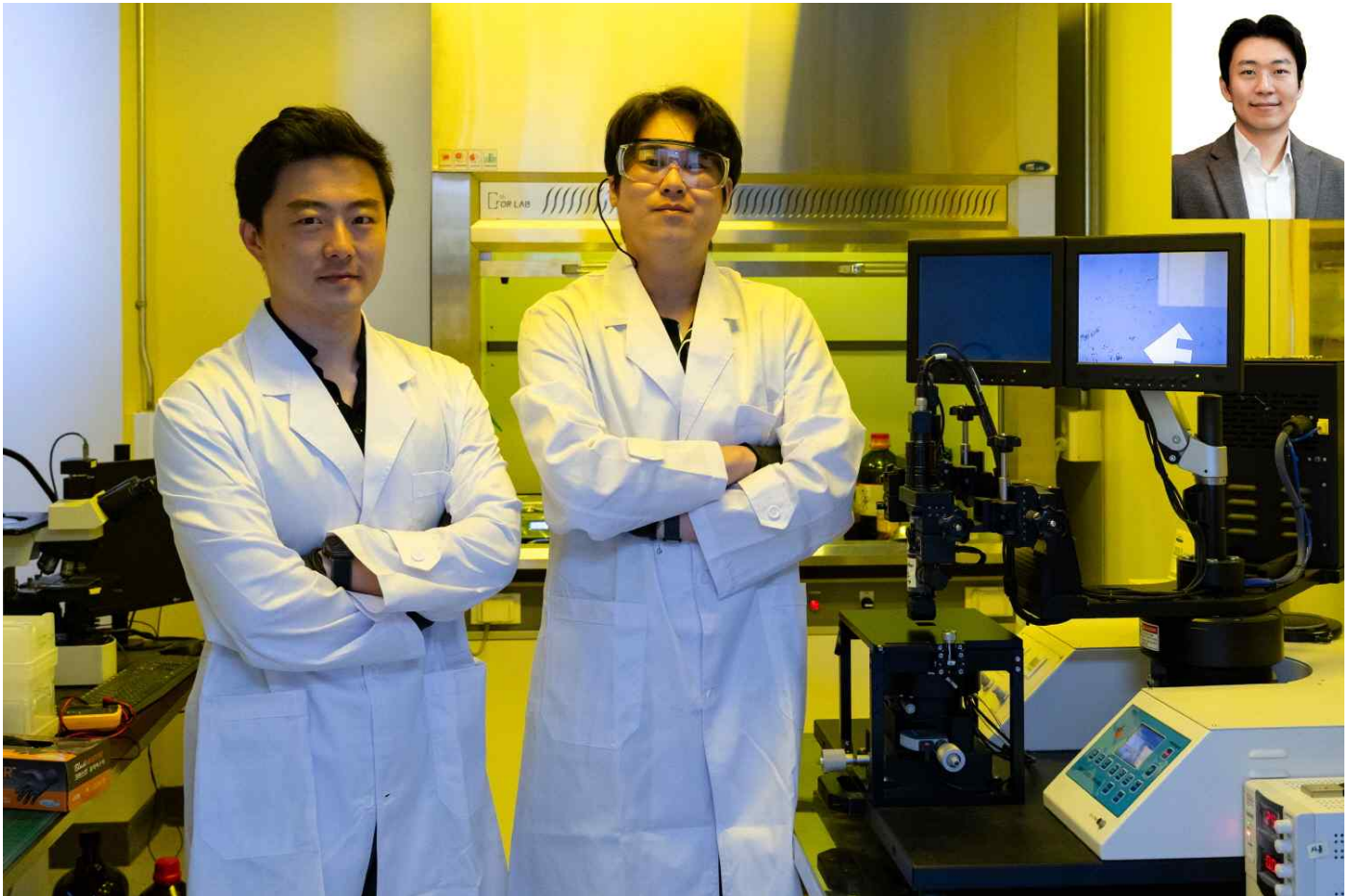


GIST-DGIST, '적색광·근적외선' 따로 읽는 무기 반도체 웨어러블 광센서 개발

- GIST 이한열 교수팀·DGIST 이태훈 교수팀 2차원 반도체·실리콘 층층이 쌓아 적색광·근적외선 구별
- 별도 광학 필터 없이 두 빛 구별하고 전기 신호도 높여... 광전류 최대 9.82배 향상
- 손목 부착형 센서로 심박수·혈중 산소포화도 변화 실시간 측정... 국제학술지《eScience》게재



▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 이한열 교수, 전북대학교 신소재공학부 김정현 박사과정생, (우측 상단) DGIST 에너지공학과 이태훈 교수

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 신소재공학과 이한열 교수 연구팀이 대구경북과학기술원(DGIST) 에너지공학과 이태훈 교수 연구팀과 공동으로, 하나의 작은 센서에서 서로 다른 파장의 빛을 구별해 감지할 수 있는 무기 반도체 기반 웨어러블 광센서를 개발했다고 밝혔다.

공동연구팀은 원자 몇 층 수준의 매우 얇은 2차원 반도체와 실리콘을 위아래로 쌓아 '적색광'과 '근적외선' 신호를 각각 구분해 감지하면서 빛에 대한 전기적 반응도 높였다.

개발한 광센서를 손목에 부착해 심박수와 혈중 산소포화도(SpO_2)*의 변화를 실시간으로 측정하며 웨어러블 생체신호 센서로서의 활용 가능성을 확인했다.

* 혈중 산소포화도(SpO_2): 혈액 속 헤모글로빈 가운데 산소와 결합한 헤모글로빈의 비율을 나타내는 지표이다.

스마트워치에서 심박수나 혈중 산소포화도를 측정할 때는 피부에 빛을 비추 뒤, **혈액의 양과 산소 상태에 따라 달라지는 반사광을 센서로 감지한다.**

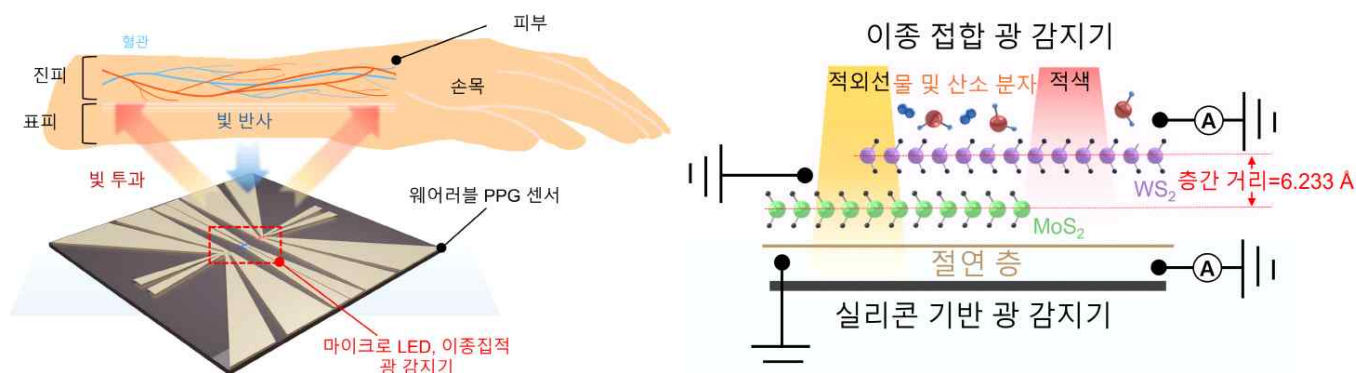
특히 혈중 산소포화도는 산소와 결합한 헤모글로빈과 그렇지 않은 헤모글로빈이 **‘적색광’과 ‘근적외선’을 서로 다르게 흡수하는 성질**을 이용해 측정하기 때문에, 두 빛의 반사 신호가 섞이지 않도록 각각 구별해 감지하는 것이 중요하다.

반면 실리콘 같은 무기 반도체는 안정적이고 광센서 성능도 우수하지만, **서로 다른 무기 반도체를 여러 층으로 쌓으려면 결정 구조를 정밀하게 맞춰야 해** 하나의 작은 센서에서 여러 파장의 빛을 구별해 감지하는 구조를 만들기 어려웠다.

연구진은 이러한 한계를 해결하기 위해 **종이처럼 얇게 겹쳐 쌓을 수 있는 ‘2차원 반도체’에 주목했다.**

‘2차원 반도체’는 일반적인 무기 반도체와 달리 서로의 결정 구조를 정밀하게 맞추지 않아도 다른 반도체와 층층이 결합할 수 있다.

공동연구팀은 **2차원 무기 반도체인 이황화텅스텐(WS_2)과 이황화몰리브덴(MoS_2)을 겹쳐 하나의 광검출기로 만든 뒤, 이를 실리콘 광검출기 위에 수직으로 쌓았다.**



▲ **2차원 반도체와 실리콘을 수직으로 쌓은 웨어러블 광센서의 구조와 작동 원리.**
(왼쪽) 손목에 부착한 센서에 적색광과 근적외선을 비추 뒤 반사되는 빛을 감지해 생체신호를 측정하는 웨어러블 센서의 개념도이다. (오른쪽) 위쪽의 이종 접합 광검출기는 두 종류의 2차원 반도체인 이황화텅스텐(WS_2)과 이황화몰리브덴(MoS_2)을 겹쳐 만든 것으로 적색광에 강하게 반응하고, 근적외선은 이 층을 통과해 아래쪽 실리콘 광검출기가 감지한다. 두 광검출기 사이의 절연층은 각각의 전기 신호가 서로 섞이는 것을 막아 별도의 광학 필터 없이 두 종류의 빛을 구별해 감지할 수 있도록 한다.

이렇게 만든 위쪽 2차원 반도체 광검출기는 적색광에 강하게 반응하고, 근적외선은 위쪽 2차원 반도체층을 통과해 아래쪽 실리콘 광검출기가 감지한다.

두 광검출기 사이에는 전기가 통하지 않는 절연층을 넣어 적색광과 근적외선에 대

한 신호가 서로 섞이지 않고 각각 측정되도록 했다. 이를 통해 별도의 광학 필터 없이 두 종류의 빛을 구별해 감지할 수 있었다.

연구진은 두 종류의 빛을 구별하는 것뿐 아니라, 센서가 빛을 받아 만들어내는 전기 신호도 키웠다. 두 2차원 반도체를 옮겨 쌓는 과정에서 생기는 원자 수준의 미세한 결함을 활용한 것이다.

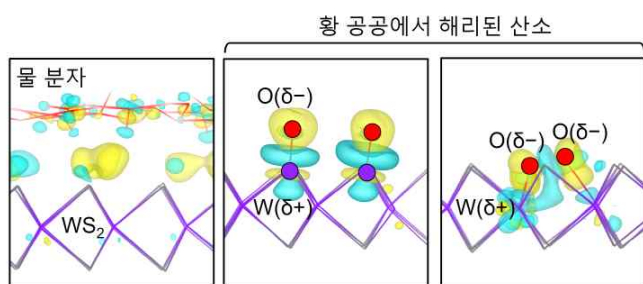
실험과 계산 결과, 적절한 열처리를 하면 이 미세한 결함과 주변 공기 분자의 상호작용이 달라지면서 반도체의 전자 상태가 변하고, 빛에 대한 반응이 커지는 것으로 나타났다.

그 결과 적색광을 받아 만들어내는 전기 신호인 '광전류'는 단일층 반도체 광검출기보다 최대 9.82배 높아졌으며, 광검출기에 들어온 빛의 양(W)에 비해 얼마나 큰 전류(A)를 만들어내는지를 나타내는 '반응도'는 최대 97 암페어 퍼 와트(A/W)를 기록했다.

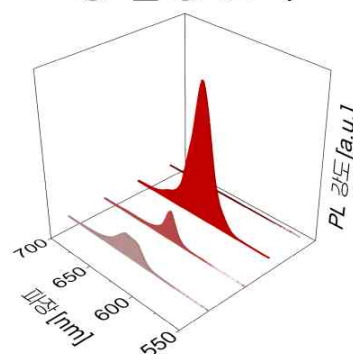
공동연구팀은 개발한 광센서가 실제로 사람의 생체신호를 읽어낼 수 있는지 확인하기 위해 적색광과 근적외선을 내는 초소형 LED와 결합해 손목 부착형 센서를 제작했다.

손목에 센서를 부착한 결과, 심장 박동에 따른 혈류 변화를 연속적으로 감지했으며, 혈류를 일시적으로 차단했다가 회복시키는 실험에서도 그 변화를 뚜렷하게 포착했다.

분자 동역학 시뮬레이션



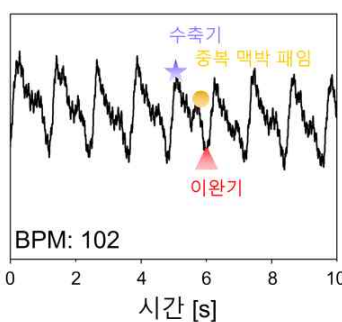
광 발광 분석



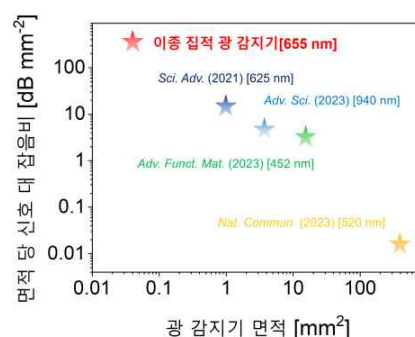
광 반응성 분석



맥박 신호 분석



신호 대 잡음 비 비교



▲ 2차원 반도체 광검출기의 성능 향상 원리와 웨어러블 생체신호 측정 결과. 2차원 반도체를 옮겨 쌓는 과정에서 생긴 미세한 결함과 주변 공기 분자의 상호작용을 조절해 빛에 대한 전기적 반응을 높인 원리와 실험 결과이다. 개발한 센서는 적색광과 근적외선에 각각 반응했으며, 손목에 부착했을 때 심장 박동에 따른 혈류 변화를 연속적으로 감지했다. 또한 센서 면적을 고려한 '신호 대 잡음비'가 논문에서 비교한 기존 웨어러블 광검출기보다 높은 성능을 보였다.

특히 적색광의 '신호 대 잡음비(SNR)*'는 14.5 데시벨(dB)로 기존 실리콘 광검출기보다 221% 향상됐으며, 센서 면적을 고려한 '신호 대 잡음비'도 논문에서 비교한 기존 웨어러블 광검출기의 23배에 달했다.

적색광과 근적외선에서 각각 얻은 신호로 **혈중 산소포화도(SpO₂)의 변화도 실시간으로 추정**했으며, 호흡을 멈추자 낮아지고 다시 호흡하자 회복되는 변화를 확인했다.

* **신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)**: 측정하려는 신호가 주변 잡음에 비해 얼마나 뚜렷한지를 나타내는 값으로 높을수록 원하는 신호를 선명하게 구별할 수 있다.

신소재공학과 이한얼 교수는 "이번 연구는 서로 다른 무기 반도체를 수직으로 결합해 하나의 작은 센서에서 서로 다른 파장의 빛을 구별하는 동시에, 광전류까지 높일 수 있음을 보여줬다는 데 의미가 있다"며 "향후 심박수와 혈중 산소포화도 등 다양한 생체신호를 지속적으로 측정하는 웨어러블 헬스케어 센서 개발에 활용될 것으로 기대한다"고 말했다.

GIST 신소재공학과 이한얼 교수와 DGIST 에너지공학과 이태훈 교수가 지도하고 전북대학교 신소재공학부 김정현 박사과정생이 제1저자로 참여한 이번 연구는 ▲과학기술정보통신부·한국연구재단 ▲광주광역시·광주RISE센터 ▲교육부·한국연구재단 및 포스코청암재단 포스코사이언스펠로십의 지원을 받았다.

연구 결과는 재료과학 분야 국제학술지 《eScience》에 2026년 8월 11일 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 : eScience

(Impact factor: IF: 52.9, JCR 상위 0.5%, 2026년 기준)

- 논문명 : Spectrally Decoupled, Signal-Boosted Photodetection via Vertical 2D/3D Heterointegration for Non-Invasive Biosignal Monitoring

- 저자 정보 : 김정현(제1저자, 전북대 신소재공학부), 윤순주(공동저자, 전북대 신소재공학부), 이상엽(공동저자, 포항공과대학교(POSTECH) 기계공학과), 조창규(공동저자, 전북대 신소재공학부), 조주형(공동저자, 한국표준과학연구원(KRISS) 바이오의료표준센터), 김석(공동저자, POSTECH 기계공학과), 이윤경(공동저자, 전북대 신소재공학부), 이태훈(공동교신저자, DGIST 에너지공학과), 이한열 (대표교신저자, GIST 신소재공학과, 차세대에너지연구소, 반도체특성화대학원)