

Review

유기 트랜지스터 기반 가스 센서의 최신 연구 동향

구나현 · 박영돈[†]

인천대학교 에너지화학공학과

(2024년 8월 20일 접수, 2024년 10월 10일 수정, 2024년 10월 18일 채택)

Recent Developments in an Organic Transistor-Based Gas Sensors

Nahyeon Gu and Yeong Don Park[†]

Department of Energy and Chemical Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

(Received August 20, 2024; Revised October 10, 2024; Accepted October 18, 2024)

초록: 인간 피부의 포괄적인 특성을 구현하려면 물리적인 변형은 물론 온도, 빛, 습도 및 유해 기체를 포함한 외부 자극을 구별할 수 있는 다양한 감지 모듈의 통합이 필수적이다. 특히 가스 센서는 주변에 존재하는 기체 분자를 감지하여 공기 질을 모니터링 하고 몸속에서 방출되는 기체로부터 여러 질병을 조기 진단할 수 있을 것을 기대해 볼 수 있다. 전자 피부에 적용되기 위해서는 유기 트랜지스터를 이용한 가스 센서 개발이 필수적이며 빠른 응답 속도와 높은 감도를 달성하기 위해 유기 활성층의 분자구조 조절과 신규 물질 개발에 중점을 두고 있다. 본 논문에서는 유기 트랜지스터 기반 가스 센서의 최근 연구 동향을 소개하고, 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

Abstract: In order to realize the comprehensive characteristics of human skin, it is essential to integrate various sensing modules that can distinguish not only physical deformation but also external stimuli including temperature, light, humidity, and harmful gases. In particular, gas sensors can be expected to monitor air quality by detecting gas molecules present in the surroundings, as well as to be able to diagnose various diseases early from the gases emitted from the body. For application to electronic skin, the development of gas sensors using organic transistors is essential, and it focuses on controlling the molecular structure of organic active layers and developing new materials to achieve fast response speed and high sensitivity. In this paper, we will introduce the recent research trend of organic transistor-based gas sensors and suggest future research directions.

Keywords: organic field-effect transistor, conducting polymer, gas sensor, organic semiconductor, E-skin.

서 론

생체공학과 로봇공학이 발전함에 따라, 인간의 피부와 장기를 모방하여 물리적 환경을 감지하고, 인간의 활동과 개인의 건강을 모니터링 할 수 있는 전자 피부가 최근 몇 년간 큰 주목을 받으며 빠르게 성장하고 있다. 인간의 피부는 내부 장기를 충격에서 보호하는 물론 주변 환경의 물리 또는 화학적 자극을 전달한다. 접촉, 압력, 온도를 감지하고 스스로 신호를 생성하여 전송하고 신체를 보호하는 등 많은 기능을 동시에 구현할 수 있는 복잡한 대규모 다기능 통합 시스템이다.¹⁻⁶ 인간 피부의 포괄적인 특성을 구현하려면 인공 전자 피부(E-skins)에 물리적인 변형, 비틀림뿐만 아니라 온도, 빛, 습도 및 유해 기체를 포함한 외부 자극을 구별할 수 있는 다양한 감

지 모듈의 통합이 필수적이다.⁷ 특히 가스 센서는 주변에 존재하는 특정 화학 물질이나 기체 분자를 감지하여 공기 질을 모니터링 하고 독성 물질의 탐지 등을 통해 화재와 같은 재난 현장에 즉각적으로 반응하여 작업 환경이나 가정에서 안전을 보장하는 데 중요한 역할을 수행할 수 있다. 또한 인체의 분비물이나 몸속에서 방출되는 기체로부터 체내의 생리학적 변화를 감지하고 병원에 방문하지 않고도 여러 질병을 조기 진단할 수 있을 것을 기대해 볼 수 있다.

전자 피부는 감지 성능뿐만 아니라 기계적 변형 및 비틀림과 같은 인간 피부의 물리적인 구동 특성 또한 구현할 수 있어야 하므로 유연 소재의 적용이 필수적인 분야이다.⁸ 유기 전계효과 트랜지스터는 그 유연하고 가벼운 특성 덕분에 유연 소자 분야에서 혁신적인 도약을 가능하게 하는 핵심 기술로 주목받고 있고, 이러한 유기 트랜지스터는 전자 피부의 발전에 있어서 핵심 구성 요소로 떠오르고 있다.⁹⁻¹³

유기 트랜지스터는 유연성과 경량성 외에도 재료 설계 및 비용 효율성에서 우수한 장점을 가지고 있어 다양한 분야에

[†]To whom correspondence should be addressed.
ydpark@inu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-1615-689X
©2024 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

서 여러 연구가 이루어져 왔다.¹⁴⁻¹⁷ 유기 반도체는 기존의 무기 반도체에 비해 훨씬 유연한 특성으로 인해, 사용자의 움직임에 자연스럽게 반응하고, 다양한 형태로 변형될 수 있도록 한다. 또한 반복적인 굽힘과 변형에도 높은 기계적 내구성을 유지할 수 있다. 대면적이고 유연한 기관 및 소재와의 우수한 호환성이 매우 중요한 다양한 분야에서 광범위한 응용 가능성을 제공한다. 유기 반도체는 전자 피부뿐만 아니라 액정 디스플레이(liquid crystal display), 무선 주파수 전자태그(radio frequency identification transponder, RFID), 발광 전계 효과 트랜지스터(light emitting field-effect transistor), 스마트카드(smart card) 등 다양한 응용 분야에 적용이 가능하다.¹⁴⁻¹⁷

최근에는 유기 전자소자 분야가 환경 모니터링 및 산업 제조 분야에서 중요한 역할을 하는 폭발성, 독성 기체 또는 휘발성 유기 화합물(VOC)과 같은 특정 기체의 감지에도 초점을 맞추고 있다. 유기 가스 센서는 빠른 응답 및 복구 속도와 함께 높은 감도, 선택성, 그리고 대기 안정성을 달성하기 위해 유기 반도체층의 분자구조를 조절하고 다양한 신규 물질을 개발하는 연구를 진행하고 있다. 우수한 여러 유기 트랜지스터형 센서를 개발하기 위한 노력이 이루어지면서 가스 센서, 압력 센서, 광 센서 등 포괄적인 유기 트랜지스터형 센서에 대한 리뷰들이 다양하게 제공되고 있다.¹⁰⁻¹² 유기 트랜지스터형 가스 센서에 초점을 맞춘 리뷰도¹⁸⁻²² 다루어지고 있지만 비교적 제한적이며, 최근 유기 트랜지스터형 가스 센서에 대해 많은 진전이 이루어진 것을 고려할 때 유기 트랜지스터형 가스 센서의 최근 연구에 대해 중점적으로 다루는 리뷰가 필요하다.

본 논문에서는 가스 센서의 최근 발전된 내용을 소개하고, 그 중에서도 특히 유기 트랜지스터 기반의 가스 센서와 관련해 최근 연구 동향에 대한 전반적인 개요를 제공하고자 한다. 먼저 유기 트랜지스터의 개념과 구조를 간략하게 설명한 다음 유기 트랜지스터가 가스 센서로 작동하는 원리와 감지 메커니즘을 자세히 알아보고자 한다. 그 다음으로는 반도체층 미세구조의 조절 및 표면개질을 통해 박막의 화학적, 물리적 특성을 변경하는 연구를 포함하여 유기 트랜지스터 기반 가스 센서의 최근 연구 동향을 보고한다. 마지막 섹션에서는 이 논문의 결론과 추가 연구 전망을 제시한다.

가스 센서의 종류

기체 감지 기술은 환경 모니터링, 의료 진단, 산업 안전 면에서 점점 더 중요해지고 있다. 이에 따라 다양한 유형의 가스 센서가 지속적으로 연구되고 있는데, 가스 센서는 신호를 변환하는 방법에 따라 여러 범주로 나눌 수 있다. 그 중 대표적인 네 가지 유형은 광학형,²³⁻²⁶ 전기화학,²⁷⁻³⁰ 저항형,³¹⁻³⁶ 그리고 트랜지스터 방식의 가스 센서이다.³⁷⁻⁴³ 먼저 대표적인 4가지 유형의 가스 센서들의 연구들에 대해 간략히 살펴보고자 한다.

광학형 가스 센서. 일반적으로 광학형 가스 센서는 광원, 가스 챔버, 광 검출기의 세 가지 주요 부분을 포함하는 가스 센서이다. 모든 기체는 광원의 특정 파장에서 고유한 흡수 특성을 갖기 때문에 목표 기체 분자는 광원에서 나오는 다양한 파장의 빛 중에서 특정 파장의 빛만 흡수하여 광 검출기에 의해 감지 및 측정된다.²³ 작동 메커니즘은 대상 기체 분자의 물리적 특성에만 관련되어 있으며, 기체 분자와 광 센서 간의 화학 반응이 동반되지 않기 때문에 광학 가스 센서는 출력의 오차가 낮고 수명이 길어 높은 안정성을 제공한다. 또한 높은 선택성과 빠른 반응 속도를 가지고 있지만 소형화가 어렵고 휴대성이 낮으며 높은 비용을 요구하기 때문에 상용화에 있어서는 다소 제한적이어서 더 많은 개선이 필요하다. 그리고 광학센서의 특성상 주변의 빛 간섭에 의해 영향을 받는 것도 문제점으로 꼽힌다.⁴⁴

W. Jin 연구팀은 섬유 단면에 직접 3D 마이크로 프린팅을 통한 초소형 고성능 광섬유 광열 간섭법(photothermal interferometry, PTI) 가스 센서를 보고하였다(Figure 1).⁴⁵ 최적의 광열 신호를 위한 공동(cavity)의 이론적 최적화를 기반으로 66 μm 길이의 마이크로 공동을 가진 광섬유 팁 PTI 가스 센서가 백만 단위의 서브 파트 수준에서 아세틸렌을 감지하는 것으로 입증되었다. 감지 한계는 160 ppb이며, 0.5초 미만의 전례 없는 응답 시간을 보였다. 이러한 초소형 PTI 가스 센서는 반응기 내 또는 배터리 모니터링 및 의료 진단과 같은 공간이 제약된 분야에서 미량의 기체를 감지하는 새로운 가능성을 열어줄 수 있다.

전기화학 가스 센서. 전기화학 가스 센서는 작동 전극, 상대 전극과 두 전극을 담는 전해질 용액으로 구성된다. 전기화학 센서는 작동 전극 상의 환원 또는 산화 반응에 의해 발생하는 두 전극 간의 전류 또는 전위를 측정하여 목표 기체를 감지하는 원리이다. 상대적으로 낮은 농도에서도 목표 기체에 대해 높은 민감도를 보이며 저전력으로 작동한다는 장점이 있다. 또한 저렴할 뿐만 아니라 주변 습도에 크게 영향을 받

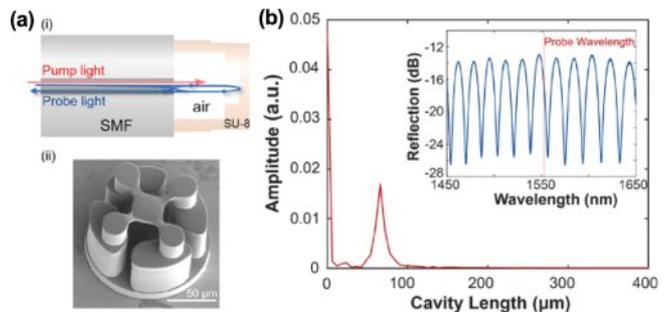


Figure 1. (a) Sectional view and SEM image of the 3D microprinted FP cavity; (b) FFT result of the reflection spectrum of the 3D microprinted FP microcavity. The inset in (b) is the corresponding reflection spectrum. Reproduced with permission from Ref. 45, Zhao, P. *et al.*, *Laser Photonics Rev.* **2024**, 18, 2301285. ©2024 The Authors. *Laser & Photonics Reviews* published by Wiley-VCH GmbH.

지 않지만, 전기화학 센서는 전해질 용액이 고온 또는 낮은 습도에서 건조될 수 있기 때문에 작동할 수 있는 온도 범위가 좁은 편이다. 따라서 수명이 짧고 전해질 용액을 유지하기 위한 설계가 필수적이다.^{28,46}

Hani E. Naguib 연구팀은 전기화학적 기체 감지를 위해 titanium carbides의 특성을 극대화하고자 titanium carbides에 반응성이 더 높은 말단작용기를 도입하여 밴드 갭을 조절하고, 다양한 이중 구조를 제공하기 위해 그래핀 나노리본(Graphene nanoribbon, GnR)과 혼성화하였다.⁴⁷ 동축 전기 방식은 섬유를 양전하로 대전시키는 반면, 음전하 MXene 및 GnR 현탁액을 동시에 전기 분사하여 증착 시 SBS 섬유의 컨포멀 코팅을 유도했다. GnR의 배향, 넓은 접촉 면적 및 가교 효과로 인해 생성된 3D 활성 나노섬유 구조는 X, Y 및 Z 방향으로 모두 우수한 동시 전도도를 보였다. MXene의 혼성화는 MXene의 에폭시(-O) 그룹의 개체 수를 증가시키고 밴드갭을 증가시켜 기체 감지 반응과 다양한 유형의 기체 분석물에 대한 반응성을 증가시켰다. 제작된 VOC 센서는 빠른 응답 시간, 낮은 최저 검출 한계와 높은 최고 검출 한계 그리고 뛰어난 선택성을 보였다. 유연하고 바인더가 없는 구조는 이상적인 기계적 특성과 환경 안정성을 보여 휴대용 및 착용형 주문형 VOC 센서에 적합한 후보가 되었다.

화학 저항형 가스 센서. 저항형 가스 센서는 가장 많이 보고되고 있는 유형의 가스 센서이다. 기체에 노출되면 센서의 저항이 변화되고 이를 측정하여 목표 기체를 감지한다. 저항형 가스 센서는 값이 싸고 비교적 쉽게 제조가 가능하며, 간단한 구조 덕분에 유기 반도체뿐만 아니라, 금속 산화물 반도체,³²⁻³⁶ 탄소 나노물질,³¹ 전이 금속 디칼코제나이드^{48,49} 등 다양한 재료를 적용하기 쉽다. 그러나 출력 변화를 줄이고 충분한 작동 전류를 얻기 위해서는 다른 반도체 기반 센서에 비해 크기가 커야 한다는 한계점이 존재하고, 감지 영역이 넓어 구동 온도를 높이기 위해 큰 크기의 열원이 필요하기 때문에 전력 소비도 높은 편이다.³²⁻³⁶

박준홍 교수 연구팀은 NO₂ 및 CO₂ 기체 검출을 위한 MXene 기반 센서의 성능에 대한 lignin 혼성화의 영향을 조사하였다(Figure 2).⁵⁰ Lignin 혼성화 시 NO₂ 및 CO₂에 대한 감도를 각각 157.38%, 297.95%로 증가시켰다. 유연한 기판을 사용하여 제조된 유연한 MXene/lignin 센서는 기존 센서와 비교하여 NO₂ 및 CO₂에 유사한 반응과 감도를 나타내었다. 이전에 제안된 화학저항 가스 센서와 비교하여 초저농도에서 다양한 유해 기체에 대해 민감도와 반응성의 향상을 확인할 수 있었고, 유연한 전자 장치로의 응용 또한 기대해 볼 수 있었다.

FET 가스 센서. FET형 가스 센서는 감지하고자 하는 기체에 노출되면 센서의 임계 전압(threshold voltage)이 이동하거나 드레인(drain) 전류에 변화가 발생한다. 앞서 언급한 세 종류의 가스 센서와 달리 FET형 가스 센서는 CMOS 회로와 호환이 가능하다. CMOS 회로는 습도, 온도 등을 감지할 때

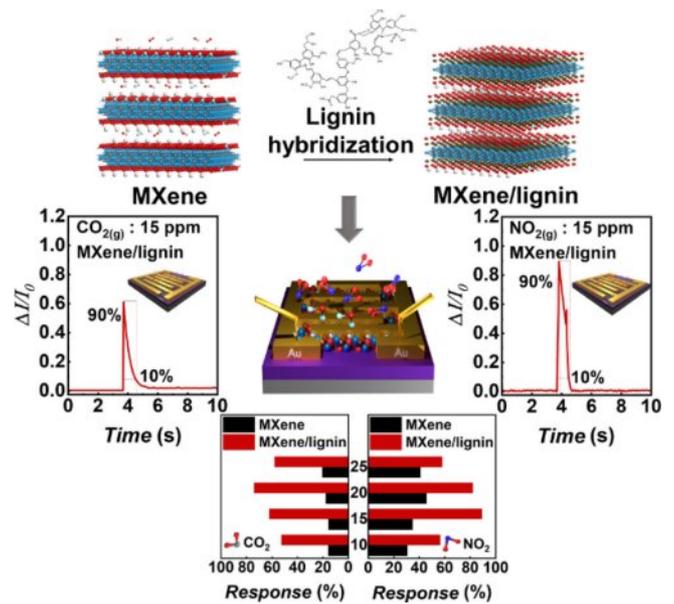


Figure 2. Gas sensing performance. Response/recovery times of CO₂(g) (left) and NO₂(g) (right) using MXene and MXene/lignin hybrid sensors. Repeatability of MXene and MXene/lignin hybrid sensor response. Response (%) of MXene and MXene/lignin hybrid sensors to CO₂(g) (left) and NO₂(g) (right). Reproduced with permission from Ref. 50, Devara, I. K. G. *et al.*, *EcoMat.* **2024**, *6*, e12453. ©2024 The Authors.

출력 신호의 변화를 제어하고 환경 조건의 변화를 보정하도록 설계되었다. 따라서 FET형 가스 센서는 CMOS 회로와 쉽게 통합되어 실용적인 고정밀 기체 감지 시스템을 구현하는 데 효율적으로 사용될 수 있다.⁵¹

유기 트랜지스터 기반 센서 역시 이와 유사한 방식으로 작동하는데, 더 유연하고 경량화된 구조 덕분에 기존 FET 센서보다 더 다양한 환경에서 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 유기 트랜지스터 기반 센서의 감지 반응은 유기 반도체 전도 채널 및 전극 내 전하 캐리어와 기체 분자의 상호작용으로 인한 것이며, 이는 임계 전압, 전하 이동도 및 출력 전류의 변화로 이어진다. 그러나 유기 트랜지스터의 전도 채널은 반도체막 하부의 몇 개의 분자층 내에 집중되어 있으므로 기존 유기 트랜지스터 기반 센서의 장치 구조는 기체 감지 성능이 제한된다. Jia Huang 연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 간단하고 효과적인 방법으로 다공성 유기 반도체 박막을 유기 트랜지스터 센서에 적용했다(Figure 3).⁵² 다공성 구조를 가진 유기 트랜지스터 센서는 증가된 분석물 흡착 지점을 비롯해 기공 주변 전도 채널에서 분석물과 전하의 상호작용이 보다 효율적으로 일어남으로 인해 더 빠른 응답성과 훨씬 더 높은 감도 및 회복 가능성을 보였다. 이를 통해 유기 반도체를 이용한 고감도의 유연 가스 센서의 발전 가능성을 기대해 볼 수 있었다.

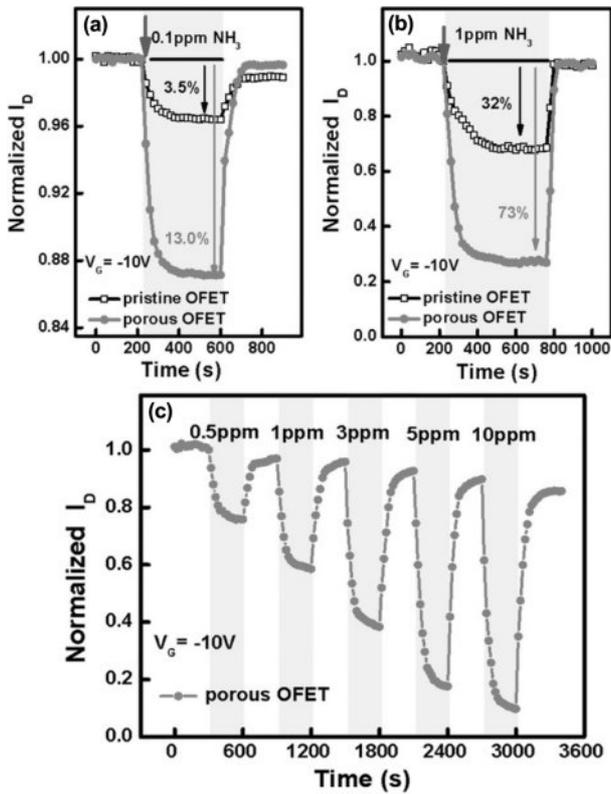


Figure 3. Sensing responses of the pristine and porous OFETs. Compared I_D changes of the two OFETs in response to (a) 0.1 ppm NH_3 ; (b) 1 ppm NH_3 ; (c) The time-dependent responses of the porous OFET upon exposure to ammonia vapors at various. Reproduced with permission from Ref. 52, Lu, J. *et al.*, *Adv. Funct. Mater.* **2017**, 27, 1700018. ©2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

유기 트랜지스터 가스 센서의 구조 및 작동 원리

유기 트랜지스터는 경량화와 기계적 유연성, 비울 효율성 등에서 기존 무기 재료보다 우수한 특성 적분에 많은 관심을 받아왔다.^{53,54} 특히, 유기 반도체는 분자 구조의 조절을 통해 감지 성능을 연속적으로 개선하고 기능화하는 데 큰 잠재력을 가지며, 이는 다기능 통합 장치를 달성하는데 유용하다.^{55,56} 또한 유기 반도체의 저온 어닐링 프로세스는 대면적 및 유연한 전자 장치를 위한 인쇄 기술과 호환된다.⁵⁷⁻⁶¹ 이러한 발전 덕분에 유기 트랜지스터는 독성 기체를 실시간으로 감지하는 기능을 갖춘 저비용 유기 트랜지스터 센서의 개발을 가능하게 한다. 목표 기체와 유기 반도체 사이의 상호 작용은 읽기 쉬운 데이터 기록 데이터로 변환될 수 있다. 우선 유기 트랜지스터의 구조와 목표 기체 감지 메커니즘에 대해 소개하고자 한다.

유기 트랜지스터의 구조. 전계 효과 트랜지스터는 기본적으로 소스와 드레인 전극으로 구성되며, 각각은 반도체층과 접촉해 있다. 이 반도체층의 전하 밀도는 반도체와 게이트 전극 사이에 인가된 전계에 의해 조절된다. 유전체는 반도체의

한 계면을 덮고, 게이트 전극은 반도체에서 떨어진 절연체의 계면에 배치된다.^{62,63} 소스-드레인 전극은 반도체와 유전체 사이의 계면이나 유전체와 접촉하지 않는 반도체 계면에 배치하는 등 다양한 구성이 가능하다. 게이트 전극은 주변의 화학 물질과 상호작용할 수 있는 소자의 최상층으로 배치하거나, 소자의 하단인 기판 위에 배치되어 주변으로부터 분리될 수도 있다. FET의 필수 기능은 게이트 전극의 입력 전압 신호를 드레인 전극에서 회로의 다른 요소로 전달되는 출력 신호로 변환하는 것이다. 출력 신호는 전류일 수도 있고, 전류를 직렬로 다른 저항 소자를 통해 향하도록 전달하여 전압으로 읽을 수도 있다. FET은 본질적으로 전류의 on/off 스위치로 작용하며, 드레인과 소스 전극(I_{DS}) 사이에 흐르는 전류는 드레인과 소스 전극(V_{DS}) 사이의 부과된 바이어스 하에서 게이트와 소스 전극(V_{GS}) 사이의 전압에 의해 제어된다.

유기 전계효과 트랜지스터에서는 유기 단분자 반도체 또는 공액고분자가 활성층으로 작동하고 유기 또는 무기 절연체는 유전체층으로 작용하며 전도성 고분자, 금속 또는 탄소 물질은 소스, 드레인 및 게이트 전극으로 적용된다. 일반적인 유기 트랜지스터는 top-gate bottom-contact(TGBC), top-gate top-contact(TGTC), bottom-gate bottom-contact(BGBC), 그리고 bottom-gate top-contact configurations(BGTC)의 네 가지 구조로 나눌 수 있다(Figure 4).²⁰ 각 구조는 특정 응용 분야와 제작 공정에 따라 장단점이 있으며, 최적의 구조를 선택하는 것이 중요하다. TGBC 구성에서는 유전체층이 반도체와 게이트 전극 사이에 위치하기 때문에 반도체와 게이트 전극 간의 인터페이스 품질이 높고, TGTC 구성은 전극 패터닝의 자유도가 높고 소자의 유연성과 제작 공정을 단순화할 수 있다는 이점이 있다. BGBC 구성에서는 게이트 전극이 기판 위에 위치하고, 그 위에 유전체층이, 그리고 그 위에 반도체층이 형성된다. 소스와 드레인 전극은 반도체층과 직접 접촉하여 반도체층 아래에 배치된다. 이 구조는 안정적이고 가장 널리 사용되는 방식이다. BGTC 구조는 소스와 드레인 전극이

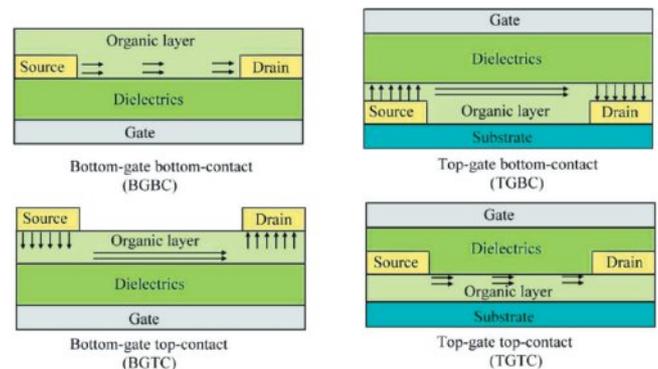


Figure 4. Carrier injection and transport scheme of four typical OFET geometries. Reprinted with permission from Ref. 64, Di, C. *et al.*, *Acc. Chem. Res.* **2009**, 42, 10, 1573-1583. ©2009 American Chemical Society.

반도체층 위에 배치되는데, 주로 고성능 소자를 제작하는 데 사용되며 전기적 특성이 우수하다.

유기 트랜지스터의 성능은 전하 이동도, 임계 전압, 전류 on/off 비율 등 여러 가지 매개변수에 의해 좌우되며, 이러한 매개변수는 구조적 구성과 재료 선택에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 유기 트랜지스터 설계에서는 원하는 전기적 특성과 물리적 특성을 달성하기 위해 다양한 구조적 접근과 재료 과학적 접근이 필요하다.

유기 트랜지스터 기반 가스 센서의 작동 원리. 지금까지 분석 기체와 장치 간 상호작용과 관련된 유기 트랜지스터 가스 센서의 전달 메커니즘에 대한 수많은 연구가 수행되었다. 장치의 기하학적 구조와 유기 반도체의 품질 및 형태에 따라, 수소 결합, 전하 전달, 소수성 상호작용, 쌍극자-쌍극자 상호작용 등을 포함한 이러한 상호작용은 표면, 결정립계(grain boundary) 또는 유기 트랜지스터의 다양한 계면에서 발생할 수 있다. 유기 반도체에서 전하의 이동은 π 결합을 통해 분자 간에 일어나며, 이는 외부 환경과 큰 관련성을 보이므로 가스 센서의 역할을 수행할 수 있게 한다.⁹ 유기 물질 기반 가스 센서는 다음 단계로 작동한다. (i) 기체 분자(분석물)가 유기 반도체 박막 표면에 흡착하고, (ii) 분석물이 벌크 유기 반도체 박막으로 확산되고, (iii) 분석물은 반데르발스 힘을 통한 쌍극자-쌍극자 상호 작용과 같은 물리적 흡수나 수소 결합 및 정전기적 상호 작용과 같은 화학 반응을 통해 유기 반도체 박막의 전하 이동 특성을 변화시킨다.⁶⁵⁻⁷¹ 분석 기체에 노출될 때 유기 트랜지스터 센서의 전달 원리는 반도체와 유전체층 계면의 전류 변화(I_{SD})에 기인한다. 전도 채널에 흐르는 전류는 기체와 반도체의 상호 작용에 따라 증가하거나 감소할 수 있다.

유기 트랜지스터는 게이트-소스 단자의 전압(V_{GS})을 조절하여 소스-드레인 전극 사이의 전류를 제어하며, 여기서 전하 캐리어는 반도체층과 유전체층 사이의 계면 근처에서 채널 영역을 통해 이동한다. 반도체의 정공(h^+)과 전자(e^-)는 반도체와 소스-드레인 전극 사이의 에너지 레벨 관계에 따라 전하 캐리어로 작용하여 p형, n형 및 양극성 동작을 포함한 다양한 거동을 나타낸다. 전형적인 유기 트랜지스터의 전류-전압(I-V) 특성은 전극의 상대적인 인가 전압에 따라 포화 영역 또는 선형 영역에서 계산된다(Figure 5).

여기서 I_{SD} 는 드레인 전류, W 와 L 은 채널의 폭과 길이, μ 는

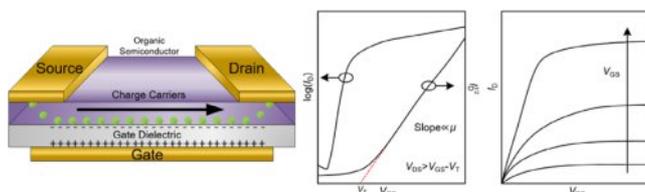


Figure 5. Mechanism of typical FET, I-V curves. Reproduced with permission from Ref. 72, Li, M. Z. *et al.*, *Adv. Intell. Syst.* **2020**, *2*, 2000113. ©2020 The Authors. Published by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

전계 효과 이동도, C_i 는 단위 면적당 게이트 유전체의 용량, V_T 는 트랜지스터의 임계 전압, V_{DS} 는 드레인과 소스 사이의 인가 전압이다. 트랜지스터의 성능을 평가하기 위한 핵심 요소는 μ , ON/OFF 전류비, V_T 등이다.

현재까지의 유기 트랜지스터 센서는 NH_3 , 아민, NO_2 , H_2S , 알코올 등을 포함한 광범위한 종류의 기체를 감지할 수 있다. 다양한 전류 측정 센서 중 FET 방식의 센서는 게이트 전극에 인가되는 전압을 제어하여 신호 증폭 능력으로 인해 2단자 기반 센서보다 높은 감도를 나타낸다. 무기 반도체와 유사하게 유기 반도체는 p형과 n형으로 나눌 수 있는데, 여기서 p형은 정공이 지배하는 수송이 이루어지고, n형은 전자가 지배하는 수송이 이루어진다.⁷³ 유기 트랜지스터 가스 센서의 반응은 관련 분석물과 유기 반도체의 특성에 따라 크게 달라지는데, 분석물은 p형과 n형 유기 트랜지스터에서 각각 정공 수용체(hole acceptor)와 전자 공여체(electron donors)로 작용한다. NH_3 또는 NO_x 와 같은 극성 기체가 존재할 때 확산된 기체 분자는 쌍극자 효과를 유도하여 전류 변화를 유도한다.⁷⁴ NO_2 , O_2 , Cl_2 등과 같은 산화물 기체는 p형 유기 반도체에 대한 전도도를 증가시킬 수 있는 반면 NH_3 , H_2S , H_2 등과 같은 환원성 기체는 전도도 감소를 유발한다. 반대로, n형 유기 반도체의 전도도는 대부분 p형 유기 반도체의 기체와 반대의 반응 거동을 나타낸다.⁷³ 암모니아는 채널에서 흐르는 전류(I_{SD})를 감소시킨다. 전류의 감소(ΔI_{SD})는 암모니아의 고립 전자 쌍에 기인하며, 두 가지 측면에서 전하 이동에 영향을 미친다. (1) NH_3 가 박막 내에서 확산되어 전도 채널의 전류 감소를 일으키는 경우 유기 분자와 연결형 구조를 형성하고 (2) 반도체-유전체의 계면에서 트랩/탈도핑되어 문턱 전압(ΔV_T)이 음의 방향으로 이동한다.

암모니아 센서와 달리 NO_2 가스 센서는 채널에서 흐르는 전류를 증가시킨다. Figure 6은 기체 노출이 없는 유기 트랜지스터(Figure 6(a))와 10 ppm NO_2 의 기체 노출이 있는 유기 트랜지스터(Figure 6(b))의 출력 및 전달 특성을 보여준다. 낮은 소스-드레인 전압(V_{SD})하에서 출력 특성은 명확한 비선형성을 보이는 반면, 10 ppm NO_2 에 노출된 후 낮은 V_{SD} 에서 선형으로 바뀌었으며 높은 V_{SD} 에서 불포화되어 도핑이 존재함을 나타낸다. 전달곡선은 NO_2 노출 하에서 임계 전압이 양의 방향으로 이동했음을 보여준다. 유기 트랜지스터의 전류 변화를 모니터링하면 주어진 유기 트랜지스터 구조에서 분석 기체 분자의 농도를 모니터링할 수 있다.⁷⁴ 기체 감지에는 선택성, 민감도, 회복 및 안정성과⁷⁵ 같은 몇 가지 주요 성능 매개변수가 있다. 선택성은 다양한 기체 혼합물 내에서 대상 기체 분자를 감지하는 능력을 말하고, 민감도는 특정 기체 분자에 대한 반응성을 의미한다. 회복성은 기체 분자가 더 이상 존재하지 않을 때 원래 신호로 돌아갈 수 있는 센서의 능력을 나타내며, 안정성은 장기간에 걸쳐 효과적으로 작동하는 센서의 능력을 나타낸다.^{76,77}

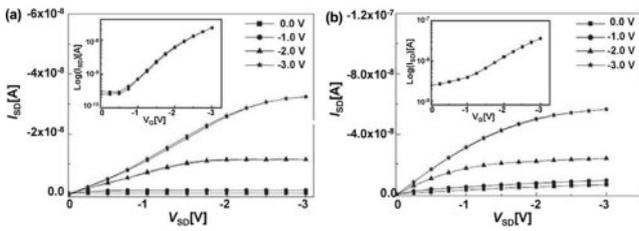


Figure 6. Output characteristics of PTA-OME OFETs at various gate volt-ages: (a) before NO₂ exposure; (b) after NO₂ exposure. The insets show saturated transfer characteristics of the corresponding OFETs in semilog plots. Reproduced with permission from Ref. 78, Das, A. *et al.*, *Adv. Mater.* **2007**, 19, 4018-4023. ©2007 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

미세구조 조절에 따른 유기 트랜지스터 가스 센서 성능 향상

최근 유기 전자 분야의 급속한 발전으로 인해 유기 트랜지스터를 저가형 전자 센서로 사용하는 데 큰 관심이 촉발되었다. 전기적, 화학적, 기계적 특성이 독특하게 결합된 유기재료는 전자에 대한 우리의 이해를 변화시켜, 초박형, 경량, 유연한 장치를 가능하게 하는 동시에 기존의 무기 전자소자에 대한 대안을 제공한다. 유기 반도체층은 고성능 유기 트랜지스터 기반 화학 센서를 달성하는 핵심 요소이다. 현재까지 유기 트랜지스터 기반 센서의 감지 성능의 향상은 π 결합 코어 구조 및 사이드 체인을 가진 유기 반도체 분자 설계, 유기 반도체에 수용체를 결합 또는 증착, 유기 반도체 박막 두께의 수정 등 재료 및 처리 방법 모두에서 개선되어 왔다. 유기 트랜지스터는 일반적으로 반도체막 하부의 유전체/반도체 사이 계면에 가까운 아주 얇은 층 내에 전하가 이동하는 채널이 형성되기 때문에 반도체층의 설계는 센서의 성능을 직접적으로 좌우한다. 따라서 반도체층의 미세구조를 조절하는 것은 센서의 성능을 향상시킬 수 있는 효율적인 방법이다.⁷⁹ 효과적인 미세구조 엔지니어링을 통해 가스 센서의 성능을 향상시킨 연구를 소개한다.

공액고분자의 자유 부피에 따른 유연 가스 센서의 성능 향상. 박영돈 교수 연구팀은 고분자의 위치 규칙성(regioregularity)에 따른 폴리티오펜 박막의 가스 센서의 감지 성능과 기계적 물성 변화를 조사하였다(Figure 7).⁸⁰ 위치 규칙성은 공액고분자의 결정화도에 중요한 역할을 하며 고분자 박막의 상이한 구조 및 분자 배열을 유도하여 전하 이동 특성과 기계적 특성에 큰 영향을 미쳤다. 위치 규칙성이 낮을수록 구조적 밀도가 커지고 결정성이 감소하여 유기 트랜지스터의 전하 이동성이 감소하는 것으로 나타났지만, 박막 내에 큰 자유 부피를 가진 비정질 영역을 증가시켜 박막의 유연성을 증가시켰다. 이러한 특성은 동시에 기체 분자의 침투를 용이하게 하여 가스 센서의 감지 능력을 향상시켰다. 제조한 가스 센서 중 가장 낮은 70% 위치 규칙성 P3HT 센서는 가장 우수한 감도와

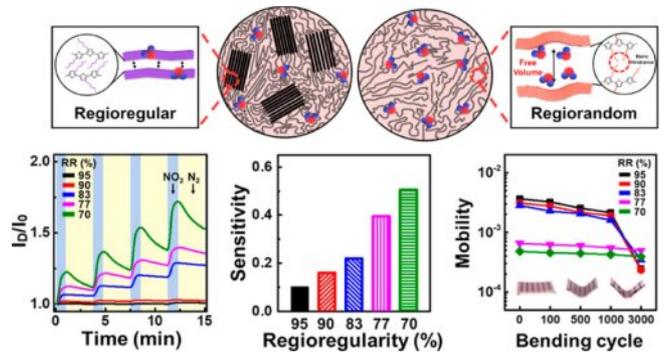


Figure 7. Schematic of gas adsorption of P3HT films with regio-regularity. Repeated gas-sensing curve for gas sensors based on P3HT thin films. sensitivity vs. regio-regularity of the P3HT thin films. Changes in the charge carrier mobility of the P3HT thin films with the number of bending cycles. Reproduced with permission from Ref. 80, Jang, D. *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 32629-32636. ©2023 American Chemical Society.

복구율을 나타냈다. 또한 70% 위치 규칙성 P3HT 센서는 큰 자유 부피로 인하여 유연한 기계적 물성을 나타내었다. 이러한 연구 결과는 고분자의 규칙성이 전하 이동 및 가스 흡착 특성에 중요한 역할을 한다는 것을 보여주었다.

반도체 박막의 결정립계의 밀도에 따른 가스 센서의 특성. 이위형 교수 연구팀은 상이한 결정립계 밀도를 갖는 triethylsilylethynyl-anthradithiophene(TES-ADT) 박막을 사용하여 기체 감지 특성에 대한 결정립계 밀도의 영향을 조사하였다(Figure 8).⁸¹ 결정립계의 밀도는 TES-ADT 용액의 혼합 시간을 변경하는 것으로 간단히 조절하였으며, 혼합 시간이 길수록 결정립계 밀도가 증가하였고, 이에 따라 전하 트래핑에 의해 전기적 특성이 저하되었다. 하지만 결정립계는 기체 분자가 채널 영역으로 확산되는 경로를 제공하여 결정립계 밀도가 증가할수록 TES-ADT 센서의 응답률과 감도가 현저하게 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과는 유기 반도체 층에서 결합으로 여겨졌던 결정립계의 역할에 대한 새로운 고찰을 제공함으로써 유기 반도체 기반의 고감도 가스 센서의 발전에 도움을 줄 것으로 기대된다.

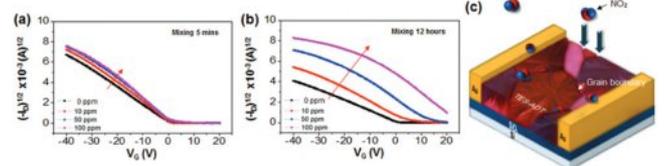


Figure 8. Changes of transfer characteristics in TES-ADT FETs prepared with different mixing time conditions: (a) 5 min; (b) 12 h; (c) schematic diagram showing gas sensing mechanism of TES-ADT FETs upon exposure to NO₂. Reproduced with permission from Ref. 81, Seo, Y. *et al.*, *Adv. Mater. Interfaces* **2018**, 5, 1701399. ©2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

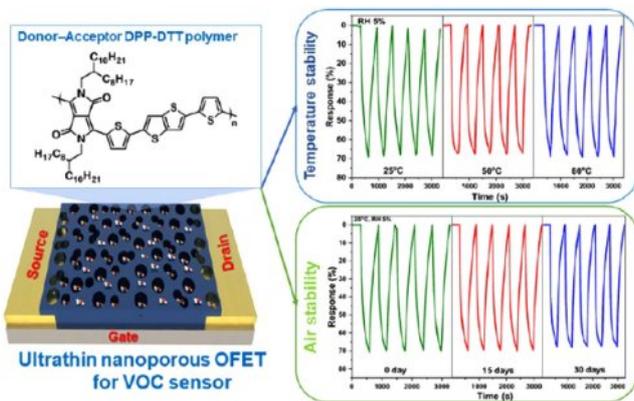


Figure 9. Schematic diagrams showing the proposed VOC sensing mechanisms of the various DPP-DTT OFET sensors: (Left) Diffusion of the VOCs into, and their adsorption onto, the nanopores in the DPP-DTT film; (Right) Effects of various temperatures and storage times upon the stability of the ultrathin nanoporous OFET sensor. Reprinted with permission from Ref. 82, Van Tran, V. *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 21270-21283. ©2023 American Chemical Society.

다공성 나노박막을 이용한 고성능 기체 센서 개발. 장민철 교수 연구팀은 Donor-Acceptor 구조의 공중합체를 사용해 장기 안정성이 우수한 고성능 유기 트랜지스터 기반 휘발성 유기 화합물(VOC) 센서를 개발하였다(Figure 9).⁸² Shearing assisted phase separation(SAPS) 방법과 폴리스타이렌을 선택적 에칭하는 방법을 함께 사용해 우수한 나노 다공성의 초박막 DPP-DTT 필름을 제작하였고, 그 결과 모세관 힘과 전단력이 비슷한 전이영역인 4 mm s^{-1} 의 속도에서 가장 미세한 기공 구조와 가장 얇은 박막 두께를 형성하는 것을 확인하였다. 평균 민감도는 약 $5.75\%/ppm$ 으로 이로서 문헌에 보고된 기존 유기 트랜지스터 가스 센서들보다 성능이 우수하다는 것을 검증하였다. 또한 제작된 DPP-DTT 유기 트랜지스터 센서는 우수한 열 안정성과 장기 보관 및 습도에 대한 안정성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Junsheng Yu 연구팀은 다공성 반도체층을 다층으로 적층시켜 초고감도의 유연 가스 센서에 대한 손쉬운 제조 방법을 성공적으로 개발하였다.⁸³ 제작된 다층 구조의 유기 트랜지스터는 풍부한 기체 흡착 지점을 제공하여 유도 전하 캐리어의 생성을 촉진하고 기체 감지 특성을 향상시켰다. 다공성 유기 반도체층을 더 많이 추가하여 선형적으로 향상된 반응성을 얻을 수 있었다. 다공성 유기 반도체를 3개 층으로 적층시킨 유기 트랜지스터는 NO_2 에 대해 가장 높은 응답성 및 우수한 감도를 나타냈으며 더불어 아주 낮은 검출한계 값을 보였다. 두꺼운 유기 활성층을 사용하는 유기 트랜지스터 센서에서는 다공성 구조가 유연/신축성 전자 장치에 사용되는 고성능 센서를 제조하는 데 효과적이며, 다른 응용 분야로 확장될 수 있다는 가능성을 제시하였다.

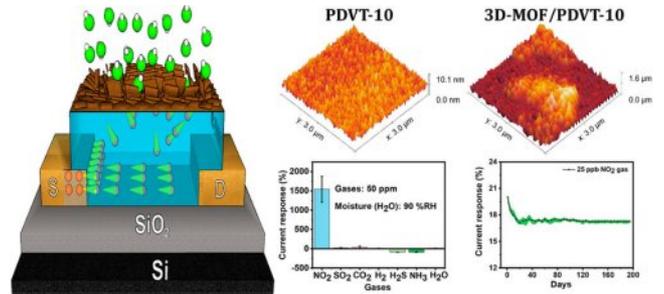


Figure 10. (Left) Schematic illustration of gas molecules' interaction process in a bottom-gate bottom-contact PDVT-10/MOF-A OFET transistor device; (Right-top) AFM topography images of (left) PDVT-10 and (right) PDVT-10/MOF-A layers in the OFET device stack; (Right-bottom) Selectivity behavior of the MOF-A/PDVT-10 OFET device (left), ambient stability study of the MOF-A/PDVT-10 OFET device (right). Reprinted with permission from Ref. 84, Yuvaraja, S. *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, 12, 18748-18760. ©2020 American Chemical Society.

유무기 하이브리드를 통한 센서의 감도 향상. Khaled N. Salama 연구팀은 DPP 공중합체를 다공성 무기 나노소재와 혼합하여 고성능 유기 트랜지스터 가스 센서를 제작하였다(Figure 10).⁸⁴ NO_2 를 선택적으로 흡착하는 역할을 하는 다공성 불소화 3D 금속 유기 골격체(Metal organic frameworks, MOFs) 수용체층을 합성하였고, 합성된 MOF는 DPP 공중합체와 혼합하여 NO_2 기체에 대한 감도가 700% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 상대 습도 5%-90% 범위에서 매우 안정적임이 입증되었다. 이러한 결과는 유기 활성층에 무기 수용체의 적절한 시너지 조합을 선택함으로써 고감도의 선택적 유무기 센서를 구현할 수 있음을 시사한다.

결론 및 전망

지난 몇 년 동안 고성능 선택적 감지를 목표로 유기 트랜지스터 가스 센서와 관련하여 큰 진전이 이루어졌다. 본 논문에서는 유기반도체층의 미세구조를 조절하여 유기 트랜지스터 기반 기체 센서의 감지 성능을 향상시킨 연구들에 대해 살펴보았다. 유기 트랜지스터에서는 유기 반도체층과 유전층 계면에 수 나노 밀에 불과한 두께의 전하가 이동하는 채널층이 형성된다. 따라서 반도체층의 미세구조를 조절하면 목표로 하는 기체 분자의 확산을 용이하게 할 수 있을 뿐만 아니라 이를 통해 채널 층과의 상호작용을 강화함으로써 감지 효율을 향상시킬 수 있다. 반도체층의 자유 부피를 증가시키거나 미세 기공을 가지는 반도체 박막을 제조하여 기체 분자의 침투를 용이하게 하였고, 결정립계의 밀도를 증가시켜 기체 분자가 채널 영역으로 확산되는 경로를 제공하여 센서의 성능을 최적화하였다. 또한 유기 재료의 한계를 보완하고자 다공성 무기 재료와 혼합해 고감도의 센서를 개발할 수 있었다.

감도, 선택성, 응답 시간, 안정성, 재현성, 감지 한계 등을 포함하여 센서의 전반적인 성능을 향상시키려는 노력은 다양한 응용분야에 필요한 요구 사항을 충족시키기 위해 지속적으로 활발하게 연구되고 있다. 지금까지 달성한 엄청난 발전은 유기 트랜지스터 가스 센서를 다양한 잠재적인 응용 분야에 적용 가능성에 한 걸음 다가가게 하고 있다.

감사의 글: 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF2023R1A2C1005218).

이해상충: 저자는 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Ma, M.; Zhang, Z.; Liao, Q.; Yi, F.; Han, L.; Zhang, G.; Liu, S.; Liao, X.; Zhang, Y. Self-powered Artificial Electronic Skin for High-resolution Pressure Sensing. *Nano Energy* **2017**, *32*, 389-396.
- Chen, H.; Song, Y.; Cheng, X.; Zhang, H. Self-powered Electronic Skin Based on the Triboelectric Generator. *Nano Energy* **2019**, *56*, 252-268.
- Lee, Y.; Kim, J.; Jang, B.; Kim, S.; Sharma, B. K.; Kim, J.; Ahn, J. Graphene-based Stretchable/wearable Self-Powered Touch Sensor. *Nano Energy* **2019**, *62*, 259-267.
- Dong, K.; Wu, Z.; Deng, J.; Wang, A. C.; Zou, H.; Chen, C.; Hu, D.; Gu, B.; Sun, B.; Wang, Z. L. A Stretchable Yarn Embedded Triboelectric Nanogenerator as Electronic Skin for Biomechanical Energy Harvesting and Multifunctional Pressure Sensing. *Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1804944.
- Ha, M.; Lim, S.; Cho, S.; Lee, Y.; Na, S.; Baig, C.; Ko, H. Skin-Inspired Hierarchical Polymer Architectures with Gradient Stiffness for Spacer-Free, Ultrathin, and Highly Sensitive Triboelectric Sensors. *ACS Nano* **2018**, *12*, 3964-3974.
- Liu, Y.; Pharr, M.; Salvatore, G. A. Lab-on-Skin: A Review of Flexible and Stretchable Electronics for Wearable Health Monitoring. *ACS Nano* **2017**, *11*, 9614-9635.
- Pang, C.; Lee, G.; Kim, T.; Kim, S. M.; Kim, H. N.; Ahn, S.; Suh, K. A Flexible and Highly Sensitive Strain-gauge Sensor Using Reversible Interlocking of Nanofibres. *Nature Materials* **2012**, *11*, 795-801.
- Wang, X.; Dong, L.; Zhang, H.; Yu, R.; Pan, C.; Wang, Z. L. Recent Progress in Electronic Skin. *Advanced Science* **2015**, *2*, 1500169.
- Someya, T.; Dodabalapur, A.; Huang, J.; See, K. C.; Katz, H. E. Chemical and Physical Sensing by Organic Field-Effect Transistors and Related Devices. *Adv. Mater.* **2010**, *22*, 3799-3811.
- Sokolov, A. N.; Tee, B. C.; Bettinger, C. J.; Tok, J. B.; Bao, Z. Chemical and Engineering Approaches to Enable Organic Field-Effect Transistors for Electronic Skin Applications. *Acc. Chem. Res.* **2012**, *45*, 361-371.
- Torsi, L.; Magliulo, M.; Manoli, K.; Palazzo, G. Organic Field-effect Transistor Sensors: a Tutorial Review. *Chem. Soc. Rev.* **2013**, *42*, 8612-8628.
- Baeg, K.; Binda, M.; Natali, D.; Caironi, M.; Noh, Y. Organic Light Detectors: Photodiodes and Phototransistors. *Adv. Mater.* **2013**, *25*, 4267-4295.
- Cramer, T.; Campana, A.; Leonardi, F.; Casalini, S.; Kyndiah, A.; Murgia, M.; Biscarini, F. Water-gated Organic Field Effect Transistors - Opportunities for Biochemical Sensing and Extracellular Signal Transduction. *J. Mater. Chem. B* **2013**, *1*, 3728-3741.
- Wang, C.; Dong, H.; Hu, W.; Liu, Y.; Zhu, D. Semiconducting π -Conjugated Systems in Field-Effect Transistors: A Material Odyssey of Organic Electronics. *Chem. Rev.* **2012**, *112*, 2208-2267.
- Gelinck, G.; Heremans, P.; Nomoto, K.; Anthopoulos, T. D. Organic Transistors in Optical Displays and Microelectronic Applications. *Adv. Mater.* **2010**, *22*, 3778-3798.
- Guo, Y.; Yu, G.; Liu, Y. Functional Organic Field-Effect Transistors. *Adv. Mater.* **2010**, *22*, 4427-4447.
- Sirringhaus, H. 25th Anniversary Article: Organic Field-Effect Transistors: The Path Beyond Amorphous Silicon. *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 1319-1335.
- Someya, T.; Dodabalapur, A.; Huang, J.; See, K. C.; Katz, H. E. Chemical and Physical Sensing by Organic Field-Effect Transistors and Related Devices. *Adv. Mater.* **2010**, *22*, 3799-3811.
- Torsi, L.; Dodabalapur, A. Organic Thin-film Transistors as Plastic Analytical Sensors. *Anal. Chem.* **2005**, *77*, 380A-387A.
- Zhang, C.; Chen, P.; Hu, W. Organic Field-effect Transistor-based Gas Sensors. *Chem. Soc. Rev.* **2015**, *44*, 2087-2107.
- Wang, T.; Ma, S.; Lv, A.; Liu, F.; Yin, X. Concentration Recognition of Gas Sensor with Organic Field-effect Transistor Assisted by Artificial Intelligence. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2022**, *363*, 131854.
- Seo, Y.; Jung, H.; Lee, J. H.; Jang, H. W.; Lee, W. H. Recent Research Trend in Flexible and Stretchable Electrode for Wearable Device. *KIC NEWS* **2018**, *21*, 34-44.
- Hodgkinson, J.; Tatam, R. P. Optical Gas Sensing: a Review. *Measurement Sci. Technol.* **2013**, *24*, 012004.
- Coban, O.; Tekmen, S.; Gur, E.; Tuzemen, S. High Optical Response NiO, Pd/NiO and Pd/WO₃ Hydrogen Sensors. *Int. J. Hydrogen Energy* **2022**, *47*, 25454-25464.
- Wang, T.; Zhu, L.; Yue, Y.; Asghari, M. R.; Samani, B. H.; Yamamoto, T.; Mukai, Y.; Kanda, H. N,N-Dimethylformamide Detection and Refractive Index Sensing Using an Electrospun Polymer/Ti₃C₂ MXene-TiO₂ Modified Optical Fiber Sensor. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2024**, *417*, 136143.
- Zhao, Y.; Liu, Y.; Liu, Q.; Zhao, J.; Zhang, Y. Room-Temperature Operated Fast Reversible Ammonia Sensor Based on Hybrid Optical Fiber Structure with Temperature Compensated Function. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2024**, *408*, 135472.
- Arroyo, P.; Gomez-Suarez, J.; Luis Herrero, J.; Lozano, J. Electrochemical Gas Sensing Module Combined with Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Monitoring. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2022**, *364*, 131815.
- Gatty, H. K.; Leijonmarck, S.; Antelius, M.; Stemme, G.; Roxhed, N. An Amperometric Nitric Oxide Sensor with Fast Response

- and Ppb-level Concentration Detection Relevant to Asthma Monitoring. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2015**, 209, 639-644.
29. Okamura, K.; Ishiji, T.; Iwaki, M.; Suzuki, Y.; Takahashi, K. Electrochemical Gas Sensor Using a Novel Gas Permeable Electrode Modified by Ion Implantation. *Surf. Coat. Technol.* **2007**, 201, 8116-8119.
 30. Cho, H.; Noh, Y.; Jin, E.; Yim, J. Study on the Hybrid Dual-functioning Application of Urethane Foam Modified with Graphene Oxide and Polypyrrole for an Electrode Scaffold as Well as Chemical Sensor. *Polym. Korea* **2023**, 47, 453-462.
 31. Bekyarova, E.; Davis, M.; Burch, T.; Itkis, M. E.; Zhao, B.; Sunshine, S.; Haddon, R. C. Chemically Functionalized Single-walled Carbon Nanotubes as Ammonia Sensors. *J. Phys. Chem. B* **2004**, 108, 19717-19720.
 32. Shin, J.; Choi, S.; Lee, I.; Youn, D.; Park, C. O.; Lee, J.; Tuller, H. L.; Kim, I. Thin-Wall Assembled SnO₂ Fibers Functionalized by Catalytic Pt Nanoparticles and their Superior Exhaled-Breath-Sensing Properties for the Diagnosis of Diabetes. *Adv. Funct. Mater.* **2013**, 23, 2357-2367.
 33. Zhu, G.; Xi, C.; Xu, H.; Zheng, D.; Liu, Y.; Xu, X.; Shen, X. Hierarchical NiO Hollow Microspheres Assembled from Nanosheet-stacked Nanoparticles and Their Application in a Gas Sensor. *RSC Advances* **2012**, 2, 4236-4241.
 34. Kim, H.; Yoon, J.; Choi, K.; Jang, H. W.; Umar, A.; Lee, J. Ultraselective and Sensitive Detection of Xylene and Toluene for Monitoring Indoor Air Pollution Using Cr-Doped NiO Hierarchical Nanostructures. *Nanoscale* **2013**, 5, 7066-7073.
 35. Li, E.; Cheng, Z.; Xu, J.; Pan, Q.; Yu, W.; Chu, Y. Indium Oxide with Novel Morphology: Synthesis and Application in C₂H₅OH Gas Sensing. *Crystal Growth & Design* **2009**, 9, 2146-2151.
 36. Comini, E.; Faglia, G.; Sberveglieri, G.; Pan, Z. W.; Wang, Z. L. Stable and Highly Sensitive Gas Sensors Based on Semiconducting Oxide Nanobelts. *Appl. Phys. Lett.* **2002**, 81, 1869-1871.
 37. Hong, S.; Wu, M.; Hong, Y.; Jeong, Y.; Jung, G.; Shin, W.; Park, J.; Kim, D.; Jang, D.; Lee, J. FET-type Gas Sensors: A Review. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2021**, 330, 129240.
 38. Liao, F.; Chen, C.; Subramanian, V. Organic TFTs as Gas Sensors for Electronic Nose Applications. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2005**, 107, 849-855.
 39. Zan, H.; Li, C.; Yeh, C.; Dai, M.; Meng, H.; Tsai, C. Room-temperature-operated Sensitive Hybrid Gas Sensor Based on Amorphous Indium Gallium Zinc Oxide Thin-Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* **2011**, 98, 253503.
 40. He, Q.; Zeng, Z.; Yin, Z.; Li, H.; Wu, S.; Huang, X.; Zhang, H. Fabrication of Flexible MoS₂ Thin-Film Transistor Arrays for Practical Gas-Sensing Applications. *Small* **2012**, 8, 2994-2999.
 41. Gergintschew, Z.; Kornetzky, P.; Schipanski, D. The Capacitively Controlled Field Effect Transistor (CCFET) as a New Low Power Gas Sensor. *Sensors and Actuators B-Chem.* **1996**, 36, 285-289.
 42. Oprea, A.; Frerichs, H.; Wilbertz, C.; Lehmann, M.; Weimar, U. Hybrid Gas Sensor Platform Based on Capacitive Coupled Field Effect Transistors: Ammonia and Nitrogen Dioxide Detection. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2007**, 127, 161-167.
 43. Kim, C.; Cho, I.; Shin, J.; Choi, K.; Lee, J.; Lee, J. A New Gas Sensor Based on MOSFET Having a Horizontal Floating-Gate. *IEEE Electron Device Lett.* **2014**, 35, 265-267.
 44. Rubio, R.; Santander, J.; Marco, S.; Fonseca, L.; Fonollosa, J.; Moreno, M. Non-selective NDIR Array for Gas Detection. *Smart Sensors, Actuators, and MEMS II* **2005**, 5836, 239-246.
 45. Zhao, P.; Krishnaiah, K. V.; Guo, L.; Li, T.; Ho, H. L.; Zhang, A. P.; Jin, W. Ultraminiature Optical Fiber-Tip 3D-Microprinted Photothermal Interferometric Gas Sensors. *Laser & Photonics Reviews* **2024**, 18, 2301285.
 46. Huebert, T.; Boon-Brett, L.; Black, G.; Banach, U. Hydrogen sensors - A review. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2011**, 157, 329-352.
 47. Mohseni Taromsari, S.; Shi, H. H.; Habibpour, S.; Kiddell, S.; Yu, A.; Park, C. B.; Naguib, H. E. An Ultra-Sensitive and Stable Electrochemical Sensor with an Expanded Working Range via *in situ* Assembly of 3-D Structures Based on MXene/GnR Nanohybrids. *J. Mater. Chem. A* **2023**, 11, 10748-10765.
 48. Donarelli, M.; Prezioso, S.; Perrozzi, F.; Bisti, F.; Nardone, M.; Giancaterini, L.; Cantalini, C.; Ottaviano, L. Response to NO₂ and Other Gases of Resistive Chemically Exfoliated MoS₂-based Gas Sensors. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2015**, 207, 602-613.
 49. Lee, K.; Gatensby, R.; McEvoy, N.; Hallam, T.; Duesberg, G. S. High-Performance Sensors Based on Molybdenum Disulfide Thin Films. *Adv. Mater.* **2013**, 25, 6699-6702.
 50. Devara, I. K. G.; Kwon, M. J.; Cho, S.; Kwon, D.; Park, J. H. Enhanced Sensitivity of Zero-bias-operated MXene Chemiresistive Sensor via Lignin Hybridization. *Ecomat* **2024**, 6, e12453.
 51. Grassi, M.; Malcovati, P.; Baschiroto, A. A 141-dB Dynamic Range CMOS Gas-sensor Interface Circuit without Calibration with 16-bit Digital Output Word. *IEEE J Solid State Circuits* **2007**, 42, 1543-1554.
 52. Lu, J.; Liu, D.; Zhou, J.; Chu, Y.; Chen, Y.; Wu, X.; Huang, J. Porous Organic Field-Effect Transistors for Enhanced Chemical Sensing Performances. *Adv. Funct. Mater.* **2017**, 27, 1700018.
 53. Klauk, H. Organic Thin-film Transistors. *Chem. Soc. Rev.* **2010**, 39, 2643-2666.
 54. Ren, X.; Yang, F.; Gao, X.; Cheng, S.; Zhang, X.; Dong, H.; Hu, W. Organic Field-Effect Transistor for Energy-Related Applications: Low-Power-Consumption Devices, Near-Infrared Phototransistors, and Organic Thermoelectric Devices. *Adv. Energy Mater.* **2018**, 8, 1801003.
 55. Minder, N. A.; Lu, S.; Fratini, S.; Ciuchi, S.; Facchetti, A.; Morpurgo, A. F. Tailoring the Molecular Structure to Suppress Extrinsic Disorder in Organic Transistors. *Adv. Mater.* **2014**, 26, 1254-1260.
 56. Li, Y.; Sonar, P.; Murphy, L.; Hong, W. High Mobility Diketopyrrolopyrrole (DPP)-based Organic Semiconductor Materials for Organic Thin Film Transistors and Photovoltaics. *Energy Environm. Sci.* **2013**, 6, 1684-1710.
 57. Yi, H. T.; Payne, M. M.; Anthony, J. E.; Podzorov, V. Ultra-flexible Solution-processed Organic Field-effect Transistors. *Nat. Commun.* **2012**, 3, 1259.
 58. Fukuda, K.; Takeda, Y.; Yoshimura, Y.; Shiwaku, R.; Lam Truc Tran;

- Sekine, T.; Mizukami, M.; Kumaki, D.; Tokito, S. Fully-Printed High-performance Organic Thin-film Transistors and Circuitry on One-micron-thick polymer films. *Nat. Commun.* **2014**, *5*, 4147.
59. Lee, Y.; Shin, M.; Thiyagarajan, K.; Jeong, U. Approaches to Stretchable Polymer Active Channels for Deformable Transistors. *Macromolecules* **2016**, *49*, 433-444.
60. Oh, J. Y.; Rondeau-Gagne, S.; Chiu, Y.; Chortos, A.; Lissel, F.; Wang, G. N.; Schroeder, B. C.; Kurosawa, T.; Lopez, J.; Katsumata, T.; Xu, J.; Zhu, C.; Gu, X.; Bae, W.; Kim, Y.; Jin, L.; Chung, J. W.; Tok, J. B.; Bao, Z. Intrinsically Stretchable and Healable Semiconducting Polymer for Organic Transistors. *Nature* **2016**, *539*, 411-415.
61. Arias, A. C.; MacKenzie, J. D.; McCulloch, I.; Rivnay, J.; Salleo, A. Materials and Applications for Large Area Electronics: Solution-Based Approaches. *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 3-24.
62. Islam, A. E. Current Status of Reliability in Extended and Beyond CMOS Devices. *Ieee Transactions on Device and Mater. Reliability* **2016**, *16*, 647-666.
63. Petti, L.; Muenzenrieder, N.; Vogt, C.; Faber, H.; Buethe, L.; Cantarella, G.; Bottacchi, F.; Anthopoulos, T. D.; Troester, G. Metal Oxide Semiconductor Thin-film Transistors for Flexible Electronics. *Appl. Phys. Rev.* **2016**, *3*, 021303.
64. Di, C.; Liu, Y.; Yu, G.; Zhu, D. Interface Engineering: An Effective Approach toward High-Performance Organic Field-Effect Transistors. *Acc. Chem. Res.* **2009**, *42*, 1573-1583.
65. Chakravarty, S.; Datta, A.; Sen Sarma, N. An Electrical Solid-state Sulphur Dioxide Vapour Sensor Based on a Polyvinyl Alcohol Formaldehyde Composite. *J. Mater. Chem. C* **2017**, *5*, 2871-2882.
66. Nketia-Yawson, B.; Jung, A.; Noh, Y.; Ryu, G.; Tabi, G. D.; Lee, K.; Kim, B.; Noh, Y. Highly Sensitive Flexible NH₃ Sensors Based on Printed Organic Transistors with Fluorinated Conjugated Polymers. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 7322-7330.
67. Liu, S.; Wang, H.; Wang, X.; Li, S.; Liu, H.; Chen, Y.; Li, X. Diverse Sensor Responses from Two Functionalized Tris(phthalocyaninato) europium Ambipolar Semiconductors Towards Three Oxidative and Reductive Gases. *J. Mater. Chem. C* **2019**, *7*, 424-433.
68. Yang, Y.; Katz, H. E. Hybrid of P3HT and ZnO@GO Nanostructured Particles for Increased NO₂ Sensing Response. *J. Mater. Chem. C* **2017**, *5*, 2160-2166.
69. Kim, Y.; An, T. K.; Kim, J.; Hwang, J.; Park, S.; Nam, S.; Cha, H.; Park, W. J.; Baik, J. M.; Park, C. E. A Composite of a Graphene Oxide Derivative as a Novel Sensing Layer in an Organic Field-effect Transistor. *J. Mater. Chem. C* **2014**, *2*, 4539-4544.
70. Zhou, X.; Niu, K.; Wang, Z.; Huang, L.; Chi, L. An Ammonia Detecting Mechanism for Organic Transistors as Revealed by Their Recovery Processes. *Nanoscale* **2018**, *10*, 8832-8839.
71. Luo, H.; Chen, S.; Liu, Z.; Zhang, C.; Cai, Z.; Chen, X.; Zhang, G.; Zhao, Y.; Decurtins, S.; Liu, S.; Zhang, D. A Cruciform Electron Donor-Acceptor Semiconductor with Solid-State Red Emission: 1D/2D Optical Waveguides and Highly Sensitive/Selective Detection of H₂S Gas. *Adv. Funct. Mater.* **2014**, *24*, 4250-4258.
72. Li, M.; Han, S.; Zhou, Y. Recent Advances in Flexible Field-Effect Transistors toward Wearable Sensors. *Adv. Intelligent Systems* **2020**, *2*, 2000113.
73. Wu, M.; Hou, S.; Yu, X.; Yu, J. Recent Progress in Chemical Gas Sensors Based on Organic Thin Film Transistors. *J. Mater. Chem. C* **2020**, *8*, 13482-13500.
74. Kwak, D.; Lei, Y.; Maric, R. Ammonia Gas Sensors: A Comprehensive Review. *Talanta* **2019**, *204*, 713-730.
75. Wang, Z.; Huang, L.; Zhu, X.; Zhou, X.; Chi, L. An Ultrasensitive Organic Semiconductor NO₂ Sensor Based on Crystalline TIPS-Pentacene Films. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1703192.
76. Khim, D.; Ryu, G.; Park, W.; Kim, H.; Lee, M.; Noh, Y. Precisely Controlled Ultrathin Conjugated Polymer Films for Large Area Transparent Transistors and Highly Sensitive Chemical Sensors. *Adv. Mater.* **2016**, *28*, 2752-2759.
77. Zhuang, X.; Han, S.; Huai, B.; Shi, W.; Yu, J. Sub-ppm and High Response Organic Thin-film Transistor NO₂ Sensor Based on Nanofibrillar Structured TIPS-pentacene. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2019**, *279*, 238-244.
78. Das, A.; Dost, R.; Richardson, T.; Grell, M.; Morrison, J. J.; Turner, M. L. A Nitrogen Dioxide Sensor Based on an Organic Transistor Constructed from Amorphous Semiconducting Polymers. *Adv. Mater.* **2007**, *19*, 4018-4023.
79. Chae, H.; Han, J. M.; Ahn, Y.; Kwon, J. E.; Lee, W. H.; Kim, B. NO₂-Affinitive Amorphous Conjugated Polymer for Field-Effect Transistor Sensor toward Improved NO₂ Detection Capability. *Adv. Mater. Technologies* **2021**, *6*, 2100580.
80. Jang, D.; Park, S. Y.; Lee, H. S.; Park, Y. D. Low-Regioregularity Polythiophene for a Highly Sensitive and Stretchable Gas Sensor. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, *15*, 32629-32636.
81. Seo, Y.; Lee, J. H.; Anthony, J. E.; Nguyen, K. V.; Kim, Y. H.; Jang, H. W.; Ko, S.; Cho, Y.; Lee, W. H. Effects of Grain Boundary Density on the Gas Sensing Properties of Triethylsilylethynyl-Anthradithiophene Field-Effect Transistors. *Adv. Mater. Interfaces* **2018**, *5*, 1701399.
82. Van Tran, V.; Jeong, G.; Wi, E.; Lee, D.; Chang, M. Design and Fabrication of Ultrathin Nanoporous Donor-Acceptor Copolymer-Based Organic Field-Effect Transistors for Enhanced VOC Sensing Performance. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, *15*, 21270-21283.
83. Gao, L.; Liu, C.; Peng, Y.; Deng, J.; Hou, S.; Cheng, Y.; Huang, W.; Yu, J. Ultrasensitive Flexible NO₂ Gas Sensors via Multilayer Porous Polymer Film. *Sensors and Actuators B-Chem.* **2022**, *368*, 132113.
84. Yuvaraja, S.; Surya, S. G.; Chernikova, V.; Vijjapu, M. T.; Shekhah, O.; Bhatt, P. M.; Chandra, S.; Eddaoudi, M.; Salama, K. N. Realization of an Ultrasensitive and Highly Selective OFET NO₂ Sensor: The Synergistic Combination of PDVT-10 Polymer and Porphyrin-MOF. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 18748-18760.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.