반도체디스플레이기술학회지 제15권 제4호(2016년 12월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 15, No. 4. December 2016.

IGZO박막 증착 공정에서 플라즈마 방출광 모니터링 및 플라즈마 균일도 제어

최진우[*]·황상혁[*]·김우재[*]·신기원[*]·권희태[*]·조태훈[*]·우원균[**]·차성덕[**]·안병철[***]·
박완우[***]·도재철[***]·권기청[*†]

[*]광운대학교 전자바이오물리학과, [**](주)원우시스템즈, [***](주)아바코

Monitoring and Controlling Uniformity of Plasma Emission Intensity for IGZO Sputtering Process

Jinwoo Choi[*], Sang Hyuk Hwang[*], Woo Jae Kim[*], Gi Won Shin[*], Heui Tae Kwon[*], Tae Hoon Jo[*], Won Gyun Woo[**], Sung Duk Cha[**], Byung Chul An[***], Wan Woo Park[***], Jae Chul Do[***] and Gi-Chung Kwon[*†]

[*]Kwangwoon Univ. Dep. of Electrical and Biological Physics, [**]WONWOO SYSTEMS CO., LTD., [***]AVACO CO., LTD.

ABSTRACT

In recent years, various researches have been conducted to improve process yields in accordance with miniaturization of semiconductor.

APC(Advanced Process Control) is considered one of the methods to increase in process yields. APC is a process control technology that maintains optimal process conditions and improves the reliability of results by controlling and formulating the relationship among the various process parameters and results.

We built up an optical diagnostic system with a three-channel spectrometer. The system detects signals those represent the changes of specific emission peaks intensity versus each reference and converts it into MFC control signals to get back the changes to the reference state. Controlling the MFC continues until the specific peak intensity changes into the normal state. Through this device, we tested a APC automatically responding to process changes during the plasma process.

We could control gas flow while sputtering process on going and improve uniformity of plasma intensity with this system. Finally, we have got results those enhance the plasma intensity non-uniformity to 7.7% from 15.5%. Also, found unexpected oxygen flow what is estimated to be come out from IGZO target.

Key Words : Process plasma, Diagnostics, APC, OES, Sputtering, IGZO, Process control, Oxygen

1. 서 론

기존의 실리콘 반도체를 대체할 차세대 반도체로 각광받고 있는 산화물 반도체는 비정질상태(Amorphous)에서도 높은 전하 이동도(Mobility)를 갖고, 비정질산화물을 통해 높은 전기 전도도와, 광 투과율을 가지는 투명전도성산화물(TCO : Transparent Conducting Oxide) 형성이 가능해 디스플레이와 태양전지 분야에서 투명전극으로 널리 사용되고 있다[1]. H. Hosono 교수 연구 그룹의 인듐갈륨아연산화물

[†]E-mail: gckwon@kw.ac.kr

(IGZO : Indium-Gallium-Zinc-Oxide)을 이용한 박막트랜지스터(TFT : Thin Film Transistor) 발표 후 IGZO는 산화물 반도체 연구의 주류를 이루었다[1, 2]. IGZO의 특성은 증착 시 기판 온도와 가열을 통한 후처리 공정이 중요한 변수로 알려져 있으며[3, 4] 이는 열처리로 인해 원자가 재배열 됨에 따라 전자 트랩이 감소하고, 전자 이동도가 증가하기 때문으로 보고 되고 있다[5].

IGZO는 디스플레이 시장의 발전에 따라 주로 대면적화가 용이한 스퍼터링(Sputtering) 공정을 통해 증착 된다[6].

스퍼터링 공정은 저온 플라즈마(Plasma)를 이용하는 증착 공정으로 대면적에 균일한 박막을 증착 할 수 있고, 재현성 및 증착 박막의 특성이 우수 하며 저온에서 박막 증착이 이루어져 디스플레이 및 반도체 공정에 널리 사용 되고 있다[7, 8]. 또한 화학 양론에 따라 박막 구성 물질 비율을 조절 할 수 있기 때문에 전자재료용 박막 연구에 역시 널리 사용된다[7].

최근에는 점점 더 미세화 되어가는 공정에 대해 생산성을 향상하기 위해 공정을 관찰하고 이를 제어하기 위한 APC (Advanced Process Control)에 대한 연구가 다방면으로 이루어 지고 있다. APC는 고급공정제어기술을 말하며, 다양한 공정 변수들과 결과물의 관계를 수식화 하여 제어 함으로써 최적의 공정 조건을 유지하고, 결과물의 신뢰성을 향상시키는 기술이다[9].

공정 제어를 위하여 공정 정보를 수집 하는 방법 중 발광 분광 분석법(OES : Optical Emission Spectroscopy)은 다양한 공정에 널리 적용 되는 기술로, 플라즈마를 이용하는 공정에서는 플라즈마 방출광을 관찰하는 방법으로 사용한다.

발광 분광 분석법을 통해 플라즈마 방출광으로부터 얻을 수 있는 빛띠(Spectrum)에는 플라즈마 내에 존재하는 입자의 종류와 에너지 상태에 대한 정보가 포함되어 있으므로 플라즈마 방출광은 공정 플라즈마 관찰에 매우 중요한 정보이다[10].

본 연구에서는 APC연구의 일환으로 직류스퍼터링 공정을 이용한 IGZO 박막 증착 중 발생하는 플라즈마 방출광 변화를 MFC(Mass Flow Controller)로 피드백 하여 공정 기체 유량을 제어하고, 제어에 따른 플라즈마 균일도에 미치는 영향을 확인해 보았다. 또한, IGZO 타깃으로부터 발생한 것으로 추정되는 산소의 정량적 분석을 시도해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험 장치는 크게 공정 장비와 고급공정제어 장치로 나눌 수 있다.

공정 장비는 200 x 200 mm IGZO 스퍼터 장비(아바코)를 이용하였고, APC장치는 원우시스템즈의 Multi-channel APC 장치를 이용하였다.

2.1.1 공정 장비(Process Equipment)

Fig. 1에 실험에 사용된 공정 장비 개략도를 나타내었다.

실험은 직류 전원이 인가되는 스퍼터링 챔버(Chamber)를 이용하였고, 챔버 벽면에는 기판에 평행한 방향으로 OES를 위한 창(Window)을 제작하여 총 세 개의 광 파이버(Optical fiber)를 이용하여 OES 및 APC를 진행하였다. 플라즈마 방출광에 대한 관측은 스퍼터 타깃(Target)의 중앙을 원점으로 하였을 때 -85 mm, 0 mm, 85 mm 에 해당하는 세 위치에서 진행 되었으며 각 위치를 Ch1, Ch2, Ch3로 정의하였다. 실험 중 공정 기체를 조절하기 위한 MFC를 세 개 이용하였으며 MFC는 Fig. 1에 나타내었듯이 기본 공정 환경을 조성하기 위해 Ar기체를 주입하는 MFC1 과 O_2기체를 주입하는 MFC2, APC장치의 제어에 의해 O_2의 과다한 유량 또는 부족한 유량을 조절하는 MFC3로 구성되어 있다.

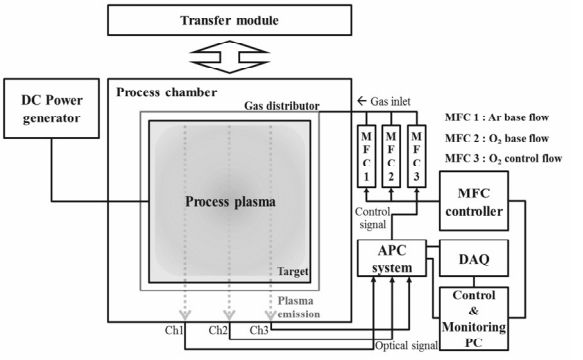

Fig. 1. Schematic of equipment.

2.1.2 고급공정제어(Advanced Process Control)

APC장치에는 세 개의 광 파이버를 통해 플라즈마 방출광 정보를 수집하는 세 개의 분광기(Spectrometer)가 장치되어있다. 분광기는 Ocean Optics社의 USB 2000 + 제품이며 해상력은 0.1 nm ~ 10 nm 이다. APC장치는 PC (Personal Computer)에 설치된 전용 소프트웨어 (Software)를 통해 작동 및 제어된다.

본 연구에서 APC는 얻어진 플라즈마 방출광 스펙트럼 상의 공정 기체를 대표하는 특정 파장의 피크(Peak)를 실시간으로 관찰(Monitoring)하여 목표 광량(Target intensity)에 도달 할 수 있도록 PID Control(비례/적분/미분 제어기) 방

법을 이용하여 측정 광량의 과다와 부족을 보상하는 전압 신호를 MFC로 출력함으로써 공정을 제어한다.

2.2 실험방법

증착 공정 중 O_2의 제어를 테스트 하기 위해 실험 장비에 장치된 MFC 세 개의 역할은 각각 다음과 같이 지정하였다.

MFC1은 방전 유지에 사용되는 Ar을 유입하는 용도이고, MFC2는 공정 레시피(Recipe) 상의 O_2 유량을 일정하게 주입해주고 제어실험 시 사건(Event)을 발생하는 용도이며, MFC3는 APC와 연동하여 APC에 의해 과다 또는 부족 분의 O_2 유량을 제어하는 용도이다.

실험은 MFC1,2를 이용하여 방전 분위기를 조성 하고, MFC2의 O_2 유량을 임의로 변화시켰을 때 MFC3를 통해 제어되는 O_2 유량 변화를 확인하는 방법으로 APC가 챔버 내 O_2의 변화량을 보상하는지 확인하였다.

MFC3를 제어하기 위한 기준 광원은O에 해당하는 777 nm파장(O Peak)을 선택 하였고, 챔버 중앙 위치에서 광 파이버를 통해 수집되는 방출광 신호를 이용하였으며, 목표 광량(Target intensity)은 사전 실험을 통해 위치 별 광량 분포가 가장 균일 한 O_2 유량 5 sccm 조건에서 나타나는 2550 count를 선정하였다.

Table 1. Experimental conditions of process control

Input DC power(W)	3000
Frequency(Hz)	DC
Ar flow(sccm)	80
O_2 flow(sccm)	0 ~ 10
Base pressure(Torr)	7×10^{-7}
Working pressure(Torr)	$1.5 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3}$
IGZO target	200 x 200 mm

Table 1.에서 보는 바와 같이 IGZO 스퍼터링 공정 플라즈마는 직류 스퍼터 챔버에서 Ar 80 sccm, O_2 0 ~ 10 sccm분위기에 DC 3 kW를 인가하여 방전하였다.

O_2 제어 실험으로부터 확인된 타깃으로부터 나온 여분의 O_2를 분석하기 위해 6 inch IGZO 타깃이 적용된 스퍼터 장치에서 Ar 기체만을 이용한 방전 환경에서 사중극자질량분석장치(QMS : Quadrupole Mass Spectrometer)로 증착 시간에 따른 O_2에 해당하는 32 amu(Atomic Mass Unit) 신호의 변화를 확인해 보았다.

Table 2.와 같은 실험 조건으로 여분의 O_2를 확인하기 위한 실험을 진행 하였다. 13.56 MHz의 교류 전원을 사용하는 스퍼터 챔버에 Ar 50 sccm만을 주입하여 400W의 전력을 인가하여 방전하였다.

Table 2. Experiment of conform of excess oxygen

Input RF power(W)	400
Frequency(Hz)	13.56 M
Ar flow(sccm)	50
Base pressure(Torr)	1.8×10^{-6}
Working pressure(Torr)	3.1×10^{-4}
IGZO target	6 inch

3. 결 과

3.1 APC 결과

Fig. 2는 APC 장치에 의한 공정 챔버 모니터링 및 MFC 제어를 나타내는 결과이다. Fig. 2의 a), b), c)는 위치 별 O 피크를 모니터링 한 결과이고, d), e)는 MFC2에 의해 발생한 O_2유량 변화 사건에 따라 APC에서 발생한 MFC3에 대한 제어전압 신호와 제어전압 신호에 따른 MFC3의 O_2 유량을 나타낸다.

공정 시작과 동시에 APC 제어에 따라 MFC 제어 전압이 상승한 후 모니터링 하는 O피크의 광량이 지정된 값인 2550 count 부근에 도달하여 유지됨을 확인 할 수 있다. 유량이 유지되는 정상상태의 유량(Ordinary flow) 영역을 지나 MFC2에 의해 O_2 유량 변화를 주는 이벤트 발생(Events occur) 영역에서 모니터링 한 광량의 증가/감소에 따라 MFC3 제어 전압이 감소/증가 가며 광량이2550 count 부근으로 회귀하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2에 표시한 ①, ②를 통해 APC의 제어 속도와 제어에 대한 공정 장비의 응답속도를 확인할 수 있다. ①은 APC의 제어 속도를 나타내며 이벤트에 의한 광량 변화 시점부터 제어 시작 시점까지의 시간으로 ~ 40 ms 로 측정되었다. ②는 APC제어에 대한 공정 장비의 응답 속도를 나타내며APC를 통한 MFC3의 유량 제어 시점부터 광량의 변화 완료 시점까지의 시간으로 ~ 4 s로 측정되었다. ①은 APC 장치와 PC의 처리 속도, 통신 속도에 영향을 받고, ②의 경우 압력, 챔버 부피, 유량에 관련이 있는 것으로 추정된다[11].

Fig. 3는 APC를 적용하지 않은 공정 중 각 채널에 해당하는 세 개의 광파이버를 이용하여 관찰한 O 피크 광량의 불균일도(Non-uniformity)이다. 각 곡선은 O_2 유량에 따른 세 위치의 광량을 의미하며, 해당 유량에서의 불균일도를 표시하였다. O피크는 O_2 유량에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 보이며 불균일도 평균은 16.2% 이고, 표준

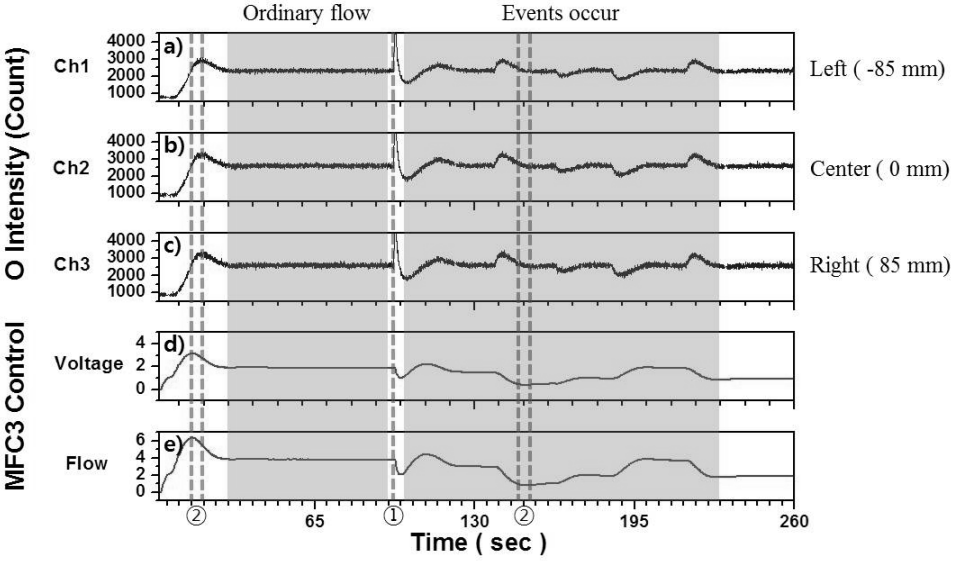

Fig. 2. Multi channel OES monitoring and flow control by APC at Ar 80 sccm, Power 3 kW and Pressure 1.5 x 10^{-3} Torr.

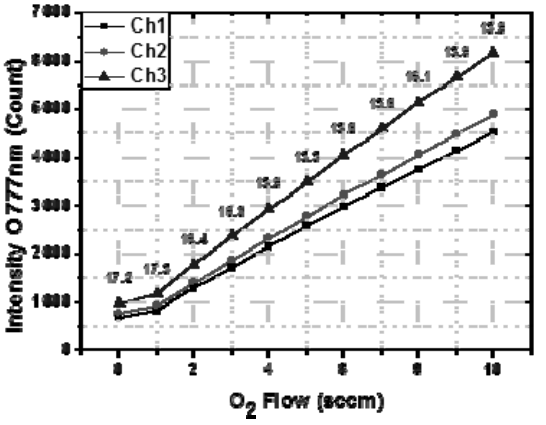

Fig. 3. 777 nm intensity non-uniformity in conditions of Ar 80 sccm, O2 0 ~ 10 sccm, Power 3 kW and Pressure 1.5x10-3 ~ 2.5x10-3 Torr.

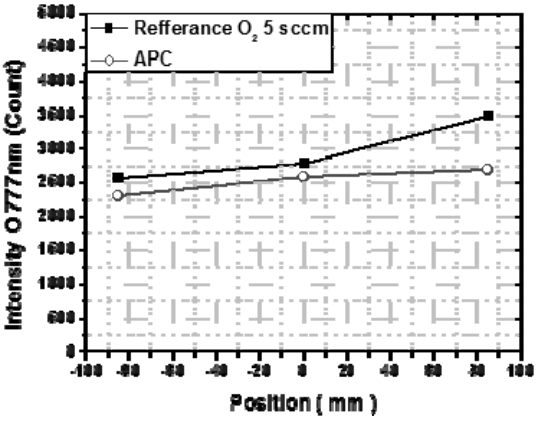

Fig. 4. Enhancement of non-uniformity in conditions of O_2 target intensity 2550 count(5 sccm), Power 3 kW and Pressure 1.7x10^{-3} Torr.

편차는 0.61로 결과를 얻었다. 이를 통해 불균일도가O_2유량에 관계없이 유지된다는 해석이 가능하다.

Fig. 3에서 보이는 것처럼 O_2 유량에 관계없이 Ch3에서 O피크가 높은 이유는 기체 주입구로부터 가장 가까운 위치에 있는 Ch3부터 기체가 확산하여 Ch2와 Ch1 순서로 공정기체가 유입되기 때문으로 생각할 수 있다. 진공 챔버 안의 기체 분포의 불균일은 기체 주입구(Gas in-let)에서 기체 분사구(Gas distributor)의 각 구멍까지의 경로가 달라 발생한 것으로 보이며 이는 기체 주입구로부터 기체 분사구까지의 경로를 고려한 설계로 개선이 가능하다[11].

Fig. 4에서 사각형으로 표시된 선은 APC가 적용되지 않은 경우에 MFC2를 통해 5 sccm의 O_2를 주입하며 방전했을 시 나타나는 위치 별 O 피크를 나타내며, 불균일도는 15.5%로 나타났다. 원형으로 표시된 선은 APC를 적용하

여 MFC2는 1sccm의 O_2를 주입하며 Ch2 위치에서 2550 count를 만족하도록 MFC3를 제어하여 얻은 O피크의 위치 별 광량이다. 불균일도는 7.7%로 나타났으며 APC를 적용하지 않았을 때에 비해 7.8% 개선된 결과를 얻었다.

균일도가 개선의 원인은 PID Control 과정에서 제어 광량이 목표 광량 부근에서 진동하면서 MFC제어 전압 역시 증가・감소를 반복하며 기체 유량을 Pulsing하는 효과를 주었고 Ch3로 유입되는 기체의 총량이 감소하여 Ch3 부근의 O 피크 광량이 크게 감소 한 것으로 보인다. 또한 Ch1과 Ch2 사이의 O 피크 광량의 기울기가 커진 것을 확인 할 수 있는데, 역시 기체 Pulsing에 의해 유입되는 기체의 총량이 감소하여 확산 속도의 감소에 의해 위치 별 분압차가 발생 한 것으로 보인다.

$$F = -D\frac{dc}{dx} \quad (1)$$

수식 (1)에 Fick's first law를 나타내었다. F는 단위 시간 당 단위 면적을 통과하는 입자의 개수 이고, D는 확산 계수, c는 밀도를 나타내어 dc/dx는 거리에 따른 농도 기울기를 의미한다. Fick's first law에 의하면 농도 차가 크고 거리가 짧을 수록 확산량이 커진다[12]. 이에 의하면 기체 Pulsing에 의해 챔버 내 총 유량이 감소하여 확산 속도가 감소하는 결과로 나타나 Ch1 과 Ch2 사이의 기체 밀도의 기울기가 커졌다고 해석된다.

3.2 여분의 산소 발생

APC를 적용한 공정 중 Event 없이 광량이 유지되는 영역의 분석을 통해 광량 변화는 없지만, 시간에 따라 MFC3의 제어 전압이 감소하는 영역을 확인 하였다.

Fig. 5는 IGZO타겟에서 발생한 여분의 O_2로 추정되는 유량제어 현상을 나타낸다. 그림 상 가장 위의 진동하며 유지되는 실선은 O 피크 모니터링 그래프이고, 가장 아래의 시간에 따라 감소하는 추세의 실선은 MFC3에서 출력되는 유량 값이며, 그 위에 점선은 MFC3의 유량의 선형 피팅(Fitting)결과이다.

Fig. 5에서 보이는 것과 같이 777 nm 광량은 목표 값인 2550 count 부근에서 제어되고 있는 반면, MFC3 의 제어 전압이 감소하며 유입되는 O_2 유량이 감소하는 현상을 발견 하였다. 그림에 나타나듯이 50 s 동안 0.15 sccm에 해당하는 O_2 유량이 감소 하였고, Fig. 3의 유량 별 O피크 변화 추이로부터 광량으로 환산한다면 약 65 count 의 광량이 감소함을 바탕으로 제어된다는 것을 알수 있다. 이와 같은 제어 유량 변화는 IGZO 타깃 으로부터 발생한 O_2에 의한 것으로 보인다.

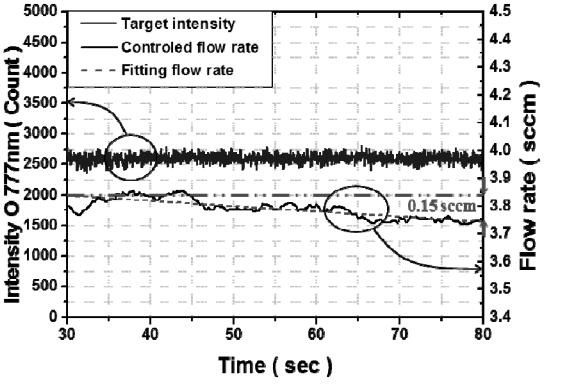

Fig. 5. Excess oxygen flow in conditions of Ar 80 sccm, Power 3 kW, Pressure $1.5x10^{-3}$ Torr and Controlled O_2 flow.

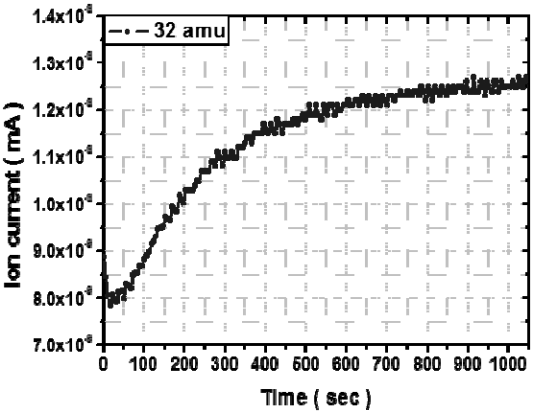

Fig. 6. Increase ion current from O_2 signal in conditions of Ar 50 sccm, Power 400 W and Pressure 3.1 x 10^{-4} Torr @ 32 amu.

스퍼터링 공정 중 산화물 타깃인 IGZO로부터 떨어져 나온 O_2에 의해 챔버 내 O_2 분위기가 변화한다는 가정을 확인하기 위해 사중극자질량분석기를 이용한 실험을 하였고, Fig. 6 과 같은 결과를 얻었다. Fig. 6에 나타나는 곡선은 QMS에서 측정된 시간에 따른 32 amu 의 이온 전류 값이다. Fig. 6에 보이는 바와 같이 6 inch IGZO 타겟이 적용된 직류 스퍼터링 장비에서 IGZO 증착 공정 시 공정 진행 시간에 따라 O_2에 해당하는 32 amu 이온 전류 신호 증가를 확인 하였다. 증가한 전류신호는 $4.73x10^{-9}$ mA 이며 이온 전류를 O_2 의 양으로 환산 한 결과 주어진 실험 환경에서 초당 10^7 개 정도의 O_2가 발생 했음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

APC적용을 통해 증착 공정 중 스펙트럼 변화를 이용하여 공정을 제어하고 균일도를 개선할 수 있었다. APC를 적용 하였을 때 균일도는 15.5%에서 7.7%로 개선되었다. 또한 스퍼터링 공정을 이용한 IGZO 증착 공정에서 타깃으로부터 O_2가 발생하고, APC 장치를 통해 이를 제어할 수 있음을 확인 하였다. 실험에서는 50 s 동안 0.15 sccm 의 O_2 유량이 제어 되었고 이는 광량으로 환산 했을 때 65 count에 해당하는 양이었다. 이와 같은 사실을 확인하기 위해 다른 챔버에서 QMS를 적용한 실험을 하였고, 초당 10^7개 정도의 O_2의 증가를 확인하였다.

본 연구를 통해 앞으로 APC가 점점 더 미세화 되는 반도체 공정 결과물의 수율을 보장하는 하나의 방법으로 발전하여 공정의 작은 변화를 감지하고 제어하는 기능을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Nomura, Kenji. et al., “Room-temperature fabrication of transparent flexible thin film transistors using amorphous oxide semiconductors,” Nature, Vol. 520, pp. 488-492, 2004.
2. Jang, Kyungsoo., et al., “A Review : Improve of Operation for Realizing of High Mobility Oxide Semiconductor Thin-film Transistors,” J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., Vol. 28, pp. 351-360, 2015.
3. Ide, Keisuke. et al., “Effects of low-temperature ozone annealing on operation characteristics of amorphous In–Ga–Zn–O thin-film transistors,” Thin Solid Films, Vol. 520, pp. 3787-3790, 2012.
4. Shin, Hyun Soo. et al., “Annealing temperature dependence on the positive bias stability of IGZO thin-film transistors,” Journal of Information Display, Vol. 12, pp. 209-212, 2011.
5. Lee, Yih-Shing. et al., “Relationships between the crystalline phase of an IGZO target and electrical properties of a-IGZO channel film,” Ceramics International, Vol.38, pp. s595-s599, 2012.
6. Kim, Taeyong. et al., “A Review : Improvement of Electrical Performance in the Oxide Semiconductor Thin Film Transistor Using Various Treatment,” J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.”, Vol. 29, pp. 1-5, 2016.
7. Subramanyam, Guru. et al., “Challenges and opportunities for multi-functional oxide thin films for voltage tunable radio frequency/microwave components,” Journal of Applied Physics, Vol. 114, pp. 192301, 2013.
8. J. I. Jeong, J. H. Yang and S. M. Cho, “Characteristics of Cu Films Deposited by High Rate Magnetron Sputtering Source,” RIST Journal of R&D, Vol. 22, pp. 119-125, 2008.
9. Hong, Sang Jeen. et al., “Optical In-Situ Plasma Process Monitoring Technique for Detection of Abnormal Plasma Discharge,” Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 14, pp. 71-77, 2013.
10. A. Kolpaková, P. Kudrna, and M. Tichý, “Study of Plasma System by OES (Optical Emission Spectroscopy,” WDS'11 Proceedings of Contributed Papers, Part II, pp. 180-185, 2011.
11. Kim, Hyun Hoo., and others. Introduction to BASIC VACUUM ENGINEERUNG for Semiconductor and Display Processing. Seoul: NAEHA CORP. 2007.
12. Kal Renganathan Sharma, PE. PRINCIPLES OF MASS TRANSPER. New Delhi: Prentice-Hall of India Private ltd. 2007.

접수일: 2016년 11월 2일, 심사일: 2016년 12월 19일, 게재확정일: 2016년 12월 26일