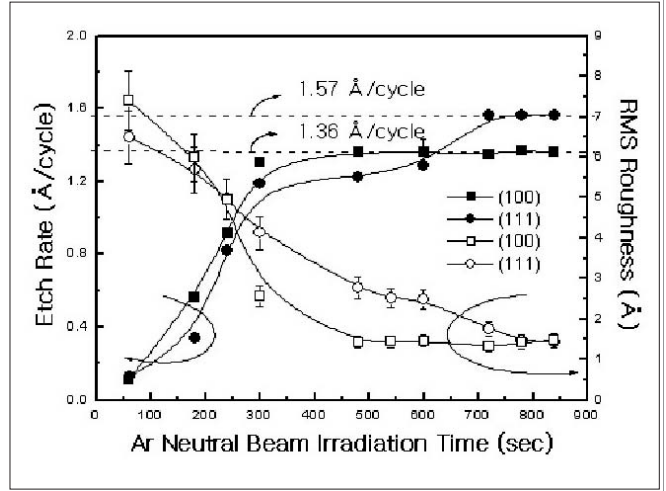


〈그림 2〉 충분한 중성빔의 조사량이 주어지는 상태에서 염소 가스의 압력 변화에 따른 실리콘의 식각 속도 및 표면 거칠기 변화를 나타내는 것으로 일정 압력 이상의 염소 가스가 주어질 경우 단위자층의 식각 속도 및 원자층 단위내의 표면 거칠기를 나타낸다.

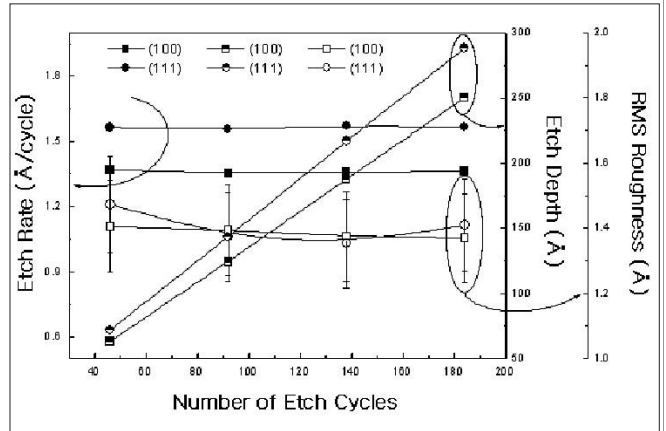
너지(30eV 이하)까지 조절하는 기술이 필수적이다.

현재 테라급나노소자개발사업단의 성균관대학교 플라즈마 장치 및 공정 기술 연구팀에서는 2000년부터 LAFRN(Low Angle Forward Reflected Neutral) 기술을 이용하여 대면적화가 용이한 중성빔 소스를 개발중이며, 이를 이용하여 중성빔을 이용한 원자층 식각을 실시하고 있다. 〈그림 2〉와 〈그림 3〉은 원자층 식각의 주요 인자인 염소 가스의 압력과 중성빔 조사량의 변화에 따른 실리콘의 식각 속도로 표면 거칠기 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 충분한 양의 염소 가스와 중성빔의 조사량이 주어질 경우 실리콘의 결정 방향에 따라 각각의 단위자층에 해당하는 식각 속도를 나타낼 수 있다. 〈그림 4〉는 식각 사이클 횟수의 변화를 통하여 일정한 원자층 단위의 정확한 실리콘의 식각 속도와 식각 깊이를 조절할 수 있음을 나타낸 결과이다. 또한 식각 공정 후 발생하는 표면 거칠기(RMS)도 원자층 단위내로 조절할 수 있음을 나타내는 결과이다. 이 결과는 원자층 식각의 기본 메커니즘에 세계 최초로 중성빔 적용을 통하여 식각 후의 손상 및 정확한 식각 속도의 조절, 그리고 대면적화 등 기존의 결과들에 비하여 월등히 향상된 것으로 기존에 시도된 원자층 식각 기술을 한 차원 끌어올린 것이다.

중성빔을 이용한 원자층 식각 기술은 신개념의 식각기술로 상용화가 이루어질 경우 다양한 분야에서 적용 가능할 것으로 예상된다. 예를 들면 앞에서 언급하였던 바와 같이 나노미터급 반도체소자의 제작뿐만 아니라, 원자층 수준의 식각 깊이 및 손상 정도의 제



〈그림 3〉 충분한 염소 가스의 압력이 주어지는 상태에서 중성빔의 조사량 변화에 따른 실리콘의 식각 속도 및 표면 거칠기 변화를 나타내는 것으로 일정량 이상의 중성빔이 조사될 경우 단위자층의 식각 속도 및 원자층 단위내의 표면 거칠기를 나타낸다.



〈그림 4〉 원자층 식각의 사이클 변화에 따른 실리콘의 식각 속도, 깊이 및 표면 거칠기 변화를 나타내는 것으로 원자층 단위의 정확한 식각 속도와 표면 거칠기를 유지하며 식각 깊이를 조절할 수 있음을 나타낸다.

어가 필요한 양자점 또는 양자선 등의 제작 및 식각 후 손상에 매우 민감한 HEMT 소자, 그리고 정확한 식각 재현성을 필요로 하는 FinFET 소자 등에 적용이 가능할 것이다. ㉔



글쓴이는 한양대학교 금속공학과 졸업 후 서울대학교에서 금속학 석사학위를, 미국 일리노이대학교에서 전자재료공학 박사학위를 받았다.