

전해 이온화와 자외선광을 이용한 사파이어 화학기계적 연마의 재료제거 효율 향상에 관한 기초 연구

박성현¹ · 이현섭^{2*}

¹동명대학교 대학원 기계시스템공학과 석사과정생

²동아대학교 기계공학과 부교수

Basic Study on the Improvement of Material Removal Efficiency of Sapphire CMP Using Electrolytic Ionization and Ultraviolet Light

Seonghyun Park¹ and Hyunseop Lee^{2*}

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

²Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

(Received October 7, 2021; Revised December 24, 2021; Accepted December 29, 2021)

Abstract – Chemical mechanical polishing (CMP) is a key technology used for the global planarization of thin films in semiconductor production and smoothing the surface of substrate materials. CMP is a type of hybrid process using a material removal mechanism that forms a chemically reacted layer on the surface of a material owing to chemical elements included in a slurry and mechanically removes the chemically reacted layer using abrasive particles. Sapphire is known as a material that requires considerable time to remove materials through CMP owing to its high hardness and chemical stability. This study introduces a technology using electrolytic ionization and ultraviolet (UV) light in sapphire CMP and compares it with the existing CMP method from the perspective of the material removal rate (MRR). The technology proposed in the study experimentally confirms that the MRR of sapphire CMP can be increased by approximately 29.9, which is judged as a result of the generation of hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) in the slurry. In the future, studies from various perspectives, such as the material removal mechanism and surface chemical reaction analysis of CMP technology using electrolytic ionization and UV, are required, and a tribological approach is also required to understand the mechanical removal of chemically reacted layers.



© Korean Tribology Society 2021. 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 – sapphire(사파이어), chemical mechanical polishing(화학기계적 연마), ultraviolet(자외선), electrolytic ionization(전해 이온화), material removal rate(재료제거율)

*Corresponding author: Hyunseop Lee
Tel: +82-51-200-7648
E-mail: hyunseop@dau.ac.kr
<http://orcid.org/0000-0003-4717-3147>

1. 서 론

화학기계적 연마(Cheical Mechanical Polishing; CMP)는 반도체 생산에 있어 박막의 광역 평탄화(Global planari-

zation)에 활용되고 있는 핵심 기술 중 하나이다[1]. CMP는 반도체 소자의 제조 외 기관 소재의 최종 표면거칠기(Surface roughness) 확보와 기관 표면 아래 가공 변질층(Subsurface damage) 제거를 위한 필수 기술이기도 하다. CMP는 슬러리(Slurry)에 포함된 화학적 요소들과 소재가 반응하여 표면에 화학 반응층(Chemically-reacted layer)을 형성시키고, 연마 입자(Abrasive)를 이용하여 화학 반응층을 기계적으로 제거하는 재료제거 메커니즘(Mechanism)을 이용한 일종의 하이브리드(Hybrid) 가공 공정이다[1].

사파이어(Sapphire)는 알루미늄(Al_2O_3) 원료를 고온에서 단결정으로 성장시킨 결정체로 다이아몬드(Diamond) 다음으로 높은 모스경도(Mohs hardness)를 가지고 있으며, 내마모성, 내식성이 우수하고 광학적 투과성이 우수하여 모바일(Mobile) 기기 및 디스플레이(Display) 장치의 백 라이트 유닛(Back light unit; BLU)과 각종 조명 등에 사용되는 발광소자(Light emitting diode; LED) 용 기관 소재로 활용되고 있다[2]. 그러나 우수한 기계적 특성과 화학적 안정성 때문에 화학반응과 기계적 재료 제거를 이용하는 CMP 공정에 있어 상당한 시간이 소요되고 있다. 웨이퍼 제조 공정에서 기관 소재의 표면 가공에 의해 발생하는 비용이 전체 웨이퍼 가격에서 상당한 부분을 차지하기 때문에, 사파이어 기관의 생산에서 CMP 공정 시간의 단축 혹은 재료 제거 효율(Material removal efficiency)의 향상은 필수적으로 극복되어야 할 과제이다.

사파이어 CMP의 효율 향상에 관한 기존의 연구는 크게 3가지로 나뉜다.

- ① 슬러리의 화학적 반응 향상에 관한 연구
- ② 연마 입자의 종류, 함량 및 혼합 입자 슬러리(Mixed abrasive slurry)에 관한 연구
- ③ CMP 장치의 공정 조건에 관한 연구

Park 등[3]은 사파이어 CMP 슬러리에 염화칼륨(Potassium chloride; KCl)를 첨가 시 물 분자를 H⁺와 OH⁻ 이온으로 분해하여 염기성 영역에서 제타 전위의 변화는 크지 않지만, 표면 화학 반응층의 생성을 활성화시켜 재료제거율(Material removal rate; MRR)을 높일 수 있음을 확인하였다. Yan 등[4]은 상용 슬러리를 이용하여 콜로이드 실리카(Colloidal silica) 입자의 함량 변화에 따른 재료 제거 특성에 대해 연구하였으며, 입자 함량이 증가할수록 높은 MRR을 획득할 수 있음을 밝혔다. Lee 등[5]은 거시적 및 미시적 관점에서 사파이어 CMP의 재료 제거에 메커니즘에 대해 연구하였으며 MRR은 CMP 가공 중 마찰 에너지(Friction energy)에

따라 선형적으로 증가함을 보여주었다.

사파이어 CMP의 MRR 증가를 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있지만, 여전히 사파이어 CMP의 재료 제거 효율 향상을 위한 또 다른 노력이 필요해 보인다. 최근, 슬러리의 전해 이온화(Electrolytic ionization)를 이용하거나 자외선(Ultraviolet; UV) 광을 이용하는 CMP 방식이 구리와 SiC 등의 소재를 대상으로 소개되고 있다[6,7]. 두 방식의 공통점은 슬러리에 에너지(전기 및 광 에너지)를 공급하여 슬러리의 하이드록실 라디칼($\cdot OH$)의 생성을 활성화하여 소재와 슬러리의 화학적 반응을 향상시키는 점이다. 그러나 두 가지 방식을 동시에 이용하는 연구에 관해서는 아직 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 사파이어 CMP의 MRR 향상을 위하여 전해 이온화와 UV를 동시에 이용한 기술에 관한 기초 연구를 수행하고자 한다. 특히, 일반 CMP 가공과 본 연구에서 제안하는 전해 이온화와 UV를 이용한 사파이어 CMP를 MRR의 관점에서 비교하고 향후 재료 제거 메커니즘 및 공정 개선 연구의 수행 방향에 대해 논하고자 한다.

2. 연구방법 및 내용

실험을 위하여 100 mm 직경의 사파이어 웨이퍼를 준비하였다. 웨이퍼의 두께는 약 800 μm 였다. 본 연구에서는 기관 소재의 CMP에 사용되는 상용 슬러리를 이용하였으며 연마 패드(Polishing pad)는 KPX Chemical의 KONI 패드를 이용하였다. CMP 장치는 G&P Technology의 POLI-300 연마기를 이용하였으며, 전해 이온화를 위해 슬러리 노즐에 SS304로 제작된 전극(Electrode)을 위치시켜 노즐로부터 나오는 슬러리가 전극 사이를 통과하며 전해 이온화가 되도록 하였다. 또한 UV 조사 장치를 이용하여 가공 중 연마 패드 위로 공급되는 슬러리가 UV에 노출될 수 있도록 하였다. 은 구체적인 실험의 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental condition

Parameters	Conditions
Pressure (g/cm^2)	400
Head/Platen speed (rpm)	100
Flow rate (ml/min)	150
Electrode	SS304
AC Voltage (V)	30
Slurry	Silica slurry+DIW+H ₂ O ₂
UV light	125 W

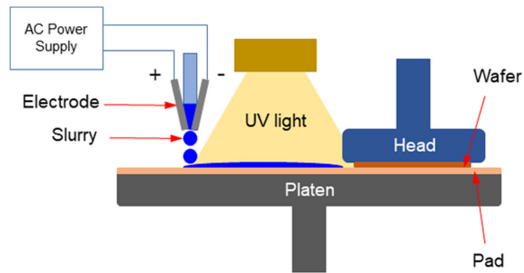


Fig. 1. Schematic of CMP system using electrolytic ionization and photocatalytic Reaction.

사파이어 CMP의 MRR은 정밀저울을 통해 측정된 무게와 사파이어의 밀도(Density)를 활용하여 다음과 같이 환산하였다.

$$MRR(\mu\text{m}/\text{h}) = \frac{\Delta m \times 10^4}{\rho \times A \times t} \quad (1)$$

여기서 Δm 은 사파이어의 무게 변화량(g)이고 ρ 는 사파이어의 밀도(3.98 g/cm^3), A 는 웨이퍼 면적(cm^2), t 는 가공 시간(h)을 뜻한다. Fig. 1은 실험에 이용된 실험 장치의 개략도를 보여준다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 전해 이온화와 UV를 이용한 CMP 실험에 앞서 기존 방식의 사파이어 CMP 실험을 실시하였다. 실험에는 상용 콜로이드 실리카 슬러리를 사용하였으며 슬러리의 입자 함량은 20 wt% 였으며 과산화수소(H_2O_2)가 3.3 wt% 첨가되었다. 가공 압력은 400 g/cm^2 , 정반과 헤드의 회전속도는 각각 100 rpm이며 슬러리의 유량은 150 ml/min이다. 사파이어 CMP 가공 실험은 1시간 동안 이루어졌다. 다음으로 전해 이온화를 활용한 CMP 실험이 이루어졌으며 실험의 조건은 앞선 일반 CMP 조건과 동일하나 슬러리의 반응성을 높이기 위해 슬러리에 고순도의 산소를 공급하였다. 마지막으로 본 연구에서 제안한 전해 이온화와 UV를 이용한 CMP 실험을 수행하였다. 실험은 조건당 각각 3회 수행되었다.

Fig. 2는 일반적인 CMP, 전해 이온화를 이용한 CMP, 전해 이온화와 UV를 이용한 CMP에 있어서 사파이어의 MRR을 보여준다.

일반적인 사파이어 CMP의 경우의 MRR은 $1.37 \mu\text{m}/\text{h}$ 이며, 전해 이온화가 적용된 경우는 $1.59 \mu\text{m}/\text{h}$, 전해 이온화와 UV를 이용한 경우 $1.78 \mu\text{m}/\text{h}$ 로 기계 및 화학적

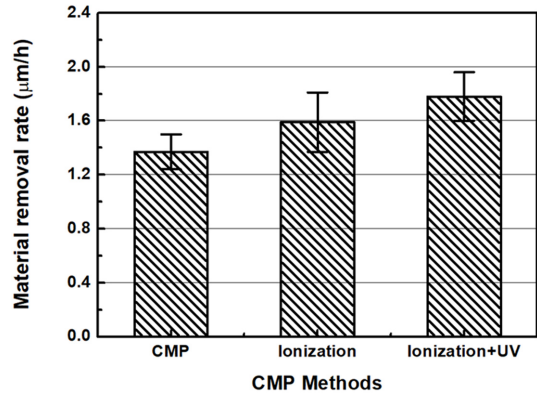


Fig. 2. Material removal rate of sapphire wafer as a function of CMP methods.

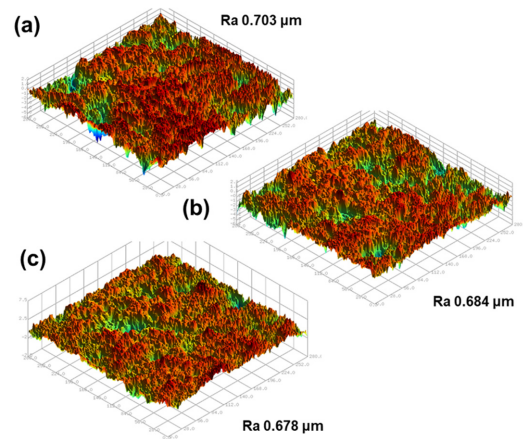


Fig. 3. Surface image of sapphire wafer after CMP; (a) conventional, (b) w/ electrolytic ionization, and (c) w/ electrolytic ionization and UV.

에너지 외 전기 및 광 에너지를 추가할 경우 사파이어의 MRR이 증가함을 알 수 있다. 전해 이온화를 이용한 CMP와 전해 이온화와 UV를 이용한 CMP의 MRR은 기존 CMP보다 각각 약 16.1%, 29.9% 상승하였다.

Fig. 3은 가공 후 공초점 레이저 현미경(Confocal laser microscope)로 측정된 사파이어 웨이퍼의 표면을 보여준다. 가공 전 웨이퍼의 평균 거칠기는 $0.857 \mu\text{m}$ 였으며, CMP 가공 후 $0.703 \mu\text{m}$, 전해 이온화를 이용한 CMP 후 $0.684 \mu\text{m}$, 전해 이온화 및 UV를 이용한 CMP 후 $0.678 \mu\text{m}$ 이다.

슬러리의 전해 이온화는 $\cdot\text{OH}$ 라디칼 발생을 활성화하여 슬러리와 웨이퍼의 반응을 촉진시키는 것으로 알

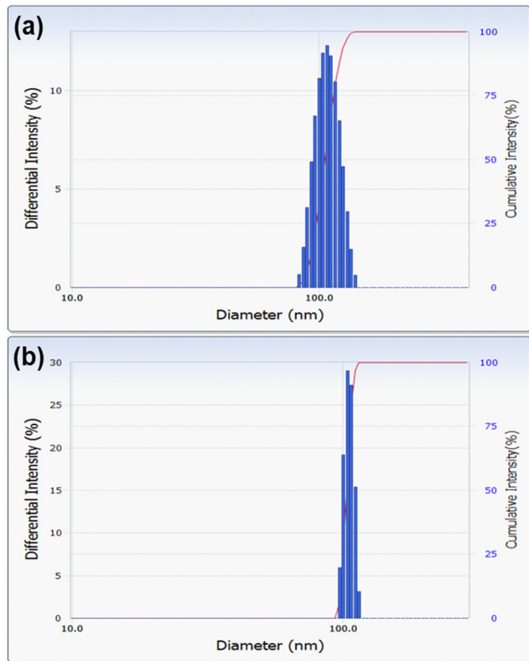


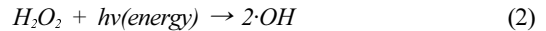
Fig. 4. Particle size distribution; (a) conventional slurry and (b) electrolytically-ionized slurry.

려져 있다[7]. 따라서 본 연구에서 역시 사파이어와 슬러리의 화학적 반응이 전해 이온화를 통해 활성화된 것으로 보인다.

Fig. 4(a)는 실험에 사용된 슬러리의 입자 크기 분포 (Particle size distribution; PSD)를 보여준다. 준비된 슬러리의 입자는 109.1 nm의 평균 직경을 가지고 입자 크기의 표준편차(Standard deviation; SD)는 12.0 nm이다. 슬러리를 전해 이온화하는 경우(Fig. 4(b)), 입자의 평균 직경은 108.5 nm로 다소 감소하나 큰 변화가 없는 반면, SD는 4.5 nm로 크게 감소함을 알 수 있다. 일반적으로 CMP 슬러리의 입자가 뭉쳐 PSD의 SD가 커질수록 스크래치(Scratch) 발생 확률이 높아진다. 또한 재료 제거에 참여하는 입자의 수가 감소하여 전반적으로 MRR이 감소하는 경향을 보인다[8]. 따라서 전해 이온화를 이용한 사파이어 CMP의 MRR 상승은 ·OH 라디칼에 의한 화학적 반응 활성화와 연마 입자의 SD 감소에 의한 것으로 판단된다.

전해 이온화와 UV를 동시에 사용하는 경우 슬러리와 사파이어 웨이퍼의 화학적 반응이 더욱 활성화 되는 것으로 생각된다. 연구에 따르면, 산화제에 UV를 조사하면 광분해되어 순간적으로 라디칼을 생성하게 되는 것

으로 알려져 있다. 본 연구에서 슬러리에 포함된 H_2O_2 의 경우는 UV 조사에 의해 광분해 되어 아래와 같이 반응성 ·OH 라디칼을 생성한다[9].



따라서 전해 이온화와 UV를 이용하는 CMP에서는 기존의 CMP 방식에 비하여 슬러리 내 ·OH 라디칼이 크게 증가하여 CMP 시 높은 MRR을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

향후 전해 이온화와 UV를 이용하는 CMP 공정의 재료제거 메커니즘 분석을 위해 전해 이온화에 따른 슬러리 입자 SD 변화의 원인 규명 및 ·OH의 생성과 사파이어와의 화학적 반응에 관한 추가적인 연구가 필요해 보이며 이를 위한 트라이볼로지 연구가 요구될 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 사파이어 CMP에 있어 전해 이온화와 UV를 이용한 CMP 기술에 관해 소개하고 기존의 CMP 방식과 MRR의 관점에서 비교하였다. 연구에서 제안한 기술은 사파이어 CMP의 MRR을 약 29.9% 증가시킬 수 있음을 실험적으로 확인하였으며, 이는 슬러리 내 ·OH 라디칼의 생성에 따른 결과로 판단된다.

향후 전해 이온화와 UV를 이용한 CMP 기술의 재료제거 메커니즘과 표면화학 반응의 분석 등 다양한 관점에서의 연구가 추가적으로 필요할 것으로 보이며, 특히 화학 반응층의 기계적 제거의 이해를 위한 트라이볼로지적 접근이 요구된다.

Acknowledgements

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기초연구사업(NRF-2021R1F1A1063060)의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- [1] Lee, H., "Tribology Research Trends in Chemical Mechanical Polishing (CMP) Process," *Tribol. Lubr.*, Vol.34, No.3, pp.115-122, 2018, <https://doi.org/10.9725/kts.2018.34.3.115>
- [2] Niu, X., Liu, Y., Tan, B., Han, L., Zhang, J., "Method of Surface Treatment on Sapphire Substrate", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol.16,

- pp.732-734, 2006.
- [3] Park, C., Kim, H., Jeong, H., "Study on Effect of KCl Concentration on Removal Rate in Chemical Mechanical Polishing of Sapphire," *J. Korean Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.33, No.5, pp.228-233, 2017, <https://doi.org/10.9725/kstle.2017.33.5.228>
- [4] Yan, W. -X., Zhang, Z. -F., Guo, X. -H., Liu, W. -L., Song, Z. -T., "Effect of Abrasive Concentration on Chemical Mechanical Polishing of Sapphire," *Chin. Phys. Lett.*, Vol.32, No.8, pp.088301, 2015.
- [5] Lee, H., Lee, H., Jeong, H., Choi, S., Lee, Y., Jeong, M., Jeong, H., "Macroscopic and Microscopic Investigation on Chemical Mechanical Polishing of Sapphire Wafer," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Vol.12, pp.1256-1259, 2012.
- [6] Lee, D., Lee, H., Jeong, S., Yuh, M., Jeong, H., "Surface Activation by Electrolytically Ionized Slurry during Cu CMP," *ECS J. Solid Sci. Technol.*, No.8, No.5, pp.P3053-P3057, 2019.
- [7] Lu, J., Huang, Y., Fu, Y., Yan, Q., Zeng, S., "Synergistic Effect of Photocatalysis and Fenton on Improving the Removal Rate of 4H-SiC during CMP," *ECS J. Solid Sci. Technol.*, No.10, No.4, pp.044001, 2021.
- [8] Luo, J., Dornfeld, D. A., "Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling," *IEEE Trans. Semicon. Manufact.*, Vol.14, pp.112-133, 2001.
- [9] Li, W., Jain, T., Ishida, K., Liu, H., "A mechanistic understanding of the degradation of trace organic contaminants by UV/hydrogen peroxide, UV/persulfate and UV/free chlorine for water reuse," *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, Vol.3, Issue 1, pp.128-138, 2017.