습식 식각에 의한 실리콘 웨이퍼의 표면 및 전기적 특성변화(2) - 표면거칠기와 전기적 특성의 상관관계 -

김준우 · 강동수 · 이현용 · 이상현* · 고성우* · 노재승[†]
금오공과대학교 신소재시스템공학부, *㈜eCONY

Change of Surface and Electrical Characteristics of Silicon Wafer by Wet Etching(2) - Relationship between Surface Roughness and Electrical Properties -

Jun-Woo Kim, Dong-Su Kang, Hyun-Yong Lee, Sang-Hyeon Lee*,
Seong-Woo Ko* and Jae-Seung Roh[†]

Kumoh National Institute of Technology, Gumi-Si, Gyeongbuk 730-701, Korea
*eCONY, 170-4 Simi-Dong Gumi-Si Gyeongbuk 730-340, Korea

(2013년 3월 19일 접수: 2013년 6월 11일 최종수정: 2013년 6월 11일 채택)

Abstract The relationship between electrical properties and surface roughness (Ra) of a wet-etched silicon wafer were studied. Ra was measured by an alpha-step process and atomic force microscopy (AFM) while varying the measuring range 10×10 , 40×40 , and $1000 \times 1000 \mu\text{m}$. The resistivity was measured by assessing the surface resistance using a four-point probe method. The relationship between the resistivity and Ra was explained in terms of the surface roughness. The minimum error value between the experimental and theoretical resistivities was 4.23% when the Ra was in a range of $10 \times 10 \mu\text{m}$ according to AFM measurement. The maximum error value was 14.09% when the Ra was in a range of $40 \times 40 \mu\text{m}$ according to AFM measurement. Thus, the resistivity could be estimated when the Ra was in a narrow range.

Key words surface roughness, resistivity, Si-wafer, etching.

1. 서 론

슬림화 식각 기술은 웨이퍼의 두께 감소 및 표면거칠기의 향상을 목적으로 한다. 실리콘 웨이퍼는 식각용액에 따라서 표면형상과 표면거칠기가 다르게 나타난다.¹⁾ 표면거칠기는 내마모성, 마찰계수, 접촉저항에 영향을 미치며 각 특성들을 이용하여 gear, shaft, CAM, clutch, switching 그리고 connector 등에 사용되게 된다.²⁾

표면거칠기에 관한 연구는 여러 분야에서 꾸준히 진행되어 왔고, 표면거칠기를 통해 예상되는 연마 제원을 산출해 내는 방법도 보고되어 있다.³⁾ 또한 표면거칠기를 이용하여 열방사율을 예측할 수 있는 연구도 보고되어 있

다. 일반적으로 표면거칠기가 증가하면 열방사율이 증가하지만 과도한 기공이 존재할 경우에는 열방사율이 저하된다.^{4,6)}

실리콘 웨이퍼는 표면거칠기에 따라 back metal의 접합력 문제, 여러 단계의 공정 중에 웨이퍼를 보호하기 위해 사용되는 테이프와의 접착력 문제가 발생한다.⁷⁾ 따라서 실리콘 웨이퍼는 표면거칠기 특성을 평가하는 것이 매우 중요하다.

한편 반도체용 웨이퍼의 중요 특성은 전기적 특성이다. 웨이퍼는 얇고 비파괴 방법으로 검사해야 하기 때문에 전기적 특성검사는 4개의 프로브가 일정한 간격으로 일렬 배열된 표면저항 측정법을 이용한다. 프로브를 실리콘

[†]Corresponding author

E-Mail : jsroh@kumoh.ac.kr (J. S. Roh, Kumoh Nat'l Inst. Tech.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

웨이퍼의 표면에 접촉시켜 비저항을 측정하며, 프로브 배열방법에 따라 단일 배열⁸⁻¹²⁾과 이중배열 측정기술이 이용되고 있다.¹³⁻¹⁵⁾

그러나 비저항과 표면거칠기 관계를 연구한 문헌들은 거의 찾아보기 어렵다. 이 논문은 wet etching에 의한 실리콘 웨이퍼의 표면거칠기와 비저항과의 관계를 연구하였으며, 표면거칠기에 따른 비저항의 예측 가능성에 대하여 논의하고자한다.

2. 실험 방법

2.1 실리콘 웨이퍼 및 식각

식각용액은 불산농도를 28~36.%까지 2 %씩 증가시켜 제조하였고, 식각시간은 10분, 식각온도는 40 °C로 설정하여 실험을 진행하였다. 시편의 명칭은 불산농도에 따라 HF28, HF30, HF32, HF34 그리고 HF36으로 명명하였다.

2.2 AFM(Atomic Force Microscopy)

좁은 영역(10 μm^2 , 40 μm^2)에서의 표면거칠기를 측정은 AFM(XE-100, ParkSystem)을 이용하였다. AFM 측정 시 X-Y축 방향으로 측정범위는 최대 50 μm 이고, 분해능은 최대 0.02 nm까지 가능하다. Z축 방향으로서는 최대 측정범위는 12 μm 이고, 분해능은 최대 0.01 nm이다. AFM으로부터 측정된 데이터를 이용하여 X축으로 256회 측정된 표면거칠기의 평균값으로 Ra를 표기하였다.

2.3 Alpha-step

넓은 영역(1000 × 1000 μm)에서의 표면거칠기를 측정하기 위해 박막두께측정장비(Alpha-step IQ, KLA Tencor)를 이용하였다. 측정 시 한 방향으로 5회 스캔하였으며, 스캔거리는 1000 μm 였고 스캔속도는 20 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 하였다.

2.4 Resistivity 측정

식각된 실리콘 웨이퍼 비저항 측정은 창민테크사의 표면저항측정기(CMT-SR100N)를 이용하였다. 4-포인트 프로브를 이용하여 측정하였으며, 일반적인 방법으로 싱글 배열과 듀얼배열 측정법이 있다. 본 연구에서 측정방법은 싱글 배열을 채택하여 사용하였으며, 이 구조는 양 끝 프로브에서 전압인가를 시켜 가운데 2개의 프로브에서 측정하는 방법이다. 자동측정방법이 아닌 전류인가를 100 mA로 일정하게 하여 전압강하를 측정하였으며, 그 이유는 각 웨이퍼마다 다른 전류가 인가되면 큰 오차를 발생할 수 있기 때문이다. 저항은 습도, 온도, 시료의 두께, 시료의 면적에 따라서 보정계수를 적용하여 면저항을 계산한 후 두께를 곱하여 비저항을 계산하였다.¹⁴⁾

표면저항측정기의 제원은 다음과 같다. 프로브사이의 거리는 0.1 mm이며 총 프로브거리는 0.3 mm 이다. 측정범위는 1~2 m Ω/sq , 전압 측정 범위는 0~2 V이다. 싱글 배열은 양 끝 프로브에서 전류 I_{AD} 를 흘리고, 가운데 2개의 프로브에서 전압 V_{BC} 를 측정하여 저항 R_s 를 다음과 같이 구한다.

$$R_s = \frac{V_{BC}}{I_{AD}} [\Omega] \quad (1)$$

그리고, 면저항 R_{ss} 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{ss} = k_s \times R_s [\Omega / \text{sq.}] \quad (2)$$

k_s 는 비례상수로써 다음과 같이 정의된다.

$$k_s = F(D/S) \times F(t/S) \times F(T) \times F(S) \quad (3)$$

또한 비저항(ρ)은 면저항을 구한 후 시료의 두께를 곱하여 구하며 식(4)와 같다.

$$\rho = R_{ss} \times t [\Omega \cdot m] \quad (4)$$

비례상수는 $F = (D/S)$ 는 탐침간격 S 에 대한 시료크기 D 의 보정계수이며, 원형인 시료와 사각인 시료가 따로 구분되어 보정계수를 사용하게 된다. $F = (t/S)$ 는 탐침간격 S 에 대한 시료 두께 t 의 보정계수로써 탐침거리가 1.00 mm일 때 시료의 두께 t 가 0.400 mm이면 보정계수 $F = (t/S)$ 는 0.9995가 된다. $F = (T)$ 는 측정 온도에 대한 보정 계수로서 실리콘 웨이퍼를 비롯한 저항체들은 온도에 대한 영향이 있으므로 가능한 항온에서 일정하게 유지되는 실험실에서 측정하였다.^{13,16)}

표면저항기를 측정하여 측정된 면저항으로 샘플의 제원을 이용하여 비저항을 구하였다. 비저항은 총 8회 측정하여 최대 및 최소값을 제외하고 평균값을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 AFM(Atomic Force Microscopy)

Fig. 1 및 2는 AFM으로 관찰된 표면 형상 이미지이다. Fig. 1은 40 μm^2 로 측정하여 관찰한 이미지이며, bare 웨이퍼는 그라인딩 자국이 그대로 남아 있는 것을 관찰할 수 있었다. HF28부터 HF32까지 그라인이 증가하였고, HF34 및 HF36에서는 그라인의 크기가 매우 증가하였다. 10 × 10 μm 의 좁은 영역의 이미지는 Fig. 2에서 나타내었다.

3.2 표면거칠기 Ra

Fig. 3과 4는 AFM 결과로부터 얻은 표면거칠기 데이터 중 보편적인 것 한 개씩을 예를 들어 나타내었다. Fig.

Fig. 1. AFM images(40 × 40 μm). a) Bare, b) HF28, c) HF30, d) HF32, e) HF34, and f) HF36.

Table 1. Measured resistivity data.

Resistivity (ohm·cm)	Bare	HF28	HF30	HF32	HF34	HF36
	7.25	7.94	7.53	7.71	10.14	16.76

5는 α -step으로부터 얻은 표면거칠기 데이터 중 한 개씩을 예로 나타내었다. 불산 농도가 증가하면서 표면거칠기가 달라지는 것이 관찰된다.

Fig. 6에 각 영역에서의 측정된 R_a 를 그래프로 나타내었다. Fig. 6에서 전반적으로 불산 농도가 증가할수록 R_a 는 증가하였다. 측정 범위가 넓을수록 R_a 도 높게 측정되었고(1000 μm), 불산 농도가 증가할수록 좁은 영역과 넓은 영역에서 측정한 R_a 차이는 크게 나타났다.

3.3 Resistivity

Bare 웨이퍼의 비저항은 7.2537 ohm·cm으로 가장 낮게 측정되었으며, 식각된 시편 중 HF30는 7.5347 ohm·cm로 가장 낮게 측정되었다. HF28, HF30 및 HF32는 7.9382, 7.5347 및 7.7085 ohm·cm로 거의 유사한 값을 나타내었고, HF34와 HF36의 비저항은 10.1371과 13.76310 ohm·

Fig. 2. AFM images(10 × 10 μm). a) Bare, b) HF28, c) HF30, d) HF32, e) HF34, and f) HF36.

cm로 증가하였다.

3.3 표면거칠기 구성요소

Wen 등은 표면에 요철이 존재하는 재료의 표면거칠기와 열방사율의 관계는 다음 식들을 이용하여 설명하였다.¹⁵⁾

$$R = (1 + 1.25\pi^2 n^2 R_a^2)^{-1} \quad (5)$$

R 은 표면거칠기와 비저항의 관계를 나타낸 식이다. R_a 는 실험적으로 측정된 산술평균 거칠기, n 은 표면거칠기 프로파일의 중심선과 교차되는 프로파일 교차점의 수이며 단위 길이 당 수로 표기 된다. Table 2에 측정범위에 따라 식 (5)의 각 factor들을 정리하였다.

σ 는 rms(root-mean-square)거칠기로써 보통 $\sigma \approx 1.25R_a$ 의 관계를 갖는다. 한편 표면거칠기 factor와 비저항의 관계는 다음 식을 이용하였다.

$$\varepsilon_i = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_k} - 1 \right) \frac{R_i}{R_k} \right]^{-1} \quad (6)$$

Wen 등은 식 (5),(6)으로부터 표면거칠기와 열방사율의

Fig. 3. Surface roughness profiles from AFM($10 \times 10 \mu\text{m}$). a) Bare, b) HF28, c) HF30, d) HF32, e) HF34, and f) HF36.

관계가 비교적 일치함을 보였다. 본 연구팀은 열방사율과 표면거칠기는 시편의 표면특성과 관련된 것이므로, 식 (5)를 이용하여 표면거칠기와 비저항의 관계에 대하여 계산하였다.

식 6에서 ε_i 는 식각을 한 각 샘플로부터 얻어진 비저항 측정값으로, ε_k 는 bare 웨이퍼의 비저항 측정값으로 적용하였다. R_i 는 식각한 각 샘플의 표면거칠기 인자이며, R_k 는 bare 웨이퍼의 표면거칠기 인자이다. 식 (6)은 이미 측정된 bare 웨이퍼의 비저항 데이터를 갖고 있고, 식각된 웨이퍼의 표면거칠기 값을 알 경우 식각된 웨이퍼의 비저항을 예측할 수 있다는 의미이다.

Table 3에 위의 계산결과를 정리하였다. 표면거칠기의 측정 범위가 $40 \mu\text{m}^2$ 및 $1000 \mu\text{m}$ 인 경우 HF34와 HF36에서 Ra는 급격히 증가하였다. 측정 범위가 $10 \mu\text{m}^2$ 로 가장 좁은 경우 HF30에서 표면거칠기가 $0.0334 \mu\text{m}$ 로 약간 상승하다가 다시 감소하고, HF36에서 $0.0990 \mu\text{m}$ 로

Fig. 4. Surface roughness profiles from AFM($40 \times 40 \mu\text{m}$). a) Bare, b) HF28, c) HF30, d) HF32, e) HF34, and f) HF36.

증가하였다. Table 3으로부터 얻은 비저항 측정값과 이론값의 관계를 Fig. 7에 그림으로 표현하였다.

Fig. 7을 보면 실제 측정된 비저항 값과 이론적으로 계산된 값은 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 측정범위가 달라도 Ra 값이 크지 않은(bare~HF32) 경우 매우 잘 일치하여 오차는 최대 4.79%($1000 \mu\text{m}$ 에서 HF32)이다. Ra 값이 크게 증가하면 오차는 커지게 된다. HF34 및 HF36의 경우 $1000 \mu\text{m}$ 에서 이론값과 실험값의 차이는 25.30 및 41.56 %로 큰 오차를 보였다.

그러나 Ra 값을 좁은 범위($10 \mu\text{m}^2$)를 측정된 경우 비저항 측정값은 이론값과 아주 잘 일치하였고, 최대 오차는 HF36에서 4.23 %였다. $40 \mu\text{m}^2$ 의 범위에서 측정된 비저항 값과 이론값의 차이도 최대 14.09 %로써(HF36) 실험값에 비교적 일치함을 보였다.

위 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 전압강하법으로 측정된 비저항 데이터를 갖고 있고, 식각

Fig. 5. Surface roughness profiles from α -step($1000 \times 1000 \mu\text{m}$). a) Bare, b) HF28, c) HF30, d) HF32, e) HF34, and f) HF36.

Fig. 6. Surface roughness observed by experimental measurements.

된 웨이퍼의 미세한 범위에서 측정된 R_a 값을 알면 식 5와 6으로부터 비저항을 예측할 수 있다. 한편 R_a 값 측정 시 넓은 범위(즉, $1000 \mu\text{m}$)에 걸쳐 측정하면, 아주 미

세한 요철의 측정은 무시될 수 있으므로 거칠기 프로파일 자체의 오차가 커지기 때문에 이론값과 실험값의 오차가 커지게 된다고 판단된다.

Wen 등이 이용한 표면거칠기와 열방사를 관계를 해석한 식으로부터, 표면거칠기와 표면저항으로부터 얻은 비저항 값과 관계를 해석한 결과는 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이는 열방사와 표면거칠기가 시편의 표면 특성과 관련된 것이므로, 앞으로 다른 표면특성 해석에 도움이 될 것으로 기대된다.

한편 이전의 보고에서, HF30의 비저항은 $7.54 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ 로 가장 낮게 측정되었으며, 표면 형상 관찰에서 얻어진 wave는 가장 크게 측정되었다.¹⁶⁾ 이는 일반적으로 식각된 웨이퍼의 표면을 탐침법으로 측정한 비저항 값과 주사전자현미경(약 수백 배)으로 관찰한 웨이브의 크기는 비례한다고 알려져 있는 것과 다른 양상이다. 본 연구에서 HF30과 HF32의 표면거칠기는 모든 측정조건에서 HF34와 HF36보다 작은 값이 얻어졌고, HF30과 HF32의 비저항 값도 더 작았다. 따라서 식각 웨이퍼 표

Table 2. Roughness factors of samples.

Samples	measuring range(μm)	Ra(μm)	σ	n(1/ μm)	R
Bare	10	0.0050	0.0063	2.100	0.9987
	40	0.0044	0.0055	0.675	0.9999
	1000	0.1300	0.1625	0.144	0.9957
HF28	10	0.0114	0.0142	0.400	0.9997
	40	0.0156	0.0194	0.100	1.0000
	1000	0.0326	0.0407	0.139	0.9997
HF30	10	0.0334	0.0418	0.400	0.9978
	40	0.0428	0.0535	0.375	0.9968
	1000	0.0831	0.1038	0.198	0.9967
HF32	10	0.0257	0.3213	0.500	0.9980
	40	0.0894	0.1117	0.100	0.9990
	1000	0.1436	0.1794	0.217	0.9882
HF34	10	0.0491	0.0614	0.300	0.9973
	40	0.2620	0.3275	0.050	0.9979
	1000	0.6180	0.7725	0.096	0.9588
HF36	10	0.0990	0.1238	0.200	0.9952
	40	0.4350	0.5438	0.075	0.9870
	1000	0.6455	0.8068	0.111	0.9403

Table 3. Measured and theoretical resistivity values.

Samples	measuring range(μm)	Resistivity($\text{ohm}\cdot\text{cm}$)		$\{1 - (B/A)\} \times 100$
		experimental (A)	theoretical (B)	
Bare	10		7.2537	-
	40	7.2537	7.2537	-
	1000		7.2537	-
HF28	10		7.9995	0.77
	40	7.9382	7.9426	0.06
	1000		8.1704	2.93
HF30	10		7.4935	0.55
	40	7.5347	7.3869	1.96
	1000		7.5851	0.67
HF32	10		7.6737	0.45
	40	7.7085	7.6636	0.58
	1000		7.3395	4.79
HF34	10		10.0170	1.18
	40	10.1371	9.9550	1.80
	1000		7.5720	25.30
HF36	10		13.1812	4.23
	40	13.7631	11.8236	14.09
	1000		8.0430	41.56

Fig. 7. Measured and theoretical resistivities.

면의 비저항과 관련된 웨이퍼의 표면특성은 일반적으로 이용되는 주사전자현미경으로 얻어진 웨이브의 크기를 이용한 방법보다, 미소영역에서 측정된 표면저칠기와와의 연관성을 찾는 것이 더 좋은 방법이라고 할 수 있다.

4. 결 론

Wet etching 공정에 의해 실리콘 웨이퍼의 표면이 거칠어질 때, Ra와 비저항과의 관계를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

Ra 값을 좁은 범위($10\mu\text{m}^2$)에서 측정한 경우 비저항 측정값은 이론값과 아주 잘 일치하였고, 최대 오차는 HF36에서 4.23 %였다. $40\mu\text{m}^2$ 의 범위에서 측정한 비저항 값과 이론값의 차이도 최대 14.09 %로써(HF36) 실험값에 비교적 일치함을 보였다.

표면저항으로부터 얻어진 비저항 데이터를 갖고 있고, 식각된 웨이퍼의 미세한 범위에서 측정된 Ra 값을 알면 비저항을 예측할 수 있었다.

너무 넓은 영역에서 얻은 Ra 값으로 비저항 값을 예측하기는 어려울 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2012년 한국연구재단 지역인력양성사업의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

1. B Schwartz and H Robbins, J. Electrochem. Soc, **123**(12), 1903-1909 (1976).
2. C. S. Kim and M. W. Park, (in Korean) KSPE, **27**(4), 40-45 (2010).
3. S. O. Kim, S. H. Lee and J. S. Kwak, (in Korean) KSME, **35**(4), 401-407 (2011).
4. J. Zuecoa and F. Alhamab, J. Quan Spectro & Rad Tran **101**(73), (2006).
5. S. Bellayer, J. W. Gilman, S. S. Rahatekar, S. Bourbigot, X. Flambard, L. M. Hanssen, H. Guo and S. Kumar, Carbon **45**(12), 2417-2423 (2007).
6. S. K. Seo, J. S. Roh, E. S. Kim, S. H. Chi, S. H. Kim and S. W. Lee, Carbon letter, **10**(4), 300-304 (2009).
7. E. J. Jang, S. M. Hyun, D. G. Choi, Y. B. Park and H. J. Lee, KSME, **7**, 51-55 (2007).

8. A. Uhler, JR., Bell Syst. Tech J., **34**(1), 105-128, (1954).
9. L. B. Valdes, Proc Inst Radio Eng. **42**(2), 420-427 (1954).
10. V. F. M. Smits, Bell Syst. Tech. J., **37**(3), 711-718 (1958).
11. L. J. Swartzendruber, p. 199, NBS technical note, USA (1964).
12. J. R. Ehrstein, M. C. Crparlom, p.106, NIST, USA (1999).
13. M. YAMASHITA, JJAP, **42**(2), 695-699 (2003).
14. J. H. Kang, K. M. Yu, K. W. Koo and S. O. Han, KIEE. **60**(7), (2011).
15. C. D. Wen and I. Mudawar, Int. J. Heat. Mass. tran. **49**(23,34), 4279-4289 (2006).
16. J. W. Kim, D. S. Kang, H. Y. Lee, S. H. Lee, S. W. Ko and J. S. Roh, MRSK, in press.