

삼차원 표면 조도 측정기와 삼차원 레이저 공초점 현미경 적용에 따른 표면 거칠기에 대한 영향 연구

정희영¹ · 김대은^{2*}

¹연세대학교 대학원 기계공학과 석사과정생

²연세대학교 기계공학과 교수

Study of the Effect of Surface Roughness through the Application of 3D Profiler and 3D Laser Confocal Microscope

Hee-Young Jung¹ and Dae-Eun Kim^{2*}

¹Master Student, Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

²Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received March 19, 2024; Revised April 17, 2024; Accepted April 22, 2024)

Abstract: Surface topography plays a decisive role in determining the performance of several precision components. In particular, the surface roughness of semiconductor devices affects the precision of the circuit. In this regard, the surface topography of a given surface needs to be appropriately assessed. Typically, the average roughness is used as one of the main indicators of surface finish quality because it is influenced by both dynamic and static parameters. Owing to the increasing demand for such accurate and reliable surface measurement systems, studies are continuously being conducted to understand the parameters of surface roughness and measure the average roughness with high reliability. However, the differences in the measurement methods of surface roughness are not clearly understood. Hence, in this study, the surface roughness of the back of a silicon wafer was measured using both contact and noncontact methods. Subsequently, a comparative analysis was conducted according to various surface roughness parameters to identify the differences in surface roughness depending on the measurement method. When using a 3D laser confocal microscope, even smaller surface asperities can be measured compared with the use of a 3D profiler. The results are expected to improve the understanding of the surface roughness characteristics of precision components and be used as a useful guideline for selecting the measurement method for surface topography assessment.



© Korean Tribology Society 2024. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords: 3D profiler(삼차원 표면 조도 측정기), 3D laser confocal microscope(삼차원 레이저 공초점 현미경), Surface roughness(표면 거칠기)

*Corresponding author: Dae-Eun Kim

Tel: +82-2-2123-2822, Fax.: +82-2-312-2159

E-mail: kimde@yonsei.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-6095-5138>

1. 서 론

반도체와 같은 전자 산업의 정밀화 및 고도화로 인하여 정밀하게 가공된 높은 품질의 실리콘 웨이퍼에 대한

요구가 증가하고 있다. 절단 직후 웨이퍼의 경우에는 표면에 결함이 있고 거칠기 때문에 회로의 정밀도에 영향을 줄 수 있다[1]. 또한, 표면 거칠기에 의하여 접촉각과 접촉 면적이 변화하므로 접착력 (adhesion) 및 마찰에 큰 영향을 미쳐 표면에 대한 정확한 정보가 요구된다[2-6]. 또한, 표면 거칠기는 광 투과율과 관련이 있으며, 광 투과율이 전기 효율에 영향을 미치기에 표면 거칠기가 증가하면서 전기 효율이 감소한다[7].

이와 같이, 표면 거칠기에 따라 반도체 소자의 특성을 저하시킬 수 있어 많은 연구가 이루어졌다. 반도체 산업에서는 더 얇고 작은 다이 (die)를 지향한다. 다이 크기와 웨이퍼 두께에 따라 다이 강도가 달라진다. 다이 강도는 싱글레이션 (singulation)을 평가하는 요소이며, 다이 두께와 다이 가장자리 결함 및 웨이퍼의 후면 거칠기 등에 의하여 결정된다. 따라서, Sudani 등은 다이 강도와 표면 거칠기 분석을 진행하였다[8]. 또한, 표면강화 라만 산란 (SERS) 기판은 정확한 정보를 얻는 데 중요하게 활용되어 높은 화학적 안정성, 우수한 제어성 등의 특성을 가진 반도체 계면의 나노 구조를 이용하는 경우가 많다[9]. 표면강화 라만 산란 기판의 경우 표면이 거친 금속 기판이 표면 조도가 매우 낮은 기판에 비하여 더 중요한 표면강화 라만 산란 신호를 제공한다. 다공성 실리콘은 화학적 및 생물학적 물질을 감지하기 위하여 표면강화 라만 산란 기판으로 주로 사용된다. 금속 증착 방식에 영향을 미치는 요소로는 기판의 표면 특성이 있다. 따라서, Dridi 등은 실리콘 웨이퍼의 앞면에 비하여 상대적으로 표면이 거친 뒷면에 전기화학적 양극산화를 통해 다공성 층을 형성한 후 금 코팅을 하여 표면강화 라만 산란 기판을 제작하였다. 다공성의 거친 특성과 웨이퍼 뒷면의 거친 표면이 표면강화 라만 산란의 효율에 미치는 영향을 연구하였다[10]. 연구 결과에 따르면 웨이퍼 전면뿐만 아니라 후면의 거칠기 또한 중요한 요소이기에 이를 정확히 파악하는 것이 요구된다.

특히, 산술 평균 거칠기는 마모, 공구-기계 간 발생하는 진동 등의 상호작용과 같은 동적 매개변수와 도구 형상 및 재료와 같은 정적 매개변수의 영향을 받아 연마 시 표면 마감 품질을 나타내는 주요 지표 중 하나로 사용되기도 한다[11,12]. 이처럼 정확하고 신뢰성이 높은 표면 측정 시스템에 대한 요구가 증가함에 따라 표면 거칠기 파라미터에 대한 이해와 정확한 값의 평균 거칠기를 측정하는 것에 관한 많은 연구가 지속적으로 이루어졌다. 평균 거칠기의 측정 방식은 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있다. 접촉식으로 표면 거칠기를 측정하는 장비는 접촉식 프로파일로미터[13], AFM (Atomic Force

Microscope)[14], step meter[15], CMM (Coordinate Measuring Machine)[16] 등이 있으며, 프로브의 팁을 이용하여 측정한다. 비접촉식으로 평균 거칠기를 측정하는 장비는 confocal, interferometric, focus variation 세가지 측정 기술을 탑재한 광학 프로파일로미터[17], 공초점 색도 센서 (Confocal Chromatic Sensor)[18], 백색광 간섭계[19] 등이 있으며, 레이저를 이용하여 측정한다.

Quinsat 등은 보다 정확한 표면 거칠기를 측정하기 위하여 비접촉식 광학 센서를 이용하여 공작기계에서 부품을 제거하지 않고 표면 거칠기를 측정하는 방법을 제안하였다[20]. Shahabi 등은 머신 비전을 사용하여 표면 거칠기를 측정하였을 때, 데이터가 중복되는 문제점을 방지하기 위하여 2차원 프로파일을 이용한 방법을 고안하였다[21]. Nwaogu 등은 광학 센서를 이용하여 주조 부품의 표면 데이터를 수집한 후 현미경 검사용 분석 소프트웨어인 SPIP (Scanning Probe Image Processor)로 이미지를 분석하여 표면 거칠기를 측정하였다[22]. 하지만, 접촉식과 비접촉식 방식의 차이점에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이에 따라, 접촉 및 비접촉식 표면 거칠기 측정을 적절하게 사용하기 위해서는 이에 관한 연구가 이루어질 필요가 있다.

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼 후면의 표면 거칠기를 접촉식인 삼차원 표면 조도 측정기와 비접촉식인 삼차원 레이저 공초점 현미경을 이용하여 각각 측정한 결과에 대한 연구를 수행하였다. 두 가지 방식으로 측정한 표면 거칠기를 다양한 표면 거칠기 파라미터에 따라 비교 분석함으로써 측정 방식에 따른 표면 조도의 차이를 규명하고자 하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1. 시편 및 측정 방법

본 연구에서는 평탄화가 되어있고, 시편 간 표면 특성에 차이가 거의 없는 실리콘 웨이퍼를 활용하였다. 측정에 사용한 웨이퍼의 직경은 205 mm이며, 다이는 한 번의 길이가 25 mm인 정사각형이다. Fig. 1은 거울면과 같이 표면 조도가 0.007 μm 로 매우 작은 실리콘 웨이퍼 앞면의 광학 이미지로, 실리콘 웨이퍼의 뒷면과 상대비교하기 위한 대조군으로 활용하였다. (a)는 10 배율, (b)는 150 배율로 관찰한 것이다. Fig. 2 (a), (b)는 실리콘 웨이퍼의 앞면과 동일하게 각각 10 배율과 150 배율로 실리콘 웨이퍼의 후면을 관찰한 결과이다. 실리콘 웨이퍼의 후면은 앞면과 달리 표면에 사각형 모양의 특이한 패턴 형상이 나타난다.

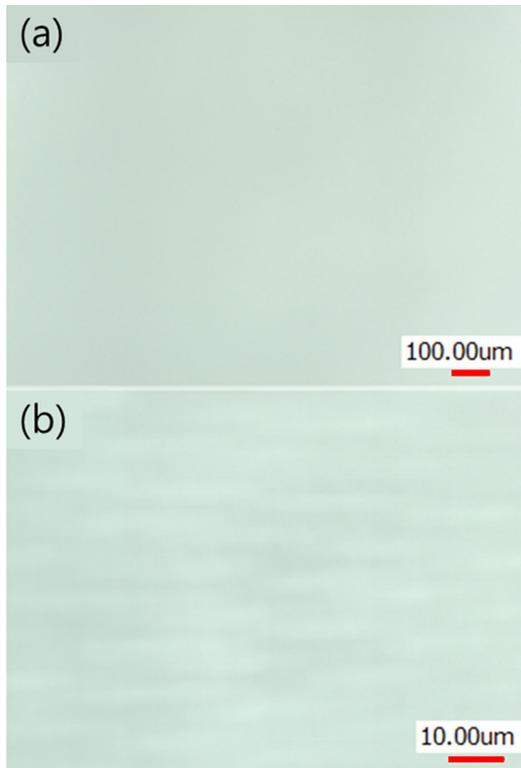


Fig. 1. Optical images of the front side of the Si wafer using (a) 10× magnification, (b) 150× magnification.

2.2. 표면 조도 측정 방법 및 조건

삼차원 표면 조도 측정기는 프로브에 달린 스타일러스 팁이 시편 표면에 접촉한 상태로 움직이며 표면을 긁는 방식으로 표면 거칠기를 측정한다. 본 연구에서는 삼차원 표면 조도 측정기 (Bruker, DektakXT-A)로 매핑을 진행하여 면적의 표면 조도를 측정하고자 하였다. 반지름이 0.7 μm 인 구형의 스타일러스 팁을 사용하여 1 mg의 스타일러스 하중을 가하여 측정하였다. 측정 길이는 95.85 μm , 맵 범위는 72 μm 였으며, 분해능은 0.032 $\mu\text{m}/\text{pt}$ 로 설정하였다. 시험이 끝난 후 시편의 파상도 (waviness)를 고려하여 틸팅을 진행하였다. 삼차원 레이저 공초점 현미경은 접촉하지 않고 레이저를 조사하는 방식으로 초점과 일치하는 빛만 검출하여 삼차원 표면을 측정하는 장비이다. 본 연구에서는 삼차원 레이저 공초점 현미경 (Keyence, VK-X210)의 150 배율 대물 렌즈를 사용하여 면적의 표면을 측정하고자 하였다. 측정 면적은 95.85 $\mu\text{m} \times 71.92 \mu\text{m}$ 였으며, 높이 측정 시 표시 분해능은 0.5 nm이고, 폭 측정 시 표시 분해능은 1 nm이다. 측정용 레이저 광원의 파장은 408 nm이다. 삼차원 표면 조도 측정

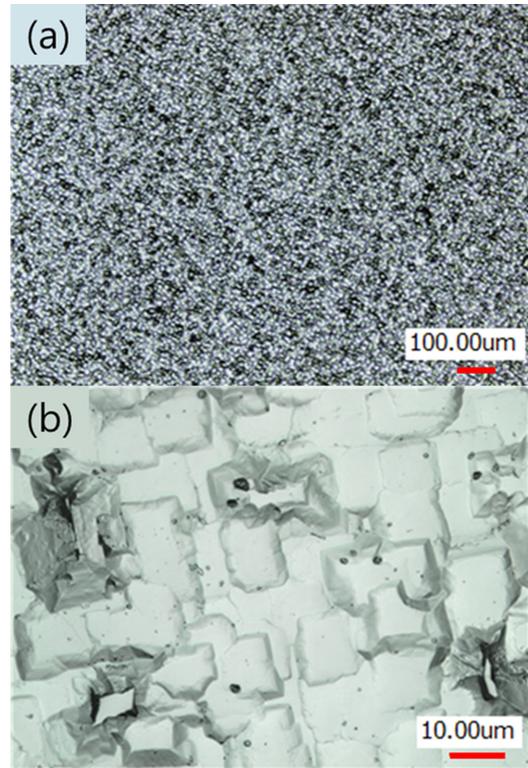


Fig. 2. Optical images of the back side of the Si wafer using (a) 10× magnification, (b) 150× magnification.

Table 1. Comparisons of measurement equipment

Measurement equipment	3D profiler	3D laser confocal microscope
Measurement tool	Stylus	Laser
Resolution	0.032 $\mu\text{m}/\text{pt}$	Height : 0.5 nm Width : 1 nm
Measurement range	95.85 $\mu\text{m} \times 71.92 \mu\text{m}$	
The number of data	1726	2048

기와 동일하게 시험이 끝난 후 시편의 파상도를 고려하여 틸팅을 진행하였다. 삼차원 표면 조도 측정기와 삼차원 레이저 공초점 현미경의 차이점을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

실리콘 웨이퍼 후면의 표면 거칠기를 접촉식 삼차원 표면 조도 측정기와 비접촉식 삼차원 레이저 공초점 현미경을 사용하여 측정하였다. 표면 거칠기는 Ra (산술 평균 거칠기), Rq (제곱 평균 거칠기), Rp (최대 단면 산 높이), Rv (최대 단면 골 깊이), Rz (10점 평균 거칠기) 값을 각각의 장비로 측정하여 비교 분석하였으며, 측정

결과의 신뢰성 확보를 위하여 시편 당 임의의 세 지점에 대하여 측정을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 프로파일 측정 결과

삼차원 표면 조도 측정기와 삼차원 레이저 공초점 현미경을 이용하여 각각 접촉 및 비접촉식 방법으로 실리콘 웨이퍼 앞면과 뒷면의 삼차원 화상과 프로파일을 확인하였다. x축과 y축의 스케일을 동일하게 설정하였다. Fig. 3은 실리콘 웨이퍼 앞면을 측정한 것으로 2차원 평면 정보를 기반으로 삼차원 이미지를 높이에 따라 각각의 색으로 구현한 이미지이다. 95.85 μm 를 x축, 71.92 μm 를 y축, 표면 조도를 z축으로 하여 삼차원으로 나타내었다. (a)는 삼차원 표면 조도 측정기로 측정한 결과로 표면 조도의 범위는 -9.45~10.06 nm이고, (b)는 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정한 결과로, 표면 조도의 범위는 0~1100 nm이다. Fig. 4는 실리콘 웨이퍼의 뒷면을 앞면과 동일한 배율로 나타내었으며, (a)는 삼차원 표면 조도 측정기로 측정한 결과이고, (b)는 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정한 결과이다. 삼차원 표면 조도 측정기로 측정하여 나타낸 표면 조도의 범위는 -2902.09

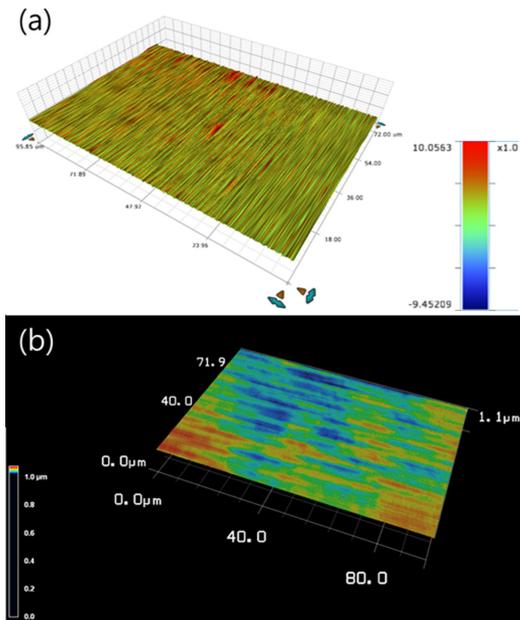


Fig. 3. The three-dimensional image of the front side of the Si wafer using (a) 3D profiler, (b) 3D laser confocal microscope.

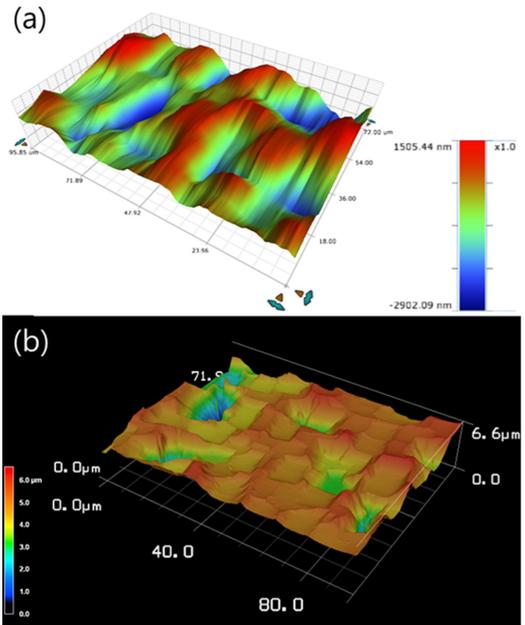


Fig. 4. The three-dimensional images of the back side of the Si wafer using (a) 3D profiler, (b) 3D laser confocal microscope.

~1505.44 nm이며, 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정하여 나타낸 표면 조도의 범위는 0~6000 nm이다. 비교적 선형인 실리콘 웨이퍼의 앞면 프로파일에 비하여 실리콘 웨이퍼의 후면은 골과 마루처럼 보이는 형상을 확인할 수 있었다. 표면을 틸트로 굽는 방식으로 측정하여 나타낸 삼차원 표면 조도 측정기의 결과에 비하여 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정할 경우 프로파일 이 더 연속적으로 나타난다.

Fig. 5는 표면 거칠기 (Ra)가 0.007 μm 인 실리콘 웨이퍼의 앞면을 (a) 삼차원 표면 조도 측정기와 (b) 삼차원 레이저 공초점 현미경을 이용하여 y축인 71.92 μm 의 한 점을 기준으로 잡아 95.85 μm 를 x축, 표면 조도를 y축으로 다시 나타낸 것이다. 삼차원 표면 조도 측정기는 0 μm 를 중심선으로 하여 데이터를 획득하였으며, 삼차원 레이저 공초점 현미경은 1.05 μm 를 중심선으로 하여 측정된 결과이다. Fig. 6는 실리콘 웨이퍼의 뒷면을 (a) 삼차원 표면 조도 측정기와 (b) 삼차원 레이저 공초점 현미경을 이용하여, Fig. 5와 같이 95.85 μm 의 동일한 길이를 측정하였다. 삼차원 표면 조도 측정기로 획득한 데이터는 0 μm 가 중심선이며, 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정된 데이터는 4.72 μm 를 중심선으로 하는 결과이다. 삼차원 표면 조도 측정기와 삼차원 레이저 공초

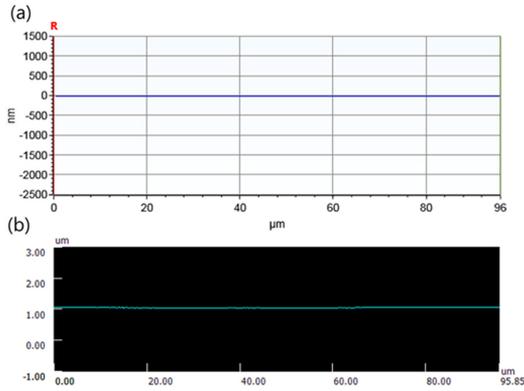


Fig. 5. Surface profile image of the front side of the Si wafer using (a) 3D profiler, (b) 3D laser confocal microscope.

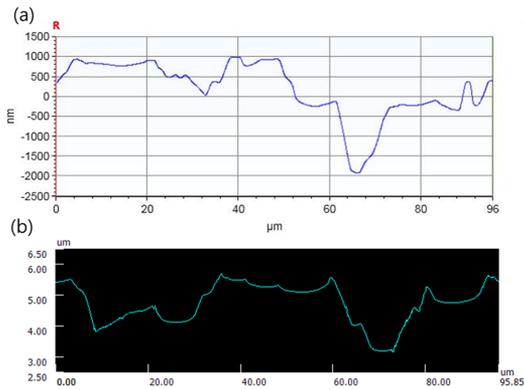


Fig. 6. Surface profile images of the back side of the Si wafer using (a) 3D profiler, (b) 3D laser confocal microscope.

점 현미경으로 획득한 데이터의 수에는 차이가 있었다. 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정된 데이터의 수가 2048 개였으며, 삼차원 표면 조도 측정기로 측정된 경우 데이터의 수는 1726 개로, 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정된 경우에 비하여 데이터의 수가 약 16% 적었다. 따라서, 삼차원 레이저 공초점 현미경이 삼차원 표면 조도 측정기에 비하여 시편 표면의 형상을 더 잘 표현한다고 판단할 수 있다.

삼차원 표면 조도 측정기와 삼차원 레이저 공초점 현미경을 이용하여 동일한 길이인 95.85 µm에 대하여 각각 측정을 수행하여 중심선을 0 µm로 설정한 결과는 Fig. 7에 도시된 바와 같다. 대체적으로 삼차원 표면 조도 측정기를 이용하여 측정된 경우에는 삼차원 레이저 공초점 현미경을 사용한 경우보다 상대적으로 중심선에

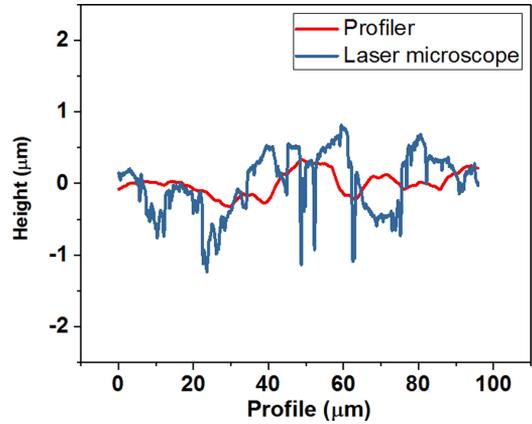


Fig. 7. Surface profile of the back side of the Si wafer with respect to measurement equipment.

가깝게 측정이 되었다. 삼차원 표면 조도 측정기를 이용하여 측정된 1726 개의 데이터 중 height이 0 µm보다 큰 경우는 795 개로 절반보다 적었으며, 삼차원 레이저 공초점 현미경을 이용하여 측정된 2048 개의 데이터 중 height이 0 µm보다 큰 경우는 1084 개로 절반보다 많은 수로 나타났다.

이는 삼차원 표면 조도 측정기의 경우 음수 범위에서 측정되는 height 값의 평균에 절댓값을 취한 값과 양수 범위에서 측정되는 height 값의 평균 값을 비교했을 때 양수 범위에서 측정되는 height 값의 평균이 더 크게 나타남을 의미한다. 반대로 삼차원 레이저 공초점 현미경을 이용한 경우에는 음수 범위에서 측정되는 height 값의 절댓값의 평균이 더 크게 나타남을 의미한다. 이러한 결과를 바탕으로, 삼차원 표면 조도 측정기의 특성 상 반경이 0.7 µm인 구형의 스타일러스 팁을 이용하여 표면을 긁는 방식으로 표면 거칠기를 측정하기 때문에 팁보다 작은 크기의 표면 돌기 (asperity)를 측정하지 못하였다고 추정된다. 또한, 시편 표면의 형상의 경향성을 확인하는 데에는 문제가 없으나 데이터의 수가 상대적으로 적기 때문에 표면 돌기를 정밀하게 파악하기에는 다소 어려움이 있다.

3.2. 표면 거칠기 결과 분석

삼차원 표면 조도 측정기와 삼차원 레이저 공초점 현미경을 이용하여 각각 접촉 및 비접촉식 방법으로 실리콘 웨이퍼 뒷면의 표면 거칠기를 측정하였다. Fig. 8은 측정 방식에 따라 5개의 Ra, Rq, Rp, Rv, Rz 표면 거칠기 파라미터로 실리콘 웨이퍼의 후면의 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 측정 방식과 상관없이 표면 거칠기 파라

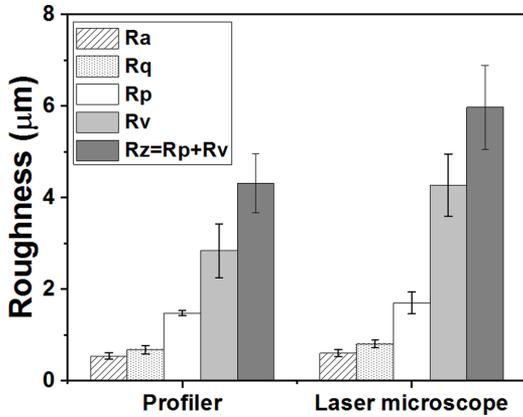


Fig. 8. Surface roughness of various parameters of the back side of the Si wafer with respect to measurement equipment.

미터 중 Ra 값이 가장 작았으며, Rz 값이 가장 크게 나타났다. Ra, Rq, Rp 값은 삼차원 표면 조도 측정기로 획득한 값이 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 획득한 값에 비하여 10~15.7% 가량 작게 나타난 반면, 측정 방식에 따른 Rv 값의 편차는 33.6%로 다른 값에 비하여 2배 이상 큰 값이었다. Rp 값과 Rv 값의 합인 Rz 값의 편차는 27.3%로 나타났다. Rv 값의 경우에는 최대 단면 골 깊이를 이용하여 값을 구하는데, 삼차원 표면 조도 측정기의 특성 상 반경이 0.7 µm인 구형의 스타일러스 팁을 이용하여 표면을 긁는 방식으로 표면 거칠기를 측정하기 때문에 스타일러스 팁은 표면의 모든 골에 도달할 수 없다[23].

이는 팁보다 작은 크기의 표면 돌기는 정밀히 측정하지 못하였으며, 미세한 표면을 측정하는 데 한계가 있음을 시사한다. 반면, 삼차원 레이저 공초점 현미경의 경우 408 nm 파장의 레이저를 이용하여 높이 0.5 nm, 폭 1 nm의 분해능으로 표면 거칠기를 측정하기에 마찬가지로 분해능보다 작은 크기의 표면 돌기는 정확하게 측정할 수 없지만, 삼차원 표면 조도 측정기에 비하면 보다 정밀하게 표면 돌기를 측정할 수 있다. 따라서, 삼차원 표면 조도 측정기로 측정된 표면 거칠기 값에 비하여 상대적으로 크게 측정되며 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정된 값이 더욱 정밀하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼 전면 및 후면의 표면 조도를 접촉식과 비접촉식 방식으로 각각 측정하였을 때

프로파일을 비교하고 웨이퍼 후면의 표면 거칠기 측정 결과를 파라미터에 따라 비교 분석하였다.

동일한 영역의 표면 거칠기를 측정하였을 때, 접촉식의 삼차원 표면 조도 측정기로 측정된 경우에 비하여 비접촉식의 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정된 경우 데이터의 수가 더 많았다. 이는 삼차원 레이저 공초점 현미경으로 측정하였을 때, 데이터가 더욱 연속적으로 표현되며 신뢰성 높은 결과를 나타낸다고 판단할 수 있다.

삼차원 표면 조도 측정기와 삼차원 공초점 현미경으로 획득한 각각의 표면 거칠기 파라미터의 편차를 비교한 결과 Ra, Rq, Rp 파라미터의 경우 삼차원 공초점 현미경으로 획득한 값에 비하여 삼차원 표면 조도 측정기로 획득한 값이 10~15.7% 정도 작게 나타났다. 반면, Rv 값의 경우에는 측정 방식에 따른 차이가 33.6%로 다른 표면 거칠기 파라미터에 비하여 편차가 크게 나타났다. 이는 삼차원 표면 조도 측정기의 특성 상 반경이 0.7 µm인 구형의 스타일러스 팁을 이용하여 표면을 긁는 방식으로 표면 거칠기를 측정하므로, 스타일러스 팁이 표면의 모든 골에 도달하지 못하였기 때문으로 추정된다. 따라서, 팁보다 작은 크기의 표면 돌기는 정밀히 측정하지 못하여 미세한 표면을 측정하는 데에 한계가 있음을 시사한다.

이러한 연구 결과는 실리콘 웨이퍼 후면의 표면 거칠기 특성에 대한 이해를 제고하고, 표면 거칠기 측정 시 측정 방식 선정에 활용하기 위한 기준으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C2004714).

References

- [1] Seo, J., Lee, H., "Effect of Surface Roughness of Sapphire Wafer on Chemical Mechanical Polishing after Lap-Grinding", *Tribol. Lubr.*, Vol.35, No.6, pp.323-329, 2019, <https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.6.323>
- [2] Wang, J., Wu, Y., Cao, Y., Li, G., Liao, Y., "Influence of surface roughness on contact angle hysteresis and spreading work", *Colloid Polym. Sci.*, Vol.298, pp.1107-1112, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00396-020-04680-x>
- [3] Lee, S.-H., Kim, H.-J., "A Molecular Simulation on

- the Adhesion Control of Metal Thin Film-Carbon Nanotube Interface based on Thermal Wetting”, *Tribol. Lubr.*, Vol.39, No.1, pp.8-12, 2023, <https://doi.org/10.9725/kts.2023.39.1.8>
- [4] Shin, K. S., Cho, C. W., “The effects of surface roughness on Wear-life of DLC coating in dry sliding”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.21, No.3, pp.130-135, 2005, <https://doi.org/10.9725/kstle.2005.21.3.130>
- [5] Yoon, E.-S., Oh, H.-J., Yang, S. H., Kong, H., “Effect of surface topography on wetting angle and micro/nano-tribological characteristics”, Proc. Spring Conf. Korean Soc. *Tribol. Lubr. Engr.*, Pusan, Korea, May, 2002.
- [6] Cha, K. H., Kim, D. E., “Investigation of the tribological behavior of octadecyltrichlorosilane deposited on silicon”, *wear*, Vol.25, pp.1169-1176, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00729-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00729-3)
- [7] Kim, H. J., Kim, D. E., “Effect of surface roughness of top cover layer on the efficiency of dye-sensitized solar cell”, *Sol. Energy*, Vol.86, pp.2049-2055, 2012.
- [8] Sudani, N., Venkatakrishnan, K., Tan, B., “Laser singulation of thin wafer: Die strength and surface roughness analysis of 80 μm silicon dice”, *Opt. Lasers Eng.*, Vol.47, pp.850-854, 2009.
- [9] Yang, B., Jin, S., Guo, S., Park, Y., Chen, L., Zhao, B., “Recent development of SERS technology: Semiconductor-based study”, *ACS Omega*, Vol.4, pp.20101-20108, 2019.
- [10] Dridi, H., Haji, L., Moadhen, A., “Studies of SERS efficiency of gold coated porous silicon formed on rough silicon backside”, *Appl. Surf. Sci.*, Vol.426, pp.1190-1197, 2017.
- [11] Gandla, P. K., Inturi, V., Kurra, S., Radhika, S., “Evaluation of surface roughness in incremental forming using image processing based methods”, *Measurement*, Vol.164, pp.1-11, 2020.
- [12] Park, S., An, B., Lee, J., “The Effect of Pressure and Platen Speed on the Material Removal Rate of Sapphire Wafer in the CMP Process”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.32, No.2, pp.67-71, 2016, <https://doi.org/10.9725/kstle.2016.32.2.67>
- [13] Alp, G., Johnston, W. M., Yilmaz, B., “Optical properties and surface roughness of prepolymerized poly (methyl methacrylate) denture base materials”, *J. Prosthet. Dent.*, Vol.121, pp.347-352, 2019.
- [14] Gros-Otero, J., Ketabi, S., Canones-Zafra, R., Garcia-Gonzalez, M., Villa-Collar, C., Casado, S., “Atomic force microscopy comparative analysis of the surface roughness of two posterior chamber phakic intraocular lens models: ICL versus IPCL”, *BMC ophthalmol.*, Vol.21, No.280, pp.1-9, 2021.
- [15] Li, S., Nie, J., Shi, Y., Tao, X., Wang, F., Tian, J., Lin, S., Chen, X., Wang, Z. L., “Contributions of different functional groups to contact electrification of polymers”, *Adv. Mater.*, Vol.32, pp.1-10, 2020.
- [16] Bradley, C., “Automated surface roughness measurement”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.16, pp.668-674, 2000.
- [17] Maruda, R.W., Krolczyk, G. M., Wojciechowski, S., Powalka, B., Klos, S., Szczotkarz, N., Matuszak, M., “Evaluation of turning with different cooling-lubricating techniques in terms of surface integrity and tribologic properties”, *Tribol. Int.*, Vol.148, pp.1-14, 2020.
- [18] Fu, S., Kor, W. S., Cheng, F., Seah, L. K., “In-situ measurement of surface roughness using chromatic confocal sensor”, *Procedia CIRP*, Vol.94, pp.780-784, 2020.
- [19] Melia, M.A., Duran, J. G., Koepke, J. R., Saiz, D. J., Jared, B. H., Schindelholz, E. J., “How build angle and post-processing impact roughness and corrosion of additively manufactured 316L stainless steel”, *npj Mater. Degrad.*, Vol.4, pp.1-11, 2020.
- [20] Quinsat, Y. and Tournier, C., “In situ non-contact measurements of surface roughness”, *Precis. Eng.*, Vol.36, pp.97-103, 2012.
- [21] Shahabi, H. H., Ratnam, M. M., “Noncontact roughness measurement of turned parts using machine vision”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.46, pp.275-284, 2010.
- [22] Nwaogu, U.C., Tiedje, N.S., Hansen, H.N., “A non-contact 3D method to characterize the surface roughness of castings”, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.213, pp.59-68, 2013.
- [23] Jeyapooan, T., Murugan, M., “Surface roughness classification using image processing”, *Measurement*, Vol. 46, pp. 2065-2072, 2013.