

# 절삭유의 필터링 시스템이 플라즈마 에칭 전극의 표면 품질에 미치는 영향

이은영<sup>\*†</sup>·김문기<sup>\*\*</sup>

<sup>\*†</sup>한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과, <sup>\*\*</sup>한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

## Effects of Filtering System of Cutting Fluid on the Surface Quality of Plasma Etching Electrode

Lee Eun Young<sup>\*†</sup> and Moon Ki Kim<sup>\*\*</sup>

<sup>\*†</sup>Department of Mechatronics Engineering, Graduate School of Korea University of Technology and Education

<sup>\*\*</sup>School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze effects of filtering system of cutting fluid which is used for machining silicon electrode. For the research, different sizes of filter clothes are applied to check grain size of sludge of cutting fluid. Surface roughness of machined workpiece, depth of damage inside of silicon electrode, and suspended solids of cutting fluid are experimented and analyzed. From these experiments, it is verified that filtering system of cutting fluid is very important factor for machining. Results of this study can affect various benefits to the semiconductor industry for better productivity and better atmospheric pollution in workplace.

**Key Words** : Filtering System, Cutting Fluid, Silicon Electrode, Surface Roughness, Depth of Damage

### 1. 서 론

IoT(internet of things)와 함께 인터넷에 연결된 사물의 수가 폭발적으로 증가함에 따라 수집된 데이터를 분석, 판단 및 추론하기 위한 저장 장치의 성능 개선이 절실히 요구되고 있으며, 이를 위해 메모리 반도체의 미세화 개발이 요구되고 있다. 이와 같은 반도체 미세화의 개발을 위해 3D 형태의 적층형 반도체 상용화가 진행되고 있으며, QPT(Quadruple Patterning)로 DPT(Double Patterning)를 반복하는 패턴 형성 방식이 적용되고 있다.

DPT를 두 번 진행하는 QPT 방식은 포토장비를 더 사용하지 않는 대신 플라즈마 에칭(plasma etching) 공정이 더 많이 사용되는데, 이는 포토 공정이 반도체 8대 공정 중에서 가장 비싼 공정이기 때문에 원가 절감 효과가 있는

것으로 알려져 있다. 에칭 공정의 CTQ(critical to quality) 중 셀 캐패시터의 가로/세로 비율인 식각 종횡비(A/R, aspect ratio)는 3x nm 세대에서 A/R 25였고, 20 nm 후반에선 A/R 50, 20 nm 초반에선 A/R 60이상이 요구되었지만 1x nm 세대에선 A/R 100까지 타이트한 스펙이 요구되고 있는 실정이다.

반도체 에칭 공정에 사용되는 실리콘 전극(silicon electrode)의 플라즈마면 표면 거칠기는 웨이퍼의 center와 edge 전체의 식각 균일도 유지를 위한 핵심 요소로 판단되고 있으며, 가공된 소재의 내부에 손상 및 오염이 남아 있는 경우는 에칭 공정이 진행됨에 따라 열충격에 의한 균열전파가 이루어져 파티클이 발생하거나 부품의 수명을 단축시키는 원인으로 작용하게 된다[1]. 이와 같은 문제의 해결을 위해서 전극의 표면은 크랙, 칩핑이 없어야 하고, 소재 내부의 손상 및 오염[2] 정도가 최소화 되어야 한다.

이러한 실리콘 전극의 절삭가공 시에는 발생하는 열을 냉각시킴과 동시에 가공경사면과 여유면의 마찰을 윤활

<sup>†</sup>E-mail: wiselyey@koreatech.ac.kr

시켜 줄 수 있는 절삭유를 사용하는데[3], 절삭유는 염소(Cl), 유황(S), 인(P) 등을 함유하고 있고, 이 첨가물은 가공 중 현장에 비산되어 작업 환경 악화, 환경 오염 및 인체 유해 요소로 작용하게 된다[4]. 그러므로 절삭유 사용으로 인한 환경 오염 및 작업자 건강에 대한 유해성이 사회적 인 문제로 대두되고 있다.

절삭유는 일정기간 사용하면 절삭 가공시 발생하는 피삭재, 공구에서 탈락된 입자, 다른 종류 물질의 혼입 등으로 부패가 진행되고 폐기된다. 유럽에서는 절삭유 사용에 따른 환경 오염 및 인체 유해성에 관한 법률을 제정하여 강제적으로 사용을 규제하고 있다[5]. 절삭 스톨 표면상의 절삭유가 절삭스톨의 회전원심력으로 인해 반경방향으로 튕겨 나가면서 회전분리 되어 미립화 되고, 공구나 공작물에 절삭유가 충돌하면서 운동량 전달로 인해 미립화가 진행된다. 미세하게 미립화 된 절삭유는 작업자 호흡기 질환 및 작업장내 대기오염의 주요한 원인이 된다는 연구가 있다[6]. 그러므로 절삭 가공 시 절삭유를 사용할 경우에는 혼탁한 절삭유의 필터링 과정은 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 절삭유의 필터링 시스템이 반도체 에칭 공정에 사용되는 실리콘 전극의 표면거칠기 향상에 미치는 영향을 분석하고, 실리콘 표면으로부터 소재 내부로 전파되는 손상 및 오염 정도(depth of damage)를 연구하였으며, 필터링 시스템을 통한 절삭유 부패를 방지함으로써 작업 환경 오염 및 인체 유해 요소 저감 효과를 연구하였다. 이를 위해 절삭유 필터링 시스템이 사용 절삭유 내 부유물 입도 변화에 영향을 미치는지 확인하고, 필터링 절삭유로 가공한 시편의 표면거칠기와 내부 손상 및 오염 변화를 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에는 폴리실리콘을 도가니 속에서 용해하여 고체의 종 결정과 접촉시켜 서서히 인상시키면서 종결정 밑에 단결정을 성장시키는 초크랄스키법으로 성장시킨 단결정 실리콘 잉곳을 사용하였다. Fig 1의 (a)는 성장이 완료된 단결정 실리콘 잉곳의 모습이며, (b)는 실험을 위해 둥근 원통형 모양으로 절단한 실리콘 로드(rod)의 모습이다.

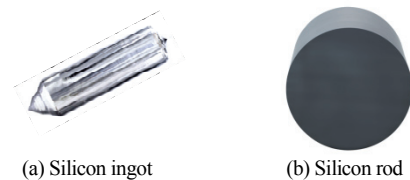


Fig. 1. Single crystal silicon ingot and rod.

단결정 실리콘은 순도 99.999999 % (8N) 이상의 소재로 반도체 공정에서 주로 사용되는 100 결정면의 소재이며, 실험에 사용한 단결정 실리콘의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of workpiece

item	specification
growing method	Cz
material	Single crystal silicon
color	Grey
crystal orientation	100
purity (%)	> 8N
vickers hardness (Hv)	1,015

실험 장치로는 저중심의 고강성 구조로 고품질의 정밀 가공에 특화된 고속 정밀 수직형 머시닝센터(HWACHEON, SIRIUS-UL+)를 사용하여 가공 실험을 진행하였다. 그리고, 절삭유의 필터링 효과를 확인하기 위해 슬러지(sludge)가 여과포(filter cloth)를 통과하면서 탈수 가압력에 의해 액체와 고체가 분리되는 방식으로 절삭유내 미세 실리콘 슬러지를 분리할 수 있는 필터프레스(JUNGDO, general filter press), 집유 탱크 및 공급 탱크를 설치하였다.

10 μm 이내의 미세 입자로 분포하는 절삭유내 실리콘 부유물을 여과하기 위하여 미세 입자 여과용 PP소재의 10 cc/cm<sup>2</sup>/s, 5 cc/cm<sup>2</sup>/s, 0.4 cc/cm<sup>2</sup>/s 통기도를 갖는 여과포를 장착하였으며, Fig 2의 (a)는 설치된 필터프레스 장치, (b)는 여과포를 장착한 여과판의 모습이다.

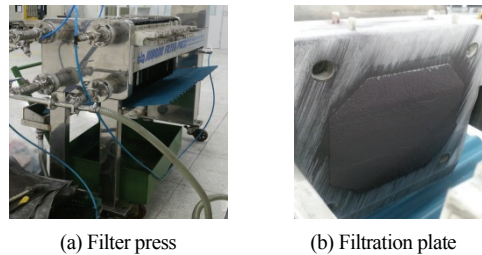


Fig. 2. Filter press and filtration plate.

필터프레스를 통해 여과된 절삭유를 사용하여 단결정 실리콘의 표면 가공시 품질 변화에 대한 연구를 진행하였으며, 실험 조건은 Table 2와 같다.

절삭유내에 잔류하는 실리콘 부유물의 입도 는 KS A ISO 13320 입자 크기 분석 - 레이저 회절법에 준하여 마이크로입도분석기(KEYENCE, VK-X150K)를 이용해 분석하였다. 절삭유 시료를 흔들어서 고르게 섞은 후 일회용 피펫을 사용하여 시료를 투입하고, 장비 안에 있는 초음파

**Table 2.** Experimental conditions

items	contents
machine	SIRIUS UL+ 12K
maker	HWACHEON
spindle speed (rpm)	6,000
feed rate (mm)	0.25
tool	vitrified wheel
filter air permeability (cc/cm <sup>2</sup> /s)	0.4, 5, 10
filter material	PP (Polypropylene)
filter pressure (Kgf/cm <sup>2</sup> )	6
filter press plate size (mm)	600

분해(sonication) 장치를 이용하여 내부에서 응집된 시료를 떨어뜨려 입도 분석을 진행하였다.

실리콘 전극의 표면거칠기 측정은 KS B 0161 규격에 준하여 광범위한 측정 및 해석이 가능한 소형 표면 조도 측정기 (Mitutoyo, SJ-310)를 이용하여 측정하였고, 표면 가공 과정 중 단결정 실리콘 내부에 전파된 손상 및 오염 정도를 측정하기 위하여 시편을 절단 후 주사전자현미경 (JEOL Ltd, JSM-6510)을 이용하였다.

또한, 절삭유에 박테리아 및 곰팡이 유무를 판단하기 위하여 Biosan 사의 Sani-check BF test kit (Bacteria/Fungi)를 사용하여 절삭유의 부패도를 확인하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 절삭유내 부유물 입도

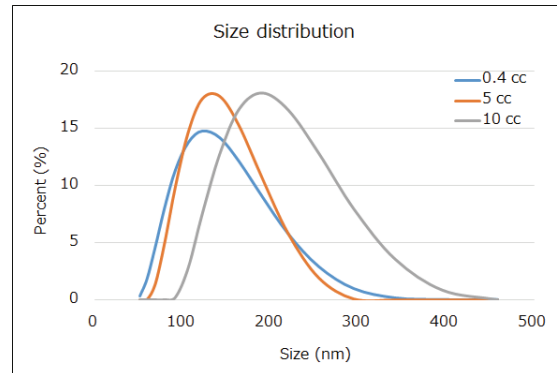
가공 완료 후 실리콘 슬러지가 많이 함유된 절삭유는 검은색을 나타내지만 필터프레스를 통과하여 여과된 절삭유는 원유 본연의 색을 되찾는 것을 확인할 수 있었고, Fig 3에서 알 수 있듯이 여과포의 통기도가 낮을수록 절삭유의 색이 좀더 신유에 가까운 색으로 변하는 외관 변화를 확인할 수 있었다.



(a) before filtration (b) 10 cc (c) 5 cc (d) 0.4 cc

**Fig. 3.** Cutting fluids after filtration.

부유물의 수치상 입도 차이를 확인하기 위하여 KS A ISO 13320에 준하여 마이크로 입도분석을 진행하였다. 필터링 후의 절삭유를 분석한 결과, 0.4 cc 여과포로 필터링 한 절삭유내 슬러지의 평균 사이즈는 111.1 nm, 5 cc로 필터링 후에는 140.9 nm, 10 cc로 필터링 한 후에는 평균 200.7 nm로 부유물의 입도 차이가 확인되었고, 각 필터링에 따른 입도 분포는 Fig 4와 같다.

**Fig. 4.** Suspended solid size distribution.

부유물 분포도에서 peak이 제일 높은 부분의 수치는 Table 3의 정리 내용과 같이 0.4 cc는 134.6 nm, 5 cc는 139.3 nm, 10 cc는 200.6 nm로 나타났으며, 값이 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지 즉 흩어져 있는 정도를 나타내는 표준편차는 4 cc는 49.78, 5 cc는 41.55, 10 cc는 60.10으로 5 cc로 여과한 부유물의 표준편차가 가장 작게 분석되었다.

**Table 3.** Experimental results

filter air permeability (cc/cm <sup>2</sup> /s)	mean (nm)	Size (nm)	St Dev
0.4	111.1	134.6	49.78
5	140.9	139.3	41.55
10	200.7	200.6	60.10

#### 3.2 표면 거칠기

가공 표면의 Ra 측정 결과는 Fig 5에 나타내었다. 0.4 cc 여과포로 필터링 한 절삭유를 사용한 경우는 0.328  $\mu\text{m}$ , 5 cc 여과포 적용시 0.361  $\mu\text{m}$ , 10 cc 여과포 적용시 0.363  $\mu\text{m}$ 로 여과포의 사이즈가 작을수록 Ra 값도 함께 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 필터링 되지 못한 비교적 큰 사이즈의 실리콘 칩의 재유입이 가공 표면의 거칠기에 영향을 미친 것으로 사료된다.

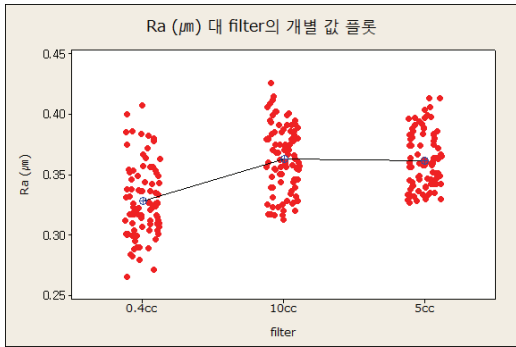


Fig. 5. Individual value plot of Ra.

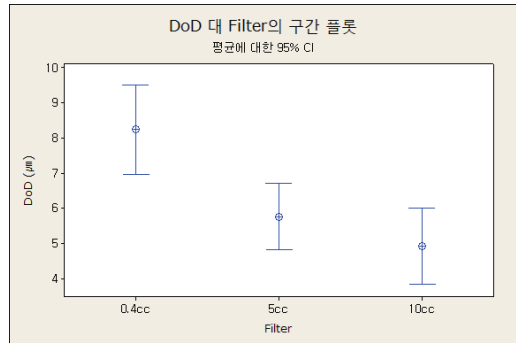


Fig. 7. Depth of damage box plot.

Ra 평균 간의 차이가 통계적으로 유의한지를 확인하기 위하여 통계분석 프로그램인 미니탭을 이용하여 분산 분석을 진행한 결과를 Fig 6에 나타내었다. p 값이 유의 수준 0.05 보다 작으므로 모집단 평균이 모두 같다는 귀무가설을 기각하고, 필터 크기에 따라 평균 표면 거칠기가 다르다는 대립가설을 채택할 수 있다. 측정된 각각의 Ra 값이 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 확인하기 위하여 표준편차를 분석한 결과 0.4 cc 여과포로 필터링 한 절삭유를 사용한 경우는 0.03, 5 cc 여과포 적용시 0.02, 10 cc 여과포 적용시 0.03의 표준편차를 나타내었다. 5 cc 여과포 적용시 가장 낮은 표준편차로 표면거칠기의 재현성을 확보할 수 있는 것으로 확인되었다.

일원 분산 분석: Ra (μm) 대 filter

출처	DF	SS	MS	F	P
filter	2	0.069063	0.034527	47.89	0.000
오차	267	0.192478	0.000721		
총계	269	0.261531			

S = 0.02685 R-제곱 = 26.40% R-제곱(수정) = 25.85%

수준	N	평균	표준 편차	합동 표준 편차에 근거한 평균의 개별 95% CI
0.4cc	90	0.32824	0.02969	(-----)
10cc	90	0.36303	0.02743	(-----)
5cc	90	0.36123	0.02300	(-----)

0.324    0.336    0.348    0.360

합동 표준 편차 = 0.02685

Fig. 6. One-way ANOVA results.

3.3 내부 손상 및 오염

단결정 실리콘 소재 내부로 전파된 손상 및 오염 정도를 SEM을 이용하여 측정하였고, 그 결과는 Fig 7과 같다. 손상 정도의 표준편차 또한 Ra 표준편차와 유사하게 0.4 cc 여과포로 필터링 한 절삭유를 사용한 경우는 2.006, 5 cc 여과포 적용시 1.495, 10 cc 여과포 적용시 1.727로 5 cc 여과포를 적용한 절삭유의 내부 손상 및 오염 표준편차가 가장 낮게 나타났다.

3.4 작업 환경

작업 환경 오염 및 인체 유해 요소 확인을 위해 Biosan사의 BF kit (Bacteria/Fungi)를 사용하여 절삭유의 부패도를 검사한 결과는 Table 4와 같다. 사용유를 분석한 결과 필터 프레스를 적용하지 않은 절삭유에서는 박테리아가 10<sup>7</sup> 수준으로 검출되었고, 이로 인해 악취가 심하게 발생하였으나 필터프레스를 통해 여과된 절삭유는 박테리아가 검출되지 않고, 부패하지 않은 것을 알 수 있었다.

Table 4. Results of corruption

item	unfiltered cutting fluid	filtered cutting fluid
appearance		
bacteria		

4. 결론

본 연구에서는 절삭유의 필터링 시스템이 반도체 에칭 공정에 사용되는 실리콘 전극의 표면거칠기 향상에 미치는 영향을 연구하고, 실리콘소재의 내부로 전파되는 손상 및 오염 정도의 변화를 연구하였다.

또한 절삭유 필터링 시스템 적용을 통해 절삭유의 부패를 방지함으로써 절삭유를 사용하는 작업 환경 오염 및 인체 유해 요소 저감 효과도 확인하였다.

1. 0.4 cc 여과포로 필터링 한 절삭유내 슬러지의 평균 사이즈는 111.1 nm, 5 cc로 필터링 후에는 140.9 nm, 10 cc로 필터링 한 후에는 평균 200.7 nm로 필터링 여과포의 통기도가 낮을수록 실리콘 슬러지의 입도가 작아지는 것을 확인하였다.
2. 가공 표면의 Ra 측정 결과 여과포의 사이즈가 작을수록 Ra 값도 함께 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. Ra 값의 표준편차를 분석한 결과 5 cc 여과포 적용시 0.023의 가장 낮은 표준편차를 나타내었다.
3. 단결정 실리콘 소재 내부로 전파된 손상 및 오염 정도를 SEM으로 측정한 결과 필터링 별 표준편차는 0.4 cc 여과포로 필터링 한 절삭유를 사용한 경우는 2.006, 5 cc 여과포 적용시 1.495, 10 cc 여과포 적용시 1.727로 5 cc 여과포를 적용한 경우의 표준편차가 가장 낮게 나타났다.
4. 10 μm 이내의 분포를 갖는 미세한 실리콘 칩 부유물이 발생하는 단결정 실리콘 연삭의 경우, 필터프레스를 적용함으로써 절삭유에 부유하는 부유물의 입도를 낮추고, 표면거칠기도 향상시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 10 μm 이내의 크기로 발생하는 실리콘 칩의 필터링에는 통기도 5 cc의 여과포가 가장 효과적인 것으로 판단된다.
5. 필터프레스를 적용함으로써 부패없이 장기간 절삭유를 사용할 수 있는 것을 확인하였다. 부패 과정에서 발생하는 유화분리 현상으로 인한 윤활성 저하, 공구 마모도 증가, 가공표면 조도 저하 문제를 예방할 수 있으며, 이와 함께 부패된 절삭유가 미세하게 미립화되어 작업자 호흡기 질환 및 작업장 내 대기오염을 일으키는 현상도 함께 예방할 수 있다. 더불어 절삭유를 교체없이 장기간 사용함으로써 실리콘 연삭 공정의 원가 절감 효과도 함께 기대할 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2018년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. W. K. Choi, "A study of lifetime optimization of silicon and ceramic materials for semiconductor dry etcher," *Korea University of Technology & Education*, (2016).
2. S. K. Kim, "A study on the grindability of Fine Ceramics by Experimental Method," *Journal of The Semiconductor & Display Technology*, Vol. 10, No. 6, pp. 35-42, (2011).
3. H. S. Rama Iyengar, R. Salmon and W. B. Rice, "Some effects of cutting fluid on chip formation in metal cutting," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 87, pp. 36-38, (1965).
4. Joon Hwang, Eui-Sik Chung, "A study on the environmentally conscious machining technology cutting fluid atomization and environmental impact in grinding operation (I)," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 61-69, (2005).
5. Byme, G., Scholta, E., "Environmentally clean machining process a strategic approach", *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 471-474, (1993).
6. Cook, N. H., "Tool wear and tool life," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 95, pp. 931-938, (1973).

접수일: 2018년 11월 26일, 심사일: 2018년 12월 13일,  
게재확정일: 2018년 12월 18일