



식각공정의 신뢰성 향상을 위한 모니터링 기술에 관한 연구

김경남*

대전대학교 반도체공학과

A Study on Monitoring Technology to Improve the Reliability of Etching Processes

Kyongnam Kim *

Department of Semiconductor Engineering, Daejeon University, Daejeon 34520, Korea

(Received 20 April, 2024 ; revised 30 April, 2024 ; accepted 02 May, 2024)

Abstract

With the development of industry, miniaturization and densification of semiconductor components are rapidly progressing. Particularly, as demand surges across various sectors, efficiency in productivity has emerged as a crucial issue in semiconductor component manufacturing. Maximizing semiconductor productivity requires real-time monitoring of semiconductor processes and continuous reflection of the results to stabilize processes. However, various unexpected variables and errors in judgment that occur during the process can cause significant losses in semiconductor productivity. Therefore, while the development of a reliable manufacturing system is important, the importance of developing sensor technology that can complement this and accurately monitor the process is also growing.

In this study, conducted a basic research on the concept of diagnostic sensors for thickness based on the physical changes of thin films due to etching. It observed changes in resistance corresponding to variations in thin film thickness as etching processes progressed, and conducted research on the correlation between these physical changes and thickness variations. Furthermore, to assess the reliability of thin film thickness measurement sensors, it conducted multiple measurements and comparative analyses of physical changes in thin films according to various thicknesses.

Keywords : Plasma; Atomic Layer Etching; Thickness; Thin Film, Sensor.

1. 서 론

반도체 소자의 생산성 향상을 위한 소자의 미세화 및 대구경화는 제조상에 많은 문제점과 이슈를 발생시키고 있다. [1-3] 이러한 제조상의 다양한 문제들 중 대표적인 것은 웨이퍼 내에 반도체 칩의 생산 수율이 낮다는 것이다. 그중 플라즈마를 이용한 공정은 반도체 공정중 많은 부분을 차지하

고 있고, 아직까지 이러한 공정이 이루어지는 플라즈마에 대한 메커니즘이 정확하게 보고되지 않았기 때문에 플라즈마 공정중 발생하는 다양한 메커니즘과 결과들에 대해 예측이 쉽지 않다는 것이다. 많은 반도체 관련 장비업체들은 공정 장비에 대한 시스템 안정성 확보를 통해 이러한 불확실성을 해결하려고 노력하고 있지만, 근본적인 문제인 플라즈마 공정에 따른 결과에 대한 즉각적인 모니터링을 통한 공정 제어는 불가능 하다는 것이다. 그로 인한 많은 연구자들은 공정의 오류를 발생할 수 있는 온도나 플라즈마 밀도와 같은 공정 파라

*Corresponding Author : Kyongnam Kim
Department of Semiconductor Engineering, Daejeon University
Tel: +82-42-280-2413 ; Fax: +82-42-280-2418
E-mail: knam1004@dju.kr

미터를 측정하여 공정 결과 예측을 할 수 있는 많은 연구를 진행하고 있다. Huang et al. group은 ellipsometer을 이용하여 플라즈마 및 공정이 진행된 웨이퍼에 대한 분석에 관하여 연구 보고하였고, Chae et al. group은 optical emission spectroscopy (OES)와 impedance analyzer를 이용하여 실시간 식각공정에 따른 end point detection에 관한 연구를 보고를 하였다. [4,5] 이러한 방법은 실시간 모니터링이 가능하였고, nm 단위까지 측정이 가능하였지만, 측정하고자 하는 웨이퍼의 표면 오염이나 평판도, 굴절률, 파장의 수, 광학계수에 대한 보정등 오류에 대한 변수가 많았으며, 측정자에 따른 오차범위가 커서 값을 신뢰하기 힘들다는 단점이 있었다. 또 다른 방법으로는 전기적 분석 장치를 이용하여 공정에 사용되는 플라즈마를 분석하여 공정에 따른 결과를 예측하는 연구가 보고되고 있다. [6,7] 이러한 측정 방식은 간접적 측정함으로써, 최종적인 공정의 정확성 및 신뢰성을 높일 수 있지만, 공정 된 웨이퍼의 상태를 실시간으로 예측하기에는 어렵다는 단점이 있다. 또한, 반도체 공정 장비를 구성하고 있는 여러 부분품을 이용하여 공정에 영향을 미치는 파라미터를 측정하고, 이에 관한 오류를 실시간 확인하는 연구가 보고되어 지고 있다. [8-13] 이 또한 플라즈마 공정이 진행된 웨이퍼를 직접적으로 분석 및 측정하는 것이 아니기에 공정 결과에 대한 예측의 정확성이 떨어진다는 단점이 있다. 지금까지 언급한 바와 같이 제조 공정에 대한 직접 혹은 간접적인 모니터링 방법이 활발하게 연구되어지고는 있으나, 정확도나 신뢰성 측면에서 많은 연구가 필

요하다고 사료된다. 특히, 식각 공정과 같이 정밀한 공정제어가 요구되는 분야에서의 실시간 공정에 따른 결과에 대한 모니터링 기술은 생산성과 직접적으로 연결되는 가장 중요한 부분이다. 그러한 이유로, 플라즈마 공정중 실시간 in-situ 모니터링에 대한 센서 기술개발은 매우 중요하며, 이에 대한 중요성도 증가되고 있다. [14] 반도체 소자의 생산성 극대화 및 공정의 신뢰성을 높이기 위해서는 반도체 공정을 실시간으로 측정하고, 측정된 결과가 공정의 안정화 개선을 위해 활용될 필요가 있다. 특히 in-situ로 두께를 측정할 수 있는 실시간 모니터링 기술은 공정 이후 웨이퍼의 정확한 정보를 주게 될 것이며, 이를 통한 공정 제어는 소자의 고집적화 및 생산성 향상을 위한 필수 개발요소일 것이다. [5]

본 연구에서는 식각공정에 따른 박막의 물리적 두께 변화를 실시간으로 측정하기 위한 진단 센서 개념에 대한 기초 연구를 진행하였다. 박막 두께 변화에 따른 저항을 측정하였고, 측정된 물리량 변화에 따른 두께 변화에 대한 반복적인 실험을 진행하였다. 이를 통해 두께변화와 물리량 변화가 선형성을 보이는 구간을 관찰하였다.

2. 실험 방법

2.1. 플라즈마 공정 시스템

그림 1은 본 연구에서는 식각 공정 및 그에따른 두께 측정 센서 개발을 위해 사용된 플라즈마 식

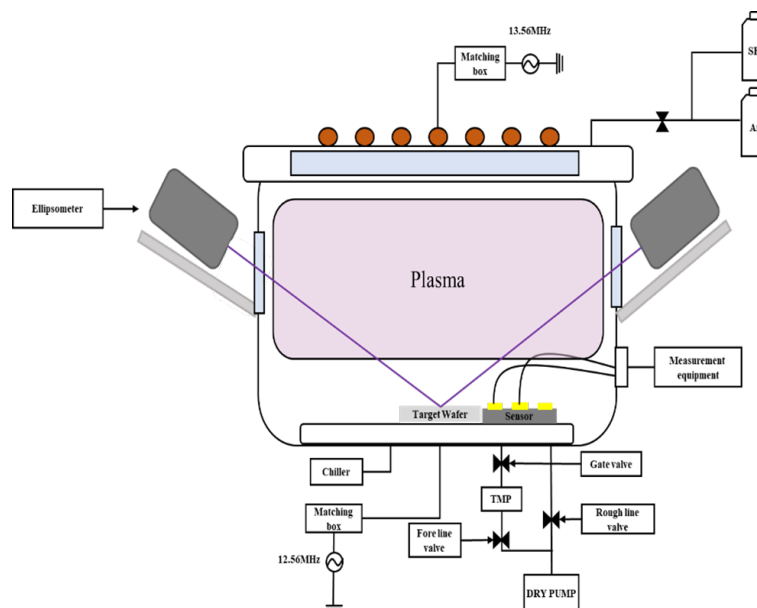


Fig. 1. In-situ Inductivity Coupled Plasma Dry etching system.

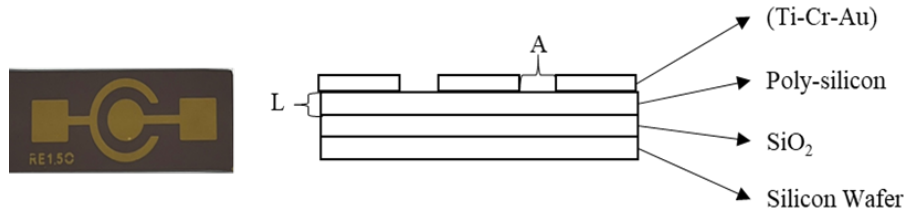


Fig. 2. Schematic diagram of the basic design of the sensor.

각 시스템의 개략도이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 플라즈마를 발생시키기 위한 소스 파트와 플라즈마내 이온들의 독립적인 에너지 제어를 위한 바이어스가 인가되는 기판쪽 파트로 구성되어 있다. 플라즈마 공정을 위한 저진공 상태를 만들기 위해 1차 Pump로 Dry pump(Dry Kashiya, HC450)을 사용하였고, 고진공 상태를 만들기 위한 2차 Pump로 TMP(Turbomolecular pump TMP Shimadzu, TMP 2003LM)을 사용하였다. 플라즈마 방전을 위한 Source로는 직경 180mm 인 Spiral-type 안테나를 사용하였으며, quartz plate를 이용하여 챔버 내부와 격리시켰다. 플라즈마 소스는 13.56MHz rf power를 사용하였고 기판쪽에는 12.56MHz rf power를 연결하여 사용하였다. 기판은 20°C로 유지하였으며, 식각가스로는 SF₆와 Ar을 이용하였다. 제작된 센서의 식각공정에 따른 전기적 특성 변화를 관찰하기 위해 일정 시간동안 플라즈마 방전을 반복하는 cyclic 형태로 공정을 진행하였다. 또한, 플라즈마 공정에 따른 두께 변화를 모니터링 하기 위해 다파장 ellipsometer가 설치되어 있으며, feed through 통하여 저항계측기(MCP-HT800)와 두께 측정 센서를 연결하여 in-situ 모니터링이 가능하도록 구성하였다.

2.2. 센서 구조 및 원리

그림 2는 본 연구에서 사용된 센서의 모습과 단면에 대한 개략도이다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이, Si wafer위에 300nm 두께의 SiO₂를 thermal deposition방식으로 증착시켰다. 또한, 식각 공정에 따른 두께 모니터링을 위한 Si 부분을 low pressure chemical vapor deposition (LPCVD) 방식을 이용하여 증착하였다. 그 위에 Ti(300nm)-Cr(50nm)-Au(100nm)을 E-beam evaporator를 이용하여 증착하여 전극을 형성하였다. 외경의 7mm이고 내경은 6mm인 전극을 형성하였으며, 전극사이에 1mm 간격의 Poly-Si이

노출되어 있다. 공정에 노출된 부분을 식각 하면서 변하는 면저항을 측정하였고, 신뢰성 향상을 위해 같은 실험을 다양한 형태로 반복하였다. A는 식각하고자 하는 단면적이며 센서 전극 사이에 노출된 부분으로써 공정에 따라 변하지 않는 변수이다. 또한, L은 공정 시간에 따라 변화하는 파라미터이고, 플라즈마 건식 식각을 통해 물질의 일정 두께가 감소되는 양을 확인한 후 저항의 변화량을 통해 두께와의 상관관계를 알아보는 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 플라즈마 공정 챔버 안 substrate 위에 sensor를 위치시키고 공정 cycle이 진행됨에 따라 poly-Si이 식각이 되어 남아있는 두께와 그에 따라 변화하는 표면저항의 변화를 측정한 그림이다. 실험조건으로는 SF₆와 Ar을 1:4비율로 5mTorr의 공정압력을 유지하였으며, 100W의 입력전력을 이용하여 플라즈마를 방전하여 공정을 진행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 식각공정이 진행됨에 따라 poly-Si이 식각량이 증감함을 관찰할 수 있었고, 그에 따라 표면저항도 선형적으로 증가하고 있음을 관찰할 수 있었다. 이는 예상한 바와 같이, 제작된 센서에서의 전극사이의 Poly-Si이 식각이 되어 측정된 결과이다. 또한, 식각 cycle이 진행됨에 따라 더 많은 식각이 진행되어 표면저항이 선형적으

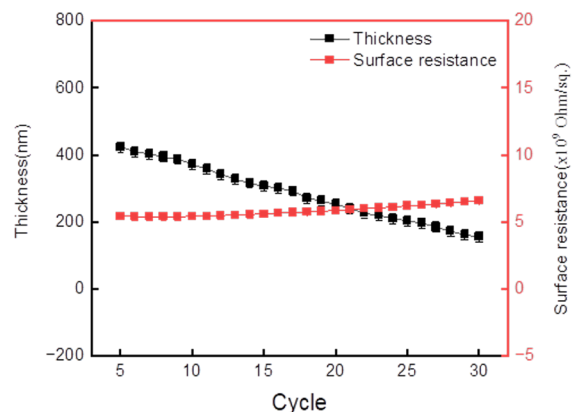


Fig. 3. Changes in thickness and surface resistance according to the etching process.

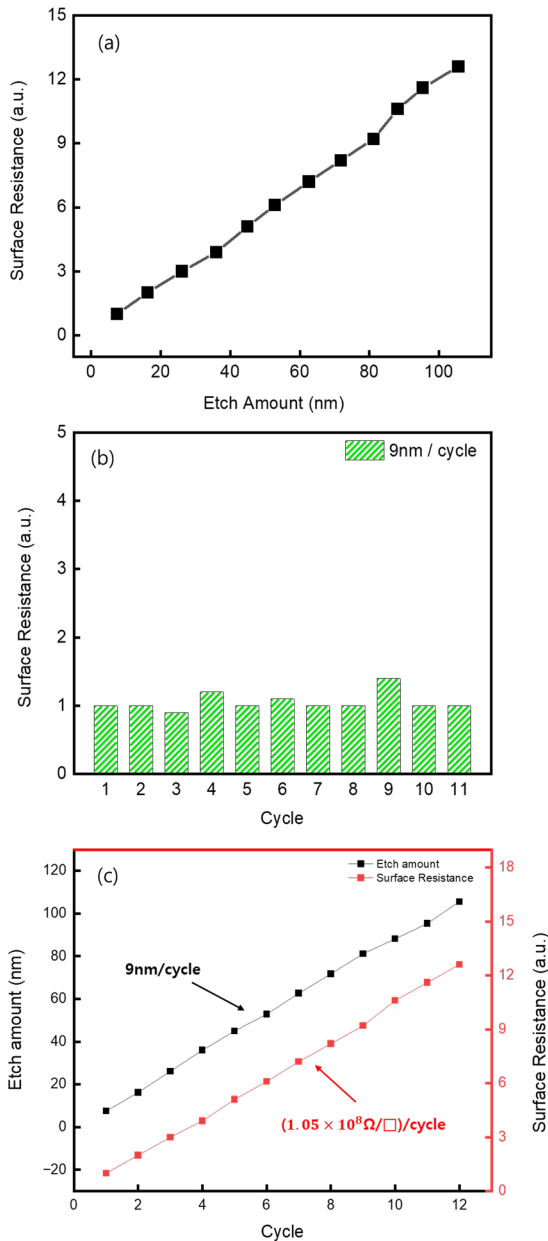


Fig. 4. (a) Changes in etch amount and surface resistance according to plasma exposure (b) Surface resistance measurement data according to plasma etching cycle, (c) Change in etch amount and surface resistance according to plasma etching cycle.

로 증가함을 관찰한 것은 표면저항의 변화량을 통해 식각량을 모니터링 할 수 있는 중요한 기초 데이터라고 사료된다. 센서 측정 결과의 신뢰성을 위해 10회 이상의 반복 실험을 통한 평균값을 사용하였다. 또한, 서로 다른 시점에 제작된 6개의 시편을 이용하고, 이를 반복 실험함으로써 재현성과 신뢰성을 확인하였다.

그림 4는 cycle에 따른 식각 속도를 낮추고 기판에 인가되는 바이어스 전압을 이용하여 표면저항을 측정한 그림이다. 플라즈마 방전을 위해 소스에

150W의 전력을 인가하고, -13V정도의 기판 바이어스 전압을 인가하여 식각 공정을 진행하였다. 공정압력은 SF₆와 Ar을 1:4비율로 고정하고 4mTorr의 공정압력을 유지하였다. 그림(a)에서 볼 수 있듯이, 사이클당 5s 간격으로 플라즈마를 방전시켜 식각 공정을 수행하였다. 식각량이 선형적으로 증가함에 따라 면 저항 값 또한 선형적으로 증가함을 관찰할 수 있었다. 그림(b)는 플라즈마 식각 cycle 각각에 따른 표면저항을 측정한 그림이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 면 저항 변화량 및 두께 변화량이 모두 일정한 영역 안에 수렴한다는 것을 확인할 수 있었다. 그림 (c)는 식각 cycle에 따른 식각량과 표면저항의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이 cycle이 진행됨에 따라 식각량이나 표면저항 값이 선형적으로 증가하고 있음을 관찰할 수 있었다. 이는 플라즈마 공정에 따른 식각량에 대한 모니터링을 표면저항의 변화를 통해 추측 및 모니터링이 가능한 결과라고 사료된다. 또한, 한 cycle당 약 9nm로 식각이 되고 있는 경우 $1.05 \times 10^8 \Omega/\text{sq}$. 정도의 면저항이 변화하고 있음을 계산할 수 있었다. 이러한 결과들로 예상해보자면, 두께에 따른 면 저항 변화량을 정량적으로 관찰할 수 있고, 그에따라 실시간으로 공정에 따른 식각 특성을 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 5는 낮은 식각량 공정조건에서도 센서가 표면저항 변화량을 통해 유의미한 변화를 모니터링하고 신뢰성 있는 식각 결과가 측정이 될 수 있는지를 알아보기 위해 측정한 결과이다. 플라즈마 방전을 위해 소스에 150W의 전력을 인가하고, -13V정도의 기판 바이어스 전압을 인가하여 식각 공정을 진행하였다. 공정압력은 SF₆와 Ar을 1:4 비율로 고정하고 4mTorr의 공정압력을 유지하였

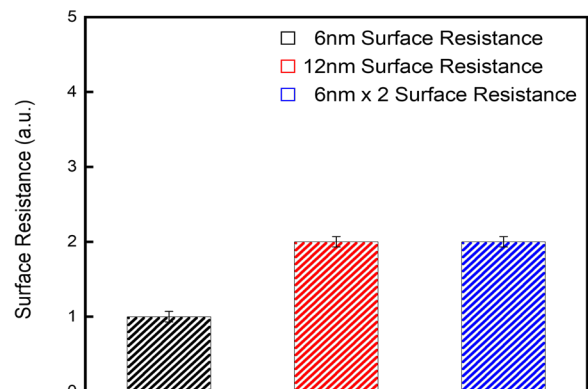


Fig. 5. Changes in etch amount and surface resistance according to cycle changes.

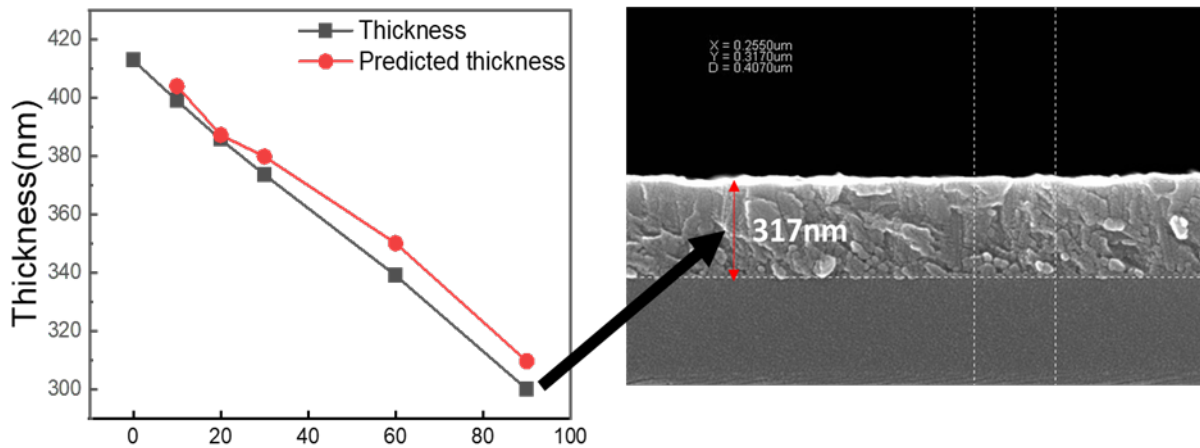


Fig. 6. (a) Changes in thickness and surface resistance due to the plasma process and the resulting expected etching values through the sensor (b) Measurement of the etching cross-section through SEM.

다. 그림에서 볼 수 있듯이, cycle마다 6s와 12s씩 공정을 진행할 경우, 약 6nm와 12nm가 각각 식각이 된다는 것을 관찰할 수 있었다. 6s를 2번 반복하여 12s에 해당하는 식각을 진행하였을 경우나, 한번에 12s를 진행하였을 경우, 식각 속도면에서는 15%정도 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었으며, 그에 따른 표면저항은 거의 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 이는 공정 시스템에서의 센서 resolution과 관련된 문제로써 향후 시스템 개선과 함께 센서의 안정성을 향상시켜 낮은 식각량에서도 유의미한 결과를 얻을 수 있도록 향후 수정 및 보완 해야할 것으로 사료된다.

그림 6의 (a)는 플라즈마 공정에 따른 poly-Si의 식각특성과 표면저항의 변화 및 그에 따른 센서를 통해 예측된 식각 특성 그래프를 나타낸 것이다. 플라즈마 방전을 위해 소스에 150W의 전력을 인가하고, -13V정도의 기판 바이어스 전압을 인가하여 식각 공정을 진행하였다. 공정압력은 SF₆와 Ar을 1:4비율로 고정하고 4mTorr의 공정압력을 유지하였다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이, 플라즈마 식각 공정이 진행됨에 따른 표면저항의 변화를 바탕으로 예상되는 두께와 실제 시편을 측정된 데이터를 나타내었다. 공정 시간이 증가할 수록 오차가 증가했지만 전체적으로 5%이하의 예측 오차를 관찰할 수 있었다. 또한 그림 (b)는 측정의 신뢰성을 높이기 위해 90s동안 노출된 시편을 이용하여 SEM을 이용하여 두께를 측정된 그림이다. SEM과 ellipsometer를 이용해 측정된 두께 모두 317nm로 측정되었고, 이를 통해 식각공정에 따른 센서의 면저항의 변화로 시편의 두께 변화를 모니터링 할 수 있다는 것을 예상할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 식각공정에 따른 박막의 두께변화를 전기적 특성 분석을 통해 실시간 모니터링 할 수 있는 진단 센서 대한 기초 연구가 진행되었다. 식각공정에 따른 박막의 두께 변화와 그로인한 표면저항의 변화를 측정하였고, 전반적인 측정값들의 경향이 선형성을 보여준다는 것을 관찰할 수 있었다. Cycle 변화에 따른 식각량, 표면저항의 선형적 변화를 바탕으로 식각량에 따른 표면저항 변화량이 정량적으로 계산되었다. 또한 공정 조건을 9nm/cycle에서 6nm/cycle로 변화함에 따라 식각량과 표면저항 간에 상대적으로 큰 오차를 확인하였으며, 이는 향후 식각 시스템과 센서의 개선을 통해 정확성을 높여가야 할 부분이라고 사료된다. 플라즈마 식각 공정 시간의 변화에 따라 표면저항을 통해 시편의 두께 예상하기 위한 연구를 진행하였으며, 전체적으로 5%이내의 오차율 내에서 일치함을 관찰할 수 있었다.

References

- [1] N.G. Orji, M. Badaroglu, B.M. Barnes, C. Beitia, B.D. Bunday, U. Celano, R.J. Kline, M. Neisser, Y. Obeng, A.E. Vldar, Metrology for the next generation of semiconductor devices, *Nature Electronics*, 1 (2018) 532-547.
- [2] I.H. Seong, J.J. Lee, C.H. Cho, Y.S. Lee, S.J. Kim, S.J. You, Characterization of SiO₂ over poly-Si mask etching in Ar/C₄F₈ capacitively coupled plasma, *Applied*

- Science and Convergence Technology, 30 (2021) 176-182.
- [3] D.S. Kim, J.E. Kim, Y.J. Gill, Y.J. Jang, Y.E. Kim, K.N. Kim, G.Y. Yeom, D.W. Kim, Anisotropic/Isotropic atomic layer etching of metals, *Applied Science and Convergence Technology*, 29 (2020) 41-49.
- [4] H.T. Huang, F.L. Terry Jr, Spectroscopic ellipsometry and reflectometry from gratings (scatterometry) for critical dimension measurement and in situ, real-time process monitoring, *Thin Solid Films*, 455-456 (2004) 828-836.
- [5] H.G. Jang, D.K. Kim, H.B. Kim, S.R. Han, H.Y. Chae, Real-time plasma process monitoring with impedance analysis and optical emission spectroscopy, *Journal of the Korean Vacuum Society*, 02a (2010) 473.
- [6] K. Kitagawa, Thin-film thickness profile measurement by three-wavelength interference color analysis, *Applied Optics*, 52 (2013) 1998-2007.
- [7] F.F. Chen, Langmuir probe diagnostics, In: mini-course on plasma diagnostics, *IEEE International Conference on Plasma Science*, (2023) 20-111.
- [8] V. Godyak, Comments on plasma diagnostics with microwave probes, *Physics of Plasmas*, 24 (2017) 060702.
- [9] K. Tsumori, M. Wada, Diagnostics tools and methods for negative ion source plasmas, a review, *New Journal of Physics*, 19 (2017) 045002.
- [10] S.Y. Park, S.B. Lee, E.S. Hong, B.S. Kim, J.H. Yi, G. Kim, J.D. Park, A data mining technique for real time process monitoring with mass spectrometry: APC: Advanced process control, *IEEE/31st Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, (2020) 1-4.
- [11] T.M. Kim, J.W. Jeon, A study on the real-time flow rate change monitoring methods of mass flow controller in in-situ semiconductor processing, *IEEE/32nd Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, (2021) 1-4.
- [12] M.H. Hung, T.H. Lin, F.T. Cheng, R.C. Lin, A novel virtual metrology scheme for predicting CVD thickness in semiconductor manufacturing, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12 (2007) 308-316.
- [13] P. Kang, H.J. Lee, S.Z. Cho, D.G. Kim, J.W. Park, C.K. Park, S.Y. Doh, A virtual metrology system for semiconductor manufacturing, *Expert Systems with Applications*, 36 (2009) 12554-12561.
- [14] J.H. Kang, S.H. Lee, H. Ruh, K.M. Yu, Development of a thickness meter for conductive thin films using four-point probe method, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16 (2021) 2265-2273.