

반도체 플라즈마 에칭 상부 전극의 표면 품질 형성에 관한 가공법 평가

이은영^{*†} · 김문기^{**}

^{*†}한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과, ^{**}한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Evaluation of the Machining Method on the Formation of Surface Quality of Upper Electrode for Semiconductor Plasma Etch Process

Lee Eun Young ^{*†} and Moon Ki Kim ^{**}

^{*†}Department of Mechatronics Engineering, Graduate School of Korea University of Technology and Education,
^{**}School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

This study has been focused on properties of surface technology for large diameter upper electrode using in high density plasma process as like semi-conductor manufacturing process. The experimental studies have been carried out to get mirror surface for upper electrode. For a formation of high surface quality upper electrode, single crystal silicon upper electrode has been mechanical and chemical machining worked. Mechanical machining work of the upper electrode is carried out with varying mesh type using diamond wheel. In case of chemical machining work, upper electrode surface roughness was observed to be strongly dependent upon the etchant. The different surface roughness characteristics were observed according to etchant. The machining result of the surface roughness and surface morphology have been analyzed by use of surface roughness tester, laser microscope and ICP-MS.

Key Words : Upper electrode, Plasma etch, Surface roughness, Surface morphology, Semiconductor

1. 서 론

1년 6개월마다 반도체의 집적도가 두배로 늘어나는 무어의 법칙은 지난 50년간 반도체 산업의 기술개발 표준이 되었다. 2000년 이후 10년 동안 전자기기의 크기는 10분의 1로 줄었고, 선폭의 크기는 2000년에 100 nm를 돌파한 이후 현재는 14 nm 급의 제조기술로 반도체를 제조하고 있다.

자율주행차, 사물인터넷(IoT), 인공지능(AI) 등의 기술이 반도체와 접목되면서 차량에 탑재되는 반도체의 수는 한 대당 수 천 여개 수준으로 늘어날 전망이며, 한정된 300 mm 웨이퍼 면적에 집적도를 높여 트랜지스터의 수를 늘

리는 기술이 요구되면서 3차원 적층 집적 기술을 구현하기 위해 플라즈마 에칭 공정을 다회 반복하여 좀 더 작은 선폭을 그리는 공정 기술이 반도체 제조의 핵심기술로 부상하였다.

데이터 간섭이 발생할 정도로 회로 간격이 좁아져 상호간섭(cross-talk)으로 인한 오작동 위험이 있을 만큼 좁아진 선폭을 구현하는 공정인 플라즈마 에칭 공정의 생산성 확보를 위해 공정내 핵심 부품들도 품질 수준 향상이 필요한 실정이다.

플라즈마 에칭 공정내 핵심 부품 중 수백~수 만개의 미세구멍 사이로 가스를 통과시켜 플라즈마를 균일하게 생성시켜주는 역할을 하는 상부 전극(upper electrode)은 300 mm 웨이퍼보다 큰 직경의 대구경 제품 제작 요구 증가에 따라 플라즈마 형성면 전체의 표면 조도를 미세 요철이

[†]E-mail: wiselyey@koreatech.ac.kr

전혀 없는 수준으로 요구 받고 있다.

2. 본 론

상부 전극의 소재로 고취성 난삭 재료인 단결정 실리콘은 가공시 크랙이나 치핑이 발생하기 쉬우므로 생산성 향상을 위해서는 가공 공정의 초정밀화 연구와 함께 표면조도 및 표면 형태에 대한 명확한 분석이 필요하다.

다양한 소재별 기계 가공방법을 제시함으로써 가공 정밀도와 함께 생산성 향상 연구가 진행되어 왔다[1]. 초미립 실리콘 스톱들을 사용한 경면 연삭 연구 결과 높은 기공율, 높은 집중도, 낮은 결합도일수록 실리콘 표면에 경면을 형성할 수 있었다[2]. 다이아몬드 휠로 실리콘을 연마하면 표면에 크랙이 발생하며, 절입 깊이는 표면 조도에 영향을 없지만 이송 속도가 증가할수록 표면조도 값이 커지는 경향이 나타났다[3]. 다이아몬드 분말을 레진과 결합하여 만든 연삭 공구는 불규칙한 다이아몬드 입자의 크기와 배열 및 다이아몬드 입자와 레진 사이에 존재하는 공극의 눈매꿈 현상 등으로 공구에 따른 표면 품질 차이가 발생할 수 있으나 고속 스펀들과 다중 배열 다이아몬드 공구를 이용하여 품질 가공 면의 향상이 가능하다[4]. 반도체용 실리콘은 단결정 잉곳 성장 및 절단 후 111 결정면 방향으로 결함이 전파되기 때문에 정밀 연삭에서 야기되는 기계적 손상을 줄이는 연구가 지속적으로 진행되었다[5].

식각 공정 중에 발생하는 수소 거품과 규산염 등의 미립자가 식각을 방해하여 표면 조도를 나쁘게 하므로 세정 공정에서 사용하는 초음파 진동을 식각 공정에 도입하여 표면 조도를 개선하였다. 그러나 최근 초음파로 인한 캐비테이션(cavitation)이 실리콘을 손상시킬 수 있고, 메가소닉파의 경우 초음파 진동 대비 캐비테이션이 거의 발생하지 않기 때문에 메가소닉파가 초음파 진동을 대신하여 사용되는 경향이 있다. 메가소닉을 이용한 경우 실리콘 표면 조도를 1/10 로 낮춘 연구 결과가 있다[6]. 메가소닉파를 사용하면 주파수 증가로 유체의 속도가 증가하고, 음파 경계층(boundary layer)이 얇아진다. 음파 경계층의 두께가 얇은 경우 단결정 실리콘 표면에서 발생하는 거품들을 쉽게 분리할 수 있으므로 식각 공정 중 발생하는 수소 거품 제거에 더욱 효과적이다[7-9].

본 연구에서는 상부 전극의 기계 가공 표면 품질 향상을 위해 초정밀금 등의 평면연삭에 널리 쓰이는 다이아몬드 휠을 사용하여 휠의 입도별 상부 전극 표면의 품질 차이를 확인하였으며, 알칼리와 산 용액을 이용한 화학 가공으로 상부 전극의 표면 조도 및 표면 형태 변화를 연구하였다.

3. 실험

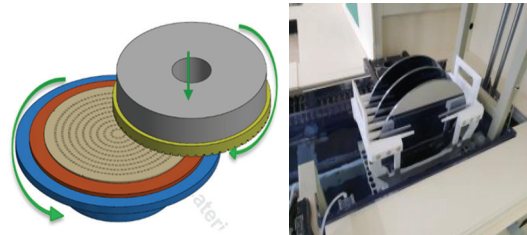
4B족의 비금속 원소로 다이아몬드 구조를 가지며, 폴리실리콘을 도가니에서 용해하여 고체의 종 결정과 접촉시켜 서서히 인상하면서 종 결정 밑에 단결정을 성장시키는 초크랄스키법으로 성장한 단결정 실리콘 잉곳을 실험 소재로 사용하였다. 단결정 실리콘은 순도 99.999999% (8N)으로 반도체 공정에서 주로 사용되는 100 결정면을 사용하였으며, 실험에 사용한 단결정 실리콘의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of workpiece

item	specification
crystal structure	face-centered diamond-cubic
density	2.33 g/cm ³ at 20 °C
thermal conductivity	149 W/(m·K)
thermal expansion	2.6 μm/(m·K) (at 25 °C)
young's modulus	130–188 GPa
poisson's ratio	0.064–0.28

고정밀 실리콘 평면연삭 장비(Okamoto, PRG-DXNC)에 부드럽고 편안한 탄력성이 있고, 지립의 자생 작용이 원활하여 연삭으로 인한 피삭재의 손상이 적으며, 매끈한 다듬질 면과 좋은 정밀도를 얻을 수 있는 레진 본드 다이아몬드 휠을 장착하여 실험하였다. 집중도가 너무 높으면 공작물과 접촉하는 지립수가 많아 연삭력이 떨어지게 되므로 1 cc 중에 4.4 ct(1ct=0.2g)의 다이아몬드가 함유된 용적을 25 vol%로 결합도 100의 다이아몬드 휠을 사용하였으며, 지립을 잡아주는 결합제의 강약은 N(medium)인 다이아몬드 휠을 사용하여 기계가공을 진행하였다.

화학 가공 실험은 식각 온도가 식각 속도에 크게 작용하는 선행 연구 결과를 토대로 가열조와 순환 펌프를 사용하여 용액의 온도와 농도가 식각 배스 내부에서 균일



(a) mechanical machining (b) chemical machining
Fig. 1. Image of experiments

하계 유지되도록 구성하였고, 메가소닉파는 용액 내부에 있는 발생장치로부터 상부 전극의 표면에 전달되도록 하였다. Fig 1의 (a)는 기계가공 과정 모식도이며, (b)는 화학가공 진행 이미지이다.

선행연구 결과에 기초한 공정 조건으로 기계, 화학 가공시 실리콘 전극 표면의 품질 변화에 대한 연구를 진행하였으며, 실험 조건은 Table 2와 같다

Table 2. Experimental conditions

Item		contents
Mechanical machining	wheel spindle	3,000 rpm
	work spindle	200 rpm
	grade	N
	concentration	100
	grit size	400, 800, 1200, 2000
Chemical machining	chemical	KOH(potassiumhydroxide) HF(Hydrogen Fluoride)
	megasonic	164 kHz
	temperature	70 °C
	removal amount	30 μm

대면적 표면의 품질 변화를 확인하기 위해 직경 400mm, 두께 10mm, 비저항(ρ) 1~3 Ωcm의 p-type 상부 전극을 80°C의 불산 또는 KOH 용액에서 표면 제거량 30 μm로 화학 가공 후 탈이온수로 세정하고 질소가스로 수분을 제거 및 건조하여 표면 조도, 형상 및 순도를 평가하였다.

실리콘 상부 전극의 표면거칠기 측정은 KS B 0161 규격에 준하여 표면 조도 측정기(Mitutoyo, SJ-310)를 이용하여 측정하였고, 표면 형태 측정은 형상 측정 레이저 현미경(Keyence, VK-250K)를 이용하였다. 고순도 정밀 정량 분석은 반도체 소재 순도 분석에 주로 사용되는 원자의 고유한 질량 차이를 이용하여 극미량 원소를 분석하는 유도 결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, Thermo, Xseries II)를 사용하였다

4. 결과 및 고찰

4.1 기계가공 표면 비교

Fig 2와 같이 다이아몬드 40~50 μm의 400 mesh 휠 로 기계 가공한 경우 Ra는 0.55~0.58 μm, 다이아몬드 20~30 μm의 800 mesh 휠 가공시 0.16~0.18 μm, 다이아몬드 10~15 μm의 1200 mesh 휠 가공시 0.11~0.13 μm, 다이아몬드 5~10 μm의 2000 mesh 휠 가공시 0.03~0.04 μm로 나타났다.

동일한 결합도와 집중도의 다이아몬드 휠의 경우, 다이

아몬드 휠의 입도가 미세할수록 표면 조도가 향상됨을 알 수 있었다. 400 mesh 휠 기계 가공은 580 nm 정도의 Ra였지만 2000 mesh 휠은 40 nm 수준의 표면 조도 형성이 가능하였다. 입도가 크기가 클수록 생산성은 향상되지만 표면 조도가 나빠지고, 공작물의 균열, 파손 및 치핑 발생 가능성이 높아지므로 다이아몬드 휠의 입도가 미세할수록 정밀한 표면조도 값을 얻을 수 있었다. 거친 입도의 다이아몬드 휠은 연삭시 큰 크기의 칩을 생성시켜 표면 조도가 나빠지는 것으로 사료된다.

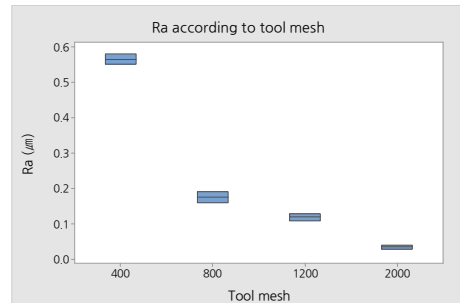


Fig. 2. Ra according to diamond tool mesh

ISO 기준에 준하여 측정된 cut off 길이 내에서 가장 높은 정점으로부터 골까지의 높이인 10점평균 거칠기 Rz는 400 mesh 로 기계 가공한 경우 5.74~6.38 μm, 800 mesh 가공시 1.76~1.88 μm, 1200 mesh 가공시 1.07~1.14 μm, 2000 mesh 가공시 0.32~0.4 μm로 측정되었다. Fig 3에서 보는 바와 같이 Ra와 동일하게 Rz 또한 다이아몬드 휠의 입도가 작아질수록 Rz 데이터의 편차가 크지 않은 정밀한 표면 조도 값을 얻을 수 있었다.

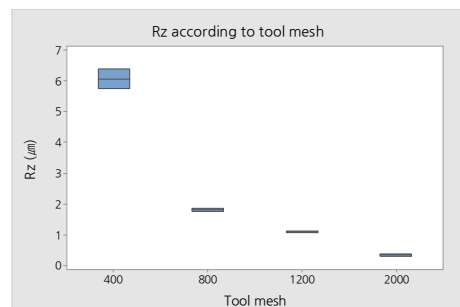


Fig. 3. Rz according to diamond tool mesh

4.2 화학가공 표면 비교

알칼리 용액을 사용하여 화학 가공시 400 mesh로 가공한 공작물의 Ra는 0.78~1.43 μm, 800 mesh 가공 공작물은 0.42~0.84 μm, 1200 mesh 가공 공작물은 0.12~0.43 μm, 2000

mesh 가공 공작물의 표면 Ra는 0.06-0.21 μm 로 확인되었다.

알칼리 용액을 이용한 화학가공은 이방성 식각 현상이 발생하며, 결정면에 따라 식각 속도가 다르기 때문에 밀도가 높은 111면이 110면이나 100면에 비해 식각속도가 낮음[6] 이방성 식각이 일어나면서 표면에 형성된 요철로 인해 표면조도가 나빠진 것을 알 수 있다.

산 용액으로 화학가공시 400 mesh 로 가공한 공작물의 Ra는 0.49-0.68 μm , 800 mesh 가공시 0.30-0.56 μm , 1200 mesh 가공시 0.05-0.08 μm , 2000 mesh 가공시 0.03-0.04 μm 이었다. 산 용액 사용시 결정 방향에 무관하게 균일한 식각 현상이 나타났으며, 이는 염기성 용액의 수산기 이온이 결정 방향에 따라 화학 반응속도가 변하는 이방성 식각이 아니라 결정 방향에 무관하게 등방성 식각이 일어나기 때문으로 판단된다. 알칼리와 산 용액으로 화학가공의 Ra 데이터는 Fig. 4와 같다. 산 용액을 사용한 화학 가공시 Ra 값의 최대값과 최소값 편차(variation)가 더 작게 나타나 균일한 표면 조도를 형성할 수 있는 것으로 확인되었다.

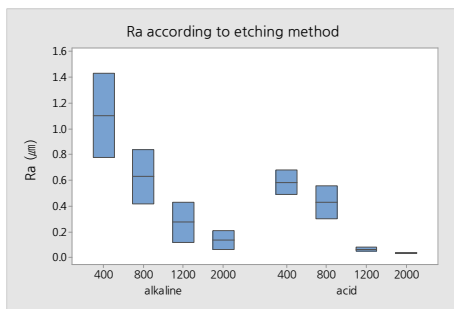


Fig. 4. Ra according to etching method

알칼리 용액으로 화학가공시 400 mesh 로 가공한 공작물의 Rz는 3.96-8.96 μm , 800 mesh는 3.22-4.72 μm , 1200 mesh 가공시 2.66-2.83 μm , 2000 mesh는 0.97-1.21 μm 로 측정되었다.

산 용액으로 화학가공시 400 mesh 로 가공한 공작물의 Rz는 2.88-4.15 μm , 800 mesh는 2.10-3.26 μm , 1200 mesh 가공시 0.46-0.26 μm , 2000 mesh는 0.20-0.29 μm 로 나타났다.

Ra와 동일하게 이방성 식각 현상이 일어나는 알칼리 용액 화학가공 대비 산 용액을 이용하여 등방성 식각이 일어나는 화학가공면의 Rz 데이터는 Fig. 5와 같고, 데이터 편차가 더 양호한 것으로 확인되었다.

레이저현미경(KEYENCE, VK250K)을 이용하여 50배율로 표면 형태를 측정된 이미지는 Table 3과 같다.

알칼리 용액을 이용한 화학 가공에서는 결정 방향에 따른 식각 속도의 차이로 인하여 사각형의 형상이 보이며, 산 용액을 사용한 화학 가공에서는 등방성 식각의 특징으로 결정 방향에 무관하게 균일한 물결 무늬가 나타

나는 것을 확인할 수 있다[10]. 또한 다이아몬드 휠의 입도가 미세 할수록 표면 형태는 경면에 가까운 형상이 나타남을 알 수 있다.

6,000°C의 플라즈마에 의하여 이온화된 시료가 전기장과 자기장을 통과하면서 질량 대 전하비에 따라 분리된 이온을 검출하는 유도결합플라즈마 질량분석기를 이용하여 순도를 분석한 결과를 Table 4에 정리하였다. 기계가공

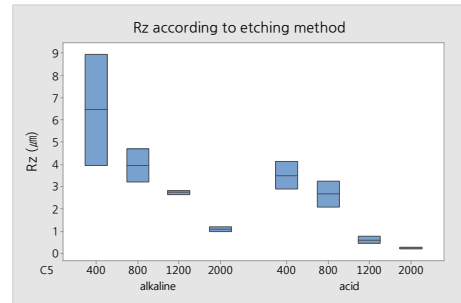


Fig. 5. Rz according to etching method

Table 3. Results of surface morphology (X50)

Item	Alkaline	Acid
400		
800		
1200		
2000		

Table 4. Results of ICP-MS

Item	As machined	Alkaline	Acid
Surface concentration (10^{10} atoms/cm ²)	1953.980	635.157	624.455

후의 오염도는 1,953.980 1010 atoms/cm² 였으나, 알칼리 용액 화학 가공 후 오염도는 635 1010 atoms/cm²로 낮아졌으며, 산 용액 화학가공 후에는 624.455 1010 atoms/cm² 로 산 용액을 사용한 화학 가공 이후의 실리콘 전극의 순도가 가장 높은 것으로 나타났다. 산 용액을 사용한 화학가공 시 고밀도 플라즈마 챔버 오염 우려가 없는 고순도의 실리콘 상부 전극을 제작할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

실리콘 상부 전극의 일반적 초정밀 미세가공은 기계 가공 후 래핑(lapping) 및 폴리싱(polishing) 등의 후 가공을 거쳐지게 된다. 그러나 2000 mesh 다이아몬드 휠로 기계 가공시 후 가공을 진행하지 않고, 기계 가공만으로 Ra 0.03-0.04 μm의 표면 형성이 가능함을 확인하였다.

알칼리 용액을 이용한 화학 가공시 Ra는 0.06-0.21 μm로 나타났으며, 산 용액 화학가공시에는 0.03-0.04 μm의 Ra로 실리콘 상부 전극을 제작할 수 있음을 확인하였다. 이를 토대로 화학 가공은 식각 속도가 빠르며, 공정 비용이 저렴한 장점이 있으나 결정 방향성(orientation) 의존 특성을 감안할 때 표면 거칠기 향상에는 산 용액을 이용한 화학 가공이 더욱 유리한 것으로 판단된다.

화학 가공을 이용하는 경우, 눈 메움(loading) 현상으로 인해 공정을 정지하고 드레싱을 진행하는 번거로움이 있는 다이아몬드 휠 기계 가공과 달리 동일 배스 내에서 여러 장을 동시에 처리할 수 있는 높은 시간 대비 생산성과 기계 가공 대비 저렴한 비용으로 우수한 품질의 실리콘 전극 표면을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2019학년도 한국기술교육대학교 연구연간제 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Masahiko yoshino, Aravindan sivanandam, Yuki kinouchi and Takashi matsumura, "Critical depth of hard

- brittle materials on Nano plastic forming", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, Vol.2 No.1, pp.59-70, 2008.
2. H. D. Jeong, "Mirror Surface Grinding Using Ultrafine Grit Wheel", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.13 No.6, pp.45-51, 1996.
3. Jongchan Lee, Sangbaek Ha, Eunho Jeon, Whan Choi, Jaekeuk Jung, "A Study on the Silicon Grinding", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, pp.46-50, 1998.
4. Yong-Woo Kim, Soo-Chang, Jeong-Woo Park, Deug-Woo Le, "The Characteristics of Machined Surface Controlled by Multi-Arrayed Diamond Tip the Characteristics of Machined Surface Controlled by Multi-Arrayed Diamond Tip", Proceedings of the KSMPE Conference, pp. 204-208, 2008.
5. Han Seog Oh, Hong Lim Lee, "Silicon Wafering Process and Fine Grinding Process Induced Residual Mechanical Damage", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 6, pp.145-154, 2002.
6. W.S Chae and C.G Suk, "Si The Improved Characteristics of Wet Anisotropic Etching of Si with Megasonic Wave", Journal of the Microelectronics and Packaging Society, v.11 no.4, no.33, pp.81-86, 2004.
7. A. Busnaina and H. Lin., "Physical removal of Nano scale defects from surfaces", IEEE/SEMI advanced semiconductor manufacturing conference, pp.272-277, 2002.
8. H. Line, et al., "Cleaning of high aspect ratio sub-micron trenches", IEEE/SEMI advanced semiconductor manufacturing conference, pp.304-308, 2002.
9. Ahmed A, Busnaina, H. Lin and N. Moumen, "Surface cleaning mechanism and future cleaning requirements", IEEE/SEMI advanced semiconductor manufacturing conference, pp.328-333, 2002.
10. Jung-Hyun Eum, Kwan-Young Choi, Sahn Nahm, Kyoon Choi, "Texturing of Multi-crystalline Silicon Using Isotropic Etching Solution", Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 46, No. 6, pp.685-688, 2009.

접수일: 2019년 10월 25일, 심사일: 2019년 12월 8일,
게재확정일: 2019년 12월 12일