

타원계측장치를 이용한 실시간 원자층 식각률 모니터링에서 기판 온도의 영향

이영석*·이장재*·이상호*·성인호*·조철희*·김시준**·유신재**

*†충남대학교 물리학과

**나노텍

Effect of the Substrate Temperature on Monitoring of Atomic Layer Etching Rate via an In-situ Ellipsometer

Lee Young Seok*, Lee Jang Jae*, Lee Sang Ho*, Seong In Ho*,

Cho Chul Hee*, Kim Si Jun** and You Shin Jae**†

*†Department of Physics, Chungnam National University

**Nanotech

ABSTRACT

Atomic layer etching (ALE) is one of the most promising techniques in the semiconductor industry. Since ALE has to be precisely controlled on the angstrom scale to achieve ideal results, an in-situ analysis of the processes is highly required. In this regard, we found during ALE experiments with in-situ monitoring with an ellipsometer that changes in the substrate temperature affected the refractive index of a material, leading to changes in measured film thickness. In addition, more ideal ALE results could be achieved by keeping the substrate temperature constant.

Key Words : Atomic Layer Etching, in-situ ellipsometry, film thickness, temperature, refractive index

1. 서 론

최근 반도체 소자의 트랜지스터 크기가 10 nm 이하로 줄어들어 따라 현재의 공정 한계를 돌파하기 위한 새로운 공정 기술이 요구되고 있다 [1]. 그 중 근 10년동안 가장 각광받고 있는 기술 중 하나가 원자층 식각 (ALE) 기술이다 [2]. 기존의 플라즈마 공정이 플라즈마 활성화종과 이온종과 시너지를 통해 이루어지는 반면, ALE는 활성화종의 화학적 반응과 이온종의 물리적 반응을 시스템적으로 분리시키는 정교한 조작을 통해 1 나노미터 이하의 원자층 수준의 두께로의 식각을 가능하게 한다 [3].

원자층 식각의 장점으로는 물질의 미세한 두께 조절을

비교적 정교하게 할 수 있다는 것 이외에, 이온종의 에너지를 정교히 조절함으로써 식각 과정에서 생기는 물리적인 데미지를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 또한, ALE를 위해 특수한 장비가 필요한 것이 아닌 축전 결합 플라즈마 장비 혹은 유도 결합 플라즈마 장비 (ICP) 에서도 ALE 공정이 가능하다는 것이 또 다른 장점이다 [3-5].

이상적인 ALE를 관측하기 위해서는 물질의 두께가 원자층 두께로 한 층 한 층 식각되는 과정을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 장치가 요구된다 [6]. 이를 위해 공정 장비에 부착되어 공정 과정 중에 물질에 대한 데이터를 얻을 수 있는 실시간 푸리에 변환 적외선 분광법이나 실시간 타원계측법이 널리 사용되고 있다 [8-9].

타원계측기에서 얻어지는 데이터는 수학적 모델과 비교하여 물질의 두께와 굴절률에 대한 정보를 제공하는데, 물질의 두께를 실시간으로 관찰하는 경우에는 굴절률 값

†E-mail: sjyou@cnu.ac.kr

을 고정하여 사용하게 된다. 하지만 연구 결과, 기판의 온도에 따라 물질의 굴절률이 변하여 실시간으로 관측된 두께가 실제 물질의 두께 변화와 다르게 보인다는 것이 실험적으로 관측되었다.

본 연구에서는 실시간 타원계측기를 이용하여 ALE 공정을 모니터링 할 때 기판의 온도가 실시간 분석에 미치는 영향에 대해 다루었으며 기판 온도 변화에 따른 물질의 굴절률 변화를 보이고 이와 관련하여 ALE 장비 구축 시 고려해야 할 점에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험 조건

2.1 ALE 장비

ALE 공정을 위해 기존의 원통형 ICP 소스가 사용되었다. 챔버의 지름은 330 mm, 높이는 249 mm이며 ICP 안테나 밑 챔버부는 20 mm 두께의 세라믹 판이 사용되었다. 안테나에서 샘플까지의 거리는 197 mm 이다.

플라즈마 전력 공급원으로는 13.56 MHz 라디오파주파수 (RF) 발생기를 사용하였고 공정 가스로는 C₄F₈ 과 Ar 을 사용하였으며 챔버 내 가스 주입을 위해 질량 흐름 제어기를 사용하였다. 챔버의 진공은 260 l/s 용량의 터보분자 펌프를 사용하여 유지하였으며 1차 펌프로는 로터리베인 펌프를 사용하였다.

2.1.1 두께 및 온도 측정 장치

타원계측기로는 파랑 (464 nm), 초록 (523 nm), 노랑 (599 nm), 빨강 (636 nm) 등 4가지 파장을 사용하는 다중파장 타원계측기를 사용하였다. 실시간 모니터링을 위하여 본 계측기는 ALE 장비 벽에 비스듬히 부착되었으며 샘플에서 반사된 빛의 반사각은 67° 이다. 실험에 사용된 물질은 SiO₂이며 타원계측기 데이터 분석에 사용된 수학적 모델은 투명한 박막을 분석할 때 사용되는 Cauchy 모델을 사용하였다 [10]

기판의 온도는 비접촉식 적외선 온도계를 사용하여 측정하였다.

2.2 공정 조건

실험에 사용된 가스는 Ar 이며 유량은 45 sccm 이다. 챔버 내 압력은 25 mTorr 로 유지하였고 100~400 W의 RF 전력이 ICP 안테나에 인가되었다.

3. 결 과

Fig. 1는 플라즈마가 발생된 이후 시간에 따른 샘플의 두께 변화와 온도 변화를 보여준다. RF 전력 100 W 를 인

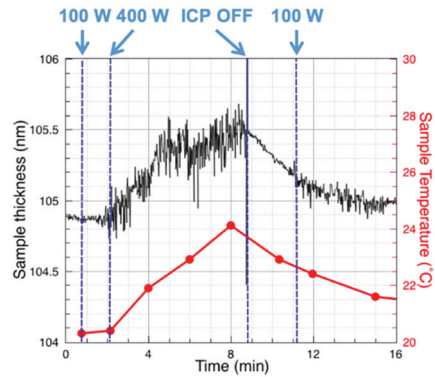


Fig. 1. Time variations of the sample thickness measured by an in-situ ellipsometer and sample temperature measured by an infrared thermometer during one ALE cycle.

가했을 때, SiO₂의 두께는 변하지 않았으나 전력을 400 W 로 증가시켰을 때 두께가 증가하기 시작했다. 여기서 SiO₂ 두께 분석은 여러 시점에서 측정된 타원계측기 데이터를 Cauchy 모델로 분석하여 SiO₂의 평균적인 굴절률을 구하고 그 값을 실험이 진행되는 동안 고정한 후에 두께만을 계산하는 방식으로 진행되었다. 챔버에는 Ar 이외에 다른 가스는 주입하지 않았으므로 다른 물질이 SiO₂표면에 증착되었을 가능성은 배제하였다. 이 때 기판의 온도를 동시에 측정된 결과, 시간이 지남에 따라 온도가 증가하였는데 이는 플라즈마에 의해 기판이 가열된 것으로 보인다. 일정 시간이 지난 후 RF 전력을 차단하였을 때 샘플의 두께는 다시 감소하기 시작하였다. 이 때 챔버 내부는 플라즈마가 없는 진공 상태이기 때문에 SiO₂가 식각되었을 가능성은 배제하였다. 동시에 기판의 온도를 측정된 결과 RF 전력을 차단한 이후 온도가 감소하기 시작하였다. 이와 같이 시간에 따른 SiO₂두께 변화와 기판의 온도 변화를 종합하여 분석한 결과, 다른 물질의 증착이나 SiO₂의 식각이 없는 상황일지라도 기판의 온도가 증가하면 SiO₂의 두께가 증가하고 온도가 감소하면 두께 역시 감소함을 알 수 있다.

Fig 2는 시간에 따른 SiO₂온도 변화와 타원계측기 데이터 분석 결과 얻어진 SiO₂굴절률 변화를 보여준다. Fig 2 통해 SiO₂의 온도가 증가할 때 굴절률이 따라서 증가하고, 온도가 감소할 때 굴절률이 감소함을 알 수 있다. 이러한 미세한 굴절률 변화는 타원계측기에서 측정된 반사광에 영향을 미쳐 Fig 1에 나타난 바와 같이 두께 분석에 오차를 야기할 수 있다. 이는 ALE 공정에서 실시간 타원계측기를 이용하여 공정을 모니터링 할 경우 기판의 온도를

일정하게 유지해야 모니터링이 보다 정확해진다는 것을 의미한다.

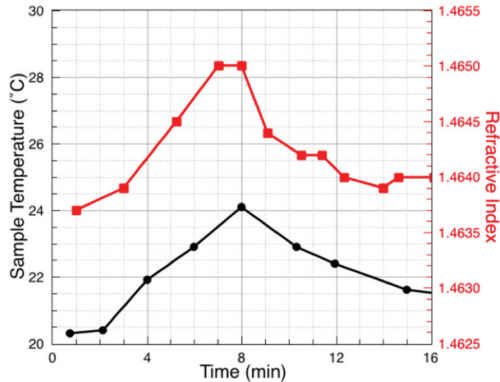


Fig. 2. Time variations of the sample temperature and the refractive index measured by an in-situ ellipsometer and sample temperature measured by an infrared thermometer during one ALE cycle.

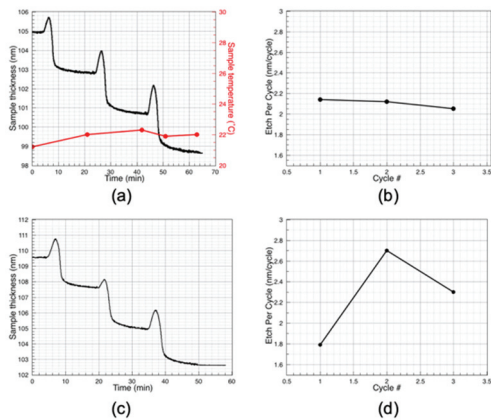


Fig. 3. (a) Time variations of the sample thickness and temperature and (b) etch per cycle with pre-heating of the sample, and (c) time variations of the sample thickness and temperature and (d) etch per cycle with pre-heating.

Fig 3(a), (b) 는 각각 예열 후 진행된 ALE 3 cycle 과 cycle 당 식각량 (EPC) 를 보여주고, Fig 3(c), (d)는 각각 예열 없이 진행된 ALE 3 cycle과 EPC 를 보여준다 (Fig 3(c) 에 나타난 두께 측정 당시 기판 온도는 측정하지 않음). 기판의 온도 변화가 타원계측기 측정 데이터 분석에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 100 W ICP 를 이용하여 기판을 예열함으로써 SiO₂의 온도가 ALE 공정 동안 일정할 수

있도록 하였다. 기판 예열 효과를 확인하기 위해 진행된 ALE 공정은 다음과 같이 진행되었다. 먼저 챔버 내에 Ar 45 sccm 을 주입한 후 25 mTorr 에서 ICP 100 W를 인가하여 플라즈마를 발생시켰다. 그 후 C₄F₈ 2 sccm 을 주입하여 SiO₂표면 위에 불화수소 (FC) 박막을 증착시킨 후 C₄F₈ 주입을 중단하여 Ar 플라즈마에 의해 FC 박막과 SiO₂의 식각을 유도하였다.

예열 후 ALE 를 진행할 경우 EPC 가 일정하게 나타나면서 이상적인 ALE 에 가까운 결과를 얻은 반면, 예열을 하지 않았을 경우 cycle 이 진행됨에 따라 EPC가 증가했다가 감소하는 불규칙하고 일정하지 않은 결과를 얻었다. 이를 통해 공정 중 기판의 온도 변화를 최소화 할 경우 보다 정확한 실시간 모니터링이 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

타원계측기를 이용한 ALE 공정 실시간 모니터링에서 기판 온도 변화가 모니터링 결과 분석에 미치는 영향을 확인하였다. 400 W ICP 발생 후 SiO₂의 두께와 기판 온도 변화를 동시에 측정된 결과 SiO₂의 두께가 증가함과 동시에 기판의 온도가 증가하였고 ICP off 이후 SiO₂의 두께가 감소함과 동시에 기판의 온도가 감소하는 것으로 보아 측정된 SiO₂두께와 기판 온도의 상관관계를 확인하였다. 또한, 타원계측기로 측정된 데이터로 분석한 SiO₂의 굴절률 변화를 확인한 결과 기판의 온도가 증가할 때 굴절률은 증가하고 온도가 감소할 때 굴절률은 감소함을 확인하였다. 실험 과정에서 SiO₂의 두께를 증가시키거나 감소시킬 다른 요인이 없음을 감안할 때 SiO₂두께 변화는 기판 온도 변화에 의한 굴절률 변화로부터 야기된 타원계측기 측정 데이터 분석 오류로 보여진다. 따라서 보다 정확한 공정 모니터링을 위하여 기판의 온도를 일정하게 유지할 수 있는 별도의 장치가 필요함을 알 수 있다.

감사의 글

This work was supported by the Chungnam National University (CNU).

참고문헌

1. Kanarik, K., Lill, T., Hudson, E., Sriraman, S., Tan, S., Marks, J., Vahedi, V., and Gottscho, R., "Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry," *J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, Vol. 33, pp. 020802 1-145, 2015.

2. Faraz, T., Knoops, H., and Kessels, W., "Atomic Layer Etching: What Can We Learn from Atomic Layer Deposition?," *J. of Solid State Science and Technology*, Vol. 4, pp. N5023-N5032, 2015
3. Oehrlein, G., Metzler, D., Li, D., "Atomic Layer Etching at the Tipping Point: An Overview," *J. of Solid State Science and Technology*, Vol. 4, pp. N5041-N5053, 2015.
4. Honda, M., Katsunuma, T., Tabata, M., Tsuji, A., Oishi, T., Hisamatsu, T., Ogawa, S., and Kihara, Y., "Benefits of atomic-level processing by quasi-ALE and ALE technology," *J. of Physics D: Applied Physics*, Vol. 50, pp. 234002-234011, 2017.
5. Agarwal, A., Kushner, M., "Plasma atomic layer etching using conventional plasma equipment," *J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, Vol. 27, pp. 37-50, 2009.
6. Kessels, E., "In situ Studies of ALD Processes & Reaction Mechanism," *18th International Conference on Atomic Layer Deposition*, Incheon, South Korea, 2018.
7. Goodyear, A. Cooke, M., "Atomic layer etching in close-to-conventional plasma etch tools," *J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, Vol. 35, pp. 01A105 1-4, 2017.
8. Gasvoda, R., Verstappen, Y., Wang, S., Hudson, E., and Agarwal, S., "Surface prefunctionalization of SiO₂ to modify the etch per cycle during plasma-assisted atomic layer etching," *J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, Vol. 37, pp. 051003 1-10, 2019.
9. Metzler, D., Bruce, R., Engelmann, S., Joseph, E., and Oehrlein, G., "Fluorocarbon assisted atomic layer etching of SiO₂ using cyclic Ar/C₄F₈ plasma," *J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, Vol. 32, pp. 020603 1-4, 2014.
10. Gasvoda, R., Steeg, A., Bohwmick, R., Hudson, E., and Agarwal, S., "Surface Phenomena During Plasma-Assisted Atomic Layer Etching of SiO₂," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 9, pp. 31067-31075, 2017.

접수일: 2019년 12월 9일, 심사일: 2019년 12월 13일,
게재확정일: 2019년 12월 16일