

GIST-서울대-USC, 차세대 AI 반도체 난제 풀어

단일 소자로 초저전력·고집적 뉴로모픽 반도체 구현

- GIST 신소재공학과 이상한 교수팀 참여한 국제 공동연구팀, 정보 저장의 비선형성과 누설 전류 문제를 하나의 소자에서 동시 해결... 선택소자 없이 안정적 정보 저장 구현
- 1천만 회 이상 반복 동작 안정성 및 11×11 메모리 셀 크로스바 어레이에서 성능 입증
- 국제학술지《Nature Communications》게재



▲ **GIST-서울대-USC, 국제 공동연구팀 단체사진.** (왼쪽부터) 서울대학교 재료공학과 장호원 교수, GIST 신소재공학과 이상한 교수, 서던캘리포니아대학교(University of Southern California) 전기·컴퓨터공학과 J. Joshua Yang 교수, 서울대학교 재료공학과 김영민 석박통합과정생, 국민대학교 전자공학과 이윤정 교수, GIST 신소재공학과 양지웅 석박통합과정생

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 신소재공학과 이상한 교수 연구팀, 서울대학교 재료공학과 장호원 교수 연구팀, 미국 서던캘리포니아대학교(University of Southern California) 전기·컴퓨터공학과 조슈아 양(Joshua Yang) 교수 연구팀이 공동으로 정보를 전기 자극에 따라 선형적으로, 즉 일정한 폭으로 저장하면서도 이를 안정적으로 유지하고 누설 전류를 효과적으로 억제하는 뉴로모픽 반도체 소자를 개발했다고 밝혔다.

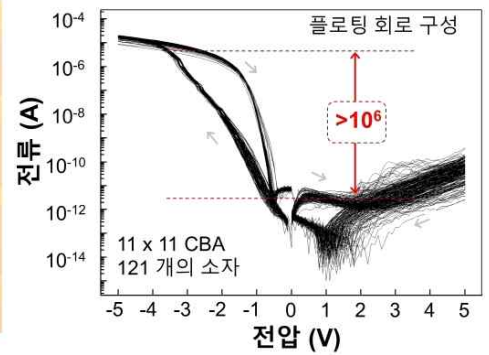
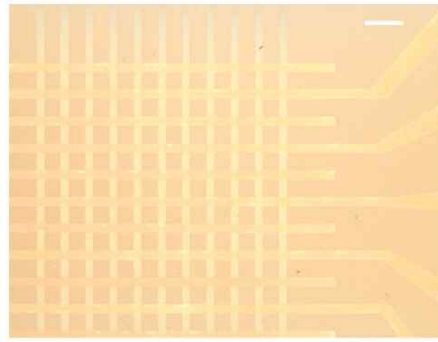
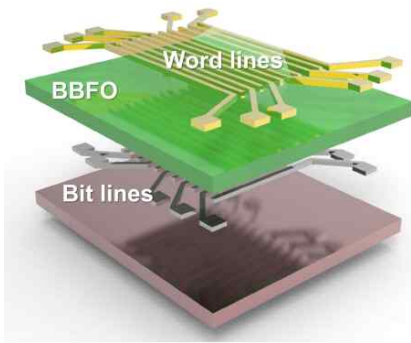
개발된 소자는 정보를 저장하는 메모리 기능과 전류를 한 방향으로만 흐르게 하는 자기 정류(Self-rectifying) 기능을 하나의 소자에 구현했다. 이를 통해 메모리 소자를 격자 형태로 배열한 크로스바 어레이(Crossbar Array)에서 기존에 필수적으로 사용되던 별도의 선택소자(selector*) 없이도 안정적으로 작동할 수 있어, 뉴로모픽 반도체의 집적도와 공정 효율을 높일 수 있는 새로운 가능성을 제시했다.

* **선택소자(selector):** 크로스바 어레이 구조에서 소자의 낮은 저항 상태로 인해 발생하는 누설 전류(sneak-path current)를 차단해 정보의 오기록이나 연산 오류를 줄이는 소자이다.

인공지능(AI)이 산업 혁신의 핵심 기술로 자리 잡으면서 사람의 뇌를 모방해 정보를 저장하고 연산하는 '뉴로모픽 컴퓨팅*'이 차세대 AI 반도체 기술로 주목받고 있다.

반복되는 전기 자극에 따라 변화하는 저항을 메모리로 활용하는 '뉴로모픽 컴퓨팅'

은 메모리 소자를 가로세로로 교차 배치한 '크로스바 어레이 구조'를 이용해 구현된다.



▲ 공동 연구팀이 개발한 강유전체 기반 단일 소자 뉴로모픽 크로스바 어레이의 구조와 정류 특성. (왼쪽부터) 소자 구조 모식도, 제작된 소자의 현미경 사진, 전류가 한 방향으로만 흐르는 자기 '정류' 특성을 나타낸 전기적 특성 그래프이다.

이를 통해 제한된 공간에 소자를 고밀도로 집적하고 대규모 데이터를 병렬로 처리할 수 있어, 연산 효율을 높이는 AI 반도체의 핵심 구조로 평가받고 있다.

하지만 같은 전기 자극을 반복해도 정보가 일정한 폭으로 저장되지 않는 **비선형적 정보 축적 현상**과, 인접 소자로 전류가 새어 나가는 **누설 전류(sneak-path current)** 문제가 연산 정확도를 떨어뜨리는 한계로 지적돼 왔다. 이를 해결하기 위해서는 메모리 소자마다 누설 전류를 차단하는 **선택소자를 별도로 추가**해야 해 소자 구조가 복잡해지고 집적도와 공정 효율이 낮아지는 문제가 있었다.

* **뉴로모픽 컴퓨팅(Neuromorphic Computing)**: 데이터의 연산과 저장을 별도로 수행하던 기존의 컴퓨팅 구조를 벗어나 생물 뇌의 뉴런(neuron)을 하드웨어로 구현함으로써 방대한 정보를 초저전력 고속 병렬 연산을 수행하는 기술이다.

공동 연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 정보를 저장하는 **메모리 기능**과 전류를 한 방향으로만 흐르게 하는 **자기 정류 기능**을 하나의 소자에 동시에 구현했다.

이를 위해 전기 신호를 기억하는 강유전체* 소재인 **비스무트 철 산화물(BiFeO₃)에 바륨(Ba)을 첨가**해, 전기 신호를 저장하는 특성과 전류의 흐름에 영향을 미치는 산소 공공(oxygen vacancy)의 이동을 정밀하게 제어할 수 있도록 소재를 설계했다.

산소 공공은 산화물에서 산소 원자가 빠져 생긴 빈자리로, 전류의 흐름과 정보 저장 성능을 좌우하는 중요한 요소다. 연구진은 바륨을 첨가해 산소 공공의 이동을 안정적으로 제어함으로써, 반복적인 전기 자극에도 정보가 일정한 폭으로 저장되는 선형적 정보 저장 특성을 구현했다.

또한 메모리 소자 자체에 자기 정류 기능을 구현해 별도의 선택소자 없이도 불필

요한 누설 전류를 효과적으로 차단했으며, 이를 통해 회로 구조를 단순화하면서도 안정적인 동작이 가능하도록 했다.

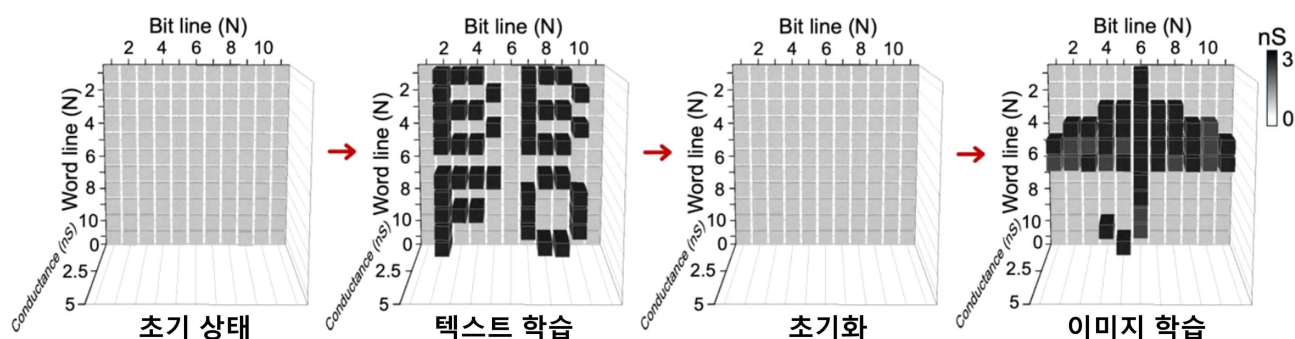
* **강유전체**: 전기 신호를 기억하는 특성을 가진 물질로, 전원을 꺼도 정보 저장 상태를 유지할 수 있어 차세대 메모리 반도체에 활용된다.

공동 연구팀은 반복 동작 안정성과 정보 저장 특성, 크로스바 어레이 적용 가능성을 다양한 실험을 통해 검증했다.

반복적인 쓰기·지우기 시험에서는 1,000만 회(10^7 회) 이상의 반복 동작에도 안정적인 특성을 유지했다.

또한 전압의 크기와 전기 자극 횟수를 달리해 정보 저장 특성을 분석한 결과, 전기 자극에 따라 정보가 일정한 폭으로 저장되는 선형적 정보 저장 특성을 확인했다.

나아가 개발한 소자로 가로 11개, 세로 11개의 메모리 셀로 구성된 크로스바 어레이(121개 메모리 셀)를 구현해 텍스트와 이미지 패턴의 기록·소거 실험을 수행한 결과, 별도의 선택소자 없이도 각 메모리 셀의 정보를 안정적으로 저장·제어할 수 있음을 입증했다.



▲ 제작된 11×11 크로스바 어레이 소자를 이용한 데이터 학습 및 초기화 시연 결과. 전도도를 정밀하게 제어해 텍스트와 이미지 패턴을 저장하고 초기화할 수 있음을 보여준다.

특히 전류를 한 방향으로만 흘려보내는 제어 능력(정류비)을 100만 배 이상으로 높여, 미세하게 전기가 새어 나가는 현상(누설 전류)을 효과적으로 차단했다.

신소재공학과 이상한 교수는 “이번 연구는 기존 뉴로모픽 반도체의 주요 난제였던 정보 축적의 비선형성과 누설 전류 문제를 하나의 소자에서 동시에 해결했다는 점에서 학술적·산업적 의미가 크다”며, “별도의 선택소자 없이도 높은 공정 효율성과 집적도를 구현할 수 있는 새로운 설계 방향을 제시했으며, 향후 고효율 뉴로모픽 컴퓨팅 구현은 물론, 고성능·초저전력 뉴로모픽 반도체의 상용화를 앞당기는 기반 기술이 될 것으로 기대한다”고 밝혔다.

GIST 신소재공학과 이상한 교수, 서울대학교 재료공학과 장호원 교수, 미국 서던캘

리포니아대학교 전기·컴퓨터공학과 Joshua Yang 교수가 공동으로 지도하고 서울대학교 재료공학부 김영민 석박통합과정생, 국민대학교 전자공학과 이윤정 교수, GIST 신소재공학과 양지웅 석박통합과정생이 공동 제1저자로 참여한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 개인기초연구사업(중견연구), 나노·소재기술개발사업, 미래소재디스커버리사업 등의 지원을 받았다.

또한 서울대학교 반도체공동연구소, 공학연구원, 소프트 파운드리(SOFT Foundry) 연구소의 연구시설 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지 《네이처 커뮤니케이션즈(Nature Communications)》에 2026년 3월 17일 온라인으로 게재됐으며, 교정 절차를 마친 최종본(version of record)이 이달 공개됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : nature communications (IF=15.7, 2024)
- 논문명 : Programmable ferroelectric rectifier for reliable and efficient neuromorphic crossbar array
- 저자 정보 : 김영민(제1저자, 서울대학교 재료공학부), 이윤정(제1저자, 국민대학교 전자공학과), 양지웅(제1저자, GIST 신소재공학과), 김병수(공저자, 서울대학교 재료공학부), 김승주(공저자, University of Southern California), 김재현(공저자, 서울대학교 재료공학부), 임인혁(공저자, 서울대학교 재료공학부), 김재영(공저자, 서울대학교 재료공학부), He Rui(공저자, 가천대학교 전자공학과), 김해성(공저자, 국민대학교 전자공학과), 박정웅(공저자, 가천대학교 전자공학과), 박민혁(공저자, 서울대학교 재료공학부), 김대환(공저자, 국민대학교 전자공학과), 최성진(공저자, 국민대학교 전자공학과), J. Joshua Yang(교신저자, University of Southern California 전기·컴퓨터공학과), 이상한(교신저자, GIST 신소재공학과), 장호원(교신저자, 서울대학교 재료공학부)