

Nanoparticles, Nanoporous Layers, and Dense Thin Films by Sputtering for the Use in Electrolyzers and Fuel Cells

ECS Meeting Abstracts · 2026 · DOI: 10.1149/ma2026-01381949mtgabs

초록 기반 score 9.0

1. 한 줄 요약 — 이온화된 스퍼터링(HiPIMS 기반)을 이용해 나노입자·나노다공성층·치밀박막을 넓은 범위로 제어하여 PEMWE용 이리듐 산화물 촉매층을 제작, 3 A/cm²에서 1.89 V(HFR 보정 1.55 V)의 성능과 800-1650시간 동안 5 μ V/h 이하의 낮은 열화율을 달성했다.

2. 연구 배경

PEM 수전해(PEMWE)와 연료전지의 핵심 과제 중 하나는 값비싼 이리듐 촉매의 사용량을 줄이면서도 활성 표면적과 내구성을 동시에 확보하는 것이다. 기존 접근법으로는 (1) 습식 화학법(잉크 코팅, 열분해)으로 IrO₂ 나노입자를 촉매층에 도포하는 방식이 있으나 입자 크기·분산·계면 접착력 제어가 어렵고 로딩량 대비 활성 표면적 최적화가 제한적이며, (2) 일반 DC/RF 마그네트론 스퍼터링으로 치밀박막을 증착하는 방식은 이온화율이 낮아 나노구조·기공도 제어 폭이 좁고 기판과의 접착력이나 응력 제어가 어렵다는 한계가 있다. 이 논문은 기판에 인가하는 전위와 HiPIMS를 통한 고이온화 플라즈마를 결합해 이 두 접근법의 한계를 동시에 극복하려는 시도로 위치한다(구체적 선행 문헌 비교는 초록에 미기재 — 원문 확인 필요).

3. 핵심 기여

1) 기판 바이어스 전압대(수백 V의 고전압 스퍼터클리닝/얇은 임플란트, 10-200 V의 저전압 표면 모빌리티 제어)를 구분해 치밀박막의 응력과 접착력을 설계하는 원리를 제시. 2) 수백 Pa의 고압 스퍼터링에서 가스상 나노입자 형성 및 음전하 대전 메커니즘을 활용, HiPIMS로 고밀도·고이온화 플라즈마를 구현해 나노입자 성장 속도를 높이는 공정을 설명. 3) 이 이온화 증착 기법을 PEMWE의 이리듐 산화물 촉매층에 적용해 밀도(약 10~100%)와 화학조성·나노구조를 폭넓게 튜닝 가능성을 실증. 4) 0.36 mg/cm² 이리듐 로딩의 다공성 전송전극을 5 cm² PEMWE 셀에서 실제 평가하여 성능·내구성 데이터를 제시.

4. 재료·소자 구조

스퍼터 타겟은 이리듐(계열)으로 추정되며, 기판에 음전위(수십~수백 V)를 인가한 이온화 마그네트론 스퍼터링(HiPIMS)을 사용. 저압(1-2 Pa) 조건에서는 치밀박막, 고압(수백 Pa) 조건에서는 가스상 나노입자 형성을 유도. PEMWE 셀 구조는 Chemours Nafion 115 PEM에 이리듐 로딩 0.36 mg/cm²의 다공성 전송전극(porous transport electrode)을 적용한 5 cm² 활성면적 셀. 나노다공성 IrO_x 촉매층의 밀도는 응용에 따라 약 10%에서 100% 사이로 조절 가능하며, 예시로 동일 로딩(0.3-0.4 mg/cm²)에서 다공도가 10배 차이 나는 두 코팅을 비교.

5. 주요 성능 수치

- 전류밀도: 3 A/cm² 도달
- 셀 전압: 1.89 V (HFR 보정 시 1.55 V) @ 80°C, 무배압

- 이리듐 로딩: 0.36 mg/cm^2

- 열화율: 800-1650시간 구간에서 $5 \mu\text{V/h}$ 이하 @ 2 A/cm^2 , 80°C

- 촉매층 밀도 가변범위: 약 10%~100%

- PEM 종류: Nafion 115, 셀 면적 5 cm^2

6. 기존 기술과의 비교

초록 자체에서는 구체적 비교 문헌(예: 기존 잉크 코팅 IrO₂ 촉매의 로딩량·성능 수치)이 명시되지 않아 정량 비교가 제한적이다. 다만 일반적으로 PEMWE 상업 촉매층은 이리듐 로딩이 $1\text{--}2 \text{ mg/cm}^2$ 수준인 경우가 많은데, 본 연구는 0.36 mg/cm^2 의 낮은 로딩으로도 3 A/cm^2 의 고전류밀도를 달성했다고 서술되어 있어 로딩 저감 측면에서 의미가 있으나, 이를 뒷받침할 구체적 대조군 데이터는 초록에 없다(원문 확인 필요). 또한 일반 스퍼터링 대비 HiPIMS가 이온화율을 높여 나노구조 제어 폭(10~100% 밀도)을 넓혔다는 정성적 비교만 제시된다.

7. 산업 적용 가능성

PEMWE 및 연료전지의 바이폴라 플레이트 보호코팅, 다공성 전송전극(PTE) 촉매층, 전극 표면처리 등에 직접 적용 가능한 공정으로, 특히 고가의 이리듐 사용량 절감과 장기 내구성(800-1650h, $5 \mu\text{V/h}$ 이하 열화)이라는 산업적으로 중요한 두 요구를 동시에 겨냥한다. HiPIMS 장비는 이미 산업용 스퍼터링 라인에 도입 사례가 있어 스케일업 잠재력이 있으나, 대면적 균일성, 생산 처리량(throughput), 장기 대량생산 비용 대비 습식 공정과의 경제성 비교는 원문에도 미기재.

8. 한계와 남은 과제

제시된 열화 데이터가 800-1650시간 구간에 한정되어 있어 상용 요구 수준(수만 시간)의 장기 내구성 검증은 부족하다. 또한 나노입자/다공성층 형성의 재현성, 대면적 스케일업 시 균일도, 공정 비용(HiPIMS 장비 및 저생산성 가능성)에 대한 정량적 데이터가 초록에는 없다. 비교 대상이 되는 기존 이리듐 촉매 공정과의 직접적 정량 비교도 부재하여 우수성의 상대적 크기를 판단하기 어렵다.

9. 연관 논문

- Helmersson, Brenning, Soderstrom의 미국특허(US 2012/305385 A1) - 고압 스퍼터링을 이용한 플라즈마 기반 나노입자 생성 공정을 원조로 제시, 본 논문의 나노입자 형성 메커니즘 설명의 기반이 됨.

- HiPIMS 기술 관련 일반 선행연구 - Kouznetsov 등이 제안한 고출력 임펄스 마그네트론 스퍼터링의 고이온화 플라즈마 생성 원리를 응용한 것으로 보이나 구체적 인용은 원문 확인 필요.

- PEMWE 촉매층 관련 습식 화학 공정(잉크캐스팅, 열분해 IrO₂) 연구들 - 로딩량과 활성표면적 트레이드오프 문제를 다룬 비교군으로 추정되나 실제 인용 목록은 원문 확인 필요.

10. 선정 이유

이 논문은 스퍼터링 공정변수(기판 바이어스, 가스압, HiPIMS 펄스)를 체계적으로 조절해 나노입자부터 치밀박막까지 폭넓은 구조 스펙트럼을 하나의 플랫폼으로 구현했다는 점에서 공정 novelty가 높고, 이를 PEMWE라는 산업적으로 중요성이 큰 응용(그린수소 생산)에 실제 셀 테스트(3 A/cm^2 , 800h+ 내구성)로 검증했다는 점에서 실용성도 갖췄다. 스퍼터링 서고 기준으로 공정-소재-소자 성능을 한 편에서 연결한 드문 사례로 평가되어 상위권에 선정되었다.

11. 키워드 태그

- HiPIMS
- PEMWE
- 이리듐 산화물 촉매
- 나노다공성 박막
- 이온화 스퍼터링
- 기판 바이어스
- 나노입자 증착
- 전기화학 내구성