

평판 용량 결합형 RF 방전 플라즈마 내 미세 오염 입자의 발생 및 행동양식

연 중규<sup>1)</sup>, 황 기용<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>충북 청주시 흥덕구 향정동-1 LG Semicon. ULSI 연구소 <sup>2)</sup>서울시 권아 신원동 산 56-1 서울공대 전기공학부

1. 서론

반도체공정등은 일반적으로 고청정을 필요로 하며, 미립자(particulate)에 의한 오염을 막기 위하여 관련 생산라인이나 실험실에서 높은 등급의 청정실을 운영하고 있다. 그러나, 1991년 Fine Particle Society의 연례회의 보고서에 의하면[1] 외기노출이나 기관처리상의 문제에 의한 미립자 오염과 장비, 공정자체에 의한 미립자 오염의 비율이 30:70인 것으로 보고되었고, 이는 청정실의 운영 등 외적조건의 충족만으로 공정에서 요구되는 청정도를 달성하기에는 한계가 있음을 말하여 주고 있다. 1985년 Spears 등[2]에 의하여 SiH<sub>4</sub> 플라즈마를 이용한 a-Si:H 박막합성 공정중 미립자의 기상성장(gas phase nucleation) 현상이 최초로 관측되었고, 이후 반응성 플라즈마를 이용한 박막 합성공정, RIE(Reactive Ion Etching), MERIE(Magnetron Enhanced RIE), Sputtering, Magnetron Sputtering 등 거의 모든 글로우방전 플라즈마 공정중 미립자의 기상성장 현상이 존재함이 보고되었다.[3][4] 일반적으로, 식각, 증착등 반도체 공정에서의 생산성은 기관상의 미립자 오염여부에 의하여 크게 좌우되고, Device가 고집적화되어 갈수록 killing particle의 입체크기는 더욱 작아진다. 현재, 생산라인에서는 공정장비의 주기적인 해체, 클리닝을 통해, 미립자 오염을 제어하는 방법을 사용하고 있으나, process monitoring의 주기는 생산라인의 효율 극대화와 직결되며, 이를 위하여서는 플라즈마 장비에서의 미립자들의 독특한 행동양식에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 현재까지 일반적인 플라즈마 공정에서 가장 널리 사용되어온 형태인 평판형 용량 결합형 방전장치를 사용하는, PECVD, RIE, Sputtering 등의 대표적인 글로우 방전 플라즈마 공정에서 발생된 미립자의 행동양식과 성질을 실험적으로 관찰하였으며 용량결합형의 RF 방전 플라즈마와 공정중 발생된 미립자들과의 상호작용에 의한 플라즈마 물성의 변화를 관찰 하였다. 또한, 미립자의 기관 흡착등에 의한 오염가능성이 가장 높은 것으로 받아들여지고 있는 방전 직후(Afterglow)의 미립자 거동에 대한 관측이 이루어졌으며, 실리콘 산화막의 반응성 이온식각공정에서의 미립자 발생 정도와 수소침가등 공정변수와와의 관련성과 RF의 on/off modulation의 적용결과와, A1의 평판 Diode형 DC sputtering 공정에서의 미립자의 발생과 ring 전극 접가에 의한 미립자 행동양식의 변화를 관찰 하였다.

2. 실험 방법

그림 1에서 실험에 사용된 플라즈마 반응기와 레이저 산란 실험 장치를 나타내었다. 실험에 사용된 반응기는 일반적인 평판 전극형 플라즈마 발생장치로서, SUS 304 로 제작되었다. 아랫전극을 powered electrode로 사용하였으며, 옆면에서의 방전을 막고 기관이 놓여지게 되는 전극면만이 플라즈마에 노출되도록 하기위해, grounded shield가 장치되었다. 레이저 산란실험을 위하여 5개의 시창을 준비하였으며(재료: glass), RF 전력인가에는 13.56MHz(Advanced Energy, RFX 600)를 사용하였다. RF 전력의 효율적인 인가를 위해 π형의 Matching network를 부착하였다. 레이저 산란 실험에는 Ar 레이저(Spectra Physics, 파장: 514.3nm, 최대출력 2W)를 사용하였으며, 산란광의 검출에는 monochromator(Spex, focal length: 1m), 또는 photodetector(Topcon, BM 7, photocolormeter)를 사용하였다. Ar 레이저 산란실험의 결과로 그림 1과 같은 양 전극간 대칭축상에서의 산란광의 시간적, 공간적변화를 관측하였다.(압력: 0.2mbar, rf power: 60W, 산란각: 90°) 레이저 산란 실험에서의, Mie산란된 빛의 진방산란광과 후방산란광의 세기의 비는 입자크기의 함수가 된다고 알려져 있다. 본 실험에서는 전방산란각(10°)와 후방산란각(170°)에 실리콘 광검출기(photodetector)를 배치하여 Mie 산란 신호의 세기를 측정하였고, 두 값에 의하여 얻어진 angular dissymmetry ratio와 계산된 reference data로부터 미립자의 평균 크기를 구하였으며, 시간에 따른 크기의 변화를 관찰하였다. 본 실험에서 사용된 reference data는 BHME code [5]를 사용하여 계산한 것이며, unpolarized 입사 빛에 대한 10°와 170°에서의 unpolarized 산란광의 비를 구하였고, 실험에 사용된 레이저의 파장은 Ar 레이저의 514.3nm, 미립자는 구형의 단일한 크기를 가지는 탄소 미립자(굴절률: 1.59) + 0.66i [5]로 가정하였다. 방전 직후의 미립자 운동의 관측을 위하여는, 원통형 광학계(cylindrical optics)를 사용하여 아르곤 레이저빔을 수직방향으로 확장시켜 동시에 전극간 전부분에서 미립자들의 운동을 관측할 수 있게 하였다. 기관의 온도를 측정하기 위하여서는 rf 전제간섭에 의한 잡음이 없는 fluoro-optic 온도계(Luxtron 790)를 사용하였다. 미립자들의 운동은 증속도 카메라(LOCAM 51, Japan)로 기록하였는데, 촬영속도를 16-500 frames/초의 범위 내에서 가변하였다.

3. 결과 및 토의

여기 CH<sub>4</sub> 플라즈마를 이용한 DLC(Diamond-like-Carbon) 증착공정에서의 레이저 산란 실험 결과는 발생기구와 행동양식이 크게 다른 두 가지의 미립자군이 반응기내에 존재함을 보여주었는데, 기관이나 전극면, 반응구 벽으로부터 지속적으로 탈착된 미립자들은 일정한 경로를 따라 서로 무관한 개별적인 움직임을 보여준 반면, 기상에서 성장된 미립자군은 집합적인 행동양식을 보이며 반응기내에서 미립자 구름(particulate cloud)을 형성하였다. 공정후 채집된 미립자들을 전자 현미경에 의해 관측한 결과, 두가지의 서로 다른 크기분포를 가지는 미립자군이 존재하였다. 첫째는 비교적 큰 크기의 미립자군으로서 크기는 수십에서 수백 마이크로미터 사이에서 분포하였고, 판상, 막상의 형태를 가진 것으로보아 표면에서의 heterogeneous nucleation과정에서 박막의 형태로 자라던 중 전자유입에 기인한 하전, 스트레스 누적 등의 이유에 의하여 탈착된 것으로 보인다. 다른 하나는, 서브 마이크로미터 영역의 미립자군으로서 완전한 구형의 형태를 가진 것으로 보아 기상에서의 homogeneous nucleation 과정을 통하여 형성된 것으로 보이며 미립자들의 크기는 모두가 비슷하였다. 레이저 산란 결과와 현미경에 의한 미립자들의 관측결과는 일치하며 두 가지의 발생경로와 행동양식이 서로다른 미립자군이 반응기내에 존재함을 말해주고 있다. (그림 2)

용량결합형의 RF 플라즈마 장치를 이용한 Ar 가스 방전에서 기관표면 물질의 스퍼터링에 의해 발생된 미립자구름의 분포를 레이저 산란에 의하여 관측하였다. 발생된 미립자들은 플라즈마와 sheath의 경계면에서 높은 밀도의 cloud를 이루었으며, 시간에 따라 주기적인 분포의 변화를 반복하였다. 미립자 구름의 발생은 플라즈마 물성의 변화를 야기하였으며, 그 결과로 심한 self-bias 전위의 감소현상이 관측되었다. 미립자 구름 분포의 시간에 따른 변화와 같은 주기의 self-bias 플라즈마 전위의 진동현상이 heated Langmuir probe에 의하여 관측되었다. 이 결과는 미립자 표면으로의 음전하 누적에 따른 전체 음전하의 이동도 감소에 의한 것으로 해석된다. 또한 emission spectroscopy를 이용하여 입자오염상태의 Ar 플라즈마와 정상상태의 Ar 플라즈마

마의 방출 선세기 (emission line intensity)의 변화를 관측하였는데, 미립자 구름 발생 시 2차 전자 차폐현상에 의해 높은 문턱 에너지 (threshold energy)를 가진 Ar II line의 세기가 감소하였다. 이상과 같이 플라즈마 전위 등의 물성은 미립자 구름의 형성 시에 크게 변화하며, 미립자 구름의 형성시에는 공정 외부에서 기대하는 플라즈마 상태의 유지가 불가능함을 알 수 있다.

미립자에 의한 기판 표면의 오염은 미립자 구름이 형성되어 있는 방전 중이 아니라 방전직후(afterglow)에 이루어지게 되는데, 미립자의 방전직후 거동을 관측하기 위하여 미립자로부터의 레이저 산란광의 변화를 방전직후에 기록하였다. 기록된 미립자 구름 사진의 분석결과에 의하면 미립자들은 열 경사력(thermophoretic force)과 점성 유인력(viscous drag force)의 균형에 의하여 차가운 표면으로의 동속운동을 보였으며, 평균 이동속도는 주변 온도 경사 (temperature gradient)에 직접적으로 비례하였고, 압력, 미립자들의 크기와 상관관계를 가졌다. 미립자 표면의 잔류전하는 방전직후 즉시 재결합(recombination)하여 미립자의 방전후 거동에는 전기력이 크게 영향을 주지 못하는 것으로 보이며, 미립자들의 운동은 방전직후 반응기 내의 가스흐름에도 크게 영향을 받았다.

실리콘 산화막의 고 선택비 식각을 위한  $CF_4/H_2$  플라즈마 반응성 이온식각 공정(Reactive Ion Etching)에서의 입자생성을 레이저 산란(Laser Light Scattering)방법에 의하여 관측하였다. LLS onset time은 수소 첨가비에 따라 현저히 증가하였는데, 이것은 수소첨가에 의한 불포화종의 증가가 입자생성을 촉진시키기 때문으로 생각된다. Onset time은 표면 상태에 따라서도 달라졌으며, polymer 성장율이 높은 실리콘 기판위에서 짧았고, 이와같은 onset time의 기판의존성은 공정 조건중 상대적으로 낮은 RF power의 경우에 잘 관측되었다. RF power가 높아질수록 입자 생성율은 증가하였고, power의 변화에 따른 onset time의 threshold behavior가 관측되었다. RF square wave modulation방법을 적용한 경우 전극간에 형성되는 입자 trap내의 입자감소로 인한 LLS 신호의 크기의 감소가 관측되었으며, duty ratio의 조절에 따라 고선택비를 유지하면서 식각율의 감소를 최소화하는 조건이 얻어질 수 있음이 보여졌다. RF modulation의 과정에서는 off time의 증가와 on time의 감소가 모두 입자 생성정도의 변화에 영향을 미쳤는데, off time의 증가가 보다 민감한 효과를 가짐이 관측되었다.

#### 4. 결론

용량결합형 RF 플라즈마 장치내에서의 미립자는 반응기 벽면에 부착되어 있었던 박막의 일부나 기상에서 형성된 핵으로부터 성장하여감이 실험적으로 관측되었다. 크기, 밀도의 시 변화에 따라 플라즈마와의 상호작용속에서 주기적인 방전 물성의 변화를 일으킴이 확인되었고, 이에 의하여 미립자 자체의 플라즈마 내 분포도 달라졌다. 방전 off 후 미립자의 거동에서 가장 크게 영향을 미치는 요소는 열 경사력이 관측되었고, 이에 의한 미립자의 방전직후 포집도 가능하리라 보여진다. 또한 실리콘 산화막의 건식식각 공정에서 미립자의 발생이 확인되었고, 이들의 발생정도가 수소함유 가스의 첨가량과 관계가 있음이 관측되었다. 또한 이들의 생성, 성장을 억제하기 위하여 RF modulation방법이 적용되었는데, 선택비등 공정 요구조건의 변화없이 미립자의 발생을 억제하는 효과를 가짐이 관측되었다.

#### 참고문헌

- [1] V. Menon, "Fine Particle Society Annual Meeting", Santa Clara, CA, July, 1991.
- [2] R.M.Roth, K.G.Spears, G.D.Stein, and G.Wong, Appl. Phys. Lett. 46, 253 (1985).
- [3] W.J.Yoo, and Ch.Steinbruchel, J.Vac.Sci.Technol. A 10(4), 1041 (1992).
- [4] G.S.Selwyn and E.F.Patterson, J.Vac.Sci.Technol. A10(4),1053(1992).
- [5] C.F.Bohren, and D.R.Huffman, "Absorption and Scattering of Light by Small particles" (John Wiley & Sons,1983).

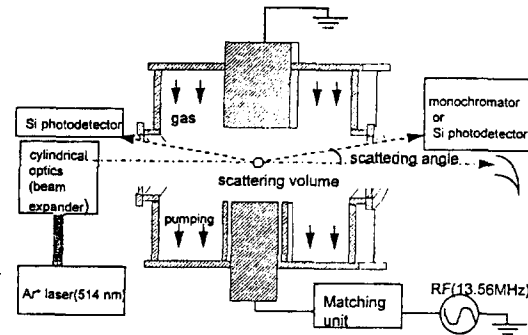


그림 1. 용량결합 RF 플라즈마 장치에서의 레이저 산란실험의 개략도.

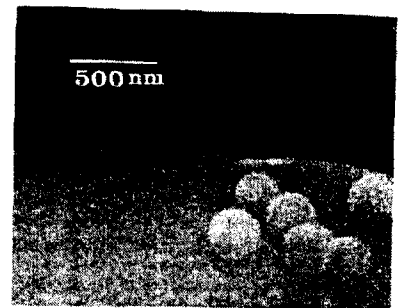


그림 2.  $CH_4$  플라즈마에서 발생된 구형의 미립자들 ( 0.3 mbar, 120 W )