

“눈에는 같은 색, 확대하면 다른 지문”

GIST-KAIST, '빛의 지문' 담은 나노 광보안소자 개발

- GIST 정현호·KAIST 송영민 교수 공동연구팀, 육안으로 보이는 색과 현미경으로 확인할 수 있는 무작위 '빛의 지문'을 하나의 소자에 구현
- 지름 약 5cm 반도체 웨이퍼에 서로 다른 광학 지문 2만 2,500개 구현... 5,000회 반복 마찰·물 분사·120℃ 고온에서도 광학 지문 유지 확인
- 국제학술지《Advanced Science》 게재



▲ GIST-KAIST, 공동연구팀 단체사진. (왼쪽부터) GIST 전기전자컴퓨터공학과 김규린 석박사통합과정생, 마지영 석사과정생, 김주환 석박사통합과정생, 이주형 석박사통합과정생, 권흥찬 연구원, KAIST 전기및전자공학부 송영민 교수, GIST 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 전기컴퓨터공학과 정현호 교수와 한국과학기술원(KAIST) 전기및전자공학부 송영민 교수 공동연구팀이 겉으로는 같은 색을 나타내면서도, 현미경으로 확대하면 소자마다 서로 다른 '빛의 지문'을 보여주는 나노 광학 보안소자를 개발했다고 밝혔다. 제품의 외관을 유지하면서 고유한 인증정보를 함께 구현할 수 있어 위조 방지와 정품 인증에 활용할 수 있는 기술이다.

제품 표면에서는 일정한 색이나 로고를 나타내면서, 그 안에는 제품마다 다른 광학정보를 숨겨둘 수 있다. 구리 나노입자의 크기와 위치가 소자마다 조금씩 달라지면서 만들어지는 서로 다른 빛의 무늬를 사람마다 다른 지문처럼 고유한 인증정보로 활용하는 방식이다.

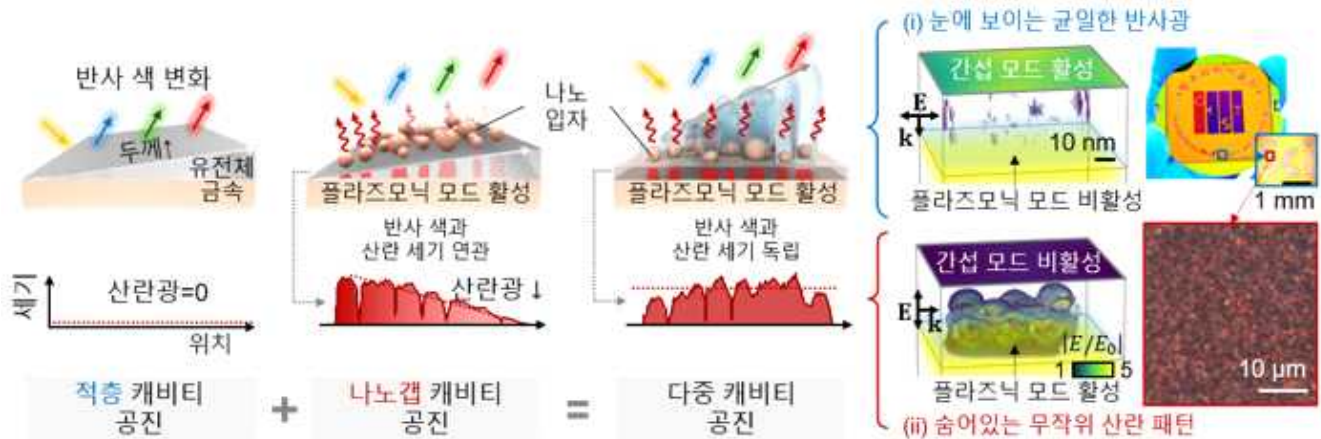
기존 광학 보안기술에서는 눈에 보이는 색을 균일하게 유지하면서 복제하기 어려운 무작위 보안정보를 함께 구현하기가 어려웠다.

눈에 보이는 색과 무작위 광학정보가 같은 미세구조의 영향을 받는 경우가 많아, 서로 다른 광학 지문을 만들어내는 능력을 높일수록 색이 불균일해지고, 반대로 색을 균일하게 만들면 광학 지문의 다양성이 떨어지는 한계가 있었다.

공동연구팀은 이를 해결하기 위해 눈에 보이는 색과 숨겨진 광학 지문을 서로 다른 구조가 각각 담당하도록 설계했다. 여러 층으로 쌓아 빛의 반사를 조절하는 '적

층 캐비티'는 일정한 색을 만들고, 구리 나노입자와 아래쪽 구리층 사이의 아주 작은 틈에서 형성되는 '나노갭 캐비티'는 빛을 다르게 산란시켜 소자마다 고유한 광학 지문을 만든다.

연구팀은 두 캐비티를 위아래로 결합한 '다중 캐비티 공진' 구조를 구현해 두 광학 특성의 상호 영향을 줄였다. 실제로 색을 결정하는 위쪽 산화하프늄(HfO_2) 층의 두께를 바꿔 녹색·노란색·주황색·보라색 등 서로 다른 색을 만들었을 때도 숨겨진 광학 지문은 거의 그대로 유지됐다.



▲ 눈에 보이는 색과 숨겨진 '빛의 지문'을 하나의 소자에 구현한 원리. 여러 층으로 쌓은 '적층 캐비티'는 눈에 보이는 색을 만들고, 불규칙하게 놓인 구리 나노입자 사이의 '나노갭 캐비티'는 소자마다 서로 다른 광학 지문을 만든다. 연구팀은 이 두 구조를 결합한 '다중 캐비티 공진' 구조를 이용해 눈에 보이는 색이나 로고 안에 고유한 광학 지문을 숨길 수 있도록 했다.

광학 지문은 구리 입자의 크기와 위치가 소자마다 미세하게 달라지는 무작위성을 이용한다. 연구팀은 구리 입자가 촘촘하면서도 불규칙하게 놓이도록 해 작은 면적에서도 서로 다른 광학 지문이 만들어지도록 했다.

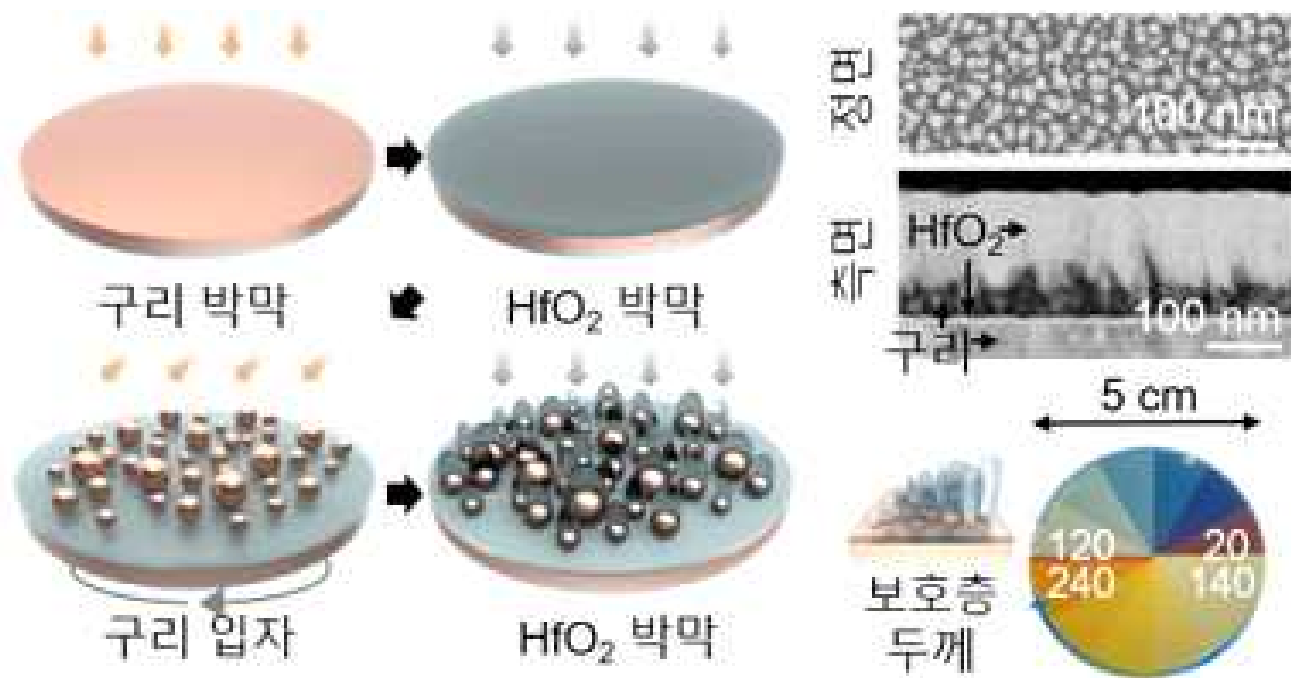
제작 과정에서는 구리와 산화하프늄(HfO_2) 등 필요한 물질을 진공 상태에서 차례로 얇게 쌓아 전체 구조를 연속적으로 제작했다. 복잡한 미세 패턴을 하나하나 새기는 공정 없이도 넓은 면적에 구현할 수 있어 대면적·반도체 공정과의 호환 가능성도 갖췄다.

연구팀은 지름 약 5cm의 반도체 웨이퍼 하나에 가로 150개, 세로 150개씩 총 2만 2,500개의 광학 보안소자를 제작했다. 웨이퍼 전체는 육안으로 거의 같은 색으로 보였지만, 각각의 소자를 현미경으로 관찰하면 서로 다른 무작위 광학 지문이 나타났다.

이 가운데 500개의 광학 지문을 무작위로 골라 비교한 결과, 서로 다른 지문은 뚜렷하게 구별됐으며 같은 지문을 반복해서 측정했을 때는 안정적으로 다시 인식할

수 있음을 확인했다.

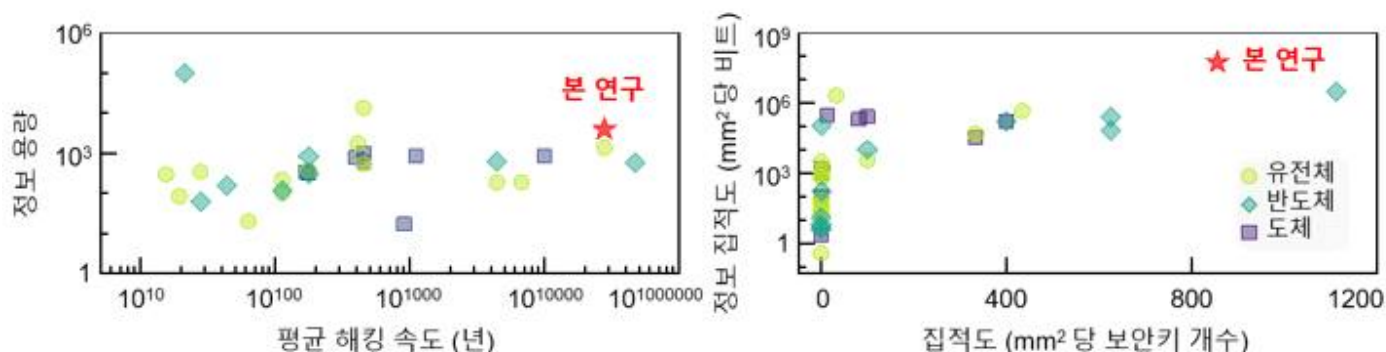
또한 기존 광학 보안기술과 비교한 결과, **좁은 면적에 많은 인증정보를 담는 능력**과 **무작위 광학 지문의 다양성을 함께 확보**한 것으로 나타났다.



▲ **물질을 차례로 쌓아 넓은 면적에 광학 보안소자를 만드는 과정.** 구리와 산화하프늄(HfO_2)을 진공 상태에서 차례로 얇게 쌓아 색을 만드는 층과 광학 지문을 만드는 불규칙한 구리 나노입자 구조를 연속해서 제작한다. 별도의 복잡한 미세 가공 없이 지름 약 5cm의 기판 전체에 제작할 수 있으며, 표면에 보호층을 추가해 외부 자극에 대한 내구성을 높였다.

공동연구팀은 실제 사용 환경을 고려해 **반복적인 마찰과 물, 고온에 노출된 뒤에도 색과 광학 지문이 유지되는지** 확인했다.

소자 표면을 **5,000회 반복해서 문지른 뒤에도 광학 지문이 인증 기준을 유지**했으며, 육안으로 보이는 색의 변화도 3.5% 미만이었다.



▲ **기존 광학 보안기술과 비교한 보안정보의 다양성과 집적 성능.** (왼쪽) 기존 연구들과 서로 다른 보안정보를 얼마나 다양하게 만들 수 있는지, (오른쪽) 같은 면적에 얼마나 많은 보안정보를 담을 수 있는지를 비교한 결과다. 빨간 별표로 표시된 이번 연구는 높은 수준의 무작위성을 유지하면서 작은 면적에 많은 보안정보를 담을 수

있음을 보여준다.

또한 강한 물줄기를 최대 5분간 분사한 뒤에도 광학 지문을 다시 판독할 수 있었고, 120°C의 고온에서도 광학 지문이 인증 기준을 유지했다. 연구팀은 고온에서 진행한 가속시험 결과를 바탕으로 반사 특성을 기준으로 20°C에서 약 10.7년의 수명을 확보할 수 있을 것으로 추정했다.

정현호 교수는 “눈에 보이는 색과 소자마다 무작위로 만들어지는 숨은 광학정보를 하나의 표면에 함께 구현하면서 서로 미치는 영향을 줄였다는 데 의미가 있다”며 “제품의 외관을 유지하면서 고유한 인증정보를 함께 넣을 수 있어 위조 방지와 정품 인증을 위한 광학 보안기술에 활용될 것으로 기대한다”고 말했다.

GIST 전기전자컴퓨터공학과 정현호 교수와 KAIST 전기및전자공학부 송영민 교수가 지도하고, GIST 전기전자컴퓨터공학과 김규린 석박사통합과정생이 제1저자로 참여한 이번 연구는 ▲과학기술정보통신부·한국연구재단 신진연구사업 ▲교육부·한국연구재단 박사과정생연구장려금지원사업 ▲2026년도 GIST 개발과제 ‘Global Value-Up 10X 사업’의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지 《Advanced Science》에 2026년 9월 27일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과의 기술사업화 및 산업적 활용에 관심 있는 기업·기관의 문의를 창업혁신진흥원 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 받고 있다고 밝혔다.

논문 정보

○ 논문명, 저자정보

- 저널명 : Advanced Science (IF: 14.1, Multidisciplinary Science 분야 상위 9.7% 2025년 기준)
- 논문명 : Covert optical fingerprints within overt structural colors via cascaded cavity resonances
- 저자 정보 : 김규린(제1저자, GIST 전기전자컴퓨터공학과 석박사통합과정생), 마지영(공저자, GIST 전기전자컴퓨터공학과 석사과정생), 김주환(공저자, GIST 전기전자컴퓨터공학과 석박사통합과정생), 이주형(공저자, GIST 전기전자컴퓨터공학과 석박사통합과정생), 권흥찬(공저자, GIST 전기전자컴퓨터공학과 연구원), 송영민(공동교신저자, KAIST 전기및전자공학부 교수), 정현호(공동교신저자, GIST 전기전자컴퓨터공학과 교수)

터공학과 교수)