

고밀도 유도 결합 플라즈마를 이용한 박막 증착 장치 개발

주정훈*

*군산대학교 공과대학 재료공학과

초 록

안테나 내장형 유도결합 플라즈마를 마그네트론 스퍼터링 장치에 추가하고 플라즈마의 생성 조건을 제어함으로써 고품질의 박막을 증착할 수 있는 장치의 개발 연구를 수행하였다. 정확한 장치의 성능을 평가하고 앞으로의 개선점을 찾기 위하여 Langmuir probe, OES, RF impedance probe, QMS 등의 플라즈마 진단 도구들을 사용하여 기본 동작 특성 및 공정중 플라즈마의 전자 온도, 밀도, 방출 파장 분석을 통한 입자 상태 분석, 부하 임피던스와 시스템 임피던스 분석을 통한 파워 전달 특성을 평가하고 이에 따라서 장치의 구성 및 동작 조건을 변경 개선하였다. 실험 대상 박막계는 기본 물성 측정을 위한 Al, Ag, TiN, MgO, Si, SiO₂, 등이며 타겟의 크기는 2인치 직경의 원형, 12인치 원형, 5인치 * 25인치 사각형 3가지 이다.

1. 서론

유도 결합 플라즈마는 간단한 구조로 10^{12} #/cm³의 높은 전자 밀도와 3 ~ 5eV의 전자 온도를 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있는 반면 유전체창의 진공쪽에 도전성 막이 증착되면 전자기장을 차폐하여 더 이상 플라즈마에 전력이 전달될 수 없는 단점이 있다. 또한 대형 시스템의 경우 1cm² 당 1kg의 압력을 견딜 수 있으려면 아주 두꺼운 유전체 창을 설치해야 하는 단점을 가지고 있다. 반면 내부 삽입형 ICP는 현존하는 챔버내에 간단히 설치할 수 있다.[1],[2],[3],[4] 본 연구에서는 모두 3가지의 시스템을 직접 구현하여 성능을 평가하였다.

2. 실험 방법

그림 1에 보이는 시스템은 내부 삽입형 안테나를 장착한 유도 결합 플라즈마 시스템의 개략도이다. 유도 결합 플라즈마의 전원은 13.56MHz의 상용 주파수를 사용하였으며, 안테나의 임피던스가 문제가 되는 대형 시스템은 2MHz의 낮은 주파수를 사용하였다. 2인치와 12인치 타겟 시스템의 경우 안테나의 인덕턴스는 약 1.8 μ H 부근이었으며 2인치의 경우 3.5회, 12인치의 경우 1회 감은 안테나를 사용하였다. 안테나의 표면은 금속의 고속 스퍼터링의 경우 금속 안테나를 사용하였고, 기타의 경우 유전체로 수냉식 금속 안테나의 표면을 피복하여 과도한 플라즈마 전위 상승을 억제하였다. 시스템의 플라즈마 진단은 Langmuir probe, OES, QMS, Z-probe를 사용하였으며

5 인치*25 인치 In-Line type sputter system 의 경우에는 전체 데이터를 주 PC 에서

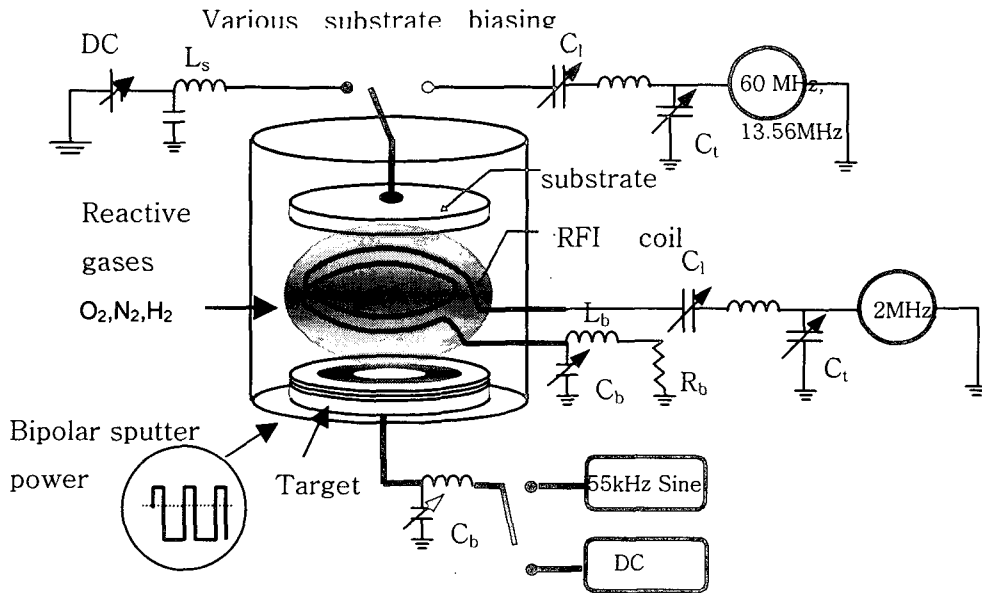


그림 1 내장형 안테나 방식의 유도결합 플라즈마 스퍼터링 장치

LabWindows/CVI 환경에서 자체 개발한 data logging and control center 프로그램을 이용하였다. 이 시스템의 경우 기본 진공도 확보를 위한 크라이오 펌프(Helix technology, CTI-250F, air 3000 l/s) 와 반응성 가스의 공정을 위한 터보분자펌프(Alcatel 5402CP, air 400 l/s) 를 사용하였다. 세 시스템 모두 기본진공도는 열음극 이온게이지로 측정된 결과 1.7×10^{-7} Torr 부근이었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 스퍼터된 입자들의 이온화 과정

연구의 초점은 부가적인 플라즈마를 사용하여 금속 타겟의 경우 이온화율을 얼마나 증가시킬 수 있는가, 그리고 화합물 증착의 경우 반응성 가스의 기판상의 반응 효율을 증대에 대한 평가에 있다. 육안으로 관찰할 수 있는 차이는 그림 2 에 보인 것과 같이 마그네트론 플라즈마만 가동시켰을 때와 유도 결합 플라즈마를 가동했을때의 차이를 볼 수 있다. 기판 전류에서도 마그네트론만 가동시키면 거의 측정값의 한계 이하인 반면 유도 결합 플라즈마를 이용하면 수 mA/cm²에서 수 십 mA/cm²의 높은 이온 전류 밀도를 갖는다. 이를 증착 속도에서 역산한 증착 입자의 유속과 비교하면 이온화율이 60 ~ 90%에 달하는 결론을 얻을 수 있다. 특히 금속 타겟의 경우에는 이온화 에너지가 5eV 내외로 아주 작으므로 높은 이온화율을 얻을 수 있다. 스퍼터링의 경우 가스압력이 1 mTorr ~ 10mTorr 사이인 경우가 많은데 유도 결합 플라즈마 영역의 두께가 5cm 정도라면 1 ~ 5eV 의 운동 에너지를 갖는 스퍼터된 입자들이 전자와 충돌로 효율적으로 이온화되려면 5cm 의 거리에서 충돌을 통한 감속이 이루어져야 한다. 통상 강구 모델의 충돌에서 1mTorr 의 평균자유행로가 5cm 정도 되고 한 번의 충돌에서 10%의 에너지를 잃어 버린다고 하면 5eV 의 입자가 0.025eV 의 열운동 에너지 정도를 가진 입자로 되려면 최소 20 번 이상의 충돌을

경험해야 하므로 20mTorr 이상의 압력과 충분한 기판까지의 거리 확보가 필요하다. 충돌을 통한 감속후 이온이 되면 (-)의 바이어스를 인가한 기판으로 가속되어 입사하므로 증착 속도의 손실은 없지만 이온화가 되지 않은 중성 입자들의 경우에는 비행 방향의 무질서화로 기판 이외의



그림 2 일반적인 마그네트론 스퍼터링 방전(a), ICP Hollow cathode 방전 (b), ICP assisted magnetron sputtering 방전(c)

부분에 증착되어 증착속도의 감소를 가져오게 된다. 따라서 비교적 높은 가스 압력과 충분한 ICP 전력 투입을 통하여 증착 속도의 손실 없는 상태에서 이온의 에너지 조절이 가능하도록 공정 변수의 최적화를 이룰 수 있다.

3-2 플라즈마 모델링

유체 모델을 기본으로 하는 도구를 사용하여 외장 안테나형과 내장 안테나형의 Ar 방전을 수치 모델로 계산한 결과를 그림 3 과 그림 4 에 나타내었다. 주 계산 결과는 전자 온도와

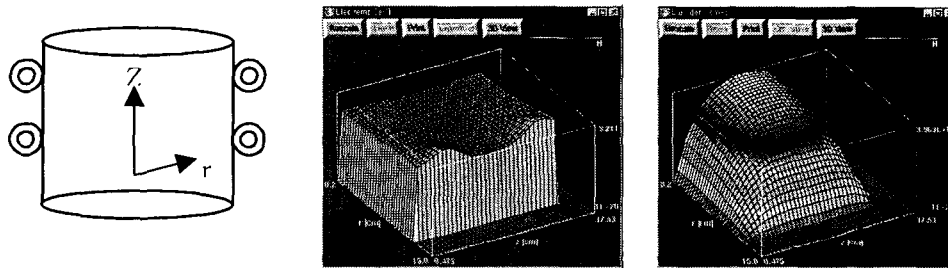


그림 3 외부 안테나형(4회 감은 모델) 유도 결합 플라즈마 시스템의 전산 모사 결과 (전자 온도와 전자 밀도 분포) 10mTorr, Ar, 13.56MHz 600W

밀도인데 전자 온도는 입자 균형식에 의해서 계산되므로 가스의 압력에, 전자 밀도는 에너지 균형식에 관계되므로 투입 전력에 따라 정해진다. 전자 온도는 3eV 내외의 값을 보였으며 전자 밀도는 10^{11}#/cm^3 범위로 계산되었다. 이 값들은 Langmuir probe 로 측정된 값과 잘 일치한다.

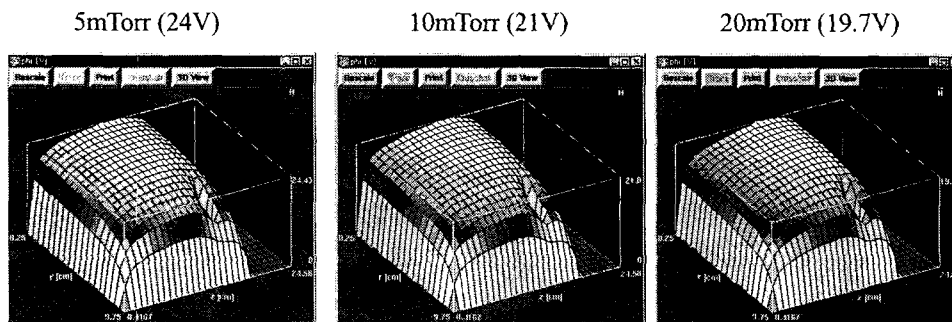


그림 4 내부안테나형 시스템에서 Ar의 아력을 5mTorr, 10mTorr, 20mTorr로 증가시키에 따라 플라즈마 전위가 24V에서 19.7V로 감소하는 경향을 보임

3-3 플라즈마 진단 : Langmuir probe, OES, Impedance

단일 탐침을 이용하여 2 인치 스퍼터링 시스템에서 유도 결합 플라즈마에 의한 전자 밀도와 전자 온도의 반지름 방향의 분포를 구하였다. 측정 결과는 그림 6 과 같다. 마그네트론 음극이 경사지게 설치되어 있으므로 누출 자기장의 영향으로 불균일도가 조금 과장되어 있다. 전자

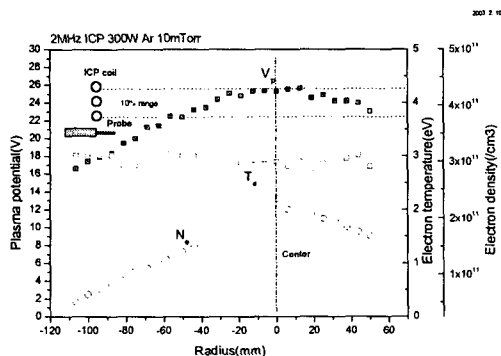


그림 6 Langmuir probe로 측정한 전자 온도와 밀도 분포

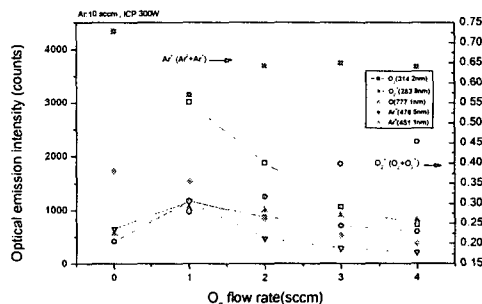


그림 7 OES로 측정한 각 입자들의 발광 강도

밀도 $4 \times 10^{11} \text{ #/cm}^3$, 전자 온도 약 3eV 의 전형적인 결과를 보였다. OES 데이터에서도 산소 혼합량을 증가시키에 따라서 산소 분자 이온의 농도가 비례해서 증가하는 것을 보였다. 실제로 산소 분자의 원자 해리도는 10% 미만인 것으로 조사되고 있으며 O_2^+ 의 발광 강도가 직선적으로 증가하는 것으로 미루어 증착 공정에 큰 영향을 미치는 것은 산소 원자로의 해리가 아니라 분자 이온인 것으로 사료된다.

3-4. 증착된 박막의 표면 거칠기 \square Si, MgO

이상의 장치로 증착된 Si 및 MgO 박막의 표면 거칠기를 AFM 으로 살펴본 결과 기존의 증착 방법에서 얻은 것보다 10 배 좋은 표면 거칠기를 얻었다.[5]

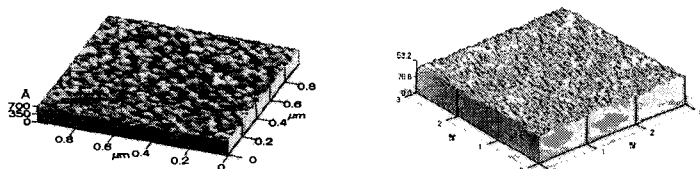


그림 8 AFM으로 측정한 표면 거칠기 (Si의 경우 2nm, MgO(오른쪽)의 경우 0.4nm)

4. 결론

안테나 내장형 유도결합 플라즈마를 이용한 마그네트론 스퍼터링 장치를 개발하였다. Langmuir probe 로 측정한 플라즈마 밀도는 10^{12} #/cm^3 으로 기존의 방법들보다 약 10 배 가량 높았으며 전자 온도는 3eV 부근에서 동작하였다. 이 장치로 Si, MgO 두 가지를 증착해 본 결과 XRD, SEM, AFM 에서 높은 결정성, 향상된 표면 거칠기를 얻었으며 특히 MgO 의 경우 1nm 미만의 값을 얻음으로써 나노미터 크기의 구조로 개선되었음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국기초과학지원연구원의 핵융합 플라즈마 사용자 육성 프로그램의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] A. Mayo, S. Hamaguchi, J. Joo, S. Rossnagel, J. Vac. Sci. Technol B15(4), 1788 (1997)
- [2] Junghoon Joo, J. Vac. Sci. Technol A17(4), 2368 (1999)
- [3] Junghoon Joo, J. Vac. Sci. Technol A18(4), 23 (2000)
- [4] Junghoon Joo, J. Vac. Sci. Technol A18(4), 2006 (2000)
- [5] Yeonghun Han, S.J. Jung, J.-J. Lee, J.H. Joo, Surf. Coat. Technol 174-175, 235 (2003)