한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 45, No. 4, 2012.
http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2012.45.4.168

<연구논문>

반응성 증착용 펄스 플라즈마 공정의 진단

주정훈*

군산대학교 신소재공학과, 플라즈마 소재응용센터

A Diagnostic Study of Pulsed Plasma Process for Reactive Deposition

Junghoon Joo*

Department of Materials Science and Engineering & Plasma Materials Research Center, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

(Received August 17, 2012 ; revised August 28, 2012 ; accepted August 30, 2012)

Abstract

A real-time monitoring of an immersed antenna type inductively coupled plasma (ICP) was done with optical emission spectroscopy (OES) to check the reports that sputtered atom density is decreasing as the ICP power is increased[1,2]. At 10 mTorr pressure of Ar, Mg was sputtered by a bipolar pulsed power supply into 2 MHz ICP which has an insulator covered 2.5 turn antenna. Emitted light was collected in two different positions: above the target and inside the ICP region. With 100 W of Mg sputtering power, the intensities of Mg I (285.06 nm), Mg II (279.48 nm), Ar I (420.1 nm) were increased constantly with ICP power from 100 W to 600 W. At 500 W, the intensity of Mg^+ exceeded that of Mg under PID controlled discharge voltage of 180 V. The ratio of Mg II/Mg I was increased from 0.45 to 2.71 approximately 6 times.

Keywords: Inductively coupled plasma, Sputtering, Optical emission spectroscopy

1. 서 론

반응성 증착법은 화합물을 스퍼터링 타겟으로 하는 경우보다 타겟 비용이 저렴하고 증착 속도가 높기 때문에 선호되고 있는 방법이다. 그러나 히스테리시스 문제, 순금속의 스퍼터링 속도보다 상대적으로 낮은 증착 속도와 공정의 드리프트 때문에 문제점을 안고 있다. 2차적인 플라즈마를 사용하면 기판에 입사하는 입자들 중 일부를 이온화, 해리 할 수 있으므로 보다 낮은 기판 온도에서 우수한 성능의 박막을 증착 할 수 있으므로, 많은 관심을 모으고 있다. 또한 여기에 펄스 공정을 도입하여 높은 플라즈마 전력 밀도에 의한 스퍼터링 타겟 및 기판의 과열 문제 등을 피하기 위한 제안이 펄스 운전이다. 플라즈마를 유지하는데 필요한 전자와 화학반응을 유리하게 조절하는데 필수적인 라디칼의 비율을 조절하는 방법으로도 주효한 것으로 알려져 있다. 따라서 이에 대한 측정도 활발한데, Matsuda 등[1)]이 보고한 바로는 2차 플라즈마인 ICP의 전력이 증가함에 따라서 타겟 원자(Mg)의 방출선 세기가 감소한다고 한다. 방출광의 세기는 식 (1)과 같이 정해지는데, 간과하기 쉬운 부분은 결과적으로 측정 시간 동안에 초점 영역을 지나가는 입자들이 내는 빛을 검출기의 적분 시간 동안 모아서 측정한다는 점이다. 또한 유도 결합 플라즈마의 투입 전력이 증가함에 따라 늘어난 전자-중성종간 충돌로 전자 온도가 감소하고 전자 밀도가 증가하는 현상 때문에 이러한 현상이 발생할 가능성도 있다. 일단 초점 영역 내에 검출 시간 동안 존재하는 발광종의 개수에 대해서 고찰해본다. 여기서 전자 에너지 분포가 문제가 되는데 전자-중성 종간의 충돌 빈도가 높을 때에는 Maxwell 분포로 가정해도 큰 문제가 없다. 본 연구에 사용한 가스 압력은 10 mTorr 내외로 중성종 간의 충돌만을 고려하면 평균 자유

*Corresponding author. E-mail : jhjoo@kunsan.ac.kr

행로가 5 mm이지만 전자-중성 종의 충돌을 고전적인 강구 충돌로 간주하면 전자의 크기를 무시할 수 있으므로 충돌 단면적이 1/4로 감소하여 20 mm가 된다. 즉, 평균적으로는 충돌 빈도가 낮은 영역에 속한다고 할 수 있다. 그러나 마그네트론의 특성상 강한 자기장(수 백 가우스)에 의해서 타겟 표면 수 mm에 갇혀 있는 전자의 경우 평균 자유 행로가 사이클로이드, 트로코이드의 형태를 가지므로 간단한 기체 동역학 이론으로는 정확한 가늠이 어렵다.

$$I(A) = [A] \cdot \int n_e(E) v_e \sigma_x dE \quad (1)$$

$I(A)$: A종에 의한 방출광 세기
$[A]$: A의 농도(#/m^3)
$n_e(E)$: 에너지 E를 갖는 전자 밀도(#/m^3)
v_e : 전자의 속도(m/s)
σ_x : x종의 전자 충돌 반응이 일어날 단면적(m^2)

즉, 1차원으로 줄여서 생각하면 방출광 분석의 대상 초점 영역의 길이를 l (m)이라고 하고 발광 입자의 속도를 v (m/sec), 단위 시간당 빛 방출량을 P (W = J/sec)라고 하면 초점 영역을 지나가면서 검출기로 입사되는 에너지는 $P \cdot l/v = P \cdot l \cdot \sqrt{m/2 \cdot E} = P \cdot l \cdot \sqrt{m/3kT}$ 가 된다. 대개의 연구 보고에서 사용하는 검출기의 적분 시간은 수 ms, 초점 영역의 길이가 1 cm라면, 300 K에서 Mg의 운동 속도는 445.3 m/s이므로 초점 영역을 지나가는 시간은 22.5 μs가 된다. 즉, 온도가 900 K로 3배 증가하게 되면 검출기에 입사되는 빛의 에너지는 $1/\sqrt{3}$ 로 감소하게 된다. Ionized Physical Vapor Deposition(I-PVD)에서 가스의 온도를 측정한 연구 결과들에서[3] 마그네트론 전류 900 mA에서 스퍼터 된 Ti 원자의 온도를 900 K 이상으로 보고하고 있다. 즉, 입자의 운동 에너지가 증가하게 되면 일정한 입자 밀도와 여기 확률 하에서 검출기에 측정되는 광량은 감소하게 된다. 그러나 ICP 전력을 증가시키면 거의 비례하여 전자 밀도가 증가하므로 입자 속도 증가에 의한 효과가 가려지게 된다. 즉, 흡수 측정 방법으로 측정한 결과에서 온도 효과에 의한 입자 밀도의 감소를 보고한 연구 결과와 방출광 분석에서 스퍼터링 된 입자의 방출광 강도가 감소 한다는 보고는 장치의 특성상 ICP 전력의 효율적인 전자 밀도 증대가 미흡하여 온도 증가 효과를 상보하지 못할 때에 주로 가능하다고 생각되어 이 점을 검증하기 위하여 마그네트론 직상부와 ICP 코일 내부의 2가지 위치에서 OES 데이터 분석을 통해서 ICP 전력에 따른 스퍼터 된 입자와 Ar의 거동을 분석하였다. 이를 위한 기초 자료로 Ar, Ar + O_2 등의 혼합 가스에서도 방출광 분석과 함께 O_2의 해리도를 QMS(Quadrupole Mass Spectrometer)를 이용하여 측정하여 MgO의 반응성 증착 과정에 참여하는 O_2의 거동을 보다 정량적으로 이해할 수 있도록 하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 유도 결합 플라즈마 보조 마그네트론 스퍼터링 장치는 기존의 논문에 보고한 것과 동일하다[4]. 스테인리스 챔버는 직경 350 mm, 높이 300 mm이고 2인치 직경의 마그네트론 음극이 설치되어 있다. 내부에 3.5회 감은 유도 결합 플라즈마 발생용 안테나가 표면에 유전체 피복을 하여 설치되어 있고, 여기에 2 MHz의 고주파를 L형 결합 회로를 이용하여 인가한다. 공정 압력은 Ar 10 mTorr 내외로 유지하였으며, 반응성 가스를 사용하는 경우, MFC를 통하여 조절하였다. MgO를 증착 하면서 실험한 경우에는 직경 2인치의 Mg을 타겟으로 사용하였고, 스퍼터링 전원은 양극성 펄스 전원(ENI RPG-100, 50-250 kHz, +30 V reversal)을 사용하였다. 방전 전압의 조절은 일정한 전력에서 산소 유량의 제어를 통해서 하였으며, 이를 제어하는 PID controller는 100 kHz의 고속 응답 특성을 갖는 모델을 사용하였다(Stanford Research Systems: SRS-960). 방출광 분석은 CCD array를 사용하는 4채널 방식을 사용하였다(Ocean Optics, SQ-2000). CCD 방식은 광방출 세기가 낮은 경우 사용하기 어려우나 유도 결합 플라즈마를 이용하는 스퍼터링 공정은 높은 방출 강도를 가지고 있어서 굳이 광증배 장치(intensified CCD)가 장착된 모델이 아니어도 측정에 큰 어려움이 없다. 12bit A/D conversion을 사용하므로 4096(=2^{12})의 동적 범위를 가지고 있는데, 피크 강도는 적분 시간에 비례하므로, 적분 시간을 조절하여 적절한 피크 강도를 얻을 수 있으며, 전체 스펙트럼을 시간에 따라서 지속적으로 기록 할 수 있으므로 full wavelength analysis나 principal component analysis 방법을 사용할 수 있도록 되어 있다. 최소 적분 시간은 5 ms이며, 모두 4개의 grating을 이용하여 UV(200 nm)에서 VIS(1000 nm)까지 각기 중첩 영역을 조금 씩 가지고 있도록 구성하였다. 방출광의 수집은 4가닥의 자외선 대응 코팅이 된 광학섬유가 들어있는 케이블을 사용하였으며, 수광은 약 30도로 중심을 향해서 기울어 있는 2인치 마그네트론의 상부를 향하고 있는 조건과 정면의 시창에서 유도결합 안테나의 중심부를 향하고 있는 두 번째 수광 위치를 이용하였다. 실험 방법

은 6개의 독립된 파장을 미리 정하여 ICP전력 등의 공정 변수를 바꾸는 경우의 시간에 따른 변화가 지속적으로 PC에 저장되도록 하였다. 이때의 전파장 영역의 데이터도 하드 디스크에 저장되도록 하여 추후에 통계적 처리를 통한 분석이 가능하도록 하였다. 대략 10분 정도의 측정에 250 MB 내외의 스펙트럼 데이터가 생성된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 산화막의 반응성 증착을 위한 양극성 펄스 방전

펄스 전원을 사용한 방전의 특징은 낮은 펄스 반복 주파수에서도 빠른 상승 시간을 이용하여 효율적인 전자의 가열이 가능하다는 점이다. 전자의 가열은 전자와 중성 입자 사이의 충돌 주파수와 가장 근접한 전기장을 인가하는 경우에 효율이 높다. 10 mTorr의 Ar에 대해서 전자와의 충돌 주파수를 구하면, 약 30 cm가 평균자유 비행 거리이므로 1 eV의 전자라면 1.6×10^{6} Hz가 되며, 열평형을 기준으로 하면 상온에서 0.025 eV이므로 1.0×10^{7} Hz가 된다. 1/4 파장을 상승 시간이라고 하면 1 MHz의 경우 250 ns이다. 그런데 본 연구에 사용한 양극성 펄스전원의 상승 시간은 80 ns였다. 즉, 저렴하고 안정적으로 동작시킬 수 있는 기본 펄스 반복 주파수 50-250 kHz의 전원으로 수십 MHz 전원의 이득을 낼 수 있다는 예측이 가능하다. 실제로 측정된 전자의 온도는 펄스 전원을 이용한 경우가 정현파 고주파 전원을 사용한 경우보다 높게 보고되고 있다[5]. MW급 고전력 펄스 스퍼터링에 대한 OES측정 결과에서도 일반적인 연속 직류 마그네트론보다 훨씬 높은 8% 정도의 이온화율이 보고되고 있다[6]. 그러나 MW급 고전력 펄스 스퍼터링만으로는 높은 이온화율의 장점을 부각시키기 어렵다. 연속 직류에 비해서 1/3로 낮은 증착 속도, 구리를 비롯한 제한적인 타겟 물질 종류 등의 단점이 존재한다. 이를 개선한 MPP(modulated pulse plasma) 공정이 소개되었으나 아직 양산용 시스템에서 적용된 결과에 대한 상세한 보고가 없다. 연구 논문 수준에서는 최근 산화알루미늄에 대한 반응성 증착이 보고되었으며 국내에서도 기본적인 물성 연구가 시작되었다[7,8]. MPP에서는 MW급의 고전력 밀도를 직접 인가하지 않고 단계별 전력 증가를 통해서 플라즈마 안정화를 이룬 것이 가장 큰 진전이라고 할 수 있다. 이를 통해서 기존의 MW급 전력을 이용하는 고전력 펄스 스퍼터링의 단점으로 주로 부각되었던 문제들이 일부 해결된 것으로 보인다. 그러나 kHz급의 플라즈마 펄싱에 따른 진단 기술의 어려움이 있다. 가장 기본적인 플라즈마 변수인 전자 온도, 전자 밀도 등을 측정하려면 기존의 단일 탐침 방법은 상대적으로 긴 전압 스캔 시간 때문에 펄스 플라즈마의 특성 분석에 적합하지 않다. 가능한 방법 중의 하나는 box car 기술을 사용하여 매번 반복되는 펄스에 의한 플라즈마 현상이 정확히 반복된다는 가정하에 일정한 위상 지연을 두고 측정을 반복하여 나중에 합산하는 것인데 MPP와 같이 다종의 펄스 집합을 이용하여 수 kHz의 펄스 플라즈마를 구동하는 경우에는 적합하지 않다. 나머지 한 방법은 삼중 프로브를 이용하여 단일 프로브의 전압-전류 스캔 부분을 중앙점, 좌한계, 우한계의 세 가지 측정점으로 압축하여 고정하고 시간에 따른 고속의 전류 변화를 읽어 내는 진단법이다.

본 연구에서는 양극성 펄스 전원을 이용한 스퍼터링과 부가적인 유도 결합 플라즈마를 통하여 섬세한 이온/라디칼의 제어를 목표로 한다. 펄스 방전의 주파수를 50 kHz에서 250 kHz까지 변화시키면, 마그네트론의 방전 전압이 동일한 전력에서 360 V에서 208 V로 급격히 감소한다. 전압을 양극으로 바꾸어서 타겟 표면에 발생한 산화막에 충전된 전하를 방전 시킬 때의 상승 시간은 약 80 ns, 음전위로 바꾸어서 이온을 입사 시킬 때의 하강 시간은 0.64 μs이다. 여기에 산소가 첨가되면서 음의 전위 언덕에 작은 피크들이 중첩되는 현상을 관찰할 수 있었다. 방전 전압 제어에서는 평균 제곱근 값을 의미한다. PID제어기에 펄스 전원 장치에서 출력되는 전압 전송 출력(100 V_{rms}/1 Volt)을 입력으로 하고 적절한 PID계수를 설정하면, 산소 MFC를 제어하는데 필요한 0-5 V_{dc}의 제어 전압이 출력된다. MgO 반응성 증착에서는 타겟 상부에 형성되는 얇은 산화막(MgO)의 스퍼터링 수율이 매우 낮으므로 빨리 금속 모드로 돌아가기 위해서는 방전 전압이 높은 낮은 주파수가 유리하지만, 아킹을 줄이고 산화막에 의한 스퍼터링 정지 현상을 막기 위해서는 높은 주파수가 필요하다. 본 연구에서는 100 kHz를 사용하였다(그림 1).

펄스 바이어스 조건 하에서 쉬스의 거동에 대해서는 전도성 기판의 경우 벌크 플라즈마-쉬스-전도성 기판의 세 층으로 이루어진 전위 구조가 되지만 유전성 층이 존재하는 경우에는 벌크 플라즈마-쉬스-유전체-전극의 사중 구조가 되고 쉬스 전압이 일부 유전체로 나눠지므로 실제 기판에 입사하는 이온의 에너지는 감소하게 된다. 금속 타겟의 반응성 스퍼터링 시에 산화물 피막이 타겟 표면에 증착되면 스퍼터 투입 전압이 동일하더라도 실제 입사 하는 이온의 운동 에너지의 감소가 발생되고 산

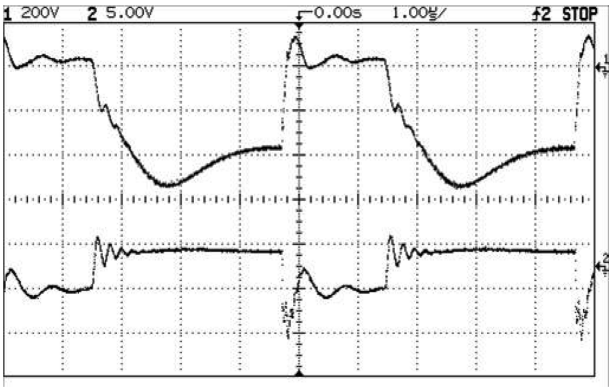

Fig 1. Voltage and current waveform measured at 100 kHz pulse at pre-sputtering stage.

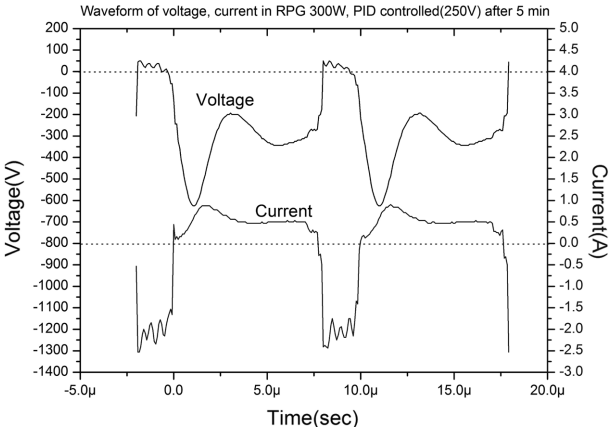

Fig. 2. Voltage and current waveform under PID control (100 kHz).

화물의 이온에 대한 스퍼터 수율이 낮은 경우(단단한 산화물 층) 타겟 전압을 상당히 높이 증가 시키지 않으면 반응성 스퍼터링의 장점인 순금속 스퍼터링과 버금가는 높은 증착 속도를 얻을 수 없게 된다. 특히 이차전자 발생 계수가 높은 산화물인 경우 타겟 전압이 더욱 감소하여 심각한 증착 속도가 떨어지고 회복이 어려운 상태가 된다. 실제 반응성 스퍼터링 공정 중에 측정한 타겟의 전압, 전류 파형을 그림 2에 나타내었다. 그림 1과의 가장 큰 차이점은 방전 전압의 상승 곡선의 기울기가 완만해지고 ringing이 나타났다는 것이다. 이는 LC 공진 현상으로 전원 장치의 출력부터를 포함하는 모든 요인들(케이블, 마그네트론 스퍼터링 음극 모듈)에 발생된 임피던스의 변화가 타겟 바로 앞에서 측정한 전압/전류 파형에 나타나고 있다고 할 수 있다. 본 실험에 사용한 시스템에는 전원 장치와 마그네트론 음극 모듈 사이에 위상 정합기는 설치되어 있지 않으나 최대 수 kHz의 펄스 주파수에서 위상 정합의 문제는 rf만큼 심각한 것은 아니고 수동형 소자를 사용하는 정합기의 경우 정확하게 펄스 파형을 따라서 정합을 할 수 있는 것도 아니어서 앞으로 심도있는 연구가 이루어져야 할 부분이다. 그림 3에는 알곤과 산소의 혼합 가스의 경우에 대해서 ICP 전력 증가에 따른 해리를 보여주는 QMS 측정 결과를 나타내었다.

3.2 ICP에서 OES 분석: 파장의 정확도와 이온의 검출

주 운전 조건인 10 mTorr Ar에서 ICP 전력을 100 W에서 500 W까지 변화시켜 가면서 자외선 및 가시광 영역의 방출광 분석을 해보면 기존의 테이블에 보고되어 있는 파장과 0.1 nm 이내로 일관되게 일치함을 알 수 있다. 본 실험에 사용한 Fiber optic spectrometer의 제조사 규격은 파장 분해능 0.3 nm 이하인데 피크 검색에 사용하는 소프트웨어에서는 화소 사이의 값을 내삽으로 알려주므로 Ar + Hg 방전관을 사용하여 2차식으로 파장 교정을 한 후 0.1 nm 이내로 정확한 값을 얻을 수 있었다. 그러나 Ar II 피크는 433.1 nm에 낮은 세기로 관찰되고 기타 파장 영역에서는 잘 검출되지 않았다. CCD를 검출기로 사용한 시스템이 갖는 단점인 낮은 분해능은 주의 깊은 실험 순서에 의해서 상당 부분 개선이 가능했다. 즉, 실험 전 암전류를 정확히 측정하여 제거한 스펙트럼에서는 날카로운 피크 모양과 0.1 nm까지 정확한 피크 위치를 결정할 수 있었고, 다중 피크 감시 모드에서는 주변 3 픽셀의 평균을 이용하였다. 총 4개의 채널 중 실험에 주로 사용한 3개 채널의 스펙트로미터는 픽셀 위치를 파장에 대해서 2차 근사식을 이용하여 환산하므로 분석 파장 영역의 하한과 상한 부근에서는 파장 정확도가 떨어진다. 따라서 주로 중심 파장 영역에 속해 있는 피크들을 분석에 이용하였다. Ar^+는 입자의 크기가 작고 전자와 다시 충돌하여 여기 후 발광 천이에 대한 충돌 단면적이 작아서 밀도가 상당

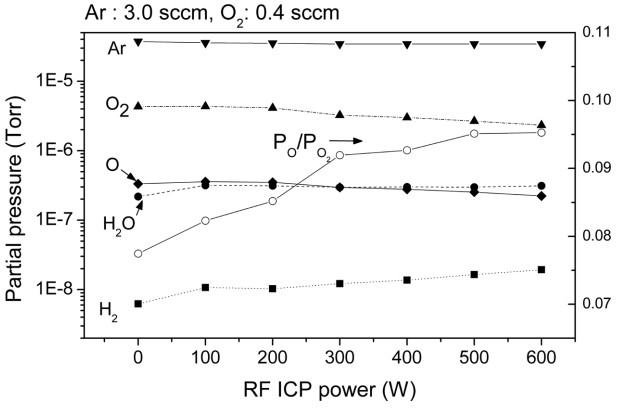

Fig. 3. Partial pressures of Ar and O_2 when RF ICP was increased.

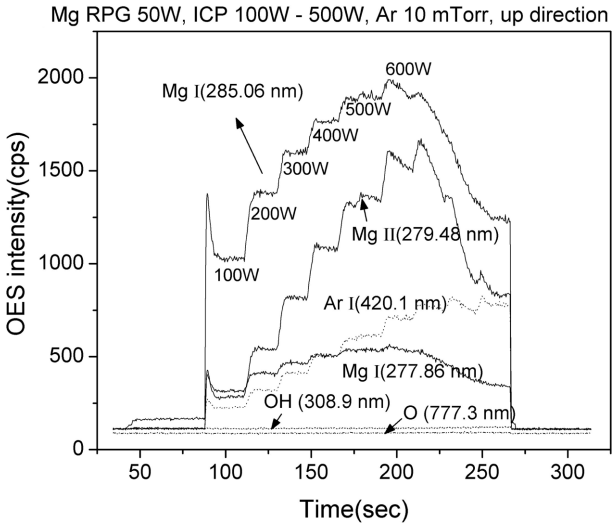

Fig. 4. Optical emission intensity profile with increasing ICP power (sputtering power 50 W, Ar 10 mTorr).

히 높아야 방출광 분석에서 검출 가능한 세기로 관찰된다. 스퍼터링 금속 원자와 그 이온 중 Mg, Mg^+는 200-300 nm 영역에 아주 발광 강도가 높은 피크를 가지고 있다. Mg (285.213 nm), Mg^+ (279.553, 280.27 nm)가 그것이다. 이들과 같이 아주 근접한 피크들은 플라즈마 내의 전자 에너지 분포의 변화에 비슷하게 반응하므로 피크 강도비가 입자 밀도에 거의 비례한다고 해석해도 무방하다. 전자 충돌 이온화는 Ar 준 중성에 의한 Penning 이온화와 함께 가장 중요한 이온화 메커니즘 두 가지이다. 그러나 가스 압력에 따라서 준중성의 최대 농도 및 공간 분포가 큰 영향을 받으므로 공간 평균된 값을 주로 측정하게 되는 OES에서는 결과의 해석에 주의를 요한다. 그림 4에 ICP 전력에 따른 각 종의 OES 세기를 나타내었다.

3.3 고속 PID 제어에 의한 반응성 증착 공정 최적화

열처리 시스템의 자동 온도 제어에 사용하는 PID(proportional, integration, differentiation) 로직은 플라즈마, 특히 비선형 응답이 주가 되는 반응성 스퍼터링의 경우에는 계수의 최적화가 힘들다. 우선 온도와 달리 어떤 변수를 측정 대상으로 하고 제어 대상을 설정하느냐가 첫 번째 관건이다. 기존의 연구들에서는 주로 반응성 가스의 유량을 제어 대상으로 하고 이를 고속화하기 위한 피에조 밸브, 유량 극대화를 위한 대용량 고진공 펌프 등을 이용하여 대응하였다. 실제로는 마그네트론 음극에 인가하는 전압이 가장 중요한 변수가 되는데 대개의 시스템에서 전력을 제어 변수로 하고 있으므로 실제 전압을 자유롭게 변화시켜 가면서 제어를 하기에는 어려움이 따른다. 고속 측정이 가능한 대상으로는 플라즈마 내의 발광종에 의한 가시광/자외선 방출선들이 있다. 그러나 증착 챔버의 특성상 시창을 통한 지속적인 광신호의 포집이 용이하지 않고 대면적 증착 시스템의 경우 일부분의 정보만 수집하는 단점이 있다. 물론 줌기능이 있는 렌즈를 이용한 포집이나 광각형 렌즈의 사용 등 개선 방법이 있으나 대면적의 경우 플라즈마 공간 전체를 볼 수 있는 위치 설정 자체가 쉽지 않다는 점이 가장 큰 문제이다. 반면 타겟 전력 공급부에서 측정한 전압/전류 값은 전체 면적에 해당하는 값이며 이를 rms(제곱근 평균, root mean square)로 이용할 경우 매우 안정적으로 제어를 진행할 수 있다. 문제가 될 소지가 있는 것은 아크의 빠른 검지와 이에 따른 출력 제어인데 대개의 전원 장치들이 전류의 급속한 증가를 검지하여 출력을 나누어 차단하는 기능을 구현하고 있다. 즉, 작은 전류의 증가(soft arc)의 경우에는 출력을 차단하지 않고 감소시키는 것으로 대응하며 전류의 증가가 일정 값 이상이면 출력을 아예 차단하고 지정된 시간 동안 기다렸다가 다시 전원을 투입하는 로직을 가지고 있다. 본 연구에서 사용하고 있는 양극성 펄스 전원 장치는 전원을 차단하는 것보다 한 걸음 더 나아간 적극적인 아크 억제책인 반대 부호의 전압을 인가하는 기능을 갖고 있으므로 아크 억제 보조 장치를 가진 연속 직류 전압을 인가하는 반응성 스퍼터링 장치보다 안정성이 높다. 기존에 보고한 결과에 상세히 보고되어 있다[9]. 이상과 같은 PID 제어 로직을 사용한 공정 시에 측정된 각 종의 OES 세기가 그림 5에 나타나 있다.

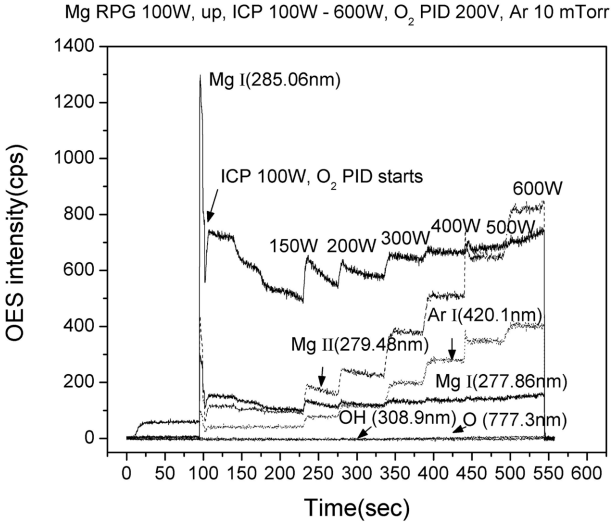

Fig. 5. Optical emission intensity profile with time under PID controled oxygen supply.

4. 결 론

유도 결합 플라즈마 스퍼터링 장치에서 원자내의 전자 준위간 천이에 의한 광방출 측정을 하였다. 마그네슘을 스퍼터링 타겟으로 사용하고 유도 결합 플라즈마를 부가적으로 이용한 상태에서 가시광 영역의 방출선을 측정한 결과 일반적인 스퍼터링 공정에서는 잘 관찰되지 않는 마그네슘 이온이 관측되었으며 이는 유도 결합 플라즈마가 스퍼터링된 입자들의 효율적인 전자 충돌 이온화에 기여하고 있다는 증거다. 반응성 스퍼터링 공정을 위하여 산소를 PID 제어기를 통해서 유입한 결과 히스테리시스 현상을 거의 제거하고 안정적인 공정 조건을 확보할 수 있었다.

후 기

본 논문은 지식경제부가 지원하는 국가 반도체 연구개발사업인 “나노반도체장비원천기술상용화사업”을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

참고문헌

1. Y. Matsuda, Y. Koyama, M. Iwaya, M. Shinohara, H. Fujiyama, Thin Solid Films, 475 (2004) 113.
2. J. C. Imbert, C. Boisse-Laporte, L. de Poucques, L. Teule-Gay, O. Voldoire, M. Touzeau, J. Bretagne, 9th International Conference on Plasma Surface Engineering, Spet. 13-17, 2004, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 427.
3. O. Leroy, L. Poucques, C. Laporte, M. Ganciu, L. Gay, M. Touzeau, J. Vac. Sci. Technol. A 22 (2004) 192.
4. S. H. Kim, J. Joo, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 45(2) (2004) 169.
5. H. Y. Chang, Fall Conference of the Kor. Inst. Surf. Eng., 2004. 11. 4, Sangnam International Building, Busan National University.
6. J. Bohlmark, J. Alami, C. Christou, A. P. Ehiasarian, U. Helmersson, J. Vac. Sci. Technol. A 23 (2005) 18.
7. W. Yang, J. Joo, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 45(2) (2012) 53.
8. J. Joo, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 43(3) (2010) 154.
9. J. Joo, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 38(2) (2005) 73.