

자외선 광을 활용하는 화학기계적 연마에 관한 연구 동향

이현섭[†]

동아대학교 기계공학과 부교수

Research Trends on Chemical Mechanical Polishing Using Ultraviolet Light

Hyunseop Lee[†]

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

(Received December 2, 2022; Revised December 16, 2022; Accepted December 16, 2022)

Abstract – Chemical mechanical polishing (CMP) is a hybrid surface-polishing process that utilizes both mechanical and chemical energy. However, the recently emerging semiconductor substrate and thin film materials are challenging to process using the existing CMP. Therefore, previous researchers have conducted studies to increase the material removal rate (MRR) of CMP. Most materials studied to improve MRR have high hardness and chemical stability. Methods for enhancing the material removal efficiency of CMP include additional provision of electric, thermal, light, mechanical, and chemical energies. This study aims to introduce research trends on CMP using ultraviolet (UV) light to these methods to improve the material removal efficiency of CMP. This method, photocatalysis-assisted chemical mechanical polishing (PCMP), utilizes photocatalytic oxidation using UV light. In this study, the target materials of the PCMP application include SiC, GaN, GaAs, and Ru. This study explains the photocatalytic reaction, which is the basic principle of PCMP, and reviews studies on PCMP according to materials. Additionally, the researchers classified the PCMP system used in existing studies and presented the course for further investigation of PCMP. This study aims to aid in understanding PCMP and set the direction of future research. Lastly, since there have not been many studies on the tribology characteristics in PCMP, research on this is expected to be required.



© Korean Tribology Society 2022. 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 – Chemical mechanical polishing(화학-기계적 연마), Ultraviolet(UV) light(자외선 광), Photocatalyst(광촉매), Research trend(연구 동향)

1. 서 론

화학기계적 연마(Chemical Mechanical Polishing;

CMP)는 기계적 연마 가공에 화학적 에너지를 활용하는 하이브리드(Hybrid) 표면 가공 공정으로 반도체용 기판 제조 및 반도체 소자의 제조에 있어 필수적으로 활용되고 있다[1-3].

반도체용 기판 제조에 있어 CMP는 잉곳의 성장 이후 웨이퍼 형상과 표면 가공을 위해 적용되는 멀티와이어 쏘잉(Multi-wire Sawing), 에지 연삭(Edge grinding), 래핑

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

(Lapping), 연삭(Grinding) 등의 기계가공 공정 이후 표면 결함 층(Damaged layer)의 제거와 웨이퍼로써의 최종 표면 거칠기(Surface roughness)를 확보하기 위하여 적용된다[4].

소자 제조에서의 CMP는 소자 간 분리(Shallow trench isolation; STI), 층간 절연막(Inter-layer dielectric)의 평탄화, 금속 배선(Metal wire)의 형성 등에 활용되며 반도체 소자의 고집적화와 대구경화에 따라 그 중요성이 점점 증가하고 있다[5].

그러나 최근 반도체 소자의 성능 향상과 적용 분야의 다변화에 따라 다양한 반도체용 기판 소재 및 박막용 소재가 개발되고 있다. 대부분의 반도체용 신소재들은 화학적으로 매우 안정되어 있어 화학적 에너지와 기계적 에너지를 동시에 활용하는 CMP를 통해 요구되는 재료 제거율(Material removal rate; MRR)과 표면거칠기를 확보하는데 있어 어려움이 따르고 있다. CMP에서의 낮은 재료제거 효율은 CMP 가공 시간을 늘려 지속가능성(Sustainability)의 관점에서 에너지 소모를 높이고 슬러리(Slurry), 패드(Pad) 등과 같은 CMP 소모품의 사용을 늘려 환경적 부담과 경제적 부담을 동시에 증가시킨다.

이를 극복하기 위하여 연구자들은 CMP에서의 화학적 반응성을 증가시키기 위한 다양한 형태의 부가적 에너지에 관한 연구를 수행하고 있다. CMP의 효율 향상을 위해 활용 가능한 에너지는 다음과 같다.

- (a) 전기에너지(Electric energy)
- (b) 열에너지(Thermal energy)
- (c) 빛에너지(Light energy)
- (d) 기계 에너지(Mechanical energy)
- (e) 화학 에너지(Chemical energy)

부가적인 기계 에너지를 이용하는 방법은 CMP 공정 시 고압/고속 조건을 활용[6]하거나 초음파 진동을 활용하는 방법[7], 슬러리 내 입자의 함량, 조합 및 종류를 조절하는 방법[8]으로 기계적 재료제거 성능을 높일 수 있는 방법이기도 하나 재료제거에 있어 평탄도(Uniformity)의 확보와 다양한 물리적 결함이 발생할 가능성이 높다.

부가적 화학 에너지를 활용하는 방법은 슬러리 내 강한 화학적 성능을 지닌 화학적 요소를 첨가하는 방법으로 높은 MRR을 확보할 수는 있으나 화학적 반응에 의해 표면거칠기 확보에 약점을 가지며 환경적 측면에서 바람직하지 않다. 따라서 기존의 CMP에서 활용하는 에너지(기계적 및 화학적 에너지)를 추가하는 방법 외 다른 외부에너지를 활용하는 방법에 대한 연구들이 많이 이루어지고 있다.

전기에너지를 활용하는 방법으로는 전기-화학-기계적 평탄화(Electrochemical mechanical planarization; ECMP)[9]와 전해이온화(electrolytic ionization) CMP 방식[10]이 있다. ECMP는 구리 박막의 평탄화를 위하여 개발되었으며 전기화학적 에너지를 통해 구리 박막의 표면에 반응층을 만들고 이를 기계적으로 제거하는 방식이지만, 박막에 직접 전류가 흘러야하기 때문에 가공 시스템의 구성에 어려움이 따르고 대상 재료가 전도체로 한정된다. 전해이온화 방식의 CMP는 슬러리를 전극을 통해 이온화하여 CMP의 효율을 향상시킬 수 있지만 슬러리와 전극 소재의 화학적 반응(산화)에 의해 공정의 지속성에 문제가 있으며 연마 입자의 응집 문제가 존재한다.

열에너지를 이용하는 CMP 방식은 슬러리 온도를 조절하여 Arrhenius의 식에 따른 화학반응 속도를 높여주는 방식[11]이지만, 고온에서의 슬러리 증발의 문제와 입자 응집, 평탄도 확보의 어려움과 같은 문제가 발생할 수 있다.

앞서 언급한 부가적 에너지를 이용한 CMP 방식들은 CMP 효율을 증가시킬 수 있는 방식임에는 분명하나 여전히 극복해야 할 과제가 많이 있다.

빛에너지를 이용한 CMP 방법으로는 자외선 광(Ultraviolet(UV)light)를 이용한 광촉매 산화(photocatalytic oxidation)를 활용하고 있으며, photocatalysis-assisted chemical mechanical polishing (PCMP)라고 불린다[12,13]. PCMP는 주로 낮은 MRR 특성을 지닌 기판 소재들을 대상으로 연구되고 있으며 CMP의 성능 향상을 위한 대안으로 떠오르고 있다.

본 연구에서는 UV 광을 활용하는 CMP 기술에 관한 연구 동향을 정리하고 현재까지 연구된 결과에 대해 고찰하며 향후 추가적으로 요구되는 연구에 관해 기술하고자 한다.

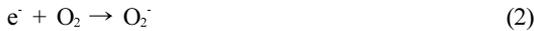
2. 광촉매 반응

UV 광을 활용하는 CMP는 광촉매(Photocatalyst) 반응을 활용하여 슬러리의 화학적 반응성을 높이는 원리를 이용하고 있다. UV 광을 이용한 기존의 광촉매 반응 기술은 공기정화, 살균, 수처리 등의 환경 정화용으로 많이 활용되고 있다[14].

광촉매로 활용 가능한 물질로는 TiO_2 , $SrTiO_3$, ZnO , ZrO_2 , WO_3 등이 사용되고 있으나 가장 많이 상용화되고 있는 물질은 활성도가 가장 높은 TiO_2 이다[15].

CMP에서는 주로 TiO_2 광촉매에 의한 광산화 반응을 활용하고 있다. TiO_2 밴드갭(Band-gap) 이상의 빛에너지

를 조사하게 되면 표면에 전자와 정공이 발생하여 전자와 광촉매 표면의 산소와의 반응을 통해 슈퍼옥사이드 음이온(O₂⁻), 정공과 수분(물)이 반응하여 하이드록실 라디칼(·OH)이 생성된다 [16].



CMP에서는 광촉매 반응에 의해 생성된 하이드록실 라디칼에 의한 가공 대상 소재와 슬러리와와의 화학반응이 활성화되는 메커니즘을 가진다. 광촉매 반응을 이용하는 CMP 시 화학반응은 대상 소재별로 차이가 있으나, 공통적으로 소재 표면의 산화반응 속도를 증가를 증가시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

3. PCMP 적용 대상 소재

UV 광을 활용한 CMP 방법은 주로 난삭재에 해당하는 반도체용 기판 소재에 관한 연구에 활용되고 있으며, 일부 소자 제작에 활용되는 소재(박막 소재)에 적용된다.

최근까지 UV 광을 활용한 CMP가 적용된 연구에 있어 대상이 되는 대표적인 소재는 SiC와 GaN 이다. 이러한 소재는 기존의 CMP 방식을 이용할 경우 화학적 안정성에 의하여 낮은 MRR을 가지며 CMP 가공에 있어 상당한 시간이 소요되고 있다. 그 밖에 GaAs와 같은 기판 소재에서 UV를 활용한 CMP의 적용에 관한 연구가 보고되고 있다.

반도체 소자용 박막 소재로는 구리(Copper; Cu) 배선의 확산 방지막(Diffusion barrier)으로 사용되는 루테늄(Ruthenium; Ru) CMP에 대한 UV 광의 이용이 보고되고 있다. Ru은 낮은 저항과 높은 녹는점에 의해 확산 방지막 소재로 각광을 받고 있지만 높은 경도와 화학적 안정성 때문에 CMP에 어려움이 따른다. Table 1은 UV 광을 활용한 CMP의 대상 소재별 연구를 연도별로 정리한 것이다.

UV 광을 활용한 CMP에 관한 연구는 그 대상 소재가 SiC와 GaN에 집중되어 있으며 이는 전력반도체에 관한 관심이 증가하면서 발생하는 연구의 동향이라고 판단된다.

4. PCMP CMP 시스템

UV 광을 활용하는 CMP 시스템은 크게 2가지 형태가 있다. 첫 번째는 연마 패드의 상부에 UV 시스템을 설치

Table 1. Target materials in PCMP researches

Material	Year	Author	Reference
SiC	2007	Hong S. H. et al.	[17]
	2012	Kubota, A. et al.	[18]
	2012	Ohnishi, O. et al.	[19]
	2014	Sakamoto et al.	[20]
	2017	Zhou, Y. et al.	[21]
	2017	Lu, J., et al.	[22]
	2017	Yuan, Z. et al.	[12]
	2018	Tanaka, T. et al.	[23]
	2020	Yan, Q. et al.	[24]
	2021	Lu, J. et al.	[25]
GaN	2021	Wang, W. et al.	[13]
	2015	Wang, J. et al.	[26]
	2016	Wang, J. et al.	[16]
GaAs	2022	Wei, W. et al.	[27]
	2005	Hong, S. H. et al.	[28]
Ru	2021	Wang, C. et al.	[29]

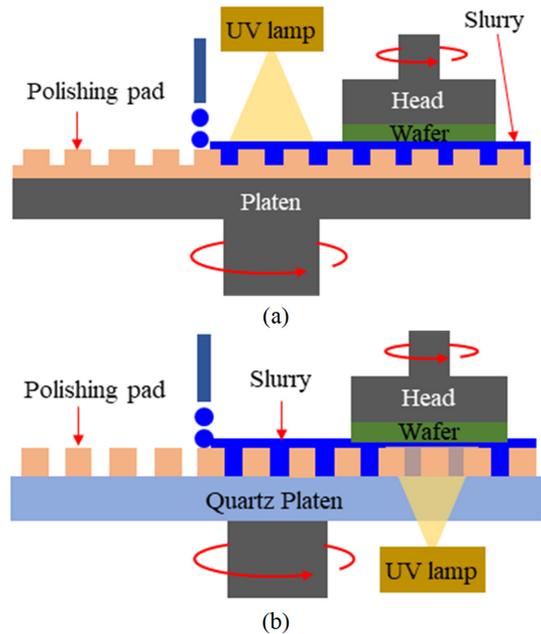


Fig.1. PCMP systems that irradiate UV light (a) on the pad and (b) below the quartz platen.

하여 노즐에서 공급되는 슬러리에 UV 광을 조사하는 방법이다(Fig. 1(a)). 두 번째 방법은 석영 정반(Quartz platen) 통해 장치 하부에서 CMP 가공의 계면(Interface)

으로 UV 광을 조사하는 방법이다(Fig. 1(b)).

외부에서 UV 광을 조사하는 방법의 경우 시스템 구성이 간단하다는 장점이 있는 반면, 직접적으로 가공이 이루어지는 지점에서 광촉매 반응을 발생시키는 데는 어려움이 따른다. 또한 CMP 장치 전반에 UV 광이 조사되어 영향을 받을 가능성이 크다.

석영 정반을 이용해 하부에서 UV 광을 조사하는 방법은 시스템 구성이 복잡하며 웨이퍼와 패드의 계면에 UV 광을 조사하기 위해 연마패드에 구멍(Hole)이 요구된다. 그러나 CMP 가공이 이루어지는 계면에 직접적으로 UV 광을 조사할 수 있다는 장점이 있다.

UV 광을 활용한 CMP에 관한 연구들에서는 시스템 구성의 편의성에 의해 많은 경우가 첫 번째 방법인 외부 조사 방식을 택하고 있다.

5. SiC PCMP

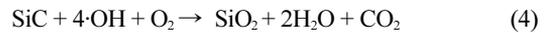
SiC는 높은 경도와 화학적 안정성에 의해 연마 가공 시 상당한 공정 시간이 필요한 소재이다. 이에 다양한 방법으로 SiC의 경면을 확보하기 위한 노력들이 이루어지고 있다. 그 중 하나가 UV 광을 활용하는 방법으로 오랜 기간 연구자들에 의해 연구가 되어 왔다.

2007년도에 Hong 등[17]에 의해 UV 광을 이용한 SiC의 정밀 연마 기법에 대해 보고하였다. 초기의 연구들에서는 광촉매를 활용하지 않고 UV 광을 통해 슬러리 내의 ·OH를 생성시키는 방법이었다. Kubota 등[18]은 4H-SiC 기판의 UV 광을 이용한 연마에서 과산화수소(H₂O₂)를 사용하는 경우 보다 높은 MRR을 확보할 수 있음을 확인하였다. Ohnishi 등[19]은 아나타제(Anatase) TiO₂ 광촉매를 이용한 UV-assisted SiC CMP에 관한 연구를 수행하였으며, UV 광원으로는 365 nm 파장을 이용하면서 동시에 CMP 장치 내 가스 환경을 조성하였다. 그들의 연구 결과에 따르면 산소(O₂) 분위기에서 UV 광을 활용할 경우 MRR이 크게 향상됨을 확인할 수 있다.

Sakamoto 등[20]은 172 nm, 200-400 nm 파장을 지닌 UV를 동시에 활용하여 SiC CMP에 관한 연구를 수행하였으며, 연마입자로는 Ceria(CeO₂)를 활용하였다. 그들의 연구에서는 실험 후 최종 SiC의 표면거칠기는 Ra 0.23 nm 였지만, 가공 시간은 6시간을 소요하였다.

광촉매 반응을 이용하는 SiC CMP에서의 가공 메커니즘은 촉매로 이용되는 TiO₂에 의해 강한 산화력을 지닌 ·OH를 발생시켜 SiC를 SiO₂로 산화시키고 연마입자에 의해 이를 제거하는 과정을 따른다. Ishikawa 등[30]에 따르면 광촉매 반응을 통한 SiC와 ·OH의 화학적 반

응은 아래 Eq. 4와 같다.



Zhou 등[21]은 특수 처리된 TiO₂ 입자를 스프레이를 이용해 연마 패드의 표면에 부착시킨 패드를 활용하여 SiC CMP를 수행하였다. 연구에는 5 wt%의 H₂O₂, 3 wt%의 KOH, 25 wt%의 콜로이드 실리카(Colloidal silica) 입자(100 nm)가 함유된 슬러리를 사용하였다. 그들은 실험을 통해 TiO₂ 함량이 증가됨에 따라 UV 광을 활용한 SiC CMP의 MRR이 증가함을 확인하였다.

Lu 등[22]은 SiC CMP에서의 낮은 MRR을 극복하기 위해 600 nm 직경의 나노다이아몬드(Nano-diamond) 슬러리에 TiO₂를 코팅한 슬러리를 이용하였으며 TiO₂가 코팅되지 않은 슬러리의 경우보다 CMP를 통해 낮은 표면 거칠기를 확보할 수 있음을 확인하였다.

Yuan 등[12]은 전자 포획을 위해 H₂O₂와 K₂FeO₄를 사용하였으며, UV-assisted CMP에서 H₂O₂를 포함하는 슬러리가 K₂FeO₄를 포함하는 슬러리보다 높은 산화 환원 전위(Oxidation reduction potential)와 높은 MRR을 가짐을 보여주었다.

Tanaka 등[23]은 물에 TiO₂+다이아몬드, 카틸론(Cathilon)+다이아몬드, TiO₂+카틸론+다이아몬드를 첨가한 슬러리들을 이용한 비교 실험을 실시하였으며, TiO₂+카틸론+다이아몬드+물로 구성된 슬러리를 이용한 UV-assisted CMP 시 표면거칠기는 최대 36.4% 향상(감소)되며, MRR은 카틸론+다이아몬드+물을 활용한 슬러리에 비하여 크게 증가함을 확인하였다. TiO₂+Diamond+물이 혼합된 슬러리의 경우, MRR은 높지만 기계적 재료제거에 크게 의존하기 때문에 스크래치가 발생하는 현상을 보였다.

Yan 등[24]은 슬러리 내의 H₂O₂와 TiO₂ 함량, 슬러리 pH, UV의 광도(Light intensity)에 따른 PCMP에 관한 연구를 수행하였다. 실험 결과에 따르면, UV 광도 1000 mW/cm², H₂O₂ 함량 4.5 vol%, TiO₂ 함량 3 g/L, pH 11에서 가장 최적의 MRR을 보였다.

Lu 등[25]은 광촉매 반응과 펜톤(Fenton) 효과를 이용하여 4H-SiC CMP의 효율 향상에 관한 연구를 수행하였다. 그들의 연구에서는 슬러리 내에 생성되는 ·OH의 함량을 측정하였으며 ·OH 함량이 증가함에 따라 MRR이 선형적으로 증가함을 밝혔다.

최근 Wang 등[13]은 나노 알루미늄 입자(200 nm, 2.0 wt%) 슬러리와 광촉매로 TiO₂, 상승 촉매로 황산염(K₂S₂O₈) 라디칼 기반의 고도산화 과정(sulfate radical-based advanced oxidation processes; SR-AOPs)을 CMP

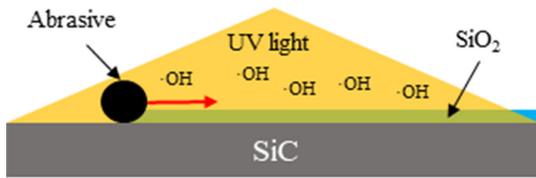


Fig. 2. SiC PCMP mechanism.

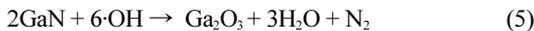
에 활용하였다. 그들의 연구에서는 슬러리 pH 6과 황산염 함량 3 wt%, TiO₂ 함량 0.2 wt%에서 높은 MRR을 보였다.

현재까지 연구된 SiC PCMP에 관한 연구에서 밝혀진 가공 메커니즘(Fig. 2)은 광촉매 반응에 의해 발생하는 ·OH와 SiC와의 산화반응을 통해 형성되는 SiO₂를 기계적으로 제거하는 것이다.

6. GaN PCMP

GaN은 LED(Light emitting diode)용 소재로 최근 각광받고 있지만, SiC와 마찬가지로 높은 경도와 화학적 안정성 때문에 CMP가 어려운 소재로 알려져 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 GaN CMP에도 역시 UV 광을 이용하여 재료제거 효율을 증가시키는 연구가 이루어지고 있다.

Wang 등[26]은 GaN CMP에서 H₂O₂-SiO₂ 기반의 슬러리를 이용하여 광촉매 없이 UV 광을 조사하는 실험을 실시하였다. 그들은 H₂O₂-SiO₂ 기반 슬러리의 최적 조성과 pH를 실험을 통해 획득 후, 다양한 파장대의 광원을 활용한 연구를 수행하였다. 실험에 활용한 광원으로는 UVA(400~315 nm), UVC(280~190 nm), 백열등이었으며, UVA 파장을 이용한 CMP 시 가장 높은 MRR(102.74 nm/h)을 획득할 수 있었다. 이때 GaN과 ·OH의 화학적 반응은 아래 식 [26]를 따른다.



Wang 등[16]은 2인치 직경의 사파이어에 30 μm 두께의 N-type GaN을 HVPE(Hydride vapor phase epitaxy)를 이용하여 증착 후 H₂O₂-SiO₂ 기반의 슬러리를 대상으로 TiO₂, SnO₂, Fe₂O₃ 광촉매의 특성을 조사하였다. 그들은 실험을 통해 TiO₂ 광촉매를 사용하는 경우에 SnO₂, Fe₂O₃를 사용하는 경우보다 높은 MRR을 확보할 수 있음을 확인하였다.

Wei 등[27]은 산화제로 H₂O₂, NaClO, KMnO₄를 고

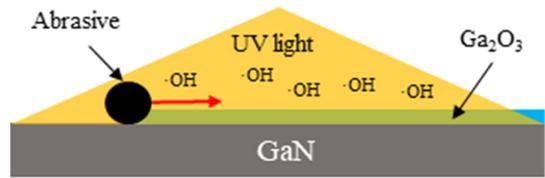


Fig. 3. GaN PCMP mechanism.

려하였으며, 1.0 vol%의 H₂O₂(pH 5)에서 MRR 380.3 nm/h와 Ra 0.065 nm, 2.0 vol%의 NaClO(pH 8) 조건에서 MRR 404.6 nm/h와 Ra 1.61 nm를 확보하였다. KMnO₄의 경우 0.3M(pH 2) 조건에서 MRR 128.5 nm/h를 가지지만, NaCl과 SDS를 첨가하는 경우 MRR이 향상함을 확인하였다.

GaN PCMP에 관한 연구를 통해 밝혀진 재료제거 메커니즘(Fig. 3)은 광촉매 반응에 의해 발생하는 ·OH와 GaN와의 산화반응을 통해 형성되는 Ga₂O₃를 기계적으로 제거하는 것이다.

7. GaAs PCMP

GaAs는 실리콘(Si)에 비하여 우수한 광변환 효율로 인해 높은 효율을 확보할 수 있어 태양전지용으로 활용이 되었다. GaAs를 대상으로 하는 UV 광을 활용한 CMP에 관한 연구는 많이 발견되지는 않지만, PCMP 연구의 초기(2005년)에 Hong 등[28]에 의해 연구되었다.

Hong 등[28]은 TiO₂-H₂O₂-H₂O로 구성된 슬러리를 이용한 연구를 수행하였으며 앞서 언급한 2가지 형태의 장치 중 석영 정반(Quartz platen) 통해 장치 하부에서 CMP 가공의 계면(Interface)으로 UV 광을 조사하는 방법을 활용하였다. 그들은 PCMP를 활용할 경우 일반적인 CMP 방법보다 재료제거 효율을 높일 수 있음을 확인하였으나 TiO₂의 광촉매로서의 역할을 명확히 밝히지는 못하였다.

8. Ru PCMP

반도체 소자용 Cu 배선의 확산 방지막으로 사용되는 Ru에 대한 PCMP 연구는 최근에 Wang 등[29]에 의해 수행되었다.

Wang 등[29]은 0.15 wt%의 H₂O₂가 포함된 60~70 nm 크기의 콜로이드 실리카(5 wt%) 슬러리(pH 9.5~10.0)를 이용하여 K₂S₂O₈의 첨가에 따른 재료제거 특성에 관한 연구를 수행하였다. 실험결과 UV 광을 활용하지 않을 경

우, $K_2S_2O_8$ 함량이 증가함에 따라 40 mM까지는 MRR이 증가하는 경향을 보이지만 그 이상에서는 크게 증가하지 않는 경향을 보였다. 이러한 현상은 Ru 표면에 RuO_2/RuO_3 산화막이 생성되고 두터워졌기 때문으로 보인다. 그러나 UV 광을 조사하는 경우는 $K_2S_2O_8$ 함량이 증가함에 따라 MRR이 지속적으로 증가하였다. 이는 $K_2S_2O_8$ 가 UV 환경 하에서 RuO_3 와 지속적으로 반응하여 기계적으로 제거하기 쉬운 다공성의 표면을 만들기 때문으로 보인다.

9. 향후 연구 방향

PCMP는 기존의 CMP 방식으로 충분한 MRR을 확보하면서 평탄화가 힘든 소재를 대상으로 연구되어 오고 있다. 광촉매를 활용하는 경우가 UV 광만을 활용하는 경우보다는 높은 MRR을 보이기 때문에 주로 TiO_2 광촉매를 사용하는 연구가 많은 추세이다. 그러나 현재까지의 PCMP에 관한 연구는 광촉매 반응에 의해 발생하는 $\cdot OH$ 와 소재와의 산화반응을 설명하는데 집중되고 있다. 따라서 PCMP의 메커니즘에 관한 보다 깊은 이해를 위해 아래와 같은 연구들이 필요할 것으로 판단된다(Fig. 4).

첫 번째는 UV 광 조사에 따른 CMP 중 가공 온도 변화에 대한 연구이다. CMP 중 UV 광의 조사는 슬러리의 온도에 영향을 미칠 것으로 보이며, 전통적인 CMP에 대한 연구에서도 이미 확인되었듯이 온도의 상승에 의한 화학반응의 활성화가 발생할 가능성이 있다. 따라서 광촉매 반응에 의한 화학적 반응과 온도 상승에 의한 화학적 반응의 정도를 확인할 필요성이 있다.

두 번째는 기존 실험들에서 활용된 TiO_2 입자가 슬러리에 첨가될 때 TiO_2 가 MRR에 미치는 영향에 대해 확

인할 필요가 있다. 슬러리 내에 첨가되는 TiO_2 는 미량이지만, 일종의 혼합입자 슬러리(Mixed-abrasive slurry)의 역할을 할 수 있어 기계적 재료제거에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

세 번째는 UV 광 조사에 따른 연마패드 표면 경도의 변화이다. CMP 용 연마패드는 폴리우레탄(Polyurethane) 재질로 이루어져 있기 때문에 UV 광에 의해 표면 경화가 발생할 가능성이 있다. 특히 SiC 및 GaN CMP에서와 같이 연마패드가 UV 광에 장시간 노출되는 경우 패드 표면 변화의 가능성이 높아질 것으로 보인다.

마지막으로 전통적인 CMP 방식에서는 오랜 기간 동안 많은 연구자들에 의해 트라이블로지 특성에 관한 연구가 이루어졌으나, PCMP에서의 트라이블로지 특성에 관한 연구는 많이 이루어지지 않았기 때문에 이에 관한 연구가 요구될 것으로 보인다.

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] Lee, H., Lee, D., Jeong, H., "Mechanical aspects of the chemical mechanical polishing process: A review", *Int. J. Precis. Eng. Manufact.*, Vol.17, No.4, pp.525-536, 2016, <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0066-0>
- [3] Lee, H., Kim, H., Jeong, H., "Approaches to Sustainability in Chemical Mechanical Polishing (CMP): A Review," *Int. J. Precis. Eng. Manufact. -Green Technology*, Vol.9, pp.349-367, 2022, <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00406-8>
- [4] Lee, H., Sung, I. -H., "Chemical Mechanical Polishing: A Selective Review of R&D Trends in Abrasive Particle Behaviors and Wafer Materials," *Tribol. Lubr.*, Vol.35, No.5, pp.274-285, 2019, <https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.5.274>
- [5] Lee, H., Kim, J., Park, S., Chu, D., "Analysis of Research Trends on Electrochemical-Mechanical Planarization," *Tribol. Lubr.*, Vol.37, No.6, pp.213-223, 2021, <https://doi.org/10.9725/kts.2021.37.6.213>
- [6] Park, C., Kim, H., Lee, S, Jeong, J., "The influence of abrasive size on high-pressure chemical mechanical polishing of sapphire wafer," *Int. J. Precis. Eng.*

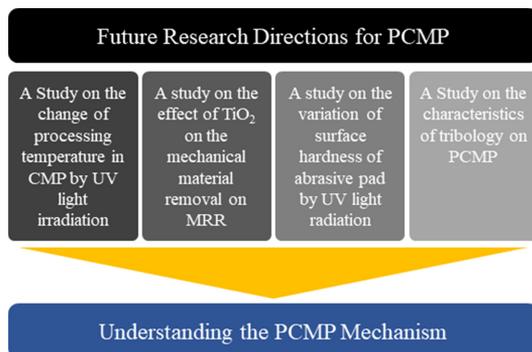


Fig. 4. Future research direction for PCMP to understand the PCMP mechanism.

- Manuf.-Green Technology*, Vol.2, No.2, pp.157-162, 2015, <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0020-0>
- [7] Tsai, M. -Y., Yang, W. -Z., "Combined ultrasonic vibration and chemical mechanical polishing of copper substrates," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol.53, pp.69-76, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.09.009>
- [8] Jindal, A., Hegde, S., Babu, S. V., "Chemical Mechanical Polishing Using Mixed Abrasive Slurries," *Electrochem. Solid-State Lett.*, Vol.5, No.7, pp.G48-G50, 2002, <https://doi.org/10.1149/1.1479297>
- [9] Gao, F., Liang, H., "Transformable Oxidation of Tantalum in Electrochemical Mechanical Polishing (ECMP)," *J. Electron. Mater.*, Vol.40, No.2, pp.134-140, 2011, <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1443-6>
- [10] Lee, D., Lee, H., Jeong, S., Yuh, M., Jeong, H., "Surface Activation by Electrolytically Ionized Slurry during Cu CMP," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.8, pp.P3053-P3057, 2019, <https://doi.org/10.1149/2.0091905jss>
- [11] Kim, N. -H., Seo, Y. -J., Ko, P. -J., Lee, W. -S., "Polishing Mechanism of TEOS-CMP with High-temperature Slurry by Surface Analysis," *Trans. Electric. Electron. Mater.*, Vol.6, No.4, pp.164-168, 2005, <https://doi.org/10.4313/TEEM.2005.6.4.164>
- [12] Yuan, Z., He, Y., Sun, X., Wen, Q., "UV-TiO₂ photocatalysis assisted chemical mechanical polishing 4H-SiC wafer," *Mater. Manuf. Proc.*, Vol.33, Issue 11, pp.1214-1222, 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2017.1364855>
- [13] Wang, W., Zhang, B., Shi, Y., Ma, T., Zhou, J., Wang, R., Wang, H., Zeng, N., "Improvement in chemical mechanical polishing of 4H-SiC wafer by activating persulfate through the synergetic effect of UV and TiO₂," *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol.295, pp.117150, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117150>
- [14] An, S. -W., Jang, J. -W., Park, J. -W., "Use of Photocatalyst in Civil & Environmental Engineering," *KIC NEWS*, Vol.19, No.5, pp.25-32, 2016.
- [15] Choi, W., "Studies on TiO₂ Photocatalytic Reactions," *Appl. Chem. Eng.*, Vol.14, No.8, pp. 1011-1022, 2003.
- [16] Wang, J., Wang, T., Pan, G., Lu, X., "Effect of photocatalytic oxidation technology on GaN CMP," *Appl. Surf. Sci.*, Vol.361, pp.18-24, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.11.062>
- [17] Hong, S. H., Watanabe, J., Touge, M., "Precision polishing technology of SiC single crystal under Ultraviolet-ray irradiation," *Int. J. Manuf. Sci. Technol.*, Vol.9, pp.23-28, 2007.
- [18] Kubota, A., Kurihara, K., Touge, M., "Fabrication of smooth surface on 4H-SiC substrate by ultraviolet assisted local polishing in hydrogen peroxide solution," *Key Eng. Mater.*, Vols.523-524, pp.24-28, 2012, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.24>
- [19] Ohnishi, O., Doi, T., Kurokawa, S., Yamazaki, T., Uneda, M., Yin, T., Koshiyama, I., Ichikawa, K., Aida, H., "Effects of Atmosphere and Ultraviolet Light Irradiation on Chemical Mechanical Polishing Characteristics of SiC Wafers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.51, No.55, pp.05EF05, 2012, <https://doi.org/10.1143/JJAP.51.05EF05>
- [20] SAKAMOTO, T., INAKI, T., ODA, K., TOUGE, M., FUJITA, T., "Ultraviolet-assisted polishing of 4 inch SiC substrate," *J. Jpn. Soc. Absr. Technol.*, Vol. 58, Issue 4, pp.235-240, 2014, <https://doi.org/10.11420/jsat.58.235>
- [21] Zhou, Y., Pan, G., Zou, C., Wang, L., "Chemical Mechanical Polishing (CMP) of SiC Wafer Using Photo-Catalyst Incorporated Pad," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.6, No.9, pp.P603-P608, 2017, <https://doi.org/10.1149/2.0061709jss>
- [22] Lu, J., Wang, Y., Luo, Q., Xu, X., "Photocatalysis assisting the mechanical polishing of a single-crystal SiC wafer utilizing an anatase TiO₂-coated diamond abrasive," *Precis. Eng.*, Vol.49, pp.235-242, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.02.011>
- [23] Tanaka, T., Takizawa, M., Hata, A., "Verification of the Effectiveness of UV-Polishing for 4H-SiC Wafer Using Photocatalyst and Cathilon," *Int. J. Autom. Technol.*, Vol.12, No.2, pp.160-169, 2018, <https://doi.org/10.20965/ijat.2018.p0160>
- [24] Yan, Q., Wang, X., Xiong, Q., Lu, J., Liao, B., "The influences of technological parameters on the rate of ultraviolet photocatalytic reaction and photocatalysis-assisted polishing effect," *J. Cryst. Growth*, Vol.531, No.1, pp.125379, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125379>
- [25] 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 State Sci. Technol.*, Vol.10, No.4, pp.044001, 2021, <https://doi.org/10.1149/2162-8777/abf16d>
- [26] Wang, J., Wang, T., Pan, G., Lu, X., "Mechanism of GaN CMP Based on H₂O₂ Slurry Combined with UV Light," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.4, No.3, pp.P112-P117, 2015, <https://doi.org/10.1149/2.0191503jss>
- [27] Wei, W., Zhang, B., Zhang, L., Yu, X., "Study on Electrochemical Corrosion and CMP of GaN in Different Oxidation Systems," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.11, No.3, pp.034002, 2022, <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac5807>
- [28] Hong, S. H., Isii, H., Touge, M., Watanabe, J., "Investigation of Chemical Mechanical Polishing of

- GaAs Wafer by the Effect of a Photocatalyst,” *Key Eng. Mater.*, Vols.291-292, pp.381-384, 2005, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.291-292.381>
- [29] Wang, C., Wang, C., Li, H., Zhou, J., Zhang, X., Tian, Y., Xu, C., “Effect of UV Radiation on Oxidation for Ru CMP,” *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.10, No.3, pp.034007, 2021, <https://doi.org/10.1149/2162-8777/abe97b>
- [30] Ishikawa, Y., Matsumoto, Y., Nishida, Y., Taniguchi, S., Watanabe, J., “Surface Treatment of Silicon Carbide Using TiO₂(IV) Photocatalyst,” *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.125, No.21, pp. 6558-6562, 2003, <https://doi.org/10.1021/ja020359i>