

“탄소를 잠깐 넣었다 빼니, 반도체 배선 저항 45% 뚝!”

GIST-삼성전자 SAIT-MIT, 차세대 반도체 배선 소재 제어 기술 《사이언스》에 발표

- GIST 중앙기기연구소 조용륜 박사, 삼성전자 SAIT·美 MIT와 공동연구... 탄소를 '일시적 결정 성장 촉진제'로 활용해 루테튬 결정 크기방향 제어하고 전기저항 45.4% 감소
- 2 nm급 차세대 반도체 배선과 복잡한 3차원 구조에도 적용 가능성 확인



▲ (왼쪽부터) 삼성전자 SAIT 임용철 박사, 하윤후 박사, 이영민 연구원, GIST 중앙기기연구소 첨단분석센터 조용륜 박사

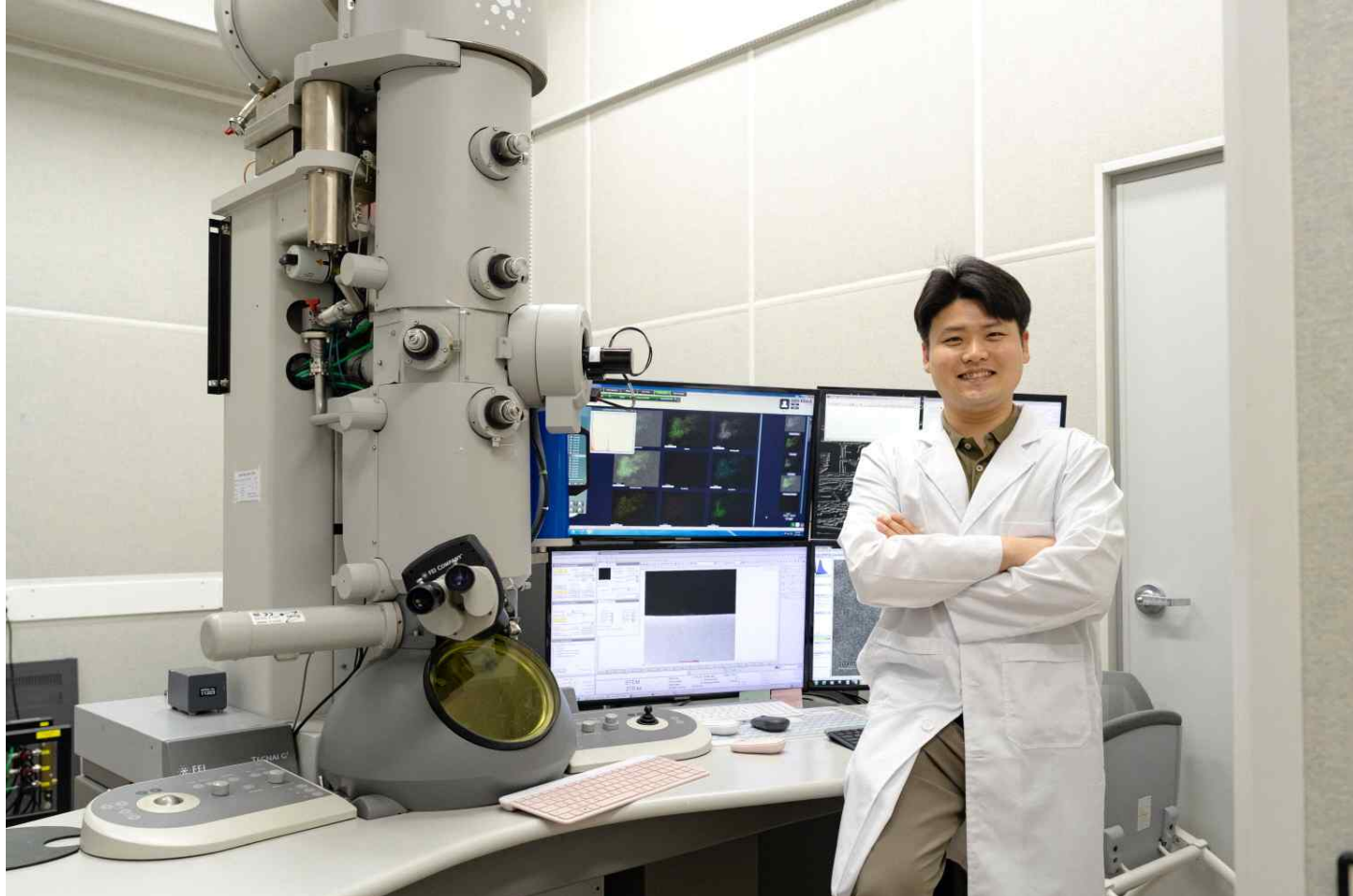
광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 중앙기기연구소(GIST Advanced Institute of Instrumental Analysis, GAIA) 첨단분석센터 조용륜 박사가 삼성전자 SAIT(옛 삼성종합기술원) 및 미국 매사추세츠공과대학교(MIT) 연구진과 함께 수행한 연구가 세계적 학술지 《사이언스(Science)》에 게재됐다고 밝혔다.

조용륜 박사는 이번 연구에 공동1저자로 참여해 실험 설계와 수행, 투과전자현미경(TEM)*을 활용한 실시간 미세구조 분석, 데이터 분석 및 시각화, 연구 결과 해석 등에 기여했다.

이번 연구는 미량의 탄소를 '일시적 결정 성장 촉진제'로 활용해 비정질 절연 기판 위에서도 금속 결정의 방향을 정밀하게 정렬하는 기술을 개발하고, 이를 통해 차세대 반도체 초미세 배선의 전기저항을 크게 낮출 수 있음을 확인했다.

특히 이번 성과는 2024년 시작된 GIST 중앙기기연구소와 삼성전자 SAIT 간 산학협력 연구에서 얻어진 초기 연구 결과를 바탕으로 후속 연구가 이어져 결실을 맺었다는 점에서도 의미가 있다.

* 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM): 전자빔(E-beam)을 시료에 투과시켜 원자 수준의 구조를 관찰할 수 있는 장비로, 매우 높은 해상도를 제공해 나노 소재나 생체 분자의 미세구조 분석에 활용됨.



▲ GIST 중앙기기연구소 첨단분석센터 조용륜 박사가 투과전자현미경(TEM) 옆에서 포즈를 취하고 있다.

반도체 칩에는 수많은 트랜지스터를 연결해 전기 신호를 전달하는 미세한 금속 배선이 촘촘하게 들어 있다. 배선의 폭이 수 나노미터 수준으로 작아지면서 기존 구리(Cu) 배선의 전기적 한계를 보완할 차세대 금속 소재로 루테튬(Ruthenium, Ru)*이 주목받고 있다.

그러나 루테튬 역시 매우 얇은 박막으로 만들 경우, 금속을 이루는 작은 결정들(결정립·grain)이 서로 맞닿는 '결정립계(grain boundary)**'에서 전자가 산란하면서 전기저항이 증가하는 문제가 있다.

따라서 '결정립'을 크게 성장시켜 전자의 흐름을 방해하는 '결정립계'를 줄이고, 각각의 결정이 같은 방향으로 정렬되도록 해 결정립계**에서 발생하는 전자 산란을 줄이는 것이 루테튬을 차세대 초미세 배선에 활용하기 위한 중요한 과제다.

* 루테튬(Ruthenium, Ru): 전기전도성과 열·화학적 안정성이 우수해 구리의 한계를 보완할 차세대 반도체 배선 소재로 연구되는 금속이다.

** 결정립계(grain boundary): 금속을 이루는 작은 결정인 '결정립'들이 서로 맞닿는 경계이다. 결정 방향이 제각각이거나 경계가 많으면 전자의 흐름이 방해받아 저항이 커질 수 있다.

기존에는 금속의 결정 방향과 크기를 제어하기 위해 결정 구조가 잘 맞는 기판 위에서 금속 박막을 성장시키는 '에피택시(epitaxy)*'나 고온 열처리 등의 방법을 사용해 왔다. 하지만 이러한 방법은 적용할 수 있는 기판과 공정 조건에 제약이 있어

실제 반도체 공정에 적용하는 데 한계가 있었다.

금속에 미량의 다른 원소를 첨가해 결정 방향을 제어하려는 방법도 시도됐지만, 첨가 원소가 지나치게 많거나 적으면 결정 성장을 방해할 수 있어 적절한 함량과 분포를 정밀하게 제어하는 것이 어려웠다.

* **에피택시(epitaxy):** 결정 구조가 규칙적인 기판의 원자 배열을 따라 그 위에 같은 방향의 결정막을 성장시키는 방법이다.

공동연구팀은 이러한 한계를 해결하기 위해 루테튬에 미량의 탄소를 첨가한 뒤, 열처리 과정에서 탄소가 결정립의 성장과 재배열을 돕고 이후 빠져나가도록 하는 새로운 전략을 제시했다.

탄소 함량을 달리해 비교한 결과, 루테튬을 구성하는 원자 1,000개 가운데 약 5개에 불과한 약 **0.48 at%(원자 퍼센트)***의 탄소를 첨가했을 때 결정립의 성장과 정렬이 가장 효과적으로 촉진됐다. 반면 탄소가 지나치게 많아지면 결정 방향의 정렬을 오히려 방해하는 것으로 나타났다.

연구진은 탄소를 박막에 계속 남겨두는 것이 아니라, 결정이 성장하고 방향을 재배열하는 과정에서만 일시적으로 작용하게 한 뒤 빠져나가도록 했다. 즉, 탄소를 결정 성장을 돕는 **‘일시적 촉진제’**로 활용한 것이다.

* **at%(Atomic Percent):** 물질을 구성하는 전체 원자 가운데 특정 원소의 원자가 차지하는 비율이다.

공동연구팀은 이어 탄소가 결정립의 성장과 정렬을 촉진하는 원리도 규명했다.

열처리 과정에서 루테튬 내부에 있던 탄소 원자들이 결정립이 맞닿는 경계인 결정립계로 이동해 탄소가 풍부한 영역을 형성하고, 이후 탄소가 기체 형태로 빠르게 빠져나가면서 일시적인 빈 공간인 **‘자유부피(free volume)’**가 형성되는 것으로 분석됐다.

이처럼 결정립계 주변에 생긴 빈 공간은 루테튬 원자의 이동을 쉽게 하고 결정립계가 움직일 수 있도록 해, 작은 결정들이 서로 합쳐지고 성장하면서 비슷한 방향으로 재배열되는 과정을 촉진한 것으로 나타났다.

특히 연구진은 **‘실시간 가열 투과전자현미경(In-situ Heating TEM)*’**을 이용해 시료를 현미경 안에서 가열하면서 결정립이 성장하고 방향을 재배열하는 과정을 직접 관찰했다.

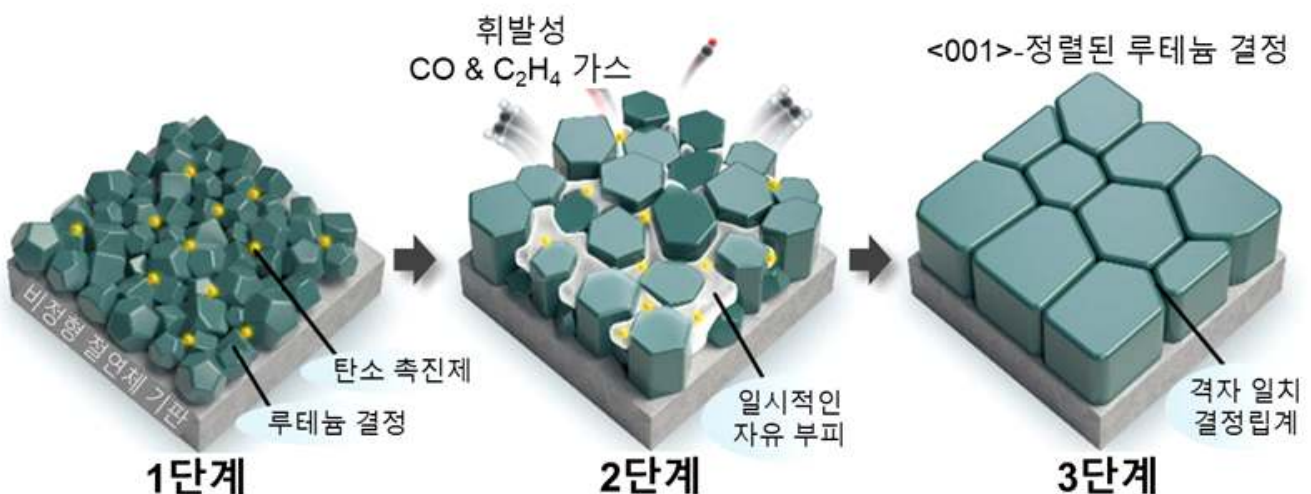
* **실시간 가열 투과전자현미경(In-situ Heating TEM):** 시료를 전자현미경 안에서 가열하면서 원자·나노구조 변화를 실시간으로 관찰할 수 있는 첨단 분석 장비



▲ GIST 중앙기기연구소 첨단분석센터 조용륜 박사가 투과전자현미경(TEM)을 이용해 시료의 미세구조를 관찰하며 분석하고 있다.

그 결과, 450 °C에서 열처리한 루테튬 박막의 **평균 결정립 크기는 약 13 nm(나노미터)에서 91.7 nm로 약 7배 커졌으며, 결정들이 한 방향으로 정렬된 정도를 나타내는 결정 배향도는 99.3 %에 달했다.**

이처럼 결정의 크기를 키우고 방향을 정렬한 결과 **전기적 성능도 크게 향상됐다.** 두께 8 nm의 루테튬 박막에서 **11.2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (마이크로옴 센티미터)의 낮은 비저항을 구현했으며, 이는 탄소 촉진제를 사용하지 않은 루테튬보다 29.0% 낮은 수준이다.**



▲ 탄소 촉진제(C-promoter)에 의한 루테튬(Ru) 결정립의 성장과 결정 방향 정렬 과정. (1단계) 증착 직후에는 작은 Ru 결정립들이 서로 다른 방향으로 배열, (2단계)

초기 열처리 과정에서 탄소가 결정립계로 이동해 네트워크를 형성하고, 휘발성 물질이 빠져나가면서 결정립 내부와 경계에서 원자가 이동할 수 있는 일시적인 공간인 자유 부피(free volume)가 만들어진다. 이로 인해 원자 이동이 더 쉽게 일어나면서 준안정한 중간 상태(metastable intermediate state)를 형성한다. (3단계) 결정립이 성장하고 결정 방향이 재배열되면서, 최종적으로 특정한 원자 배열 방향인 ' $\langle 001 \rangle$ 방향'으로 정렬된 루테늄 박막이 형성된다.

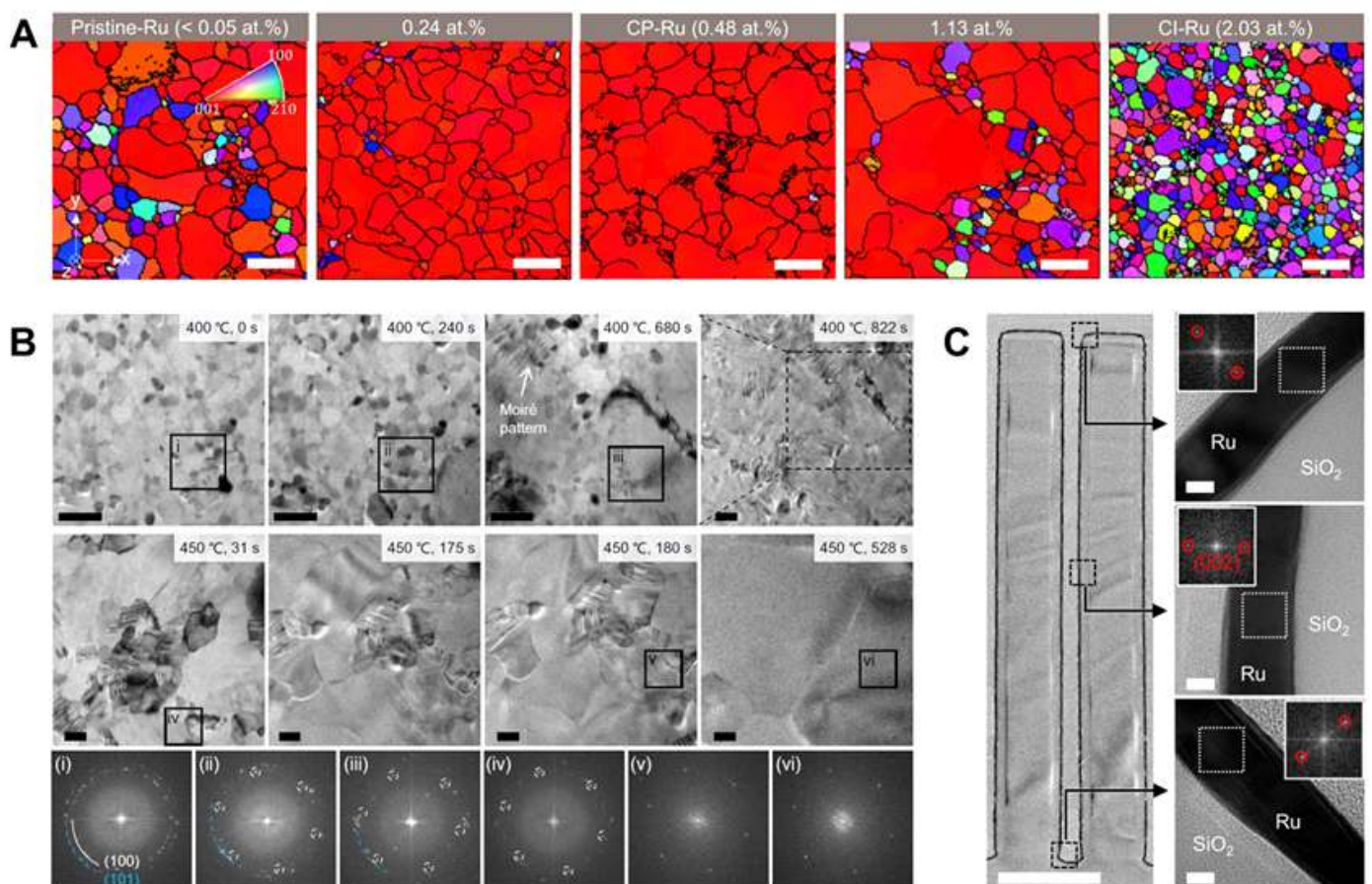
특히 실제 초미세 배선 구조로 제작했을 때에는 배선 저항이 탄소 촉진제를 사용하지 않은 루테늄 대비 45.4% 감소했으며, 선폭이 2 nm 수준으로 작아진 차세대 반도체 배선에 요구되는 전기적 성능을 충족했다.

공동연구팀은 나아가 복잡한 3차원 반도체 구조에서도 이 기술을 적용할 수 있음을 확인했다.

종횡비*가 33대 1에 이르는 좁고 깊은 홈(트렌치) 구조에 12 nm 두께의 루테늄을 입힌 결과, 홈의 측면과 바닥까지 99.1%의 높은 균일도로 루테늄이 코팅됐다. 또한 복잡한 구조의 측면과 바닥에서도 루테늄 결정의 방향이 유지되는 것을 확인했다.

이는 이번 기술이 차세대 3차원 메모리와 2 nm급 이하 초미세 반도체 배선 등 복잡한 구조의 고집적 소자에 적용될 가능성을 보여준다.

* 종횡비(aspect ratio): 구조의 깊이를 너비로 나눈 값이다. 값이 클수록 좁고 깊은 구조여서 내부를 균일하게 코팅하기 어렵다.



▲ 탄소 촉진에 따른 루테늄(Ru) 결정립의 성장·정렬 과정과 3차원 구조 적용 결과.

(A) 탄소 함량에 따른 루테늄 박막의 결정 방향을 비교한 이미지로 각 색은 서로 다른 결정 방향을 나타내며, 적정량의 탄소를 첨가한 경우 결정립이 크게 성장하고 특정 방향으로 정렬되는 것을 확인했다. (B) 실시간 가열 투과전자현미경으로 관찰한 탄소 촉진 루테늄(CP-Ru) 박막의 변화 과정으로 열처리가 진행됨에 따라 작은 결정립이 성장하고 결정 방향이 재배열되는 과정을 시간에 따라 직접 추적했다. (C) 종횡비 33, 깊이 5.1마이크로미터(μm)의 좁고 깊은 3차원 구조에 형성한 루테늄 박막. 복잡한 구조의 여러 위치에서도 루테늄 박막이 균일하게 형성되고 결정 방향이 유지되는 것을 확인했다.

조용륜 박사는 “이번 연구는 **금속 속 미량 원소**를 단순히 제거해야 하는 불순물이 아니라, 결정립의 이동과 정렬을 유도한 뒤 빠져나가는 **일시적 촉진제로 활용**할 수 있음을 보여줬다”며 “특히 실시간 투과전자현미경 분석을 통해 **열처리 과정에서 일어나는 결정의 성장과 재배열을 추적**함으로써, **차세대 반도체 배선 소재의 구조와 전기적 성능을 함께 제어할 수 있는 새로운 설계 원리**를 제시했다”고 말했다.

GIST 중앙기기연구소 임현섭 소장(화학과 교수)은 “이번 연구는 **중앙기기연구소 연구원들이 자신의 전문성을 바탕으로 외부 연구진과 자유롭게 협력하며 새로운 연구를 수행**할 수 있도록 장려해 온 연구 문화가 만들어낸 성과”라며 “앞으로도 연구원들이 각자의 전문성과 연구 역량을 바탕으로 국내외 연구기관 및 산업계와 적극적으로 협력할 수 있도록 지원해 **세계적 수준의 연구 성과를 지속적으로 창출**해 나가겠다”고 말했다.

조용륜 박사가 삼성전자 SAIT 임용철 박사, 하윤후 박사, 이영민 연구원과 공동1저자로 참여한 이번 연구는 삼성전자 SAIT의 지원을 받았다.

연구 결과는 《사이언스》에 **8월 13일 온라인으로 게재**됐다.

논문 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Science (Impact Factor: IF 47.3, 2025년 기준)
- 논문명 : Promoter-driven recrystallization affording highly textured ruthenium
- 저자 정보 : 임용철(공동1저자·교신저자, 삼성전자 SAIT), 하윤후(공동1저자, 삼성전자 SAIT), 이영민(공동1저자, 삼성전자 SAIT), 조용륜(공동1저자, GIST), 이정엽(공동저자, 삼성전자 SAIT), 조은형(공동저자, 삼성전자 SAIT), 채병규(공동저자, 삼성전자 SAIT), 이재우(공동저자, 삼성전자 SAIT), 조기영(공동저자, 삼성전자 SAIT), 박성용(공동저자, 삼성전자 SAIT)

SAIT), 변경은(공동저자, 삼성전자 SAIT), 김지환(공동저자, MIT), 김
상원(공동저자, 삼성전자 SAIT)