

GIST-서울대 공동연구팀, 메모리용 고성능 강유전체 확보 위한 저온 심자외선 공정 개발

- 심자외선(DUV) 기반 결함제어와 산화물 박막의 중심 비대칭 결정화 제어 및 강유전성 확보... 차세대 강유전체 전자소자 및 고성능 메모리 전자회로 개발 등 기대
- 재료공학 분야 국제학술지 「Materials Science and Engineering: R: Reports」 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 윤명한 교수, 서울대 박민혁 교수, GIST 최준규 박사, GIST 이상우 석사, 서울대 박사과정 김세현 학생

기존보다 **100°C 낮은 온도에서 강유전체 산화물을 확보하는 방법이 개발됐다.** 강유전체는 외부에서 전기장을 가하지 않더라도 스스로 전기분극을 나타내는 물질로서, 강유전체를 기반으로 제작된 메모리 소자는 기존 플래시메모리 대비 낮은 구동 전력, 빠른 처리 속도로 인해 차세대 고성능 반도체 메모리 소자로 주목받고 있다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학부 윤명한 교수팀과 서울대학교 재료공학부 박민혁 교수 공동연구팀이 고성능 강유전체 산화물 확보를 위한 저온 심자외선(DUV)* 기반 결함 제어 및 결정화 메커니즘을 규명했다고 밝혔다.

강유전체 중 **하프늄-지르코늄 산화물(hafnium zirconium oxide: HZO)**은 반도체와 전자 산업의 핵심 소재(상보형 금속 산화물 반도체, CMOS)와의 집적화 공정에 유리하고, 수 나노미터 스케일의 비교적 낮은 두께에도 **우수한 강유전성과 낮은 터널링 효과를 유도**한다는 점에서 주목받고 있다.

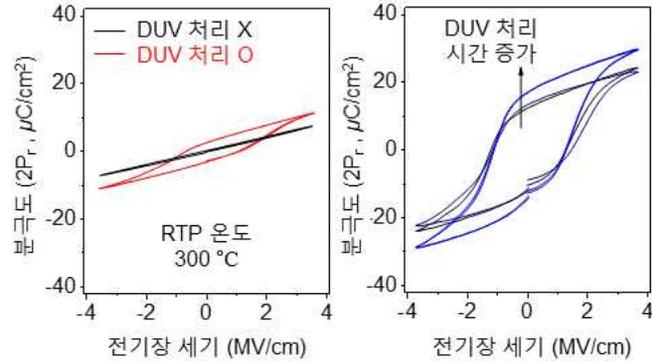
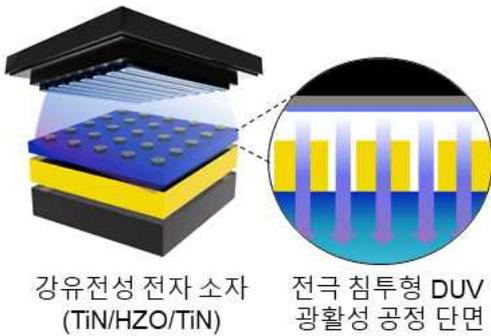
그러나 10nm(나노미터) 미만의 얇은 두께의 HZO에 강유전성을 보이는 사방정계(orthorhombic) 결정상을 확보하기 위해서는 **400~500°C의 열처리 공정이 필수적**이며, HZO의 결정화 메커니즘과 이를 제어하는 기술에 대해서는 아직 명확하게 밝혀진 바가 없다.

* 심자외선(Deep Ultraviolet: DUV): 파장이 300nm 이하인 자외선

연구팀은 강유전성을 보이는 사방정계 결정 구조 형성에 **산소 결함(oxygen vacancy)**이 중요한 역할을 한다는 점에 주목했다.

급속 열처리 장치(rapid thermal processing)를 통한 통상적인 열처리 공정 이후 심자외선 기반 광활성화 공정을 도입함으로써 **8nm의 HZO 박막 내 산소 결함을 유도하고 사방정계* 결정 구조 형성에 성공했다.**

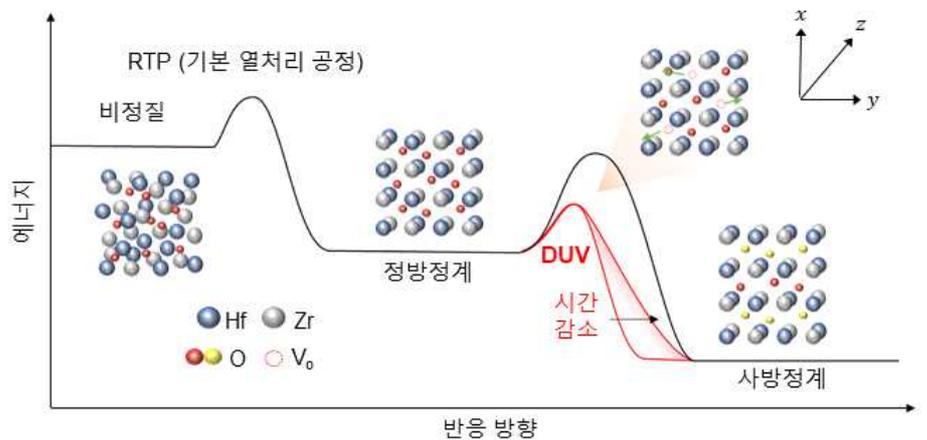
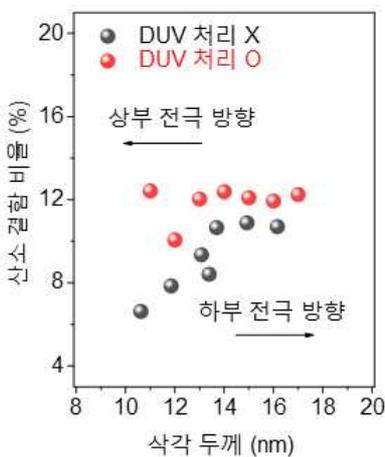
* **사방정계:** 입방정계(정육면체 모양)에서 두 개의 벡터를 서로 다른 길이로 잡아늘린 모양이다. 직사각형을 밑면으로 하는 사각기둥의 모양이며, 밑면의 양 변의 길이와 높이는 서로 다르다.



▲ 이번 연구에서 활용한 DUV 광활성 공정 모식도(좌) 및 DUV 광활성 공정 유무 및 처리 시간에 따른 강유전성 HZO 소재 자발 분극도 차이(우). DUV 광활성 공정 도입 시, 300°C의 저온에서 강유전성 특성 확보가 가능하며 및 처리 시간 증가에 따라 강유전성 특성 향상.

연구팀은 300°C 비활성 가스 분위기*에서 상하부 전극 제작까지 완료된 메모리 소자에 직접 심자외선을 조사하는 상대적으로 단순한 후공정 도입을 통해 매우 우수한 강유전성과 낮은 누설 전류 기반의 안정성을 확보하는데 성공했으며, 원자 간 결합 에너지에 대한 분석과 초고해상도 현미경 분석을 통해 심자외선 광활성화 공정에 의해 6% 가량 증가한 산소 결함이 HZO의 결정상 제어에 미치는 영향과 메커니즘을 규명하였다.

* 비활성 가스 분위기: 질소, 아르곤 gas와 같이 심자외선을 흡수하지 않는 gas로 채워진 환경



▲ DUV 광활성 공정 유무에 따른 산소 결함의 비율을 HZO 깊이에 따라 나타낸 모식도(좌) 및 이번 연구에서 제안하는 산소 결함 기반 HZO 박막 결정화 제어 메커니즘 모식도(우). DUV 광활성 공정을 통해 기존 공정 대비 적은 시간, 에너지를 소모하여 우수한 강유전성 특성을 확보할 수 있음.

GIST 윤명한 교수는 “이번 연구 성과는 특히 심자외선 빛 조사를 통해 산소 결함과 같은 원자 수준의 미시적 특성을 변화시켜 금속산화물 결정상을 제어하고 이와 관련된 메커니즘을 규명한 것으로 학술적 의미가 크다”고 평가했다.

서울대 박민혁 교수는 “저비용의 대면적 광처리 공정을 통해 저온에서 HZO의 강유전성을 확보함으로써 **전자·메모리 산업 분야에서의 활용 기대성이 크다**”고 강조했다.

이번 연구는 기능성 산화물 박막 소재의 광화학적 물성 제어를 연구하는 GIST 윤명한 교수 연구팀과 초고성능 강유전체 소재 및 메모리 소자를 연구하는 서울대학교 박민혁 교수 연구팀의 공동 연구 성과로, GIST 박사과정 최준규 학생, 석사과정 이상우 학생과 서울대학교 박사과정 김세현 학생이 공동 제1저자로 참여했으며 한국연구재단 및 GIST 신재생에너지연구소의 지원을 받아 수행하였다.

연구 결과는 전자 소자 및 재료과학 분야의 국제 저명 학술지 ‘Materials Science & Engineering: R: Reports’에 2024년 5월 7일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Materials Science and Engineering: R: Reports (IF= 31.0 (2022년))
- 논문명 : Non-Centrosymmetric Crystallization in Ferroelectric Hafnium Zirconium Oxide via Photon-Assisted Defect Modulation
- 저자 정보 : 최준규 (공동 제1저자, GIST), 이상우 (공동 제1저자, GIST), 김세현 (공동 제1저자, 서울대), 이원준 (공동저자, GIST), 김태진 (공동저자, Stony Brook University), 박민혁 (공동 교신저자, 서울대), 윤명한 (공동 교신저자, GIST)