

“빛을 더 오래 붙잡아 더 많은 전기 만든다”

GIST-전북대, 배터리 없이 작동하는 차세대 '자가 구동 광센서' 개발

- GIST 신소재공학과 이한얼 교수, 전북대 박광욱 교수팀과 함께 반도체 이종 접합과 빛을 더 오래 머물게 하는 미세구멍 구조 결합해 외부 전원 없이 작동하는 자가 구동 광센서 구현
- 강한 내부 전기장 형성과 전하 유지 시간 약 1.8배 향상으로 광 감지 성능 높여... 상용 센서 구동 보조 실증 성공으로 초저전력 IoT·웨어러블 기기 활용 기대
- 국제학술지《Small Structures》게재



▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 이한얼 교수(차세대에너지연구소 겸무), 전북대학교 신소재공학부 전자재료공학전공 박광욱 교수, 재료공학과 김정현 박사과정생, 황주찬 박사과정생

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 신소재공학과 이한얼 교수(차세대에너지연구소 겸무)가 전북대학교 연구팀과 공동으로, 서로 다른 반도체를 결합해 내부에 강한 전기장을 형성함으로써 외부 전원 없이 작동하는 자가 구동 광센서를 개발했다고 밝혔다.

이번 연구는 소재의 성분 비율과 빛을 가두는 표면 구조를 함께 제어해 광 감지 성능을 높인 것으로, 차세대 자가 구동 광센서의 새로운 설계 방향을 제시했다.

빛을 감지해 전기 신호로 바꾸는 광센서는 사물인터넷(IoT), 웨어러블 기기, 드론 등 다양한 분야에서 활용된다. 특히 별도의 외부 전원 없이 빛 자체를 에너지원으로 활용하는 '자가 구동(Self-powered) 광센서'는 배터리 교체가 어렵거나 장시간 작동해야 하는 소형 전자기기의 전력 소비를 줄일 수 있어 주목받고 있다.

'자가 구동 광센서'가 제대로 작동하려면 빛을 받아 생성된 전자와 정공*을 외부 전압 없이 빠르게 분리하고 이동시켜야 한다. 이를 위해 서로 다른 반도체를 접합해 두 소재의 경계에서 자연스럽게 전기장이 형성되도록 하는 '이종 접합' 구조가 활용된다.

그러나 기존 이중 접합 구조는 서로 다른 소재를 맞붙이는 과정에서 결함이 생길 수 있고, 내부 전기장이 충분하지 않거나 들어온 빛을 효과적으로 흡수하지 못하면 생성된 전하가 다시 결합해 사라지면서 센서 성능이 떨어지는 한계가 있다.

* **정공:** 반도체가 빛을 흡수하면 전자가 에너지를 얻어 이동하고, 전자가 빠져나간 자리에는 양전하처럼 작용하는 빈자리가 생기는데, 이를 '정공'이라고 한다. 전자와 정공을 효과적으로 분리해 이동시키는 것이 광센서의 성능을 좌우한다.

공동연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 매장량이 풍부한 **아연(Zn)과 주석(Sn), 질소(N)**로 이루어진 차세대 반도체 '**아연주석질화물(ZnSnN₂, ZTN)**'에 주목했다.

'아연주석질화물(ZTN)'은 빛을 흡수해 전하를 만들어낼 수 있고, '**질화갈륨(GaN)**'과 결정 구조가 유사해 두 소재를 결합한 이중 접합 구조를 만들기에 유리하다. 다만 외부 전원 없이 작동하려면 '**아연주석질화물**'의 전기적 특성을 정밀하게 조절해 두 소재의 접합면에 충분히 강한 내부 전기장을 형성해야 한다.

* **아연 주석 질화물(ZnSnN₂):** 지각에 풍부하게 존재하는 원소들로 구성되어 있으며, 태양광 스펙트럼에서 높은 광흡수 계수를 가져 차세대 친환경 반도체 소재로 주목받고 있다.

먼저 '**아연주석질화물**'을 얇은 막인 박막을 만드는 공정 조건을 조절해 물질의 성분 비율과 전기가 흐르는 데 관여하는 전하 운반자의 농도를 정밀하게 조절하고, 전기적 특성을 최적화했다.

이어 이렇게 최적화한 '**아연주석질화물**'과 결정 구조는 비슷하지만 전기적 성질은 다른 '**질화갈륨**'을 접합하자 두 반도체의 경계에 빛으로 생성된 전자와 정공을 서로 분리해 이동시키는 강한 내부 전기장(88 kV/cm)이 형성됐다. 이에 따라 외부에서 별도의 전압을 가하지 않아도 빛을 전기 신호로 바꿀 수 있는 광센서를 구현했다.

연구진은 여기서 한 단계 더 나아가, 들어오는 빛을 더욱 효과적으로 활용할 수 있도록 '**아연주석질화물**' 표면에 미세 구멍(Micro-hole)을 규칙적으로 형성했다.

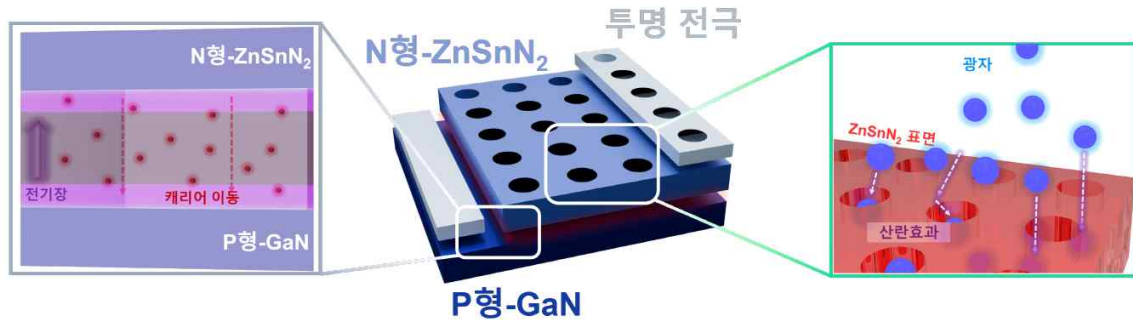
평평한 표면에서는 흡수되지 않은 빛의 일부가 반사되거나 빠져나가지만, 미세 구멍에서는 빛이 구멍의 옆면과 바닥에서 여러 차례 산란·반사되면서 소재 내부에 더 오래 머물게 된다.

그 결과 빛을 받아 생성된 전하 운반자가 유지되는 시간이 평면 구조의 3.5나노초(ns)에서 최대 6.2나노초로 약 1.8배 늘어났다. 이는 10억분의 1초 단위의 매우 짧은 시간 동안이라도 전하를 더 오래 유지하도록 해 광 감지 성능을 높인 결과다.

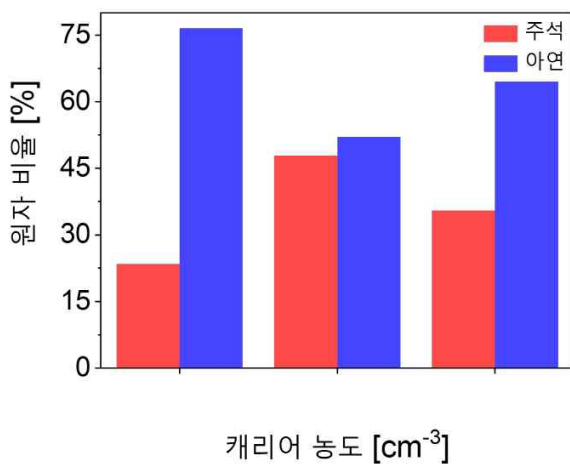
이러한 '**소재 조성 제어**'와 '**빛을 가두는 미세구조**'의 결합을 통해 연구팀은 외부 전압을 가하지 않아도 낮은 빛 세기에서도 안정적으로 빛을 감지하는 자가 구동 광

센서를 구현했다.

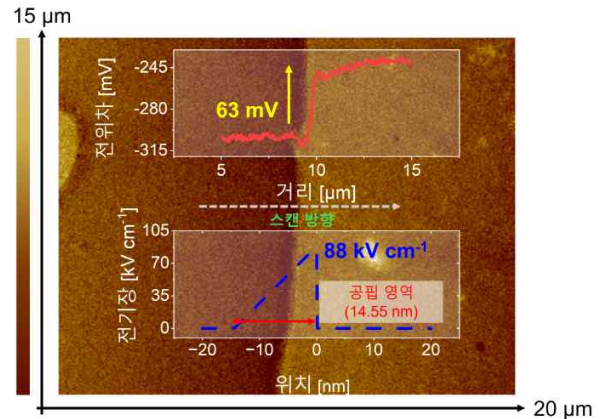
ZnSnN₂/GaN 이중 접합 기반 무 전원 광 센서



도핑 농도 및 화학양론 분석



전기장 분석



▲ 아연주석질화물-질화갈륨 이중 접합 기반 자가 구동 광센서의 구조와 내부 전기장 형성 원리. (위쪽) 전기적 성질이 다른 '아연주석질화물'과 '질화갈륨'을 접합한 광센서의 구조와 빛에 의해 생성된 전자와 정공이 분리되는 과정을 나타낸다. (아래쪽) 공정 조건에 따른 아연·주석의 성분 비율과 전하 농도 분석 결과(아래 왼쪽), 두 반도체의 접합면에 형성된 88 kV/cm의 내부 전기장 분석 결과(아래 오른쪽)를 보여준다.

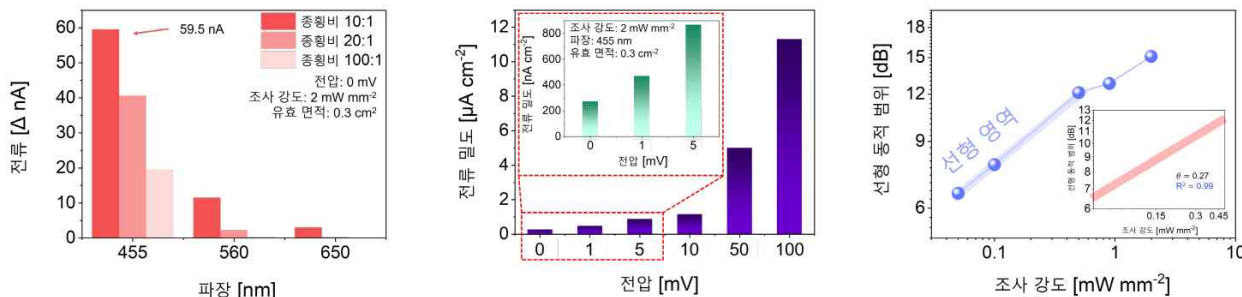
공동연구팀은 실제 활용 가능성을 확인하기 위해 개발한 광센서를 상용 온·습도 센서와 연결했다. 그 결과, 상용 센서가 작동하기에는 부족한 2.2 V의 외부 전압을 공급한 상태에서 광센서가 빛을 받아 약 0.6 V의 광전압을 생성했으며, 이를 외부 전원과 함께 활용해 센서의 구동을 구현하는 데 성공했다.

이는 주변의 빛을 전기에너지로 바꿔 외부에서 공급해야 하는 전력을 줄일 수 있음을 실제 기기로 확인한 결과로, 향후 초저전력 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 기기 등에 활용될 것으로 기대된다.

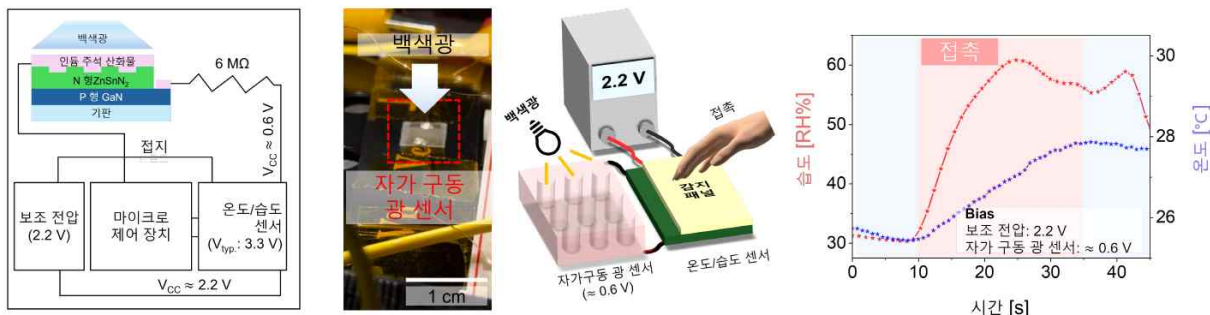
이한열 교수는 "이번 연구는 서로 다른 반도체를 단순히 접합하는 데 그치지 않고, 소재를 만드는 단계부터 빛이 이동하는 경로까지 함께 설계해야 자가 구동 성능을 높일 수 있음을 보여줬다"며 "앞으로 배터리 의존도를 낮출 수 있는 초저전력 센서

빛 소형 전자기기용 에너지 변환 소자로 활용 범위를 넓혀가겠다"고 말했다.

저조도/무 전원 환경 동작 특성 확인



자가 구동 광 센서 기반 온/습도 모니터링 시스템 시연



▲ 자가 구동 광센서의 저전압-저조도 동작 특성과 상용 온-습도 센서 구동 보조 실증. (위쪽) 개발한 광센서가 외부 전압을 가하지 않은 상태에서도 빛의 파장과 세기에 따라 안정적으로 전기 신호를 생성하는 특성을 보여준다. (아래쪽) 외부에서 공급한 2.2 V에 광센서가 빛으로 생성한 약 0.6 V의 광전압을 보태, 상용 온-습도 센서가 실시간으로 온도와 습도 변화를 측정하도록 한 실험 결과다.

GIST 신소재공학과 이한열 교수(차세대에너지연구소 겸무)와 전북대학교 신소재공학부 전자재료공학전공 박광욱 교수가 지도하고, 재료공학과 김정현 박사과정생, 황주찬 박사과정생이 수행한 이번 연구는 GIST 차세대에너지연구소, 중소벤처기업부 기술개발사업, 한국연구재단 정부 지원 과제, 교육부·한국연구재단 4단계 두뇌한국 21 사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 재료과학 분야 국제학술지 《스몰 스트럭처스(Small Structures)》에 2026년 7월 31일 온라인으로 게재됐으며, 2026년 8월호에 수록됐다.

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

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Small Structures

(Impact factor: IF: 11.3, JCR 상위 10.3%, 2024년 기준)

- 논문명 : Self-Powered ZnSnN₂/GaN Photodiodes via Fine Stoichiometry Control and Photon Trapping Micro-patterned Heterojunctions under Low-light Irradiation
- 저자 정보 : 김정현 (제1저자, 전북대), 황주찬 (제1저자, 전북대), 윤순주 (공동저자, 전북대), 이윤경 (공동저자, 전북대), 이태훈 (공동저자, DGIST), 민정욱 (공동저자, 명지대), 김종민 (공동저자, 한국나노기술원), 박광욱 (공동교신저자, 전북대), 이한얼 (대표교신저자, GIST)