

전기화학-기계적 평탄화에 관한 연구 동향 분석

이현섭^{1*} · 김지훈² · 박성민² · 추동엽²

¹동아대학교 기계공학과 부교수

²동아대학교 기계공학과 학부생

Analysis of Research Trends on Electrochemical-Mechanical Planarization

Hyunseop Lee^{1*}, Jihun Kim², Seongmin Park² and Dongyeop Chu²

¹Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

²Undergraduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

(Received November 30, 2021; Revised December 19, 2021; Accepted December 21)

Abstract – Electrochemical mechanical planarization (ECMP) was developed to overcome the shortcomings of conventional chemical mechanical planarization (CMP). Because ECMP technology utilizes electrochemical reactions, it can have a higher efficiency than CMP even under low pressure conditions. Therefore, there is an advantage in that it is possible to reduce dicing and erosions, which are physical defects in semiconductor CMP. This paper summarizes the papers on ECMP published from 2003 to 2021 and analyzes research trends in ECMP technology. First, the material removal mechanisms and the configuration of the ECMP machine are dealt with, and then ECMP research trends are reviewed. For ECMP research trends, electrolyte, processing variables and pads, tribology, modeling, and application studies are investigated. In the past, research on ECMP was focused on basic research for the development of electrolytes, but it has recently developed into research on tribology and process variables and on new processing systems and applications. However, there is still a need to increase the processing efficiency, and to this end, the development of a hybrid ECMP processing method using another energy source is required. In addition, ECMP systems that can respond to the developing metal 3D printing technology must be researched, and ECMP equipment technology using CNC and robot technology must be developed.



© 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 – Chemical mechanical planarization(화학기계적 평탄화), Electrochemical mechanical planarization(전기화학-기계적 평탄화), Research trend(연구동향)

1. 서 론

반도체 산업에서 화학기계적 평탄화(Chemical Mechanical Planarization; CMP) 기술은 고집적화된 소자의 제작을

위해 필수적인 공정으로 자리 잡고 있다[1,2]. 1990년대 IBM에 의해 반도체 제작에 적용되기 시작한 CMP 기술은 반도체 소자 결함에 치명적인 입자(Particle)을 활용하는 기술임에도 불구하고 광역 평탄화(Global planarization) 특성 때문에 점점 다양한 박막 소재의 가공에 적용되고 있다. 또한 최근 반도체 소자의 제조 외 디스플레이(Display) 분야로도 그 적용 분야를 넓혀나가고 있다. CMP 기술은 공급되는 슬러리(Slurry)에 포함된 화학적 요

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

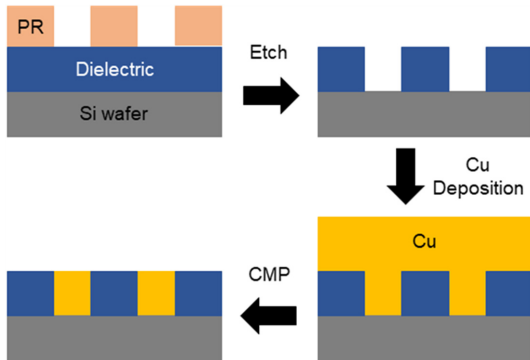


Fig. 1. Schematic of Cu damascene process.

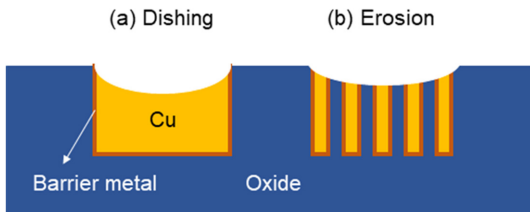


Fig. 2. Schematic of dishing (a) and erosion (b) defects.

소와 가공 대상 소재와의 화학적 반응에 의해 생성되는 화학 반응층(Chemically-reacted layer)을 연마 입자(Abrasive)에 의해 기계적으로 제거하는 일종의 하이브리드(Hybrid) 가공 기술 중 하나이다[3]. 반도체 소자 제조에 있어 CMP는 소자간 분리(Shallow Trench Isolation; STI), 층간 절연막(Inter-layer Dielectric; ILD)의 평탄화, 금속 배선의 형성(Metalization) 등을 위해 활용되고 있다. 특히 다마신(Damascene) 공정을 이용한 구리(Cu) 배선의 형성 시 CMP가 필수적으로 활용되고 있다. Fig. 1은 Cu 배선을 위한 다마신 공정의 절차를 보여준다. 다마신 공정에서 CMP는 패턴(Pattern)에 Cu를 충전 후 패턴 상부의 구리 층을 제거해 절연층 사이에 Cu 배선을 형성시킬 수 있도록 해 준다.

CMP 공정은 광역 평탄화에 유리한 공정임에도 불구하고, 금속 배선의 형성에 있어 소자에 물리적인 결함(Physical defect)을 발생시키기도 한다. Fig. 2는 Cu CMP 시 발생할 수 있는 소자의 디싱(Dishing) 및 에로전(Erosion) 결함을 보여준다. 이러한 결함은 패턴의 구조와 크기 및 밀도에 의존하는 경향이 있다. 특히 다양한 패턴 형상이 존재하는 반도체 소자의 CMP에 있어 불확실한 연마 종점(Endpoint)의 선정에 의한 과다 연마(Over-polishing)에 의해 발생하기도 한다[4]. 디싱 결함은 CMP 슬러리의 선택비(Selectivity, Cu와 확산 방지막

(Barrier metal)의 재료제거율(Material removal rate; MRR)의 비)가 적합하지 않는 등의 경우 발생하기도 하며, 에로전 결함은 웨이퍼 내 패턴의 밀도가 높은 영역에서의 빠른 MRR에 의해 Cu 배선 뿐만 아니라 산화막까지 과다 연마되면서 발생한다.

CMP에 의해 야기되는 소자의 물리적 결함들을 감소시키기 위해 슬러리와 연마 패드(Polishing pad)에 관한 연구들과 정확한 연마 종점을 선정하기 위한 모니터링 기술에 대한 개발이 이루어지고 있다 [4].

또한, 최근 절연막으로 활용되고 있는 다공성의 low-k 절연물질의 경우 낮은 경도(Hardness)와 탄성계수(Elastic modulus)로 인해 CMP에서의 가공력에 의해 박리(Delamination) 현상, 재료의 변형, 혹은 크랙(Crack) 발생 등의 문제를 수반하기도 한다[5].

CMP는 반도체 소자의 제조 뿐만 아니라 반도체용 기판소재의 최종 표면거칠기 확보를 위해 활용되기도 한다. 현재 반도체용 기판 소재로는 실리콘(Si)이 가장 널리 사용되고 있으나 최근 발광소자(Light emitting diode; LED) 및 전력 반도체(Power semiconductor)용 기판소재로 활용이 가능한 탄화규소(SiC)와 질화갈륨(GaN) 등에 관한 관심이 높아지고 있다[6,7]. 그러나, SiC나 GaN은 Si에 비하여 우수한 전기적 특성에도 불구하고 기계가공 시 재료 제거에 어려움이 따르는 난삭재로 알려져 있다. 또한 높은 화학적 안정성으로 인하여 CMP 가공 시 상당한 가공 시간이 요구된다. 이러한 이유로 Lee 등[8]은 CMP가 적용되는 소재를 그 가공 특성에 따라 분류함에 있어 SiC와 GaN를 DTA(Difficult-to-abrade)-DTR(Difficult-to-react) 소재로 분류하였다. 따라서 SiC와 GaN CMP에 관한 기존의 연구에서는 연마 입자의 종류와 슬러리의 화학적 구성요소에 관한 연구가 진행되어 오고 있으나 여전히 가공 효율의 한계를 극복하지 못하고 있는 실정이다. 보고된 바에 따르면, 반도체용 웨이퍼 생산에 있어 표면가공에 대한 비용은 전체 생산 원가의 80%를 초과하는 것으로 알려져 있다. 특히 CMP의 경우 연삭(Grinding), 래핑(Lapping) 가공에 비하여 현저히 낮은 재료제거 성능을 지니고 있어 재료제거 효율 향상을 위한 연구가 요구된다.

앞서 언급한 바와 같이, CMP 기술은 반도체용 기판 및 소자 제조에 널리 사용되고 있음에도 불구하고 여전히 많은 문제점을 지니고 있다. 특히 반도체 소자 제조에 있어 디싱과 에로전 결함과 SiC 및 GaN 등의 차세대 기판 제조에 있어 낮은 재료제거 효율은 필수적으로 극복해야 할 문제이다. 이에 CMP 공정에 있어 화학적 반응 외 추가적인 에너지를 이용하는 하이브리드(Hybrid)

CMP에 관한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 전기화학적 반응과 기계적 재료제거 현상을 활용한 하이브리드 평탄화 기술인 전기화학-기계적 평탄화(Electrochemical mechanical planarization; ECMP)에 관한 연구 동향을 분석하고자 한다. 이를 위해 ECMP 시스템의 구성과 메커니즘에 관한 연구를 소개하고, 반도체 소자용 Cu ECMP와 기판 소재와 관련된 ECMP 기술에 관해 연구의 내용들에 관해 알아보하고자 한다.

2. 전기화학-기계적 평탄화 장치의 구성

기존의 연구에 활용되고 있는 ECMP 시스템은 기존의 CMP 시스템과 외관상으로는 유사하지만, 가공 대상 소재의 전기화학적 반응을 위한 전원 공급기(Power supply)가 추가로 준비되어야 한다. 이때 가공 대상인 웨이퍼는 양극(Anode)으로 연결되고 연마 패드 하부 정반(Platen)에는 음극(Cathode)이 부착된다. CMP와는 달리 연마 패드는 양극과 음극 사이에서 절연체의 역할을 함과 동시에 전기화학적 반응을 위한 전해액(Electrolyte)을 두 전극 사이로 이송하기 위한 홈(Hole)을 지니고 있다. 이때 홈 속의 전해액은 양극과 음극 사이에서 전하가 이동하는 통로의 역할을 한다. Fig. 3은 ECMP 시스템의 개략도를 보여준다.

ECMP 시스템에서 전원공급기의 양극과 샘플(시편)의 연결은 샘플의 중심부에 연결하는 경우와 샘플의 가장자리(Edge) 영역을 패드로부터 오버행(Over-hang)하여

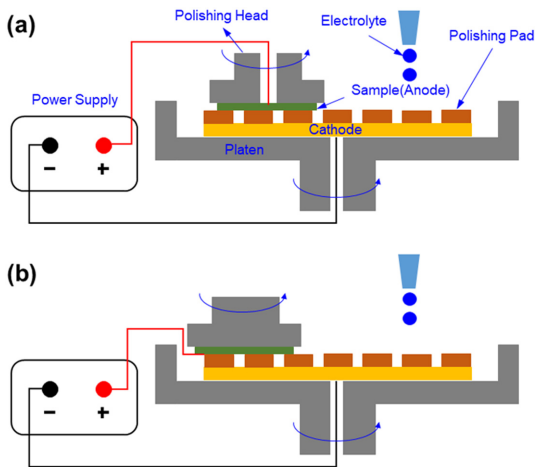


Fig. 3. Schematic of ECMP system with an anode connected to (a) the center of the sample and (b) the edge of the sample.

패드와 접촉이 발생하지 않는 샘플의 가장자리에 연결하는 방법이 있다. 전자의 경우 기판의 뒷면에서 전기가 공급되기 때문에 부도체 기판인 경우 전기화학적 반응을 발생시키지 못하거나 재료 제거 효율이 떨어질 가능성이 있다. 후자의 경우는 기판에 형성된 박막에 직접 전기를 공급하고 있지만 기판의 가장자리를 희생해야 하고 헤드의 오실레이션(Oscillation)을 이용할 수 없어 수층 측면에서 어려움이 따른다.

3. ECMP 재료제거 메커니즘

Joeng의 연구[9]에 따르면 Cu의 ECMP의 재료 제거 메커니즘은 Cu의 용해와 부동태 층(Passivation layer) 생성을 위한 전기화학적 반응과 기계적 재료 제거의 복합적 현상의 결과이다. 이는 기본적으로 전통적 Cu의 CMP 재료 제거 메커니즘과 유사한 것으로 보이나, 산화 반응을 통한 Cu 이온의 생성에 있어서 화학적 반응 외 전기에너지를 동시에 이용한다는 점에서 차이가 있다. ECMP에 있어 전기화학적 반응을 통한 금속의 용해는 Eq. 1의 패러데이의 법칙(Faraday's law)를 따라고 있다.

$$W = \frac{MIt}{nF} \tag{1}$$

여기서 W 는 용해된 금속의 무게(g), M 은 금속의 원자량(Atomic weight), I 는 전류, n 은 금속 이온의 원자가, F 는 패러데이 상수, t 는 시간을 의미한다.

구체적인 가공의 메커니즘은 가공 대상 소재 및 전해액의 구성에 따라 달라진다. Fig. 4는 Cu ECMP의 재료 제거 메커니즘을 보여준다.

ECMP에 있어 공정과 관련된 요소는 화학적인 요소와 전기적 요소, 기계적 요소로 나뉠 수 있다. 화학적 요소로는 전해액에 포함된 전도성 용액(Conductive solution), 산화제(Oxidizer), 부식방지제(Corrosion inhibitor), 착화제(Chelating agent), 염(Salt), pH 조절제(pH adjustor) 등이 있다. 전기적 요소로는 전류 밀도(Current density),

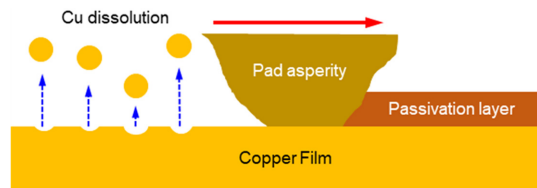


Fig. 4. Cu ECMP mechanism (Adapted from ref. [9] on the basis of OA).

Table 1. Parameters of Cu ECMP (Adapted from ref. [9] on the basis of OA)

Category	Parameter
Chemical parameter	Conductive solution
	Oxidizer
	Corrosion inhibitor
	Chelating agent
	Salt
Electrical parameter	pH adjustor
	Polishing pad type
Mechanical parameter	Electric contact area
	Pressure
Other parameter	Relative velocity
	Temperature
	Agitation

전압(Voltage) 등이 있다. 기계적 요소로는 크게 연마 패드와 공정 파라미터가 있으며, 구체적으로는 연마 패드의 형태 및 종류, 전기 접촉 영역(Electric contact area), 가공 압력(Pressure), 상대 속도 등이 있다. Table 1은 Jeong이 제안한 Cu ECMP에 관련된 요소들이다 [9]. 상세한 설명은 4.2절에서 다루어질 예정이다.

4. ECMP 연구 동향

4.1 연도별 연구 동향 및 대상 소재 분석

본 연구에서는 우선 연도별 ECMP의 연구 동향 분석을 실시하였다. Table 2는 연도별로 발표된 58편의 ECMP 관련 논문의 연도(2003-2021), 저자, 연구 대상 소재를 정리한 것이다.

Table 2. Historical review on ECMP papers

Year	Author	Target material	Ref.
2003	Lee et al.	SKD11	[10]
2003	Chen et al.	5CrNiMo, 2Cr13	[11]
2004	Economikos et al.	Cu	[12]
2004	Li et al.	SiC	[13]
2005	Emery et al.	Ag	[14]
2005	Goonetilleke et al.	Cu	[15]
2005	Pettit et al.	Ta	[16]
2005	Suni et al.	Cu	[17]
2006	Liu et al.	Cu	[18]
2007	Mellier et al.	Cu	[19]
2007	Goonetilleke et al.	Cu	[20]
2007	Truque et al.	Cu	[21]
2008	Shattuck et al.	Cu	[22]

Table 2. Continued.

Year	Author	Target material	Ref.
2008	Ng et al.	Cu	[23]
2008	Jeong et al.	Cu	[24]
2009	Tripathi et al.	Cu	[25]
2009	Han et al.	Cu	[26]
2009	Gao et al.	Ta	[27]
2009	Gao et al.	Ta	[28]
2009	Sulyma et al.	Cu	[29]
2009	Jeong et al.	Cu	[30]
2010	Tiley et al.	Ti-6Al-4V, IN718	[31]
2010	Fukuda et al.	Cu	[32]
2010	Sulyma et al.	Ta	[33]
2010	Jeong et al.	Cu	[34]
2010	Tominaga et al.	Cu	[35]
2011	Gao et al.	Ta	[36]
2012	Chen et al.	Cu	[37]
2013	Lee et al.	SS304, SS430	[38]
2013	Guo et al.	Cu	[39]
2013	Joo et al.	Cu	[40]
2014	Bian et al.	Cu	[41]
2014	Bian et al.	Cu	[42]
2014	Bian et al.	Cu	[43]
2014	Bian et al.	Ru/Cu	[44]
2015	Deng et al.	SiC	[45]
2016	Mohammad et al.	Review	[46]
2017	Murata et al.	SiC	[47]
2018	Yang et al.	SiC	[48]
2018	Yang et al.	SiC	[49]
2018	Murata et al.	GaN	[50]
2019	Yang et al.	SiC	[51]
2019	Liu et al.	Cu	[52]
2019	Mohammad et al.	SS276, SS304	[53]
2019	Gao et al.	SiC	[54]
2019	Yang et al.	SiC	[55]
2019	Wu et al.	Cu	[56]
2019	Wu et al.	Cu	[57]
2019	Yang et al.	SiC	[58]
2020	Gao et al.	SiC	[59]
2020	Bai et al.	SS316L	[60]
2020	Xu et al.	Cemented Carbide	[61]
2020	Murata et al.	SiC	[62]
2020	Guo et al.	Cu	[63]
2020	Seo et al.	Cu	[64]
2021	Zhao et al.	SLM SS304	[65]
2021	Yang et al.	SiC	[66]
2021	Yang et al.	SiC	[67]

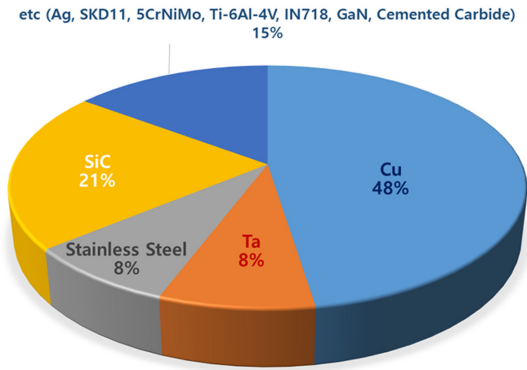


Fig. 5. Materials covered in ECMP studies from 2003 to 2021.

초기의 ECMP 연구는 냉간합금 공구강이나 구조용강과 스테인리스강 등의 표면가공을 위해 연구되었으나, 반도체용 CMP에서 물리적 결함 감소를 위한 저압 가공 공정이 요구됨에 따라 배선용 소재인 Cu의 ECMP에 관한 연구가 시작되었다. Table 2와 Fig. 5에 따르면, 2003년 이후 이루어진 ECMP 연구에서의 대상 소재 중 48%가 Cu이다. 또한 Cu 배선의 확산 방지막으로 이용되는 탄탈륨(Ta)에 관한 연구(8%)가 동시에 이루어졌다. 그 밖에 스테인리스강과 기타 소재(Ag, SKD11, 5CrNiMo, Ti-6Al-4V, IN718, GaN, Cemented Carbide)에 관한 연구가 각각 8%와 15%를 차지한다. 또한, 2015년도 이후 전력 반도체에 관한 관심이 증가하면서 기존의 CMP를 이용했을 때 장시간의 가공 시간이 요구되는 SiC ECMP 연구가 수행되고 있다. 따라서 ECMP 연구에 있어 관심 소재는 크게 Cu와 SiC로 구분된다고 할 수 있다.

ECMP에 관한 연구의 주제는 전기화학적 반응(전해액)

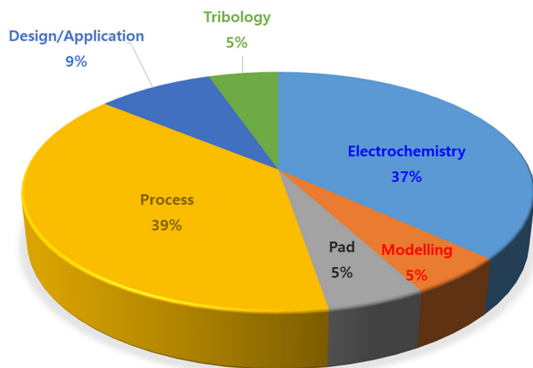


Fig. 6. Research topics on ECMP studies from 2003 to 2021.

연구, ECMP 연마 패드(홀의 배치)에 관한 연구, ECMP 공정(가공 조건에 따른 결과)에 관한 연구, ECMP 시스템 설계 및 응용에 관한 연구, 트라이볼로지 연구, 모델링 연구로 크게 나눌 수 있다. Fig. 6은 Table 1에 나열된 연구들의 연구 주제와 비율을 보여주고 있다. 전반적으로 ECMP 연구의 초기에 전해액에 의한 전기화학적 반응 분석이 많이 이루어졌으며, 이후 공정을 통한 가공 결과와 연마 패드에 관한 내용들이 연구되었다. 최근에는 트라이볼로지 연구와 공정 모델링에 관한 논문들이 발표되고 있으며, ECMP의 메커니즘을 활용한 가공 시스템(로봇/자동화 시스템 및 하이브리드 가공 시스템)의 개발 및 적용(3D 프린팅 부품 가공)이 이루어지고 있다.

4.2. ECMP 용 전해액 연구

ECMP에 있어 전해액의 조성은 가공 대상 소재에 따라 달라진다. 가공 대상 소재는 전도성이 있어야 하기 때문에 ECMP는 주로 금속류를 가공 대상으로 한다. ECMP용 전해액은 다양하게 구성될 수 있으나 앞서 설명한 바와 같이 일반적으로 전도성 용액, 산화제, 부식 방지제, 착화제, 염, pH 조절제 등으로 구성된다. 전도성 용액은 전해액의 전도성을 높여주는 역할을 하며, 주로 산성 용액이 많이 사용되고 있다. 산화제는 국부적인 전기화학적 전위를 조절하는 역할을 하며, 금속과 반응하여 금속 이온을 발생시키는 역할을 한다. 산화제로는 주로 H_2O_2 , HNO_3 , $Fe(NO_3)_3$, KIO_3 , $(NH_4)_2S_2O_8$ 등이 이용된다[9]. 부식방지제는 산화제로부터 금속의 부식을 방지하는 역할을 하며 패턴이 형성된 웨이퍼의 ECMP에서 패턴 하부를 보호해 주는 역할을 하여 디싱이나 에로전 결함을 방지하는데 도움을 준다. 착화제는 전해액 내 금속 경계면에서 부분적으로 혹은 완전히 금속 이온과 결합되며 구연산(Citric acid), 옥살산(Oxalic acid) 등의 유기산(Organic acid)과 글리신(Glycine), 에티엔디아민(Ethyendiamine) 등과 같은 무기산(Inorganic acid) 등이 사용되고 있다[9].

염은 물에 녹아 전기를 전도할 수 있도록 해 주며, 염화물(Cl^-), 아세테이트(CH_3COO^-), 플루오르화물(F^-) 등과 같은 단원자 이온이나 황산염(SO_4^{2-})와 같은 다원자 이온 등이 있다[68]. pH 조절제는 산성 혹은 염기성을 지닌 용액으로 전해액의 pH를 안정적으로 조절하는 역할을 한다. Table 3은 가공 대상 소재별 ECMP 연구에 사용된 전해액의 구성을 보여준다.

4.3. ECMP 공정 변수 및 패드 연구

ECMP에서의 공정 변수에 관한 연구는 일반적인 CMP

Table 3. Electrolyte for ECMP

Material	Electrolyte			
Cu	<ul style="list-style-type: none"> • H₂O₂+KNO₃+Glycine [15] • H₂O₂+H₃PO₄ [17] • H₂O₂+KNO₃+Citric acid [20] • H₂O₂+Citric acid+Additives [21] • H₃PO₄+K₂HPO₄+BTA(Benzotriazole) [22] • H₂O₂+H₂SO₄+KOH [23] • H₂O₂+H₃PO₄+BTA+Ethylene diamine+Citric Ammonium+KOH [24,30] • Oxalic acid+Hydroxyethylidenediphosphoric acid(HEDP)+Glycine+5-phenyl-1-H-tetrazole(PTA)+Colloidal silica [25] • KNO₃+HNO₃ [26] • H₂O₂+Oxalic acid [29] • H₂O₂+H₃PO₄+BTA+Glycine+Citric Ammonium [34] • H₃PO₄ [37] • Glycine+Thiosalicylic acid(TSA)+Abrasives(SiO₂, TiO₂)+Dispersing agent [39] • H₂O₂+Citric acid+BTA+Colloidal silica+KOH [40] • NaCl+HEDP+5-methyl-1H-benzotriazole(TTA), Tribasic ammonium citrate(TAC) [41-43] • HEDP+TTA+TAC+KOH [56,57] 			
	Ta	<ul style="list-style-type: none"> • KIO₃ [16] • H₂O₂+KCl+Acetic acid+Alumina abrasive [27,28] • KBr+KNO₃ [33] • H₂O₂+NaNO₃+Acetic acid+Alumina abrasive [36] 		
		SiC	<ul style="list-style-type: none"> • Silica slurry+KNO₃+H₂O₂ [13] • Ceria slurry [45] • NaCl [48,51,55,58] • H₂O₂+H₂SO₄ [49,67] • NaOH+Abrasive [59] 	
			GaN	<ul style="list-style-type: none"> • Ceria slurry [50]
			Steel/ Stainless steel/ Alloy	<ul style="list-style-type: none"> • NaNO₃+Na₂SO₄ [10] • NaNO₃ [11,65] • Colloidal silica [31] • NaNO₃+Abrasives(SiC, SiO₂, Al₂O₃) [38] • NaOH+KNO₃+NaNO₃ [61]
	Ru/Cu			<ul style="list-style-type: none"> • HEDP+BTA+Ascorbic acid(AA) [44]
	Ag	<ul style="list-style-type: none"> • KOH [14] 		

에서 다루는 가공 압력과 속도가 MRR에 미치는 영향 보다는 저압 조건에서 전기화학적 반응에 따른 재료의 제거에 초점이 맞추어져 있다. 공정 변수에 관한 연구는 주

로 전극에 가해지는 전압을 변화시켜 MRR의 변화를 관찰하는 방식으로 진행되었으며, 대부분의 연구 결과에서 전압 증가에 따라 MRR은 증가하는 경향을 보인다[12]. 이러한 재료 제거의 과정은 주로 전위 가변기(Potentiostat)를 이용하여 측정되었으며, 동전위 분극(Potentiodynamic polarization) 실험을 통해 재료 제거가 이루어지는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교했을 때 재료의 제거 시 동일 전압 수준에서 더 높은 전류가 발생함을 확인하였다[18]. 또한 Tiley 등[31]은 ECMP 공정 시간에 따른 Ti-6Al-4V 소재의 MRR과 전기화학 반응을 분석하였으며 부동태 층의 형성과 제거 현상을 관찰하였다. Li 등[39]은 높은 유전율(Permittivity)을 가지는 입자를 활용하여 ECMP에서의 표면거칠기를 확보하는 연구를 실시하였으며 루타일(Rutile) TiO₂ 입자가 기존의 실리카(SiO₂) 입자에 비하여 표면거칠기 확보 특성이 좋음을 확인하였다. Jeong 등[24]은 Fig. 3(b)의 웨이퍼가 오버행 되는 형태의 ECMP 장치에서 웨이퍼 오버행이 작을수록 균일한 재료 제거 균일도를 얻을 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

기판 소재, 특히 SiC 및 GaN에 관한 ECMP 연구는 기존 CMP에서의 낮은 MRR을 극복하고 경면(Mirror-like)의 표면 확보를 위한 연구에 초점이 맞춰져 있다. Murata 등[47]은 SiC 기판의 표면거칠기 확보를 위해 세리아(CeO₂) 입자에 폴리우레탄(Polyurethane)이 코팅된 입자를 사용하였으며 90분 가공 후 Ra 1 nm 이하의 표면을 확보할 수 있다고 보고하고 있다. Gao 등[54]은 SiC ECMP에 CeO₂에 합성 폴리스틸렌(Synthesized polystyrene)이 코팅된 입자를 이용하였으며 최종 Ra 0.499 nm의 표면거칠기를 확보하였다. Yang 등[48]은 AFM(Atomic force microscopy)과 X선 광전자 분광법(X-ray photoelectron spectroscopy)를 이용하여 SiC ECMP 과정에서 산화막 형성을 확인하였다. Yang 등[49]의 또 다른 연구에서는 AFM을 이용하여 SiC ECMP에서의 에치 피트(Etch pit)의 성장에 관해 연구하였으며 에치 피트의 성장을 초기 단계에서 전하이동을 조절함으로써 제어할 수 있음을 보여주었다. Murata 등[50]은 GaN의 ECMP에서 고체 폴리머 전해액(Solid polymer electrolyte)과 UV 조사를 이용하였으며 GaN의 표면 산화를 통해 시간에 따른 재료 제거 특성을 평가하였다.

ECMP 연마 패드에 관한 연구는 두 전극 사이에 전해액을 공급하기 위한 홀의 배치와 원활한 전기 공급을 위한 패드 구조에 관한 연구로 분류할 수 있으나, 전해액이나 공정 변수에 관련된 연구보다는 많은 연구가 이루어지고 있지 않다. Jeong 등[24]은 연마 패드 홀의 배치

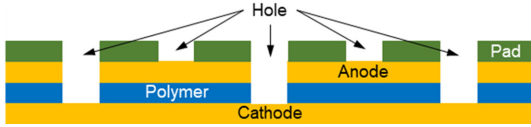


Fig. 7. Structure of ECMP pad proposed by Tominaga et al. redrawn from ref.[35].

및 크기가 MRR에 영향을 미침을 보여주었으며 적절한 크기의 홀을 패드에 배치하는 것이 MRR과 MRR의 균일도 향상에 도움이 됨을 확인하였다. Liu 등[38]은 ECMP 패드 홀의 배치에 따른 기구학적 운동 해석을 통해 재료 제거 균일도를 조사하였다. Tominaga 등[35]은 두 금속 전극 사이를 폴리머로 절연하고 그 위에 폴리우레탄 패드가 부착된 ECMP 패드를 제안하였다 (Fig. 7).

4.4. ECMP 트라이볼로지 연구

CMP는 재료 제거에 있어 계면 마찰 현상을 이용하는 공정이기 때문에 재료 제거 메커니즘의 이해를 위한 트라이볼로지 연구가 요구된다. 그러나 ECMP에 관한 연구에 있어 대부분의 연구는 전기화학적 반응에 대한 분석 및 공정에 관한 연구에 집중되어 있으며, 트라이볼로지 현상에 관한 연구는 아직도 많이 이루어지지 않고 있다. Ng 등[23]은 전해액의 pH에 따른 Cu ECMP 마찰 계수에 관하여 연구하였으며 가장 낮은 마찰계수(0.1387 ± 0.0095)를 보이는 pH 14에서 가장 양호한 표면거칠기 (Ra 4.6 nm)를 보였다. Joo 등[40]은 핀온 디스크(Pin-on-disk) 장치와 전위 가변기를 이용하여 ECMP 가공 중 마찰 계수와 타펠 곡선(Tafel curve)를 획득하였으며 전기화학적 반응과 마찰 현상에 대해 고찰하였다. Bian 등[43]은 ECMP에서 연마패드에 의해 발생하는 스크래치(Scratch)에 관해 연구하기 위하여 나노 인덴테이션(Nanoindentation) 실험을 통해 전기화학적으로 반응된 구리의 표면 경도를 측정하였으며 FEA(Finite element analysis)를 활용하여 연질 패드 돌기에 의해 발생할 수 있는 스크래치에 관한 모델을 제시하였다.

4.5. ECMP 모델링 연구

ECMP 연구에서 초기의 재료 제거 모델은 기계적인 재료 제거보다는 전기화학적 반응을 통한 재료 제거를 고려하였다. 전기화학적 반응을 고려한 재료 제거 모델은 Eq. 1의 패러데이의 법칙을 기반으로 하고 있다[24]. 따라서, 수학적 모델링에 있어 전류와 MRR의 관계로 접근하였으며 Truque 등[21]은 다음과 같이 300 mm 구리 웨이퍼를 기준으로 한 ECMP 모델을 제시하였다.

$$MRR \left[\frac{nm}{min} \right] = 29.93 \left[\frac{nm}{A \cdot min} \right] \times I [A] \quad (2)$$

Eq. 2은 MRR이 전류(I)와 선형적 관계를 가짐을 보여 주고 있다.

Fukuda 등[32]은 무차원 양으로 표현되는 보호층의 양 (Protective layer amount: ξ)을 바탕으로 구리의 용해율 (Dissolution rate; R_E)을 아래와 같이 제시하였다.

$$R_E = \max \left[R_{E0} \left(1 - \frac{\xi}{\beta} \right), R_{Em} \right] \quad (3)$$

여기서 R_{E0} 는 구리의 최대 용해율(nm/s)이고 β 는 상수, R_{Em} 은 최소 용해율(nm/s)이다. Cu의 용해량(EA)은 다음과 같이 표현된다.

$$EA = \int R_E dt_h + \delta \int R_E dt_p \quad (4)$$

여기서 t_h 는 홀을 지나는데 요구되는 시간이고 δ 는 홀이 있는 영역에 대한 홀이 없는 영역에서의 구리의 용해율의 비, t_p 는 홀이 없는 패드 영역을 지나는데 요구되는 시간이다. Fukuda의 모델은 실험을 통해 모델에 필요한 정보를 얻어야 한다는 점에서 실험적 모델에 가깝다고 할 수 있다.

Gao 등[59]은 Cu ECMP 보다 기계적 재료 제거 작용이 강한 SiC ECMP에 관한 수학적 모델을 제시하였다. Gao의 모델에서는 CeO_2 에 폴리스티렌이 코팅된 입자를 고려하였다. AFM을 이용하여 코팅된 입자의 물성을 측정하였으며, 기존 CMP에서 활용되었던 입자에 의한 기계적 재료 제거 모델을 ECMP에 적용하였다. 그러나 MRR에 관한 모델을 제시하지는 않았으며 입자가 SiC 웨이퍼로 압입되는 양에 관한 모델만을 제시하고 있다.

4.6. ECMP 적용 및 응용 연구

앞서 언급했듯이 ECMP 연구의 초기는 반도체 소재의 가공에 적용하기 전 기계 부품용 금속 소재의 표면 가공에 적용이 되었다. 최근의 연구에서는 ECMP 공정을 보다 다양한 소재에 적용시키기 위한 노력과 효율 향상 등에 관한 연구들이 이루어지고 있다.

Mohammad 등[53]은 ECMP를 반도체 외 3차원 기계 부품의 표면 가공에 활용하기 위해 로봇 기술을 활용한 ECMP 시스템을 제안하였다. 이를 위해 기존의 ECMP 장치를 로봇의 말단 효과 장치(End effector)에 장착하였으며 재료 제거에 있어 가공 공정의 유연성을 확보하였다. Xu

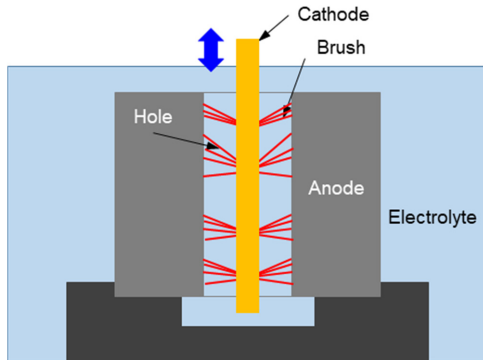


Fig. 8. Experimental setup of ECMP system for hole finishing redrawn from ref. [65].

등[61]은 5축 가공 장치를 이용하여 임펠러(Impeller)의 ECMP를 실시하였다.

Yang 등[58]은 초음파를 이용하여 SiC ECMP의 효율을 향상시키는 연구를 수행하였다. 그들은 ECMP와 초음파를 함께 이용하는 경우 기존의 ECMP 보다 높은 전류가 관찰되며 SiC의 표면 산화가 촉진되는 것을 확인하였다.

최근 ECMP 시스템은 3D 프린팅된 금속 소재의 표면 마무리 가공에도 활용되고 있다. Bai 등[60]은 SLM (Selective laser melting) 방식으로 적층된 스테인리스 316L 소재의 표면 가공을 위해 건식 ECMP 방식을 제안하였다. 실험을 위해 폴리머 입자를 약간의 전해액과 함께 희석해 탱크에 담아 전기화학적 반응을 발생시켰으며, 기계적 재료 제거는 시편의 회전과 드래그(Drag) 운동에 의해 발생한다. Zhao 등[65]은 SLM 방식으로 제조된 스테인리스 304의 홀 내부 마무리 가공에 ECMP를 활용하였다. 이때 홀 내부 가공을 위해 브러시(Brush)를 이용하였으며 실험에 이용된 장치의 구성은 아래 Fig. 8과 같다.

5. 요약 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 기존에 발표된 논문들을 바탕으로 ECMP에 관한 연구 동향에 관해 리뷰를 하였다. 2003년도부터 2021년도까지 발표된 ECMP와 관련된 논문들에서 다른 대상 소재를 파악하였으며, 이를 연구의 주제별로 분석하였다.

과거 ECMP에 관한 연구는 전해액의 개발을 위한 기초 연구 집중되어 있었지만, 최근 트라이볼로지 및 공정 변수에 관한 연구와 새로운 가공 시스템 및 적용에 관한

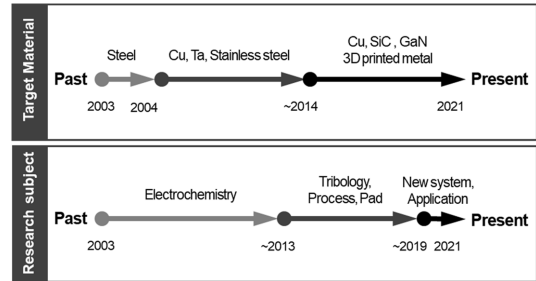


Fig. 9. Summary of Research trend of ECMP from 2003 to 2021.

연구로 발전해 오고 있다. 특히, ECMP 시스템에 관한 연구는 반도체 ECMP 뿐만 아니라 3차원 형상 가공이 가능한 형태로 발전하고 있다. 또한, ECMP의 연구 대상 소재 역시 전력 소자용 기판 소재로 각광 받고 있는 SiC 및 GaN 등으로 확장되고 있는 경향을 보인다. 최근에는 3D 프린팅으로 제작된 금속 제품에 대한 ECMP 가공의 적용 사례도 보고되고 있다. Fig. 9는 본 연구를 통해 파악된 ECMP 적용 대상 소재 및 연구 주제를 정리한 것이다.

ECMP는 향후 기존의 기계가공이 힘들었던 전도성 난삭재의 마무리 가공에 적용될 것으로 판단되며, 현재 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 여전히 가공 효율을 높일 필요성이 제기되고 있으며 이를 위해 또 다른 에너지원을 활용하는 하이브리드 ECMP 가공법의 개발이 요구될 것으로 보인다. 또한, 발전하고 있는 금속 3D 프린팅 기술에 대응할 수 있는 ECMP 시스템에 관한 연구가 필요할 것으로 보이며 CNC 및 로봇 기술을 활용한 ECMP 장비 기술의 개발이 필요할 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.
- [3] Park, S., Lee, H., "Electrolytically Ionized Abrasive-Free CMP (EAF-CMP) for Copper," *Appl. Sci.*, Vol.11, pp.7232, 2021, <https://doi.org/10.3390/app11167232>
- [4] Bibby, T., and Holland, K., "Endpoint detection for CMP," *J. Electron. Mater.*, Vol.27, pp.1073-1081, 1998, <https://doi.org/10.1007/s11664-998-0140-1>
- [5] Fayolle, M., Passemard, G., Louveau, O., Fulalba, F., and Cluzel, J., "Challenges of back end of the line for sub 65 nm generation," *Microelectron. Eng.*, Vol.70, pp.255-266, 2002.
- [6] An, J. H., Lee, G. S., Lee, W. J., Shin, B. C., Seo, J. D., Ku, K. R., Seo, H. D., Jeong, H. D., "Effect of Process Parameters on Material Removal Rate in Chemical Mechanical Polishing of 6H-SiC(0001)", *Mater. Sci. Forum*, Vols. 600-603, pp.831-834, 2009.
- [7] Kaotaka, K., Sasaoka, C., Kimura, A., Usui, A., Mochizuki, Y., "Precise Control of PN-Junction Profiles for GaN-Based LD Structures Using GaN Substrates with Low Dislocation Densities", *J. Cryst. Growth*, Vols.189-190, pp.551-555, 1998.
- [8] Lee, H. S., Jeong, H. D., "Chemical and mechanical balance in polishing of electronic materials for defect-free surfaces," *CIRP Ann. Manufact. Technol.*, Vol.58, pp.485-490, 2009.
- [9] Jeong, S., "Design of Electrolyte and Pad for High Removal Rate and Uniformity Control in Cu ECMP Process." Ph. D Dissertation, Pusan National University, 2010.
- [10] Lee, S. -J., Lee, Y. -M., Du, M. -F., "The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.140, pp.280-286, 2003.
- [11] Chen, Y. -L., Zhu, S. -M., Lee, S. -J., Wang, J. C., "The technology combined electrochemical mechanical polishing," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.140, pp.203-205, 2003.
- [12] Ecomikos, L., Wang, X., Sakamoto, A., Ong, P., Naujok, M., Knar, R., Chen, L., Moon, Y., Neo, S., Salfelder, J., Duboust, A., Manens, A., Lu, M., Shrauti, S., Liu, F., Tsai, S., Swart, W., "Integrated Electrochemical Mechanical Planarization (Ecmp) for Future Generation Device Technology," Proceedings of the IEEE 2004 International Interconnect Technology Conference (IEEE Cat. No.04TH8729), June 2004.
- [13] Li, C., Wang, R., Seiler, J., Bhat, I., "Electro-Chemical Mechanical Polishing of Silicon Carbide," *Mater. Sci. Forum*, Vols.457-460, pp.801-804, 2004.
- [14] Emery, S. B., Hubble, J. L., Darling, M. A., Roy, D., "Chemical factors for chemical-mechanical and electrochemical-mechanical planarization of silver examined using potentiodynamic and impedance measurements," *Mater. Chem. Phys.*, Vol.89, pp.345-353, 2005.
- [15] Goonetilleke, P. C., Roy, D., "Electrochemical-mechanical planarization of copper: Effects of chemical additives on voltage controlled removal of surface layers in electrolytes," *Mater. Chem. Phys.*, Vol.94, pp.388-400, 2005.
- [16] Pettit, C. M., Roy, D., "Role of iodate ions in chemical mechanical and electrochemical mechanical planarization of Ta investigated using time-resolved impedance spectroscopy," *Mater. Lett.*, Vol.59, pp.3885-3889, 2005.
- [17] Suni, I. I., Du, B., "Cu Planarization for ULSI Processing by Electrochemical Methods: A Review," *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, Vol.18, No.3, pp.341-349, 2005.
- [18] Liu, F. Q., Du, T, Duboust, A., Tsai, S., Hsu, W. -Y., "Cu Planarization in Electrochemical Mechanical Planarization," *J. Electrochem. Soc.*, Vol.153(6), pp.C377-C381, 2006.
- [19] Mellier, M., Berger, T., Duru, R., Zaleski, M., Luche, M. C., Rivoire, M., Goldberg, C., Wyborn, G., Chang, K. -L., Wang, Y., Ripoché, V., Tsai, S., Thothadri, M., Hsu, W. -Y., Chen, L., "Full Copper Electrochemical Mechanical Planarization (Ecmp) as a Technology Enabler for the 45 and 32 nm Nodes," 2007 IEEE International Interconnect Technology Conference, pp.70-72, 2007.
- [20] Goonetilleke, P. C., Roy, D., "Voltage pulse-modulated electrochemical removal of copper surface layers using citric acid as a complexing agent" *Mater. Lett.*, Vol.61, pp.380-383, 2007.
- [21] Truque, D., Xie, X., Boning, D., "Wafer Level Modeling of Electrochemical-Mechanical Polishing (ECMP)," *Mater. Res. Soc., Symp. Proc.*, Vol.991, pp.0991-C11-04, 2007.
- [22] Shattuck, K. G., West, A. C., "An investigation of phosphate based ECMP electrolyte performance on feature scale planarization," *J. Appl. Electrochem.*, Vol.39, pp.1719-1724, 2009.
- [23] Ng, D., Sen, T., Gao, F., Liang, H., "Friction and Wear-Mode Comparison in Copper Electrochemical Mechanical Polishing," *J. Electrochem. Soc.*, Vol.155(7), pp.H520-H524, 2008.
- [24] Jeong, S., Lee, S., Jeong, H., "Effect of polishing pad with holes in electro-chemical mechanical planarization," *Microelectron. Eng.*, Vol.85, pp.2236-2242, 2008.
- [25] Tripathi, A., Suni, I. I., Li, Y., Doniat, F., McAndrew, J., "Cu Electrochemical Mechanical Planarization Surface Quality," *J. Electrochem. Soc.*, Vol.156(7), H555-H560, 2009.
- [26] Han, S. -J., Seo, Y. -J., "Voltage-induced material

- removal mechanism of copper for electrochemical-mechanical polishing applications” *Trans. Nonferrous Met. Soc., China*, Vol.19, pp.s262-s265, 2009.
- [27] Gao, F., Liang, H., “Material removal mechanisms in electrochemical-mechanical polishing of tantalum,” *Electrochim. Acta*, Vol.54, pp.6808-6815, 2009.
- [28] Gao, F., Liang, H., “In Situ Observation of Friction-Induced Electrochemical Reactions and Impedance in Tantalum ECMP,” *J. Electrochem. Soc.*, Vol.156(1), pp.H80-H86, 2009.
- [29] Sulyma, C. M., Goonetilleke, P. C., Roy, D., “Analysis of current transients for voltage pulse-modulated surface processing: Application to anodic electro-dissolution of copper for electrochemical mechanical planarization,” *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol.209, pp.1189-1198, 2009.
- [30] Jeong, S., Joo, S., Kim, H., Kim, S., Jeong, H., “Effect on Two-Step Polishing Process of Electrochemical Mechanical Planarization and Chemical-Mechanical Planarization on Planarization,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.48, P.066512, 2009.
- [31] Tiley, J., Shiveley, K., Viswanathan, G. B., Crouse, C. A., Shiveley, A., “Novel automatic electrochemical-mechanical polishing (ECMP) of metals for scanning electron microscopy,” *Micron*, Vol.41, pp.615-621, 2010.
- [32] Fukuda, A., Kodera, A., Toma, Y., Suzuki, T., Hiyama, H., Doi, T., Kurokawa, S., Ohnishi, O., “Removal Rate Simulation of Dissolution-Type Electrochemical Mechanical Polishing,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.49, pp.076701, 2010.
- [33] Sulyma, C. M., Roy, D., “Voltammetric current oscillations due to general and pitting corrosion of tantalum: Implications for electrochemical-mechanical planarization,” *Corros. Sci.*, Vol.52, pp.3086-3098, 2010.
- [34] Jeong, S., Bae, J., Lee, H., Lee, H., Lee, Y., Park, B., Kim, H., Kim, S., Jeong, H., “Effect of mechanical factor in uniformity for electrochemical mechanical planarization,” *Sens. Actuator A Phys.*, Vol.163, pp.433-439, 2010.
- [35] Tominaga, S., Abe, D., Enomoto, T., Kondo, S., Kitada, H., Ohba, T., “Hybrid Electrochemical Mechanical Planarization Process for Cu Dual-Damascene Through-Silicon Via Using Noncontact Electrode Pad,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.49, pp.05FG01, 2010.
- [36] Gao, F., Liang, H., “Transformable Oxidation of Tantalum in Electrochemical Mechanical Polishing (ECMP),” *J. Electron. Mater.*, Vol.40, No.2, pp.134-140, 2011.
- [37] Chen, S. -W., Kung, T. -M., Liu, C. -P., Chang, S. -C., Cheng, Y. -L., Wang, Y. -L., “Effect of Electric Potential and Mechanical Force on Copper Electrochemical Mechanical Planarization,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.51, pp.036504, 2012.
- [38] Lee, S. -J., Chen, Y. -H., Liu, C. P., Fan, T. J., “Electrochemical Mechanical Polishing of Flexible Stainless Steel Substrate for Thin-Film Solar Cells,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol.8, pp.6878-6888, 2013.
- [39] Li, W., Guo, D., Jin, Z., Wang, Z., Yuan, Z., “Electrochemical Mechanical Polishing of Copper with High Permittivity Abrasives,” *Mater. Manuf. Process.*, Vol.28, pp.207-212, 2013.
- [40] Joo, S., Liang, H., “Tribo-electrochemical characterization of copper thin film,” *Electrochim. Acta*, Vol.99, pp.133-137, 2013.
- [41] Bian, Y. -F., Zhai, W. -J., Cheng, Y. -Y., Zhu, B. -Q., Wang, J. -H., “Electrolyte composition and removal mechanism of Cu electrochemical mechanical polishing,” *J. Cent. South Univ.*, Vol.21, pp.2191-2201, 2014.
- [42] Bian, Y., Zhai, W., “Material Removal Mechanisms in Cu Electrochemical Mechanical Polishing,” *Appl. Mech. Mater.*, Vols.490-491, pp.247-250, 2014.
- [43] Bian, Y. -F., Zhai, W. -J., Cheng, Y. -Y., Zhu, B. -Q., “Scratching by pad asperities in copper electrochemical-mechanical polishing,” *J. Cent. South Univ.*, Vol.21, pp.4157-4162, 2014.
- [44] Bian, Y. -F., Zhai, W. -J., Cheng, Y. -Y., Zhu, B. -Q., “Electrolyte composition and galvanic corrosion for tuthenium/copper electrochemical mechanical polishing,” *Rare Met.*, Vol.39, pp.1300-1306, 2014.
- [45] Deng, H., Hosoya, K., Imanishi, Y., Endo, K., Yamamura, K., “Electro-chemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO₂ slurry,” *Electrochem. Commun.*, Vol.52, pp.5-8, 2015.
- [46] Mohammad, A. E. K., Wang, D., “Electrochemical mechanical polishing technology: recent developments and future research and industrial needs,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.86, pp.1909-1924, 2016.
- [47] Murata, J., Yodogawa, K., Ban, K., “Polishing-pad-free electrochemical mechanical polishing of single-crystalline SiC surfaces using polyurethane-CO₂ core-shell particles,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol.114, pp.1-7, 2017.
- [48] Yang, X., Ohkubo, Y., Endo, K., Yamamura, K., “AFM observation of initial oxidation stage of 4H-SiC (0001) in electrochemical mechanical polishing,” *Procedia CIRP*, Vol.68, pp.735-740, 2018.
- [49] Tang, X., Sun, R., Ohkubo, Y., Kawai, K., Arima, K., Endo, K., Yamamura, K., “Investigation of anodic oxidation mechanism of 4H-SiC (0001) for electrochemical mechanical polishing,” *Electrochim. Acta*, Vol.271, pp.666-676, 2018.
- [50] Murata, J., Nishiguchi, Y., Iwasaki, T., “Liquid electrolyte-free electrochemical oxidation of GaN surface using a solid polymer electrolyte toward

- electrochemical mechanical polishing,” *Electrochem. Commun.*, Vol.97, pp.110-113, 2018.
- [51] Yang, X., Yang, X., Kawai, K., Arima, K., Yamamura, K., “Highly efficient planarization of sliced 4H-SiC (0001) wafer by slurryless electrochemical mechanical polishing,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol.144, pp.103431, 2019.
- [52] Liu, Z., Jin, Z., Wu, D., Guo, J., “Investigation on Material Removal Uniformity in Electrochemical Mechanical Polishing by Polishing Pad with Holes,” *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.8(5), pp.P3047-P3052, 2019.
- [53] Mohammad, A. E. K., Hong, J., Wang, D., Guan, Y., “Synergistic integrated design of an electrochemical mechanical polishing end-effector for robotic polishing applications,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, Vol.55, pp.65-75, 2019.
- [54] Gao, B., Zhai, W. J., Zhai, Q., Xia, Y. L., Wang, C., Peng, K. X., “Electro-Chemical Mechanical Polishing of 4H-SiC for Scratch-Free Surfaces with Less Oxide Layer at High Efficiency,” *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.8(11), pp.P677-P684, 2019.
- [55] Yang, X., Yang, X., Sun, R., Kawai, K., Arima, K., Yamamura, K., “Obtaining Atomically Smooth 4H-SiC (0001) Surface by Controlling Balance Between Anodizing and Polishing in Electrochemical Mechanical Polishing,” *Nanomanuf. Metrol.*, Vol.2, pp.140-147, 2019.
- [56] Wu, Di., Kang, R., Guo, J., Liu, Z., Wan, C., Jin, Z., “On the reaction mechanism of a hydroxyethylidene diphosphonic acid-based electrolyte for electrochemical mechanical polishing of copper,” *Electrochem. Commun.*, Vol.103, pp.48-54, 2019.
- [57] Wu, D., Kang, R., Niu, L., Pan, B., Liu, Z., Guo, J., “Two-Step Electrochemical Mechanical Polishing of Pure Copper,” *ECS J. Solid State Sci.*, Vol.8(11), pp.P699-P703, 2019.
- [58] Yang, X., Yang, X., Kawai, K., Arima, K., Yamamura, K., “Ultrasonic-assisted anodic oxidation of 4H-SiC (0001) surface,” *Electrochem. Commun.*, Vol.100, pp.1-5, 2019.
- [59] Gao, B., Zhai, W. J., Zhai, Q., Shi, Y. Q., “Polystyrene/CeO₂ Core/Shell Abrasives for High-Quality 4H-SiC Surface in ECMP: The Effects of Shell Thickness,” *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.9, pp.044005, 2020.
- [60] Bai, Y., Zhao, C., Yang, J., Fuh, J. Y. H., Lu, W. F., Weng, C., Wang, H., “Dry mechanical-electrochemical polishing of selective laser melted 316L stainless steel,” *Mater Des.*, Vol.193, pp.108840, 2020.
- [61] Xu, B., Gan, W., He, Y., Wang, X., Yin, F., Wang, X., “Five-axis Numerical Control of Electrochemical Mechanical Polishing of an Integral Impeller,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol.15, pp.12504-12523, 2020.
- [62] Murata, J., Nagatomo, D., “Investigation of Electrolytic Condition on Abrasive-Free Electrochemical Mechanical Polishing of 4H-SiC Using Ce Thin Film,” *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol.9, pp.034002, 2020.
- [63] Guo, J., Wu, D., Niu, L., Pan, B., Liu, Z., Guo, X., Jin, Z., Kang, R., “Investigation on flatness and surface integrity of pure copper processed by electrochemical mechanical polishing,” *Procedia CIRP*, Vol.95, pp.721-725, 2020.
- [64] Seo, Y. -J., “Methodological Consideration on the Prediction of Electrochemical Mechanical Polishing Process Parameters by Monitoring of Electrochemical Characteristics of Copper Surface,” *J. Electrochem. Sci. Technol.*, Vol.11(4), pp.346-351, 2020.
- [65] Zhao, C., Qu, N., Tang, X., “Electrochemical mechanical polishing of internal holes created by selective laser melting,” *J. Manuf. Process.*, Vol.64, pp.1544-1562, 2021.
- [66] Yang, X., Yang, X., Kawai, K., Arima, K., Yamamura, K., “Novel SiC wafer manufacturing process employing three-step slurryless electrochemical mechanical polishing,” *J. Manuf. Process.*, Vol.70, pp.350-360, 2021.
- [67] Yang, X., Yang, X., Kawai, K., Arima, K., Yamamura, K., “Dominant factors and their action mechanisms on material removal rate in electrochemical mechanical polishing of 4H-SiC (0001) surface,” *Appl. Surf. Sci.*, Vol.562, pp.150130, 2021.
- [68] Newman, J., Thomas-Alyea, K.E., *Electrochemical systems*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.