

임피던스 변화를 이용한 선형 대기압 DBD 플라즈마 밀도 측정

신기원*·이환희*·권희태*·김우재*·서영철**·권기청*†

*† 광운대학교 전자바이오물리학과, **영신알에프㈜

Plasma Density Measurement of Linear Atmospheric Pressure DBD Source Using Impedance Variation Method

Gi Won Shin*, Hwan Hee Lee*, Hee Tae Kwon*, Woo Jae Kim*,
Young Chul Seo** and Gi-Chung Kwon*†

*† Kwangwoon University Dept. of Electrical and Biological Physics

**YOUNGSIN-RF CO.,Ltd.

ABSTRACT

The development speed of semiconductor and display device manufacturing technology is growing faster than the development speed of process equipment. So, there is a growing need for process diagnostic technology that can measure process conditions in real time and directly. In this study, a plasma diagnosis was carried out using impedance variation due to the plasma discharge. Variation of the measurement impedance appears as a voltage change at the reference impedance, and the plasma density is calculated using this. The above experiment was conducted by integrating the plasma diagnosis system and the linear atmospheric pressure DBD plasma source. It was confirmed that plasma density varies depending on various parameters (gas flow rate, Ar/O₂ mixture ratio, Input power).

Key Words : Atmospheric Pressure Plasma, Plasma Diagnosis, DBD Plasma, Plasma Density

1. 서 론

현재 전세계적으로 반도체 시장은 각광받는 분야로 급격한 성장세를 보이고 있으며 2017년 기준으로 세계 반도체 매출액은 4000억 달러를 돌파할 것으로 전망되고 있다 [1]. 최근 반도체, 디스플레이 및 태양전지 산업에서 진공 환경이 아닌 대기압 환경에서 진행되는 대기압 플라즈마 공정의 비율이 높아지고 있다. 대기압 플라즈마를 이용하여 CPU, DRAM 등의 반도체 공정에서 기판 세정용 공정을 실시하며 디스플레이 분야에서는 기판 세정 및 기판의 친수성화 용도로 사용되고 있다[2-3]. 반도체 웨이퍼 및 디스플레이 기판 크기의 증가에 따라 공정 1 step 진행에 따른 비용이 증가하고 있다. 이러한 추세에 맞춰 대기압 플라

즈마의 산업 적용 및 연구가 활발하게 진행되고 있으며 공정 모니터링 및 제어기술의 필요성이 증가하고 있다.

현재 대기압 플라즈마를 진단하는 방법으로 대표적으로 사용되는 방법은 플라즈마 방출광을 이용한 광학적 측정방법인 OES(Optical Emission Spectroscopy)이다[4-6]. 이러한 광학적 진단 방법은 Ex-situ 방식으로 플라즈마 진단 정확도가 떨어지는 단점이 존재한다. 또한 탐침형 프로브를 이용하여 플라즈마를 진단하는 방법 또한 존재하지만 탐침이 플라즈마에 섭동(Perturbation)하여 측정하기 때문에 플라즈마의 정보가 왜곡될 수 있는 여지가 있다[7].

본 연구에서는 대기압 플라즈마를 전기적으로 진단할 수 있는 방식인 플라즈마의 임피던스 변화를 이용하여 플라즈마 밀도를 측정하는 기술을 개발하였다. 이는 탐침을 플라즈마에 섭동하는 방식 대신 평판형 전극을 플라즈마 소스에 설치하는 방식을 이용하여 플라즈마에 미치

†E-mail: gckwon@kw.ac.kr

는 영향을 최소화하였으며 플라즈마 방전 소스에서 가까운 위치에 전극을 설치함으로써 실시간으로 플라즈마 상태를 진단할 수 있는 방법이다. 위 기술을 이용하여 대기압 플라즈마 공정 조건에서 가스 유량과 입력 파워에 따른 플라즈마 밀도를 측정하는 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

대기압 플라즈마 밀도를 측정하기 위하여 플라즈마 소스 및 진단 시스템을 플라즈마 소스부, 플라즈마 진단부, 기판부로 Fig. 1과 같이 구성하였다. 플라즈마 소스부는 선형 대기압 플라즈마인 (주) 영신 알에프(HI-Z HEAD)를 이용하여 300 mm 길이의 절연체에 둘러싸인 원통형 전극 구조에 300 ~ 400 W의 13.56 MHz의 주파수와 RF파워를 인가하고, Ar 가스와 O₂ 가스를 주입하여 DBD(Dielectric Barrier Discharge)방식으로 플라즈마를 방전하였다.

플라즈마 소스와 일체화된 플라즈마 진단부는 신호발생기(Signal generator), 플라즈마 방전에 따라 바뀐 임피던스 값을 나타내는 측정부 임피던스(Measured Impedance, Z_x), 기준 임피던스(Reference Impedance, Z_R)와 신호 처리부(Signal Processing system)로 구성된다.

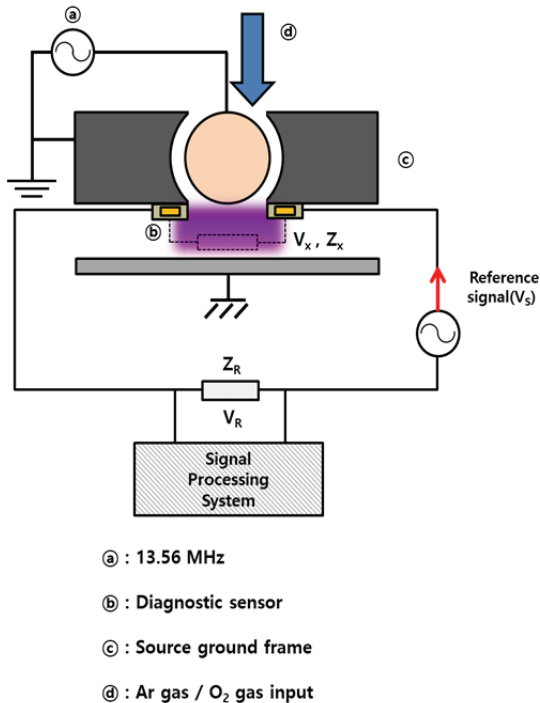


Fig. 1. Integration of plasma source and measurement system.

신호발생기에서 나온 기준 신호(Reference signal)는 플라즈마에 의해 임피던스 값이 바뀔 때 따라 측정부 임피던스와 기준 임피던스 간 전압 분배가 다르게 나타나게 된다. 이러한 전압 변화를 이용, 기준 신호와 기준 임피던스와 측정부 임피던스 간 상관관계 식을 이용하여 Ar 가스 유량과 O₂ 가스 유량 및 인가 RF 전력에 따른 대기압 플라즈마 밀도를 실시간으로 측정하였다. 플라즈마와 접촉하여 측정부 임피던스를 얻기 위한 센서(Sensor)는 전도성 물질(Conductor)에 유전체(Dielectric)를 덮어 제작[8]하였고 플라즈마가 센서 사이를 통과하면서 형성된 임피던스 값(Z_x)을 기준 임피던스(Z_R)와 신호 처리부를 통하여 플라즈마 밀도를 측정한다.

기판부는 웨이퍼 및 유리 기판을 올릴 수 있는 금속판으로 접지하여 구성하였다.

선형 대기압 DBD 플라즈마 소스를 이용하여 방전된 플라즈마가 기판부를 향해 내려오는 통로에 플라즈마 소스와 일체형으로 구성된 진단 시스템에서 RF power와 가스 유량에 따른 플라즈마 밀도를 측정하는 실험으로 구성하였다.

측정부 임피던스의 변화는 기준 임피던스에서 측정된 전압으로 알 수 있으며 Fig. 2와 같이 플라즈마 방전 전 임피던스와 플라즈마 방전 후 측정부 임피던스 변화에 따라 분배되는 기준 임피던스의 전압이 다르게 나타난다. 기준 임피던스의 전압 변화를 이용하여 플라즈마 밀도(Plasma density, n_e)를 산출할 수 있다.

$$n_e = \frac{V_R - V_R'}{e\omega Z_R} \quad (1)$$

이때 V_R는 플라즈마 방전 전 기준 임피던스에 걸리는 전압이며, V_R'은 플라즈마 방전 후 기준 임피던스에 걸리는 전압이다. ω는 기준 신호부의 주파수로 기준 임피던스에 인가된다. e는 기본전하(Elementary charge)를 의미하며, 1.602×10⁻¹⁹C를 의미한다.

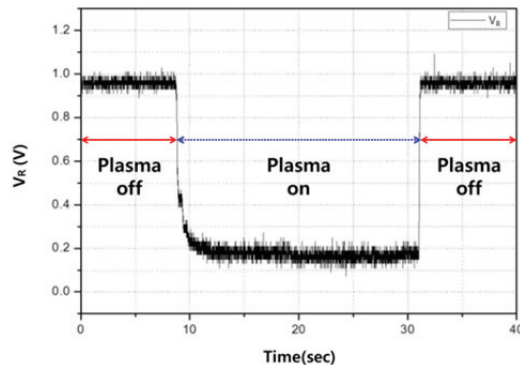


Fig. 2. Voltage variation by plasma discharge on / off.

Fig 2는 일정한 Ar 가스 유량과 일정한 RF power조건에서 측정부 임피던스의 플라즈마 임피던스 변화가 시간에 따른 기준 임피던스에서의 전압 변화를 나타낸 것이다. 기준 임피던스의 전압 변화가 플라즈마가 없을 때보다 플라즈마가 있을 때 낮아짐을 실시간으로 측정할 수 있음을 확인하였다.

3. 실험 및 결과

구성된 선형 대기압 DBD 플라즈마 소스 및 진단 시스템에서 Ar가스 유량에 따른 플라즈마 밀도 측정 실험을 진행하였다. DBD 플라즈마 소스에 일정한 350 W의 RF power, 일정한 20 lpm유량의 산소 가스(O₂ gas)를 주입하는 조건에서 아르곤 가스(Ar gas) 유량을 증가시키며 플라즈마 밀도를 측정하였다. Fig 3은 10 lpm 부터 16 lpm 까지 2 lpm 씩 Ar 가스를 증가시키며 플라즈마 밀도 변화를 나타낸 그래프이다.

Ar 가스 유량이10 lpm 일 때 플라즈마 밀도는 $2.81 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 12 lpm 일 때, $2.92 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 14 lpm 일 때 $3.22 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 16 lpm 일 때 $3.65 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 으로 측정되었다. Fig 3에서 Ar 가스 유량이 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 증가함을 확인하였다[9].

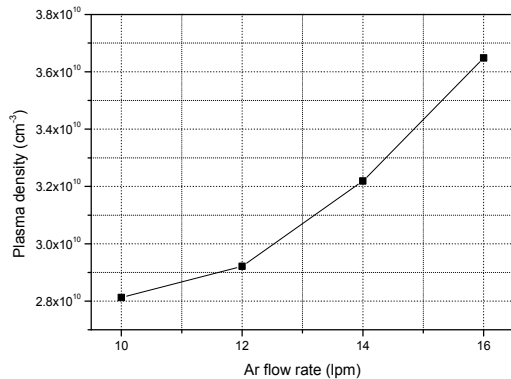


Fig. 3. Plasma density by Argon gas flow rate variation.

구성된 선형 대기압 DBD 플라즈마 소스 및 진단 시스템에서 이번에는 O₂ 가스 유량을 바꾸가며 플라즈마 밀도를 측정하는 실험을 진행하였다. RF power 350 W, Argon gas 유량 8 lpm을 일정하게 고정하는 조건에서 O₂ 가스 유량을 각각 10 lpm, 20 lpm으로 변화시키며 플라즈마 밀도 측정 실험을 진행하였다. Fig 4는 그 결과를 나타낸 그래프이다.

O₂ 가스 유량 변화에 따른 플라즈마 밀도 값은 Ar 가스 유량 변화와는 다른 결과가 나타났다. O₂ 가스 10 lpm 일 때 플라즈마 밀도는 $1.96 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 20 lpm 일 때 플라즈마

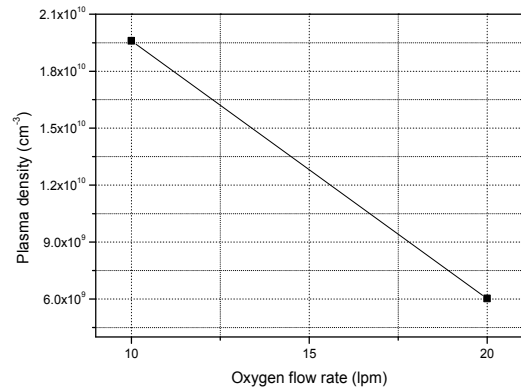


Fig. 4. Plasma density by Oxygen gas flow rate variation.

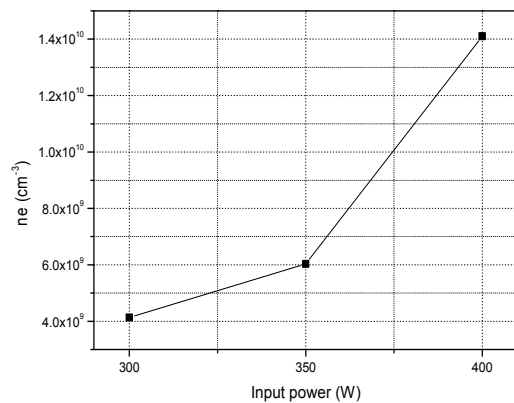


Fig. 5. Plasma density by Input power variation.

밀도는 $6.03 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 으로 나타났다. 이는 O₂ 가스와 같은 분자 가스(Molecular gas)의 전자 - 이온 쌍(Electron - ion pair) 형성에 따른 충돌 에너지 손실은 Ar가스와 같은 불활성 기체(Noble gas)와 비교하였을 때 더 높기 때문에 일정한 Ar 가스 유량 하에 O₂ 가스 유량이 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 감소하는 결과가 나타난 것으로 추정할 수 있다[10].

Ar 가스 유량은 8 lpm, O₂ 가스 유량은 20 lpm으로 일정하게 고정된 채 선형 대기압 DBD 플라즈마 소스에 인가되는 RF power를 변경하며 플라즈마 밀도를 측정하였다. Fig 5는 RF power에 따른 플라즈마 밀도를 나타낸 그래프이다.

RF power가 증가함에 따라 플라즈마 밀도 또한 증가하는 경향성을 보였다. RF power가 300 W 일 때 플라즈마 밀도 값은 $4.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$, 350 W 일 때, $6.03 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$, 400 W 일 때, $1.41 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 으로 각각 측정되었다.

Ar 가스 유량과 RF power가 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 증가함을 확인하였고 일정한 Ar 가스 유량 보다 높은 O₂ 가스 유량이 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 감소

함을 확인하였다. 이는 대기압 플라즈마 임피던스의 변화는 기준 임피던스의 전압 변화로 나타나고 플라즈마 유무에 따른 기준 임피던스의 전압 변화를 이용하여 대기압 플라즈마 밀도 측정 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

구성된 선형 대기압 DBD 플라즈마 소스 및 진단 시스템에서 일정한 RF power와 일정한 산소 가스 유량 조건 하에 아르곤 가스 유량에 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 증가함을 확인하였고, 일정한 RF power와 일정한 아르곤 가스 유량 조건 하에 아르곤 가스 보다 높은 산소 가스의 유량을 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 감소함을 확인하였다.

일정한 아르곤 가스 유량 및 일정한 산소 가스 유량 조건에서 선형 대기압 DBD 플라즈마 소스에 인가되는 RF power가 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 증가함을 확인하였다.

종합적으로 고려하면, 방전 가스(Discharge gas)와 RF power에 따라 대기압 플라즈마 임피던스의 변화는 기준 임피던스의 전압 변화로 나타나고 플라즈마 유무에 따른 기준 임피던스의 전압 변화로 플라즈마 밀도를 정량적으로 측정하였고 실시간으로 대기압 플라즈마 상태를 모니터링 할 수 있는 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 광운대학교 교내학술연구비 지원 및 산업통산자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20173030014460).

참고문헌

1. "Technology Roadmap for SME 2017-2019." Small and Medium Business Administration, (2016).
2. Woo suk Kang, Min Heo, "Surface treatment using

- atmospheric pressure plasma." Journal of the KSME, Vol. 55, No. 6, pp. 42~44.
3. Yokoyama, T., et al. "The improvement of the atmospheric-pressure glow plasma method and the deposition of organic films." Journal of Physics D: Applied Physics 23.3 (1990): 374.
4. Machala, Z., et al. "Emission spectroscopy of atmospheric pressure plasmas for bio-medical and environmental applications." Journal of Molecular Spectroscopy 243.2 (2007): 194-201.
5. Förster, S., C. Mohr, and W. Viöl. "Investigations of an atmospheric pressure plasma jet by optical emission spectroscopy." Surface and Coatings Technology 200.1-4 (2005): 827-830.
6. Sornsakdanuphap, Jirapong, et al. "Electron temperature and density of non-thermal atmospheric pressure argon plasma jet by convective wave packet model." Journal of the Korean Physical Society 70.11 (2017): 979-989.
7. Xu, Kunming G., and Steven J. Doyle. "Measurement of atmospheric pressure microplasma jet with Langmuir probes." Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films 34.5 (2016): 051301.
8. Elbuken, Caglar, et al. "Detection of microdroplet size and speed using capacitive sensors." Sensors and Actuators A: Physical 171.2 (2011): 55-62.
9. Humud, Hammad R., Qusay A. Abbas, and Aws F. Rauf. "Effect of Gas Flow Rate on The Electron Temperature, Electron Density and Gas temperature for Atmospheric Microwave Plasma Jet."
10. Takechi, K., and M. A. Lieberman. "Effect of Ar addition to an O₂ plasma in an inductively coupled, traveling wave driven, large area plasma source: O₂/Ar mixture plasma modeling and photoresist etching." Journal of Applied Physics 90.7 (2001): 3205-3211.

접수일: 2018년 5월 28일, 심사일: 2018년 6월 18일,
 게재확정일: 2018년 6월 20일