

# 유기 반도체 기반 IoT 가스 센서 기술의 응용

## Organic Transistor-based IoT Gas Sensor Technology

백도훈 · 나혜미 · 김 민 | Dohun Baek · Hyemi Na · Min Kim

School of Chemical Engineering, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Jeonju 54896, Korea

E-mail: minkim@jbnu.ac.kr

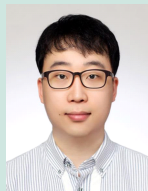
### 1. 서론

4차 산업혁명으로 전환하는 새로운 시대의 핵심 기술 중 하나로서 인공지능과 사물인터넷(Internet of things, IoT) 기술이 대두되고 있으며, 이들 기술이 우리의 주거 생활 환경에 어떻게 활용되고 적용되는지에 따라 미래 인류의 삶이 크게 달라질 거라 예상되고 있다. 모도 인텔리전스(Mordor Intelligence)는 IoT 시장이 2021년부터 2026년까지 연평균 24.05% 성장할 것으로 예상하고 있고,<sup>1</sup> 특히 5G 네트워크, 인공지능, 기계학습, 스마트홈, 스마트시티 등이 시장 성장을 견인할 것으로 분석했으며, 이는 대부분 4차 산업혁명 시대를 이끌어가는 산업군임을 알 수 있다.

다양한 가능성을 가지는 개별 IoT의 연결을 통해 유비쿼터스 컴퓨팅 시스템을 구현할 수 있으며, 이는 인공지능 및 휴먼 인터페이스 디바이스에 응용되고 있다. 특히 IoT 기술 중의 핵심은 물리적/환경적 변화를 측정 가능한 전기 신호로 변환시켜주는 센서이며, 이에 대한 에너지 공급과 무선 신호 전달 체계가 복합적으로 구성되어 실시간 환경 모니터링이 가능하다.<sup>2</sup> IoT 센서의 핵심적인 기반 기술로서 (1) 저비용 공정이 가능한 소재 개발과 (2) 장시간 디바이스 구동을 유지할 수 있는 소자 안정성을 확보함과 동시에 (3) 환경 변화를 예민하게 감지할 수 있는 감도가 필수적이다.<sup>3</sup> 또한, 기계적 유연성을 가지며 대면적 코팅이 가능한 소재를 활용하여 롤투롤 프린팅(roll-to-roll printing)으로 적용한다면 응용 범위가 크게 확대될 것으로 기대되며, 이에 따라 유기 반도체 소재가 강력한 후보군으로 연구되고 있다.<sup>4</sup> 이를 바탕으로 IoT 센서의 응용 범위가 헬스케어, 스마트홈, 팩토리, 스마트팜 및 이동기기 등에 확대되기 시작하면서 소재의 친환경성 또한 중요해지고 있다.

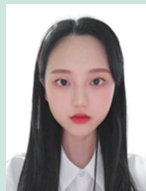
IoT 스마트 센서의 주요 기능으로 저전력 구동이 핵심이며, 장기간 실시간 탐지 및 신호 전달을 연속적으로 수행해야 하는 조건으로 가지며, 소자 구동을 위한 충분한 양의 전력을 생산하면서 동시에 저장이 가능해야 한다. 멀티 기능을 확보하기 위하여 여러 종류의 소자를 결합하여 심리스(seamless) 모듈 집적화로 구현하는

Author



백도훈

2022 전북대학교 화학공학부 (학사)  
2022-현재 전북대학교 화학공학부 (석사)



나혜미

2022 전북대학교 신소재공학부 (학사)  
2022-현재 전북대학교 화학공학부 (석사)



김 민

2008 POSTECH 화학공학과 (학사)  
2014 POSTECH 화학공학과 (박사)  
2015 POSTECH 고분자연구소 (Post-Doc.)  
2015-2019 Italian Institute of Technology (MSCA Research Fellow)  
2020-현재 전북대학교 화학공학부 조교수

것이 중요하다. 이를 적용한 차세대 센서 기술들로는 압력/변형 센서, 온도 센서, 화학/가스 센서, 방사선 센서 등이 있다. 다양한 센서의 감지 능력을 극대화하며 저전력 구동이 가능한 소자 구조로서, 유기 트랜지스터(organic field-effect transistor, OFET)이 주목을 받고 있다.<sup>5,6</sup> 유기 반도체 소재의 특징인 높은 유연성, 저중량, 생체무해성 및 효율적인 전하 이동성은 다양한 종류의 센싱 정보를 처리하는 로직 회로를 구성하는데 주요한 특성으로 작용한다.<sup>7</sup>

본 총설에서는 OFET 구조를 응용한 센서 다바이스의 구동 메커니즘 및 관련된 IoT 센서 응용에 대해서 소개하고자 한다(그림 1a). 유기 반도체의 화학구조, 나노 모폴로지 구조 및 박막 공정 방법, 그리고 다양한 기능성 나노물질의 도입에 대해서 자세히 살펴보고자 하며, 최종적으로 모듈 소자로의 구성 가능성에 대하여 덧붙이고자 한다. 유기 트랜지스터 센서의 다양한 분야 중 가스 센싱 응용에 대하여 종합하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 유기 트랜지스터 가스 센서의 구동 원리

유기 반도체 소재의 전하 이동은 공액 밴드(p-orbital)를 통한 전하의 이동 메커니즘으로 설명할 수 있으며,  $\pi$ 전자는 다음의 단계에 따라 특정 기체와 상호작용하게 된다. (1) 우선 감지 기체 분자가 유기 반도체 필름에 흡착되고, (2) 해당 감지 기체 분자가 표면에서의 확산으로 응집하게 된 후, (3) 감지 분자가 유기 반도체 분자에 물리 흡착 혹은 화학 흡착하며 전하를 매개로 전기적 상호작용을 한다. 이 때, 상호작용의 방식은 반데르발스 인력을 통한 dipole-dipole interaction, 수소 결합 및 정전기적 인력을 통한 화학적 결합 등이 있다. 이러한 방식으로 가스 분자의 흡착과 탈착이 반복적으로 이루어지며 가스 센서의 신호 변화를 야기하게 된다.

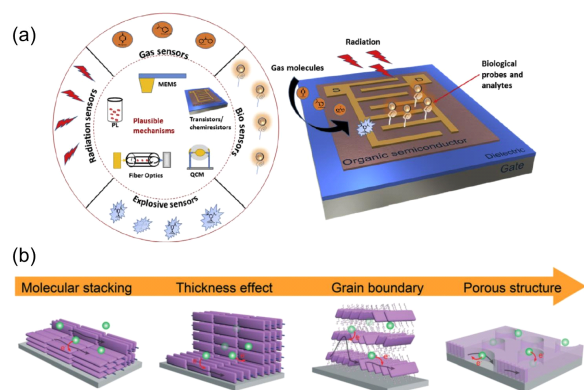


그림 1. (a) 유기 트랜지스터 기반의 가스 센서 응용 모식도 (b) 가스 감지 특성 향상을 위한 유기 반도체 박막의 개질 전략: molecular orientation, thickness, morphology, porous nanostructure.

이 때, 유기 반도체 소자의 화학 감지 능력을 극대화시키기 위해서는 감지 분자와의 상호 작용 정도를 정밀하게 제어할 수 있어야 한다. 기체 상호작용의 제어를 위해서는 유기 반도체의 화학 구조, 전하 전달 능력, 치환기, 필름 모폴로지 및 나노물질 첨가 등의 전략이 필요하다(그림 1b). 예를 들어, 기공성(porous) 나노구조를 갖는 박막은 가스 분자가 확산해서 벌크 필름 내부로 침투하기 쉽기 때문에 분자 흡착량을 높이고 감지 특성을 크게 향상시킨다. 또한, 감지하고자 하는 분자와 선택적 상호작용이 가능한 기능성 구조를 도입하여 특정 분자의 선택적 감지(selectivity)를 달성할 수 있다.

유기 반도체는 HOMO와 LUMO 에너지 레벨에 따라 p-type과 n-type으로 나뉜다. 이 때, 감지하고자 하는 가스 기체가 산화형인지 환원형인지에 따라 전도도의 변화가 다르게 나타난다. 산화형 기체인  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Cl}_2$  등이 p-type 유기 반도체에 흡착하게 되면 기체 분자가 유기 반도체의 전자를 뺏기 때문에 p-doping 특성이 유도되어 전도도가 향상되는 반면, 환원형 기체인  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$  등이 흡착하면 전자를 공여하기 때문에 전도도가 떨어지게 된다. 이에 대한 현상은 n-type 유기 반도체에서는 반대로 나타나게 된다.

### 2.2 유기 반도체의 화학 구조 제어

기체의 감지 능력을 높이기 위해 유기 반도체의 분자 구조를 제어한 연구를 소개하고자 한다. 모델 시스템으로 가장 많이 쓰이는 P3HT는 OFET 소자에 널리 응용되고 있는 고분자이다. Koo 그룹은 P3HT의 hexyl 외의 곁가지로 trifluoromethyl ketone(TFK)으로 치환함으로써 기체 반응도를 높이는 연구를 발표하였다(그림 2a).<sup>8</sup> 특히, TFK 작용기의 electrophilic 특성은 암모니아 기체와의 반응속도를 높여 가스 센서로 응용되었다.

Lee 그룹은 DPP구조의 측쇄 구조 변화에 따른  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  기체의 감지 특성을 비교하였다.<sup>9</sup> Branched alkyl 곁가지 구조의 변화를 가지는 PDBF와 ethoxy 곁가지를 가지는 2EO-PDBF를 비교하였다(그림 2b). 해당 구조 중 2EO-PDBF는  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  기체 중에서  $\text{NO}_2$ 에 대한 반응성이 2000배 이상 뛰어난 것으로 분석되었다. 이는 glycol 기능기가  $\text{NO}_2$  분자의 흡착 및 확산에 유리하기 때문이다.

Katz 그룹은 PQT12의 sulfide group을 도입하여 trap density를 증가시켜, 이를 통한 가스 분자와의 redox interaction을 유도하였다(그림 2c).<sup>10</sup> Thiophene ring에 인접한 sulfide 작용기는 박막의 모폴로지가 작은 결정을 갖고 더 불규칙적으로 만들어  $\text{NO}_2$  기체가 흡착되기 좋은 조건의 표면을 유도해내어, PQT에 흡착한  $\text{NO}_2$  기체의 양을 증가시키고 화학적 상호인력을 통한 강한 도핑 효과를 가진다.

Zhang 그룹은 PDPP구조의 본쇄에 thymine 작용기를 측면쇄 말단기에 결합하여 CO와의 상호인력을 증대시킨 연구를

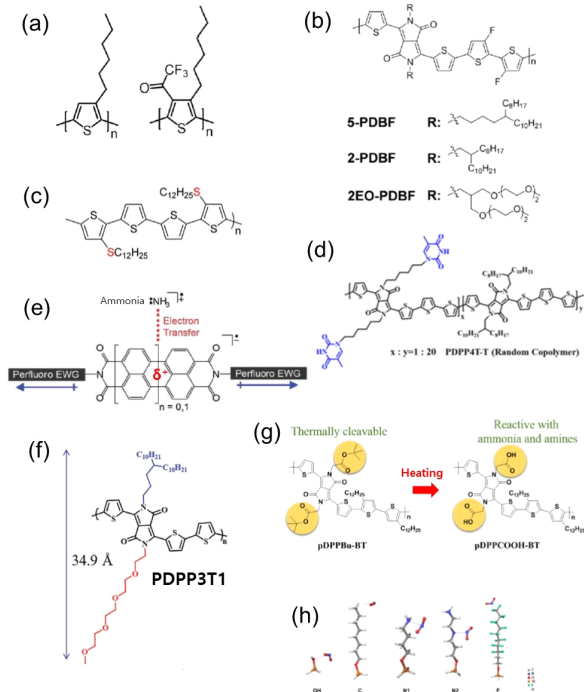


그림 2. 가스 감지 향상을 위한 유기 반도체 분자의 분자 구조 개질 전략. (a) P3HT and P3HT-S; (b) 5-PDBF, 2-PDBF, and 2EO-PDBF; (c) PQT-S; (d) AAAA; (e) BBBB; (f) PDPP3T1; (g) pDPPCOOH-BT; (h) hydroxyl, alkyl, amino, perfluorooctyl을 말단기로 가지는 자기 조립 단분자층.

발표하였다(그림 2d).<sup>11</sup> Thymine 작용기는 수소결합에 의해 고분자 사슬간의 상호인력을 증대시켜 결정성을 향상시켰으며, Pd(II)와 coordination을 유도하여 CO에 대한 반응성을 크게 높일 수 있다. 또한, Hg(II)의 coordination을 통해서 H<sub>2</sub>O와의 상호인력을 증대시켜 여러 종류의 기체에 따른 센서 특성을 조절 가능함을 보여주었다.

Kim 연구 그룹은 PDI 유기반도체에 N-치환된 perfluoroalkyl 작용기의 도입을 통해 강력한 전자받개 특성을 갖도록 하여, 아민 기체와의 상호작용을 극대화시켰다(그림 2e).<sup>12</sup> Electron-deficient 구조와 electron-withdrawing group의 도입은 시너지 효과를 가지며, Lewis base 가스와의 반응도를 향상시켰으며, 이를 가스 센서에 적용하기 위한 화학구조의 디자인 룰을 제공하였다.

Zhang 그룹은 PDPP3T1의 유기반도체에 hydrophilic tetraethylene glycol(TEEG) 작용기를 측쇄에 도입하여 고분자 단일 분자층을 안정적으로 형성하는 데 성공하였으며, Langmuir-Schaefer 방법으로 높은 전하이동도의 초박막을 제작하였으며, 공기 계면에서의 알코올 기체와의 반응성을 극대화시켰다(그림 2f).<sup>13</sup> 또한, Zhang 그룹은 PDPPBu 기반의 고분자 측쇄로서 열처리를 통해 분리가 가능한 tert-Butoxy를 적용하여 COOH 그룹으로의 열변환을 유도하였다(그림 2g).<sup>14</sup> COOH 작용기는 용액 상 용해도가 떨어져서 용액 공정이 어렵지만,

Tert-butyl 그룹으로부터의 COOH 변환은 해당 문제를 용액 공정 후 열처리를 통하여 쉽게 해결할 수 있다. COOH 작용기는 암모니아 기체와 상호작용이 뛰어나서 기체 감지의 우수한 특성을 보였다. 10 ppb 까지의 최저 농도까지 감지할 수 있었다.

Park 그룹은 유기 반도체 뿐만 아니라 전하수송채널이 형성되는 dielectric과의 계면을 제어하기 위하여 말단기 작용기가 조절된 자기조립 단일분자층(SAM)을 도입하였으며, 작용기에 따른 기체 감지성의 변화에 대하여 발표하였다(그림 2h).<sup>15</sup> 아민기를 포함한 SAM, 알킬 구조를 가진 SAM, perfluorooctyl구조를 가지는 SAM을 비교하였을 때, NO<sub>2</sub>에 대한 반응성이 아민기를 가진 SAM에서 가장 높게 측정되었다. 해당 연구는 감지하고자 하는 기체 분자의 종류에 따라 작용기의 원소 및 구조가 다양하게 제어될 수 있음을 보여준다.

## 2.3 유기 반도체의 나노 구조 제어

화학 구조의 변화뿐만 아니라, 유기 반도체 박막의 모폴로지 및 나노 구조에 따라 기체의 박막 내 확산 속도 및 흡착량이 크게 달라지기 때문에, 기체 센서로 활용되는 유기 박막층의 나노 구조 제어에 관한 많은 연구가 발표되었다. 첫째로 dielectric 계면과 유기박막층 내부로 기체가 빠르게 침투할 수 있도록 수 나노미터의 두께를 가지는 초박막 공정을 도입할 수 있으며, 둘째로 나노선 혹은 마이크로선 구조의 자기조립된 나노구조체를 도입하여 기체 표면 흡착량을 높이고 전하이동도를 높일 수 있고, 셋째로 다공성 구조(수백 nm - 수  $\mu$ m)를 도입하여 박막 표면에 확산할 수 있는 기체의 양을 늘려 흡착/탈착 속도의 극대화가 가능하다. 특히 다공성 구조 박막은 형태 변형에도 견고한 센서 특성을 유지할 수 있어 유연 소자로 구현될 수 있다.

Chi 그룹은 DTBDT-C6의 두께에 따른 NO<sub>2</sub> 감지 특성에 대해서 분석한 결과, 5 nm의 초박막 두께에서 가장 높은 성능의 가스 센싱을 발표하였으며, 이는 본래의 낮은 전하 농도와 효율적인 전하 이동도가  $\pi$ - $\pi$  인력에 의한 가스 흡착으로 큰 폭의 전하이동도의 변화를 야기하였다(그림 3a).<sup>16</sup>

Yu 그룹은 TIPS-pentacene을 off-center 스펀코팅 방식을 이용하여 정렬된 나노와이어로 제작할 수 있었으며, 정렬된 나노선은 전극과의 배향성에 따라 기체 감응도의 차이를 보였다.<sup>17</sup> 특히, 평행하게 배치된 나노선과 전극을 가진 소자는 정렬도가 낮은 소자보다 최대 7배의 높은 가스 감지 능력을 보여주었다.

Chang 그룹은 P3HT 고분자 박막층에 용매 기체 어닐링 방식을 이용하여 나노선의 형성을 유도하였으며, 해당 방식은 전하 이동 특성을 크게 향상시키고 동시에 부피대비 표면적의 비율을 높여 가스 흡착 능력이 우수한 센서를 제작할 수 있었다(그림 3b).<sup>18</sup> 박막 내 나노결정 핵을 미리 형성한 경우 높은 종횡비의 나노선을 형성할 수 있었으며, 휘발성 유기



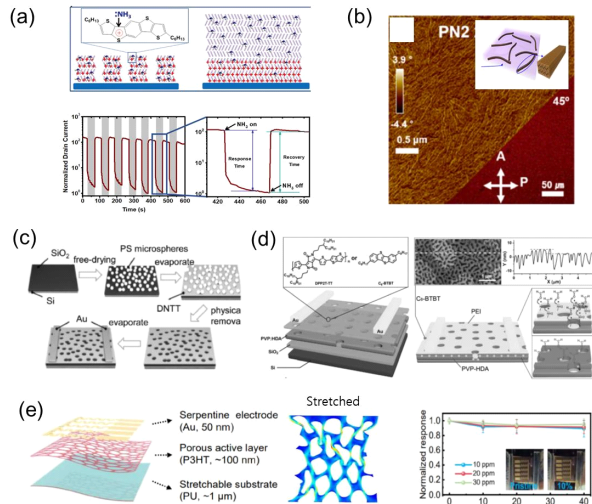


그림 3. 가스 감지 향상을 위한 유기반도체 박막 나노모폴로지 제어 전략. (a) DTBDT-C6의 초박막 두께 제어. (b) Solvent annealing을 통한 P3HT 나노선 도입. (c) PS 마이크로구형체를 이용한 DNTT porous 구조 제작. (d) HDA와 PVP블렌드 상분리를 이용한 porous 구조 구현. (e) 수분 응결 기법을 활용한 porous 구조 제작 및 stretchable 가스 센서 활용.

용매를 효과적으로 검출할 수 있는 가스 센서 성능을 발표하였다.

Huang 그룹은 다공성 표면 구조를 만들어내기 위해 PS 마이크로구형체를 이용해 초기 템플레이트를 제작하고 PS 제거 후 DNTT 유기층을 증착하여 마이크로 기공 구조를 가지는 유기 반도체 박막을 형성하였다(그림 3c).<sup>19</sup> 이를 이용하여 전하 이동 네트워크의 직접적인 기체 흡착량을 높여 최소 10 ppb의 암모니아 기체를 감지해내었다. Diao 그룹은 나노기공의 크기를 제어하기 위한 방법으로 HDA (crosslinking agent)와 PVP를 혼합하였다(그림 3d).<sup>20</sup> 두 소재 사이의 miscibility 차이로부터 50에서 700 nm의 기공을 제어할 수 있었으며, 이를 통하여 최소 1 ppb의 암모니아 기체를 감지하는 가스 센서를 구현해냈다. 해당 방법은 DPP 고분자 외에도 C8-BTBT 소재에도 적용 가능하여 포름알데히드 기체를 검출해내는 데 응용되었다.

Huang 그룹은 플렉서블 소자를 제작하기 위하여 3D 다층 마이크로 기공층을 제작하였으며, 이를 위하여 수분 응결로 인해 기공이 생긴 P3HT와 SEBS층을 layer-by-layer로 적층하여 다공성 3D 박막층을 완성하였다(그림 3e).<sup>21</sup> 해당 복합 기공층은 기체 흡착량을 비약적으로 증가시켜 23 ppb까지 감지 가능한 NO<sub>2</sub> 가스 센서를 완성함과 동시에, 3 mm의 좁은 bending radius에도 특성이 안정적으로 유지되는 유연 디바이스로의 응용이 가능하였다.

## 2.4 유기 반도체의 기능성 나노결정 도입

나노구조 및 기공의 형성 외에도 기체 흡착량을 비약적으로

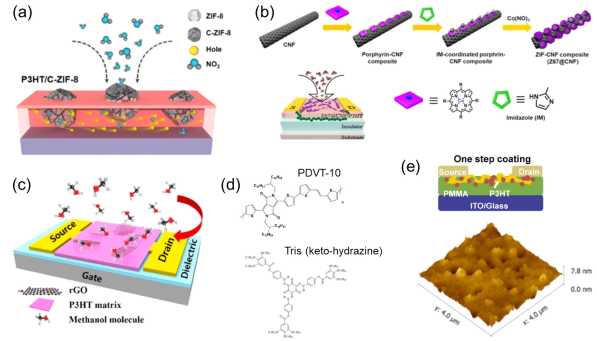


그림 4. (a) Metal-Organic-Framework(ZIF-8) 나노결정과 P3HT의 블렌드를 통한 NO<sub>2</sub> 감지 전략. (b) MOF-CNF와 블렌드시킨 P3HT 박막 기반의 NO<sub>2</sub> 가스 센서 소자. (c) rGO와 P3HT의 블렌드를 통한 메탄올 가스 감지 특성 향상. (d) PDVT-10과 Tris(keto-hydrazine)의 블렌드를 통한 H<sub>2</sub>S 가스 감지 특성 향상. (e) P3HT와 PMMA 블렌드 박막의 기공 구조 형성을 이용한 NO<sub>2</sub> 흡착 특성 향상 전략.

늘릴 수 있는 secondary 나노결정을 도입한 블렌드 전략이 활용되었다. 주로 부피대비 표면적 비율이 높은 나노기공성 소재가 다양하게 사용되며, metal organic framework, carbon nanotube, graphene oxide, 폴리머 블렌드 등이 가스센서에 활용되었다.

Park 그룹은 metal organic framework(MOF)인 zeolite를 첨가하여 P3HT의 기체반응성을 크게 향상시켰다.<sup>22</sup> ZIF-8이 포함된 P3HT 블렌드는 간단한 용액 공정을 통해 박막 제작이 가능하며, ZIF-8의 증대된 기공 표면적은 NO<sub>2</sub> 기체 흡착량을 크게 증가시켰다(그림 4a). 또한, 첨가된 ZIF-8 나노결정은 P3HT의 자기조립 결정화도를 높이며 전하 이동도를 5배 이상 향상시켰고 기체 감지도를 100% 이상 향상시켰다. Park 그룹은 carbon nanofiber에 MOF를 결합시킨 MOF-CNF를 P3HT에 첨가시켜 높은 기체 흡착량 뿐 아니라 뛰어난 전하 이동 특성을 부여하였다(그림 4b).<sup>23</sup> 해당 소재를 활용하여 NO<sub>2</sub>에 대한 기체 감지 특성을 높이면서 동시에 공기 중 수분 및 산소에 의한 소재 산화 정도를 감소시켰다. Chang 그룹은 reduced graphene oxide를 P3HT에 첨가시켜 P3HT의 분자 정렬도를 6배 향상시키고 기체 흡착 표면적을 높여서 휘발성 유기 용매 중 특히 메탄올 기체에 대한 가스 흡착 감지 능력을 110% 가량 향상시켰다(그림 4c).<sup>24</sup>

다양한 유기 분자와의 유기 반도체 블렌드는 유기 분자의 기체 상호 인력을 활용하면서 표면 모폴로지를 제어할 수 있다는 장점에 다방면으로 연구되고 있다. Salama 그룹은 tris(keto-hydrazine)을 첨가하여 PDVT-10 유기 반도체와의 블렌드 박막을 제작하여 H<sub>2</sub>S 기체와의 상호작용을 증가시켰다.<sup>25</sup> 해당 첨가제는 나노기공성 구조를 유도하고 H<sub>2</sub>S 기체와 산-염기 반응을 통하여 64배 이상의 가스 감지도를 높였으며 PDVT의 전하이동도 또한 향상시켰다(그림 4d). Yu 그룹은 P3HT/PMMA 블렌드 구조를 활용하여 PMMA의 NO<sub>2</sub> 흡착

특성이 가스 감지 센서의 성능에 좋은 영향을 준다는 결과를 발표하였다(그림 4e).<sup>26</sup> 특히 one-step 스펙코팅 방식을 통하여 수직 상분리를 유도하여 박막의 공기 중 안정성을 향상시키면서 동시에 가스 감지 민감도를 향상시켜 0.7 ppb의 최소 감지 한계를 보였다.

## 2.5 센서 집적 회로 구현

많은 수의 센서 디바이스를 집적화한 어레이 소자를 제작해 단일 소자의 기능성을 확장시킬 수 있다. 유기 트랜지스터 어레이는 여러 종류의 가스 감지체를 구별해내는 데 탁월한 성능을 보인다. 여러 종류의 유기 반도체와 가스 분자와의 다르게 상호 작용하는 것을 활용하여 어레이 신호를 각각 분석하여 특정 가스의 감지 신호를 구별해낸다.

Katz 그룹은 11개의 유기반도체를 어레이로 제작하여 멀티플 감지 파라미터를 정해 16종의 가스 분자에 대해 신호를 구분해내는 선별적 라이브러리를 구축하였다(그림 5a).<sup>27</sup> 또한, PQT-12와 PS 블렌드를 활용하여 수분이 존재하는 공기 중에서도 안정적으로 작동하는 센서 어레이를 제작하였으며, 해당 모듈은 200 ppb의 NO<sub>2</sub>에도 93%의 sensitivity를 보였고, 인버터 소자를 제작해  $V_{out}$ 을 sensing signal로 안정적으로 발생시켰다(그림 5b).<sup>28</sup> Salama 그룹은 PDVT-19과 MOF의 블렌드 소자를 이용하여 높은  $V_{out}$ 을 안정적으로 발생시키며 가스 기체를 감지할 경우 “1”의 시그널을 발생시켜 디지털

센서로의 응용 가능성을 확인하였다(그림 5c).<sup>29</sup> Oh 그룹은 PQT-12와 C[8]A분자의 블렌드를 동유체력 프린팅 방식(hydrodynamic printing)을 이용한 나노선 제작을 통하여 가스 센서 핵심 소재로 응용하였으며, 모듈 소자를 에너지 저장 장치와 블루투스 통신 어레이와 집적시켜 에탄올 기체에 대한 감지 신호를 실시간으로 무선 송수신 가능한 멀티 소자를 구현하였다(그림 5d).<sup>30</sup>

## 3. 결론

유기 반도체는 트랜지스터의 핵심 소재로서 감지 분자와의 상호 인력에 따라 전하 이동 특성이 크게 변화하여 웨어러블 센서로 응용될 수 있는 최적 소자이다. 유기 반도체의 다양한 화학 구조, 정밀 모폴로지 제어, 기능성 나노소재 도입 등의 전략을 통하여 가스 센서 특성을 크게 향상시킨 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, IoT 센서로 응용 가능성이 높아 앞으로 스마트홈, 인체신호, 로봇틱스에 쓰이게 될 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. Mordor Intelligence Inc; <https://www.marketresearch.com/Mordor-Intelligence-LLP-v4018/IoT-Sensor-Growth-Trends-COVID-30713030/> (2022).
2. B. Dong, Q. Shi, Y. Yang, F. Wen, Z. Zhang, and C. Lee, *Nano Energy*, **79**, 105414 (2021).
3. J. A. Cardenas, J. B. Andrews, S. G. Noyce, and A. D. Franklin, *Nano Futures*, **4**, 012001 (2020).
4. S. G. Surya, H. N. Raval, R. Ahmad, P. Sonar, K. N. Salama, and V. R. Rao, *TrAC Trends Anal. Chem.*, **111**, 27 (2019).
5. M. Wu, S. Hou, X. Yu, and J. Yu, *J. Mater. Chem. C*, **8**, 13482 (2020).
6. Y. Wang, J. Zhang, S. Zhang, and J. Huang, *Polym. Int.*, **70**, 414 (2021).
7. D. Zhi, E. Zhang, B. Zhang, and F. Zhang, *Mol. Sys. Design Eng.*, **7**, 553 (2022).
8. Y. G. Kim, B. M. Oh, H. Kim, E. H. Lee, D. H. Lee, J. H. Kim, and B. Koo, *Sens. Actuators B*, **367**, 132076 (2022).
9. Y. Kang, D. H. Kwak, J. E. Kwon, B.-G. Kim, and W. H. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 31910 (2021).
10. H. Li, J. Dailey, T. Kale, K. Besar, K. Koehler, and H. E. Katz, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 20501 (2017).
11. Y. Yang, Z. Liu, L. Chen, J. Yao, G. Lin, X. Zhang, G. Zhang, and D. Zhang, *Chem. Mater.*, **31**, 1800 (2019).
12. B. M. Oh, S.-H. Park, J. H. Lee, J. C. Kim, J. B. Lee, H. J. Eun, Y.-S. Lee, B. E. Seo, W. Yoon, J. E. Kwon, H. Yun, S. K. Kwak, O. P. Kwon, and J. H. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2101981 (2021).
13. S.-F. Yang, X. Zhang, P.-L. Chen, Z.-T. Liu, J.-W. Tian,

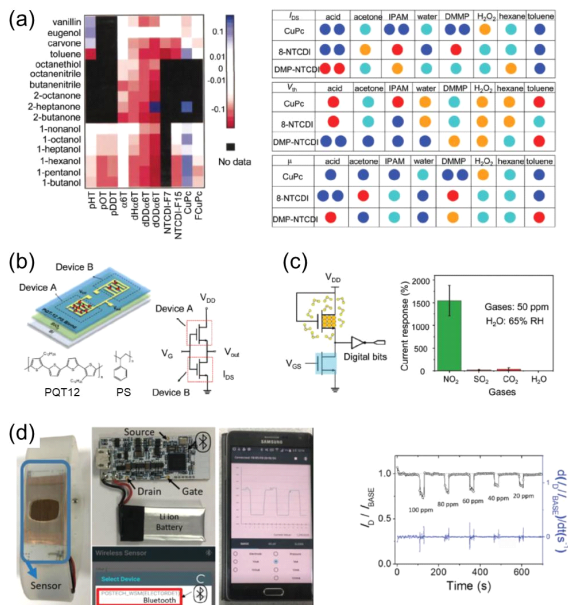


그림 5. (a) NTCDI와 CuPc의 모듈화를 통한 다양한 가스 감지 특성의 라이브러리 구축. (b) PQT12와 PS를 활용한 NO<sub>2</sub> 감지 센서 모듈 구성도. (c) PDVT-10 유기트랜지스터의 analog-to-digital 변환 시스템의 구성도 및 NO<sub>2</sub> 감지 특성 비교. (d) PQT-12/C[8]A 유기트랜지스터를 활용한 wireless 신호 송신 모듈 구성 사진 및 이의 실시간 에탄올(100 ppm 이하) 감지 곡선.

- G.-X. Zhang, and D.-Q. Zhang, *Adv. Electron. Mater.*, **3**, 1700120 (2017).
14. Y. Yang, G. Zhang, H. Luo, J. Yao, Z. Liu, and D. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 3635 (2016).
  15. Y. E. Hahm, B. H. Park, S. Y. Park, T. K. An, J. Lee, and Y. D. Park, *Org. Electron.*, **104**, 106493 (2022).
  16. L. Li, P. Gao, W. Wang, K. Müllen, H. Fuchs, and L. Chi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **52**, 12530 (2013).
  17. X. Zhuang, S. Han, B. Huai, W. Shi, and Y. Junsheng, *Sens. Actuators B*, **279**, 238 (2019).
  18. S. Y. Shin, M. Jang, H. J. Cheon, S. Go, H. Yoon, and M. Chang, *Sens. Actuators B*, **351**, 130951 (2022).
  19. J. Lu, D. Liu, J. Zhou, Y. Chu, Y. Chen, X. Wu, and J. Huang, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1700018 (2017).
  20. F. Zhang, G. Qu, E. Mohammadi, J. Mei, and Y. Diao, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1701117 (2017).
  21. C. Liu, M. Wu, L. Gao, H. Liu, and J. Yu, *Sens. Actuators B*, **371**, 132540 (2022).
  22. J. I. Lee, M. Kim, J. H. Park, B. Kang, C. Y. Lee, and Y. D. Park, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 24005 (2021).
  23. E. H. Kwon, M. Kim, C. Y. Lee, M. Kim, and Y. D. Park, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 10637 (2022).
  24. H. J. Cheon, S. Y. Shin, V. V. Tran, B. Park, H. Yoon, and M. Chang, *Chem. Eng. J.*, **425**, 131424 (2021).
  25. S. Yuvaraja, V. N. Bhyranalyar, S. A. Bhat, S. G. Surya, C. V. Yelamagad, and K. N. Salama, *Mater. Horiz.*, **8**, 525 (2021).
  26. S. Hou, J. Yu, X. Zhuang, D. Li, Y. Liu, Z. Gao, T. Sun, F. Wang, and X. Yu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 44521 (2019).
  27. W. Huang, J. Sinha, M.-L. Yeh, J. F. M. Hardigree, R. LeCover, K. Besar, A. M. Rule, P. N. Breysse, and H. E. Katz, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 4094 (2013).
  28. H. Fan, H. Li, J. Han, N. McKeever, J. Yu, and H. E. Katz, *ACS Sens.*, **4**, 3240 (2019).
  29. S. Yuvaraja, S. G. Surya, M. T. Vijjapu, V. Chernikova, O. Shekhah, M. Eddaoudi, and K. N. Salama, *Phys. Status Solidi*, **14**, 2000086 (2020).
  30. O. Y. Kweon, M. Y. Lee, T. Park, H. Jang, A. Jeong, M.-K. Um, and J. H. Oh, *J. Mater. Chem. C*, **7**, 1525 (2019).