

High - Performance Thermochromic VO₂ - Based Coatings Deposited by Roll - to - Roll High - Power Impulse Magnetron Sputtering

Energy Technology · 2024 · DOI: 10.1002/ente.202400076

초록 기반 score 9.0

1. 한 줄 요약 — 롤투롤 반응성 HiPIMS 공정으로 후속 열처리 없이 W-도핑 VO₂ 3층 박막(ZrO₂/V_{0.98}W_{0.02}O₂/ZrO₂)을 0.1mm 초박형 유연 유리 위에 대면적(0.3m×2.6m 이상)으로 증착해 전이온도 28°C, 가시광 투과율 50% 이상, 태양열 변조율 약 10%를 달성했다.

2. 연구 배경

열변색 VO₂는 반도체-금속 상전이를 이용해 건물 창호의 에너지 소비를 줄이는 스마트 윈도우 소재로 주목받아 왔으나, 상용화의 걸림돌은 (1) 통상적인 DC/RF 마그네트론 스퍼터링 후 요구되는 450°C 이상의 고온 후속 열처리 공정으로, 이는 플렉시블 기판이나 대면적 유리 코팅과 호환되지 않는다는 한계가 있고, (2) 졸-겔법 등 습식 공정은 균일성과 대면적 확장성이 떨어져 산업적 롤투롤(R2R) 생산에는 부적합하다는 한계가 있다. 또한 순수 VO₂는 전이온도가 68°C로 높아 실용성이 낮아 W 도핑으로 낮추는 접근이 시도되어 왔지만, 이를 대면적·유연 기판에 후속 열처리 없이 구현한 사례는 초록만으로는 구체적으로 명시되지 않아 원문 확인이 필요하다.

3. 핵심 기여

1. 반응성 HiPIMS와 산소 유량 제어를 이용해 후속 열처리 없이 350°C 기판 온도에서 W-도핑 VO₂(V_{0.98}W_{0.02}O₂) 박막을 직접 결정화하는 공정을 구현. 2. ZrO₂/V_{0.98}W_{0.02}O₂/ZrO₂ 3층 구조를 설계해 0.1mm 초박형 유연 유리 기판 위에서 열변색 성능을 최적화. 3. 파일럿 규모 롤투롤 장비를 이용해 폭 0.3m, 길이 2.6m 이상의 대면적 코팅을 실현함으로써 실험실 규모를 넘어선 확장성을 시연. 4. RBS, FESEM, XRD, 분광광도법을 이용해 조성-구조-광학 특성 간의 상관관계를 다각도로 분석.

4. 재료·소자 구조

기판: 0.1mm 두께의 초박형 플렉시블 유리. 활성층: W 2at% 도핑된 VO₂ (V_{0.98}W_{0.02}O₂), 반응성 HiPIMS로 산소 유량을 제어하며 약 350°C 기판 온도에서 증착. 상하부에 ZrO₂ 층을 배치한 3층(ZrO₂/V_{0.98}W_{0.02}O₂/ZrO₂) 구조이며, ZrO₂는 광학 매칭 또는 보호층 역할로 추정되나 구체적 두께나 역할은 초록에 미기재 — 원문 확인 필요. 공정은 후속 어닐링 없이 파일럿 스케일 R2R 장비에서 수행.

5. 주요 성능 수치

- 전이온도(Transition temperature): 28°C
- 적분 가시광 투과율(Integral luminous transmittance): >50%

- 태양에너지 투과율 변조(Solar energy transmittance modulation): 약 10%

- 코팅 크기: 폭 0.3 m × 길이 2.6 m 이상

- W 도핑 농도: 2 at%

- 기판 증착 온도: 약 350°C

- 히스테리시스 폭 및 ΔT_{sol} 세부값: 초록 미기재 — 원문 확인 필요

6. 기존 기술과의 비교

전통적인 DC/RF 마그네트론 스퍼터링 VO2 박막은 결정화를 위해 통상 450°C 이상의 후속 열처리가 필요해 유연 기판이나 대면적 R2R 공정에 적용하기 어려운데, 본 연구는 반응성 HiPIMS와 낮은 기판온도(~350°C)만으로 후속 열처리 없이 유사한 열변색 성능을 구현했다는 점에서 차별화된다. 또한 기존 다수의 W-도핑 VO2 연구는 수 cm² 수준의 실험실 규모 샘플에 그쳤던 것으로 알려져 있는 반면, 본 연구는 0.3m 폭, 2.6m 이상 길이의 파일럿 스케일 연속 공정으로 확장했다는 점이 두드러진다. 다만 구체적인 선행 문헌 대비 수치(예: 특정 논문의 ΔT_{sol} , Tc 수치)는 초록에 제시되지 않아 정량 비교는 제한적이며 원문 확인이 필요하다.

7. 산업 적용 가능성

건물 및 자동차 스마트 윈도우용 에너지 절감 코팅으로 직접 응용 가능하며, 특히 R2R 공정과 유연 유리 기판 호환성은 라미네이트 유리나 필름형 윈도우 제품에 통합하기 유리하다. 상용화까지는 장기 내구성(자외선, 습도, 열사이클), 기계적 유연성 반복시험, 대면적 균일도의 재현성, 그리고 생산 비용 대비 성능(투과율-변조율 트레이드오프) 최적화가 추가로 필요할 것으로 보이나 이에 대한 데이터는 초록에 없어 원문 확인이 필요하다.

8. 한계와 남은 과제

초록만으로는 코팅의 장기 내구성, 반복 열사이클 안정성, 기계적 굽힘 내구성, 히스테리시스 폭, 그리고 태양열 이득계수(SHGC) 등 실용적 성능 지표가 확인되지 않는다. 또한 ZrO2 층의 정확한 두께와 광학 설계 근거, 타 도핑 원소와의 비교 데이터도 미기재되어 있어 추가 검증이 필요하다.

9. 연관 논문

- W-도핑을 통한 VO2 전이온도 저감 연구(예: Kiri 등)는 도핑 농도에 따른 Tc 감소 효과를 보고했으나 대면적 R2R 공정은 다루지 않은 것으로 알려져 있다.

- 졸-겔 및 스퍼터링 기반 VO2 스마트윈도우 코팅 연구들은 소면적 샘플에서 높은 태양열 변조율을 보고했지만 확장성 및 공정 재현성 문제가 지적되어 왔다.

- ALD 기반 VO2 박막 연구는 정밀한 두께 제어가 가능하나 증착 속도가 낮아 대면적 산업 공정에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다.

- 실제 인용 목록은 원문 확인 필요.

10. 선정 이유

VO2 열변색 코팅을 실험실 규모를 넘어 파일럿 스케일 롤투를 HiPIMS 공정으로 구현하고, 후속 열처리 없이 유연 초박형 유리 위에서 상업적으로 의미 있는 크기(0.3m×2.6m)의 균일 코팅을 달성했다는 점에서 스마트 윈도우 산업화 관점의 novelty와 중요성이 높다. 재료 조성(W-도핑), 다층 구조 설계, 대면적 공정 최적화까지 종합적으로 다뤄 스퍼터링 공정 연구로서 실용성과 확장성을 동시에 입증한 사례로 평가된다.

11. 키워드 태그

- VO2
- 열변색 코팅
- HiPIMS
- 롤투를 증착
- W-도핑
- 스마트 윈도우
- ZrO2 버퍼층
- 유연 기판