

유기 전기화학 트랜지스터 기반 인공 시냅스 및 뉴런 연구 동향

정현학 

한국공학대학교 반도체공학부

Recent Advances in Artificial Synapses and Neurons Based on Organic Electrochemical Transistors

Hyunhak Jeong

Department of Semiconductor Engineering, Tech University of Korea, Siheung 15073, Korea

(Received December 31, 2025; Accepted January 23, 2026)

Abstract: Neuromorphic computing, which mimics the energy-efficient parallel processing capabilities of the human brain, has emerged as an alternative to traditional von Neumann architectures that struggle with high power consumption in the era of artificial intelligence (AI). Despite the potential of Si-based neuromorphic chips, they often face fundamental limitations in integration density and biological compatibility, necessitating the development of next-generation devices that can better emulate the ionic signaling of biological systems. This review provides a comprehensive analysis of the recent research trends in artificial synapses and neurons based on organic electrochemical transistors (OECTs), highlighting their unique ability to achieve high transconductance and mixed ionic-electronic conduction at ultra-low operating voltages. We discuss how OECTs successfully replicate diverse synaptic plasticities and complex neuronal spiking behaviors through advanced material engineering and structural optimizations such as vertical architectures. Furthermore, this review discusses the implementation of high-order neural functions, including associative learning and logic operations, which are facilitated by the inherent electrochemical dynamics of organic semiconductors. Finally, overcoming current challenges in reliability and scalability will establish OECTs as a pivotal platform for low-power neuromorphic hardware and bio-integrated electronics.

Keywords: Organic electrochemical transistors, Artificial synapse, Artificial neuron, Neuromorphic computing

1. 서론

인공지능 기술의 비약적 발전으로 처리해야 할 데이터 양과 연산 복잡도가 폭발함에 따라, 기존 폰 노이만(von Neumann) 구조 기반 컴퓨팅 시스템의 에너지 효율 한계가 두드러지고 있다. 메모리와 프로세서가 물리적으로 분

리된 폰 노이만 구조에서는 데이터 전송 병목 현상(memory wall)이 발생하여 대규모 연산 시 매우 높은 전력 소모와 처리 속도 저하 문제가 발생한다. 반면 인간의 뇌는 불과 수십 와트의 전력만으로도 10^{14} 개 이상의 시냅스 연결망을 통해 방대한 양의 정보를 병렬 처리함으로써 시각, 촉각, 인지 등의 고차원적 기능을 높은 에너지 효율로 수행한다. 이러한 생물학적 신경망의 원리를 모방하여 메모리와 연산 기능을 통합하고 병렬 신호 처리를 구현하려는 뉴로모픽 컴퓨팅(neuromorphic computing) 기술은 기존 폰 노이만 구조 기반 컴퓨팅 시스템의 한계 극복을

✉ Hyunhak Jeong; hjeong@tukorea.ac.kr

Copyright ©2026 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

위한 차세대 기술로 부상하고 있다 [1-3].

이 같은 뉴로모픽 컴퓨팅 하드웨어 구현을 위한 핵심 구성요소인 인공 시냅스 및 뉴런 개발을 위해 다양한 전자소자 기술이 연구되고 있다. 예를 들어, IBM의 TrueNorth와 같은 전통적인 실리콘 CMOS 소자 기반 뉴로모픽 칩은 하나의 시냅스를 구현하는 데 여러 개의 트랜지스터를 필요로 하므로 집적도와 에너지 효율에 근본적인 한계가 있다 [4,5]. 또한 실리콘 소자는 전기적 자극에 의해 작동하는 반면, 생물학적 신경계는 이온의 이동과 화학 물질의 농도 변화를 통해 신호를 전달하기 때문에 두 시스템 간의 직접적인 상호작용이 어렵고 생체적합성도 떨어진다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 멤리스터(memristor), 상변화 메모리(phase change memory), 강유전체 전계효과 트랜지스터(ferroelectric field-effect transistor), 유기 전기화학 트랜지스터(organic electrochemical transistor, OECT) 등 차세대 소자 기반 인공 시냅스 및 뉴런 개발 연구가 제시되어 왔다 [6-10]. 이러한 후보 기술 중 특히 OECT 소자는 저전압 동작, 높은 트랜스컨덕턴스(transconductance, g_m), 이온-전자 혼성 전도(mixed ionic-electronic conduction)와 같은 독특한 특성 덕분에 뉴로모픽 소자의 핵심 요소로 대두되고 있다 [11-16]. 기존의 멤리스터 소자는 높은 쓰기 전압과 확률적인 스위칭 거동의 한계를 지니지만, OECT 기반 시냅스 트랜지스터는 3단자 소자로 전기화학적 게이팅을 통해 약 1 V 이내의 낮은 전압에서도 다수의 전도도 상태를 연속적으로 조절할 수 있어 에너지 효율적인 스위칭이 가능하다 [17]. 또한 이러한 장점은 OECT 소자가 지닌 높은 생체적합성과 기계적 유연성이라는 장점과 결합되어 생체 인터페이스 및 저전력 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템에서 유용하게 활용될 수 있다 [18].

본 리뷰에서는 OECT 기반 인공 시냅스와 뉴런의 개발 사례와 최신 연구 동향을 분석하고, 현재 직면한 기술적 한계와 이를 극복하여 다가오는 생체 통합 플랫폼으로 나아가기 위한 미래 방향성을 논의하고자 한다.

2. OECT 기본 이론

OECT는 게이트 전극이 전해질을 매개로 유기 반도체 채널과 이온기반 전기적 상호작용을 통해 결합된 3단자 소자이다. 게이트 전극과 채널은 액체-겔-고체 상태의 전해질을 통해 물리적으로 분리되어 있으며, 게이트 전압(V_G)이 인가되면 전해질 내 이동성 이온이 채널로 주입되거나 추출되어 채널의 도핑 상태와 전도도가 변화하는 형태로

동작한다. 이러한 독특한 전기화학적 도핑 메커니즘은 표면 전계 효과에 기반한 금속-산화막-반도체 전계효과 트랜지스터(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)와 달리, 채널의 전기전도도를 더욱 효율적으로 조절할 수 있게 하여 매우 낮은 V_G 에서도 큰 드레인 전류 변조를 달성할 수 있도록 한다. 본 절에서는 저전력 뉴로모픽 전자소자 응용을 위한 OECT 소자 특성에 초점을 맞추어 소자의 기본 구조와 동작 원리 등에 대해 간략히 논의하고자 한다.

2.1 소자 구조

OECT는 일반적으로 평면 구조와 수직 구조의 두 가지 형태로 제작된다. 가장 널리 사용되는 평면 구조에서는 기판 위에 소스, 드레인 전극과 유기 혼성 이온-전자 전도체(organic mixed ionic-electronic conductor, OMIEC) 채널이 수평 방향으로 배치된다. 이때 게이트 전극은 채널 상부에 위치하는 탑-게이트(top-gated) 방식 또는 동일 평면의 사이드-게이트(side-gated) 방식으로 배치되며, 전해질이 두 영역을 연결한다 [그림 1(a)]. 두 방식 모두 게이트 전기장이 전해질을 통해 채널에 결합되며, 이온의 이동을 통해 채널 도핑과 전도도가 조절된다. 반면, 수직 구조는 소자 구성 요소가 3차원적으로 적층되며, 채널 길이를 나노미터 수준까지 크게 단축할 수 있다는 장점이 있다 [그림 1(b,c)]. 이러한 구조는 고집적 및 소자 소형화 측면에서 유망한 기술로 평가되고 있다 [19-21].

구조와 무관하게, 소자의 성능은 채널의 폭(W), 길이(L), 두께(d)와 같은 기하학적 요소에 의해서도 크게 좌우된다. 예를 들어, g_m 은 채널의 부피 대 길이 비율에 의해 결정되며, $(W \times d / L)$ 에 비례한다 [그림 1(d)] [22]. 따라서 g_m 향상을 위해 W/L 비를 최대화하는 전략이 주로 적용되며, 이를 위해 빗살형 전극 패턴(interdigitated electrode)을 활용하여 제한된 면적에서 넓은 채널 폭을 확보하기도 한다 [23]. 그러나 g_m 과 소자의 동작 속도 간에는 근본적인 상충관계(trade-off)가 존재한다. 예를 들어, 두꺼운 채널층은 더 많은 이온을 저장할 수 있어 정전용량과 g_m 이 증가하나, 이온 도핑/탈도핑(de-doping)에 필요한 시간이 길어져 응답 속도가 느려진다 [22]. 반대로 얇은 채널층은 이온 수송에 관여하는 RC 시정수(time constant)가 작아 빠른 스위칭이 가능하나, 정전용량 감소로 g_m 이 감소한다. 결국 고성능 OECT를 설계하기 위해서는 저전압 동작, 높은 이득, 빠른 응답, 안정적 작동 간의 상충 관계를 고려한 기하학적·소재적 요소의 정교한 최적화가 필수적이다.

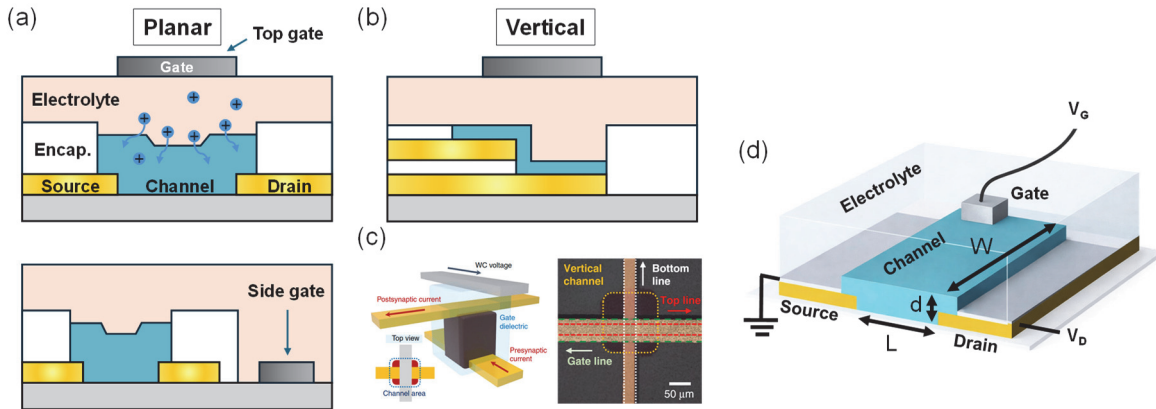


Fig. 1. Schematic illustration of OECT device architecture. (a) Planar structure: top-gated (top panel), side-gated (bottom panel), (b) vertical structure, (c) schematic example and optical microscopy image of an ion gel-gated vertical OECT, and (d) planar structure with channel dimensions: length (L), width (W), and thickness (d). ((c): Reprinted with permission from Ref. [75]. Copyright 2020, Springer Nature.)

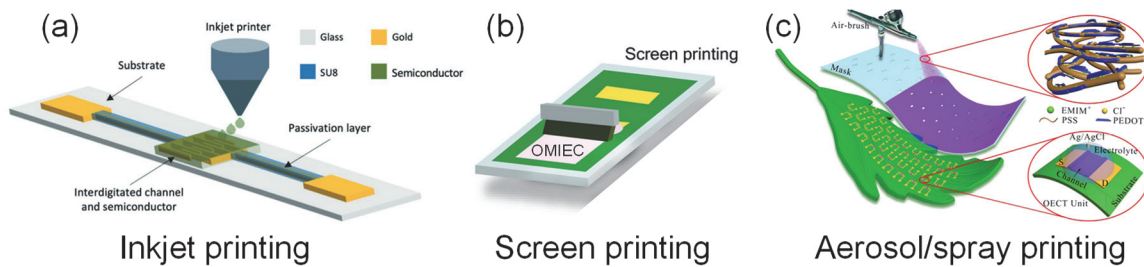


Fig. 2. Fabrication techniques for OECTs: (a) Inkjet printing, (b) screen printing, and (c) aerosol/spray printing. ((a): Reprinted with permission from Ref. [76]. Copyright 2023, Wiley-VCH GmbH. (b): Reprinted with permission from Ref. [31]. Copyright 2023, Wiley-VCH GmbH. (c): Reprinted with permission from Ref. [33]. Copyright 2020, American Chemical Society.)

2.2 제작 공정 기술

OECT의 중요한 장점 중 하나는 대부분이 용액 공정 기반이므로 다양한 반도체 소자 제작 공정과 호환성이 높고, 낮은 열 예산(thermal budget)으로 제조가 가능하여 비용 절감 효과가 크다는 점이다 [24,25]. Microscale OECT 제작에는 전통적인 포토리소그래피 기반 소자 제작 공정이 널리 사용된다 [26,27]. 이 공정에서는 기판 위에 소스·드레인 전극을 형성한 뒤, encapsulation층을 증착하고 채널 영역을 개구(opening)하여 정의한다. 이후 OMIEC 채널 소재를 spin coating, drop-casting 등을 통해 증착한다. 최종적으로 전해질과 게이트 전극을 채널 위에 배치하여 소자를 완성한다. 이 방식은 수 μm 수준의 채널 길이 구현이 가능하여 고밀도 OECT 배열(array) 구조 제작에 적합하다. 대면적 OECT 제작에는 잉크젯 [28,29], 스크린 [24,30-32], 스프레이 인쇄 기법 [33-35] [그림 2]이 활용된다. 이 방법은 나노입자, 기능성 잉크를 직접 인쇄함

으로써 포토마스크나 식각 공정 없이 패턴닝이 가능하고, 용액 공정이기 때문에 유연 기판 위에 소자를 구현하기 용이하다 [29]. 예를 들어, 스프레이 인쇄 방식은 stencil 마스크를 사용해 두께·패턴 제어가 용이하며, 종이·섬유·반창고 등 비정형 기판에서도 구현이 가능하다 [33,36]. 최근에는 전기화학적 증착 기반 3차원 제작 기술을 활용하여 계면 면적과 체적 정전용량을 크게 향상시킨 사례도 보고되었다 [37-39].

2.3 채널, 전해질 및 전극 소재

OECT의 채널로 사용되는 OMIEC는 전자·정공과 이온 수송이 동시에 가능한 소재이며 [40,41], 대표적 성능 지표는 전자 이동도(μ)와 체적 정전용량(volumetric capacitance, C^*)의 곱인 μC^* 이다. 이는 이온-전자 복합 전도 및 도핑 효율을 정량적으로 나타낸다. 가장 널리 사용되는 p형 OMIEC는 PEDOT:PSS이며, 높은 전도도와 우수한 용

액 공정성을 갖고 있다 [22,42-46]. 그러나 PEDOT:PSS는 기본적으로 고도핑 상태이므로 대부분의 PEDOT:PSS 기반 OECT는 공핍형(depletion mode)으로 동작하여 대기 전력 손실이 높다는 단점을 지니고 있다. 이를 해결하기 위해 p(g2T-TT)나 polythiophene계열의 공액 고분자(conjugate polymer) 기반 증가형(enhancement mode) OECT가 개발되었다 [47-49]. 또한 CMOS형 회로 구현을 위해 BBL (poly(benzimidazobenzophenanthroline))과 같은 n형 OMIEC도 개발되고 있다 [50-52].

전해질 또한 매우 중요한 구성 요소로, 이온의 종류와 농도(ionic strength)가 도핑 효율과 g_m 을 결정한다 [53]. 형태에 있어서 생리식염수, phosphate-buffered saline (PBS) 등 수용액 전해질은 높은 이온 이동도와 생체적합성을 가져 웨어러블·삽입형 바이오센서 응용에 적합하다. 고체 형태의 소자나 신축성 기판에서는 겔(gel)·고체형 전해질이 사용되며 액체 전해질 사용으로 인해 발생하는 누액·증발 문제를 억제하여 장기 안정성을 확보할 수 있다 [54,55]. 예를 들어, poly(ethylene glycol) (PEG)나 poly(vinyl alcohol) (PVA) 고분자 기반 hydrogel을 전해질로 활용한 OECT 개발 결과가 보고되기도 하였다 [56,57].

마지막으로 게이트 전극 소재는 게이트-채널간 전압 결합 효율과 안정성을 좌우한다. 금(Au)과 같은 분극성 물질을 게이트 전극 소재로 사용할 경우 게이트/전해질 계면에서 전기 이중층(electric double layer) 형성으로 인해 전압 강하가 발생한다. 이러한 경우, 충분한 전압 결합을 위해서는 게이트 정전용량이 채널 정전용량보다 훨씬 커야 하므로, 게이트 표면적이 채널보다 상당히 커야 한다. 따라서 Ag/AgCl과 같은 비분극성 게이트 전극을 사용하여 인가된 V_G 대부분이 채널 스위칭에 효과적으로 전달되도록 하는 것이 중요하다 [58].

2.4 동작 메커니즘

OECT의 기본 동작은 혼성 이온-전자 전도에 기반한다. V_G 는 전해질에서 채널로 이온을 주입하거나 추출하여 OMIEC의 도핑 상태를 변화시키며, 드레인 전압(V_D)은 이 도핑 상태에 따라 변화된 드레인 전류(I_D)를 구동한다. 유기 전계효과 트랜지스터(organic field-effect transistor, OFET)가 표면 전계 효과 기반인 것과 달리 [59], OECT에서는 이온이 채널 전체 부피로 직접 침투하므로 C^* 이 매우 크며($10\text{-}100\text{ F/cm}^3$) [22], 이로 인해 저전압에서도 매우 큰 g_m 을 갖는다.

OECT의 전도 특성에 관하여 가장 널리 사용되는 모델은 Bernards-Malliaras의 이중 회로(two-circuit) 모델로,

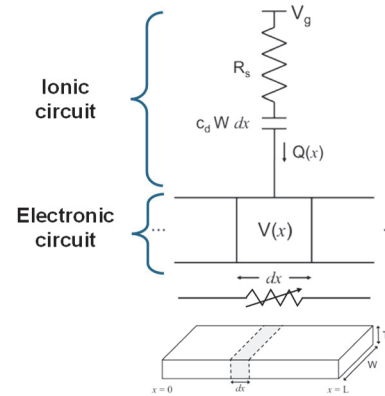


Fig. 3. Two-circuit model that describes the ionic/electronic coupling in OECTs. (Reprinted with permission from Ref. [60]. Copyright 2007, Wiley-VCH GmbH.)

OECT를 이온 회로(ionic circuit)와 전자 회로(electronic circuit)의 결합 시스템으로 단순화한다 [그림 3] [60]. 여기서 V_G 는 채널을 충전시키는 이온 전류를 구동하며, 이러한 변화는 결국 전자 회로의 전도도를 변화시킨다. 모델을 통해 예측되는 선형 영역($V_D < V_G - V_{Th}$)에서의 g_m 은 다음과 같다.

$$g_m = \frac{wd}{L} \mu C^* |V_D| \quad (1)$$

OECT의 C^* 는 OFET의 게이트 정전용량보다 수~수백 배 크기 때문에 식을 통해 OECT가 저전압 구동이 가능한 원인을 확인할 수 있다. 하지만 실제 소자에서는 고도핑 상태에서 μ 가 감소하고, 이온 수송의 지연 현상으로 인해 출력 특성이 비선형이거나 hysteresis가 나타나기도 한다 [61-63]. 이를 해석하기 위해 이온 동역학 및 전하 분포를 고려한 개선된 모델이 제안되기도 하였다 [43]. 이러한 이온 포획(trapping) 모델은 OECT의 뉴로모픽 동작특성을 이해하는 데 특히 중요하다.

2.5 성능 지표

뉴로모픽 컴퓨팅용 OECT는 인공 시냅스와 인공 뉴런 역할 모두를 수행해야 하므로 두 관점 모두에서 성능 평가가 필요하다. 먼저 인공 시냅스 관점에서 가장 중요한 지표는 시냅스 가중치(programming weight) 조절의 효율성이다. 이는 쓰기·읽기 전압(writing/reading voltage), 펄스 폭(pulse width), 업데이트당 에너지 소비(energy consumption per update)로 평가되며, 이러한 지표는 신경망 학습에 소요되는 에너지 소비량을 결정한다. 따라

서 낮은 쓰기 전압과 짧은 펄스를 사용해 최소한의 에너지만 소비하는 것은, 대규모 인공 신경망 네트워크를 구현하기 위한 핵심 요건이다. 이 같은 면에서 OECT는 생체 전압 수준(< 1 V)의 저전압 동작 특성과 높은 C*을 가지므로, 에너지 효율성이 매우 높다는 강점을 갖는다.

에너지 효율성 이외에도, 시냅스의 정밀도(precision)는 신경망의 학습 능력을 좌우하는 중요한 요소이다. 이는 시냅스의 동적 범위(dynamic range)와 그 범위 내에서 구분된 상태(distinctive state)의 개수로 평가된다. 동적 범위가 넓고 상태 수가 많을수록 신경망의 가중치를 미세하게 조절할 수 있는 고정밀 제어가 가능해지며, 이는 복잡한 패턴을 높은 정확도로 학습·표현하는 데 유리하다. 이 같은 면에서 OECT의 아날로그적 이온 도핑 특성은 고정밀 아날로그 시냅스 구현에 있어 핵심적인 장점으로 작용한다. 특히 이러한 OECT 이온 도핑 특성은 사용되는 소재·이온 종, 프로그램 전압 인가 방식에 따라 그 동역학적 특성을 자유롭게 조절할 수 있기 때문에, 단기 가소성(short-term plasticity, STP)과 장기 가소성(long-term plasticity, LTP)을 모두 모사할 수 있다.

OECT는 인공 시냅스를 넘어 복잡한 신경 동역학을 모사함으로써 인공 뉴런으로도 활용될 수 있다. OECT 이온 회로의 RC 시정수는 입력 신호의 시간적 적분을 가능하게 하며, 이는 시간에 따른 데이터를 처리하는 데 필수적인 기능이다. 적분된 전위가 소자의 고유 발화 임계값(firing threshold, V_T)에 도달하면 OECT는 실제 뉴런의 비선형 의사결정 과정과 유사한 스파이크 전위를 발생시킬 수 있다. 생물학적 뉴런의 정보 처리 능력은 스파이크 발생 빈도(spiking frequency), 불응기(refractory period)와 같은 지표로 정의될 수 있는데, 이러한 특성 역시 OECT의 이온 동역학에 의해 자연스럽게 구현된다.

결론적으로 OECT는 단일 소자 내에서 고정밀 아날로그 메모리(시냅스)와 시간에 따른 신호 처리(뉴런) 기능을 동시에 구현할 수 있는 플랫폼으로, 전자소자 기반 저전력 인공 신경망 구축에 활용될 수 있는 효율적인 기술로 평가된다. OECT 기반 인공 시냅스 및 인공 뉴런의 구체적 연구 개발 사례와 동향에 관한 논의는 3장에서 다루도록 한다.

3. OECT 기반 인공 시냅스

3.1 시냅스 가소성 모사

생물학적 시스템에서 시냅스 가소성(synaptic plasticity)이란 신경 활동에 기인하여 시냅스 연결 강도를 조절할 수

있는 능력을 의미한다. OECT 시냅스 [그림 4(a)]는 쌍펄스 촉진(paired-pulse facilitation, PPF) 및 쌍펄스 억제(paired-pulse depression, PPD)와 같은 STP 현상뿐만 아니라, 지속적인 기억 저장에 대응하는 장기 강화 및 억제(potentiation/depression)와 같은 LTP 거동[64]을 성공적으로 재현해 왔다 [그림 4(b)] [17,45,65-68]. STP는 일반적으로 수 밀리초(ms)에서 수 분에 이르는 짧은 시간 동안 발생하는 활동 의존적인 시냅스 강도의 일시적 변화를 의미한다. 예를 들어 PPF의 경우, 첫 번째 스파이크에 이어 곧바로 두 번째 스파이크가 인가되면 더욱 증폭된 반응이 유도된다. OECT 시냅스는 이러한 효과를 물리적으로 자연스럽게 구현할 수 있다. 채널 내 주입된 이온이 완전히 이완(relaxation)되기 전에 두 번째 게이트 전압 펄스가 인가되면, 잔류 이온에 의한 동역학적 특성 덕분에 시냅스 후 전류(postsynaptic current), 즉, I_D 가 더욱 크게 증폭되기 때문이다. 마찬가지로, 고주파 펄스 자극 이후 나타나는 일시적 강화 특성인 강직후 강화(post-tetanic potentiation)

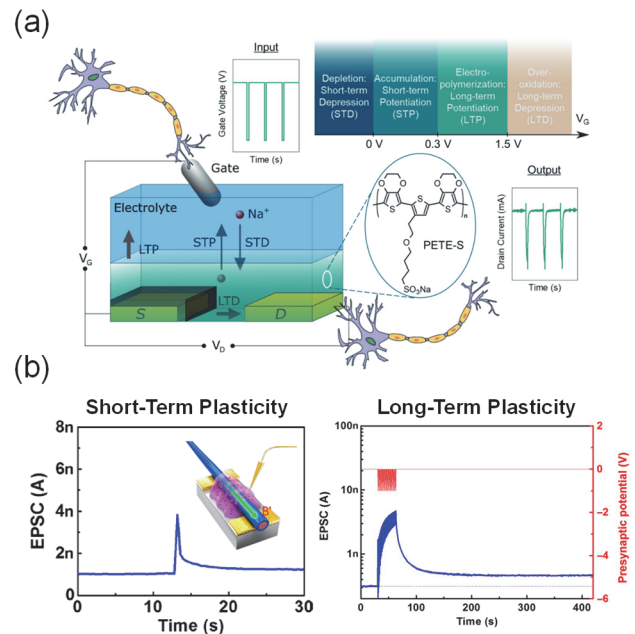


Fig. 4. Illustrative demonstrations of synaptic plasticity in OECT-based artificial synapses. (a) An example of OECT synapses formed by electropolymerization. Depending on the gate voltage spikes at different ranges or timing intervals, different synaptic functionalities including STP and LTP are obtained. (b) Excitatory postsynaptic current responses of organic core-sheath nanowire artificial synapses, demonstrating short-term (left) and long-term plasticity (right). ((a): Reprinted with permission from Ref. [77]. Copyright 2019, Wiley-VCH GmbH. (b): Reprinted with permission from Ref. [78]. Copyright 2016, American Association for the Advancement of Science.)

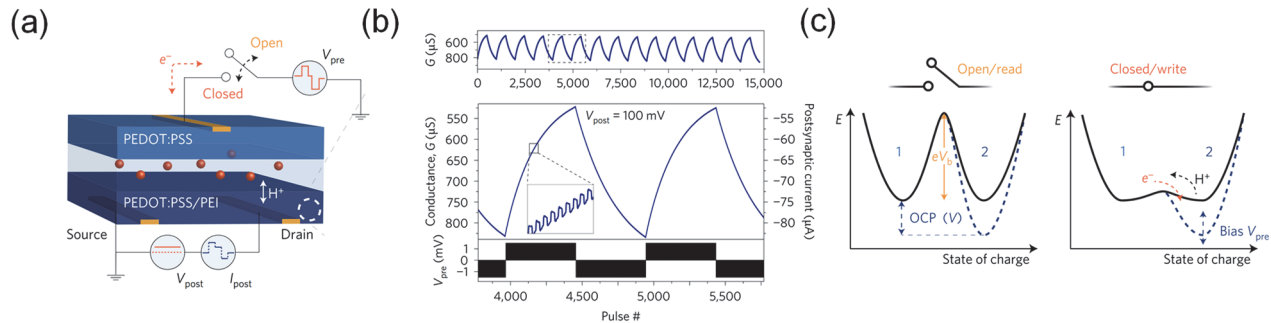


Fig. 5. Early demonstration of synaptic functionalities in OEECTs. (a) Device schematic. (b) Long-term potentiation and depression with 500 voltage-controlled conductance states. (c) Conceptual illustration of decoupled read/write operations enabled by a non-volatile redox cell, allowing low-power state retention during read processes. (Reprinted with permission from Ref. [17]. Copyright 2017, Springer Nature.)

또한 OEECT 채널의 일시적인 이온 보유 능력을 통해 효과적으로 모사할 수 있다.

OEECT 기반 시냅스 거동에 관한 초기 연구에서 van de Burgt 등은 전기화학 뉴로모픽 유기 소자(electrochemical neuromorphic organic device, ENODE)를 제안하며, 극저전력으로 구동되는 아날로그 메모리 조절 능력을 시연하였다 [그림 5(a)] [17]. 해당 연구에서 ENODE는 기존 메모리스트와 차별화된 구동 메커니즘을 가짐과 동시에, 장기 강화 및 억제와 같은 핵심적인 시냅스 가소성 거동을 충실히 재현하였다. 특히 이들은 1 V 미만의 게이트 전압 범위 내에서 500개 이상의 정밀한 비휘발성 전도도 상태를 확보하였으며, 약 10 pJ 수준의 극저전력만으로도 스위칭이 가능함을 보고하였다 [그림 5(b)]. ENODE는 이온은 투과시키되 전자는 차단하는 전해질을 사용하여 읽기 및 쓰기 경로를 분리하였으며, 이를 통해 읽기 동작 시 소자를 전기적으로 격리함으로써 지속적인 전력 공급 없이도 전도도 상태를 안정적으로 유지할 수 있었다 [그림 5(c)]. 이는 초저전압 스위칭과 전도도 상태 보존을 동시에 달성함으로써 고정밀 아날로그 메모리 조절 및 유지력(retention)을 입증한 사례이다.

3.2 인공 시냅스 성능 고도화 연구

후속 연구에서는 OEECT 시냅스의 가소성 조절 능력(tunability), 유지력 및 내구성(endurance)을 향상시키기 위한 노력들이 지속되고 있다 [44,45,65,66,68,69]. 주요 과제 중 하나는 큰 전도도 변조(modulation)를 위해 필수적인 고효율 이온 도핑을 달성함과 동시에 자발적인 이온 이완을 방지하기 위한 적절한 유지력을 확보하는 것이다. 일례로, Ji 등은 박막 내에 이온을 포획할 수 있는 PEDOT:Tosylate/PTHF 복합 채널을 시연하였으며, 이를 통해

0.8 V 미만의 쓰기 전압과 외부 유지 회로 없이도 200분 이상의 상태 유지가 가능한 비휘발성 OEECT 시냅스를 구현하였다 [그림 6(a,b)] [66]. 이 연구에서는 Na^+ 이온을 포획하고 이완을 억제하는 PTHF를 도입하여 저전압 구동과 장기 유지력을 동시에 확보하였다. 저자들은 이러한 비휘발성의 근원을 Na^+ 이온을 포획할 수 있는 비결정성 PTHF와 이를 강화하는 결정성 PTHF의 조합으로 설명하였으며, 이는 다각적인 ex-situ 분석(XPS, GIWAXS) 및 operando 분석(UV-Vis-NIR spectroscopy)을 통해 입증되었다. 특히, 이 소자는 ± 0.8 V 내에서 반복적으로 프로그램 및 소거가 가능하며 가역적이면서도 오랜 시간 유지되는 전도도 변화를 보여주었는데, 이는 단기 기억에서 장기 기억으로의 전환을 모방하는 데 필수적인 특징으로, 게이트 전압을 증가시키에 따라 “기억 수준”(memory level, 즉, 시냅스 후 전류)이 점진적으로 상승함을 통해 확인할 수 있다 [그림 6(c)]. 이 연구는 OEECT 채널 소재 최적화를 통해 큰 전도도 변조(효율적인 전기화학 도핑)와 견고한 유지력 사이의 상충 관계를 해결할 수 있음을 보여준 대표적인 사례이다.

다른 사례로, 최근 Sung 등은 동일한 주쇄(backbone)를 공유하되 서로 다른 종류의 측쇄(side chain)를 가진 고분자 반도체 소재를 혼합(polymer-blending)하는 전략을 제안하였다 [69]. 구체적으로, 이들은 소수성 alkyl 사슬을 가진 고분자와 극성 ethylene glycol 사슬을 포함하는 고분자를 결합하였다 [그림 6(d)]. 저자들은 electrochemical-AFM 및 CV(cyclic voltammetry) 분석을 통해 이러한 접근법이 채널 내 산화환원 작용을 활성화시키는 동시에 전기화학적 도핑 중 발생할 수 있는 채널 소재의 형태학적 변화(morphological change)를 억제할 수 있음을 확인하였다. 그 결과, 단일 고분자 기반 시스템 대비 도핑 효율이나 결정성(crystalline integrity)을 저해하지 않으면서도 문턱 전압을 크게 낮추고 최대 전류 크기를 높였으며, 유지

시간(retention time)을 개선하였다 [그림 6(e)]. 이 같은 소재 최적화를 통한 OECT 인공 시냅스 성능 개선 연구는 새로운 아이디어 도입을 통해 지속되고 있다. 예를 들어, Lee 등은 가교 고분자(cross-linked polymers), 이중 이온 고체 전해질(dual-ion solid electrolytes)을 활용하여 안정적인 LTP 특성을 나타내는 고이동도($\sim 25 \text{ F/cm} \cdot \text{V} \cdot \text{s}$) OECT 시냅스 소자를 개발하였다 [65]. 또는 계면 엔지니어링(interface engineering) 전략을 통한 성능 개선 연구도 활발히 진행되고 있으며, 예를 들어, Mariani 등은 게이트 전극 계면에서의 PEDOT:PSS 전해 중합(electropolymerization)을 통해 게이팅 효율이 향상된 고내구성

장기 강화 특성을 보고한 바 있다 [45].

한편, 소재 최적화 또는 계면 엔지니어링 전략을 넘어, 소자 구조 최적화를 통한 시냅스 성능 향상 연구들도 최근 보고되고 있다. 일례로, Wu 등은 전극 형상 제어를 통해 이온 확산 거리를 구조적으로 제어함과 동시에 OMIEC 측쇄 변형을 통해 이온 동역학을 조절함으로써 시냅스 가소성을 조절하는 새로운 접근법을 제시하였다 [68]. 저자들은 친수성 ethylene glycol 측쇄를 일부 소수성 alkyl 사슬로 대체하여 양친매성(amphiphilic) OMIEC을 제작함으로써 이온 동역학을 효과적으로 제어하였으며 [그림 6(f)], 특히 수직형 OECT(vertical OECT, vOECT) 구조에

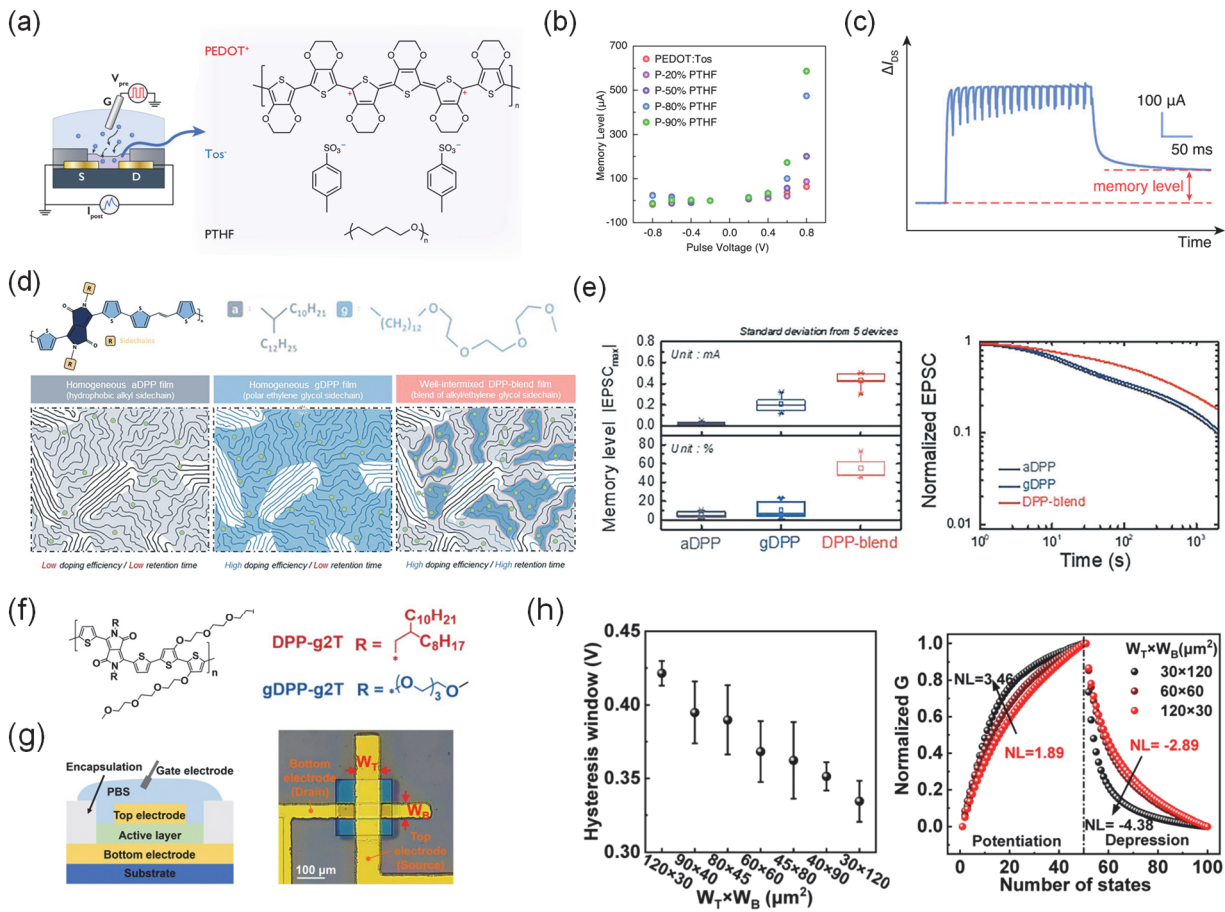


Fig. 6. Representative approaches to enhance OECT synaptic performance. (a) Composite PEDOT:Tosylate/PTHF channel OECT enabling ion trapping for non-volatile synaptic operation. (b) Multilevel memory modulation as a function of channel composition and programmed gate voltage. (c) Gradual increase of postsynaptic current (memory level) under positive gate-bias programming in PTHF-rich devices. (d) Schematic illustration of polymer-blending concept (top) and morphological stabilization (bottom) combining the same backbone with different side chains (alkyl vs. ethylene glycol). (e) Higher postsynaptic current (memory level) with improved retention compared to single-polymer OECTs. (f) Amphiphilic OMIEC design via partial substitution of ethylene glycol side chains with alkyl chains. (g) Schematic illustration and optical microscopy image of vOECT architecture to tune ion-diffusion length and ionic/electronic coupling. (h) Tunable synaptic metrics including hysteresis window, potentiation/depression nonlinearity, and asymmetry. ((a-c) Reprinted with permission from Ref. [66]. Copyright 2021, Springer Nature. (d-f) Reprinted with permission from Ref. [69]. Copyright 2024, Wiley-VCH GmbH. (f-h) Reprinted with permission from Ref. [68]. Copyright 2025, The Royal Society of Chemistry.)

서 상부 전극의 폭을 조정하는 구조적 설계를 통해 이온 확산 거리를 정밀하게 제어하였다 [그림 6(g)]. 이러한 변형을 통해 hysteresis window, 강화/억제 비선형성, 비대칭 비(asymmetry ratio) 등과 같은 시냅스 특성을 가변적으로 제어할 수 있음을 확인하였고, 이를 바탕으로 특정 응용 분야에 적합한 최적화된 시냅스 가소성을 구현할 수 있게 하였다 [그림 6(h)].

3.3 이론적 모델링 및 고차원 학습 기능의 구현

이러한 OEET 시냅스 성능 개선 노력과 함께, 시냅스 가소성 발현 메커니즘 해석을 위한 이론적 모델링의 발전은 OEET 시냅스의 효율적인 최적화를 가능케 하였다. 예를 들어, Shu 등은 PEDOT 기반 OEET 시냅스 해석에 적합하도록 수정된 Shockley 방정식을 활용하여 2차원 과도 드리프트-확산(transient drift-diffusion) 모델을 개발하였다 [그림 7(a)] [70]. 이들은 PEDOT:PSS의 상분리(phase separation) 현상을 2차원 동적 모델에 반영하였으며, 전기화학 포텐셜(electrochemical potential)을 고려한 수정된 드리프트-확산 방정식을 통해 정공 수송(hole transport) 현상을 기술하였다. 결과적으로 이 모델은 비단조적(non-monotonic) g_m - V_G 관계 및 주파수 의존적

g_m 과 같은 주요 소자 특성들을 성공적으로 재현하였으며 [그림 7(b)], 흥분성/억제성 시냅스 후 전류(excitatory/inhibitory postsynaptic currents, EPSC/IPSC), PPF/PPD 등 대표적인 시냅스 거동 또한 모사할 수 있었다 [그림 7(c)].

한편, OEET 시냅스는 게이트 전압 인가 방식을 시간적으로 조절함으로써 타이밍에 민감한 가소성 형태인 스파이크 시간 의존 가소성(spike-timing-dependent plasticity, STDP)도 구현할 수 있다. 채널 내 이온 도핑은 고유한 감쇠 시정수(decay time constant)를 가지므로, 연속적으로 인가된 펄스의 간격은 자연스럽게 전도도 변화에 영향을 미치며 생물학적 STP 및 STDP 거동을 모사할 수 있게 된다. 또한 이러한 거동은 OEET 소재 고유의 특성과 밀접하게 연관되어 있으므로, 소재 조성 변화를 통해 시정수를 조절함으로써 plasticity window의 디자인이 가능하다. 예를 들어, PEDOT 혼합물 내에서 PTHF의 비율을 증가시키면 이온 유지력이 증가하여 PPF window가 확장될 수 있음이 보고되었다 [66]. 이러한 제어를 통해 OEET 시냅스는 연합 학습(associative learning) 과정과 같은 고차원적인 학습 거동을 구현할 수 있다. 이는 OEET 시냅스가 단순한 생물학적 가소성 메커니즘을 모방할 수 있을 뿐만 아니라, 저전압에서 연합 학습과 같은 상위 레벨

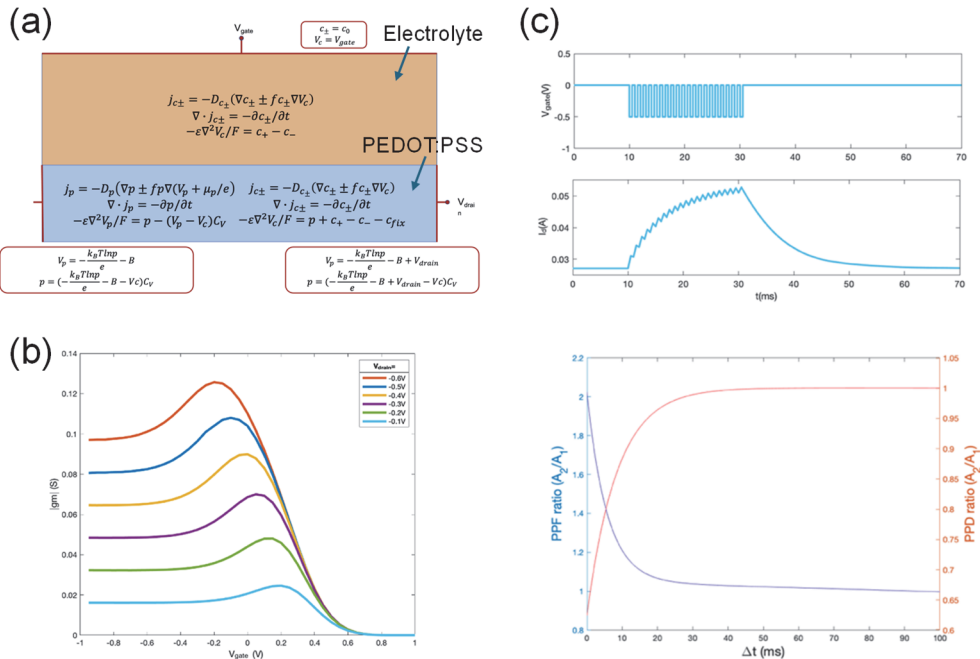


Fig. 7. Theoretical modeling of synaptic plasticity in PEDOT:PSS-based OEET synapse. (a) 2D transient drift-diffusion framework incorporating PEDOT:PSS phase separation. (b) Simulated non-monotonic g_m vs. gate bias. (c) Simulated synaptic responses including EPSC/IPSC and paired-pulse facilitation/depression. (Reprinted with permission from Ref. [70]. Copyright 2022, American Chemical Society.)

의 학습 거동까지 모사할 수 있음을 보여주는 사례이다.

종합적으로 OEET 시냅스는 저전압 구동 하에서 휘발성 STP부터 비휘발성 LTP에 이르기까지 광범위한 시냅스 가소성 거동을 모사할 수 있음이 여러 연구를 통해 보고되었다. 또한 후속 연구를 통해 아날로그 메모리 조절 능력, 유지 시간, 그리고 가소성 조절 능력 향상에 초점을 맞춘 시냅스 성능 고도화 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 발전은 향후 OEET가 에너지 효율적인 뉴로모픽 시스템과 다기능 생체 통합 플랫폼을 구현하는 데 있어 핵심적인 역할을 수행할 가능성을 한층 앞당길 것으로 예상된다.

4. OEET 기반 인공 뉴런

4.1 생체 뉴런 거동 모사 원리

OEET는 단순히 시냅스 기능을 넘어, 이온 수송 메커니즘을 활용함으로써 저전압에서 스파이크 형태의 활동 전위(action potential)를 생성하고 전파하는 인공 뉴런(artificial neuron)를 구현하는데 사용될 수 있다. 적분 및 발화(integrate-and-fire) 거동을 구현하기 위해 수많은 트랜지스터가 필요한 전통적인 실리콘 기반 뉴런 회로와 달리, 유기 전기화학 트랜지스터 기반 뉴런(organic

electrochemical transistor-based neuron, OEEN) 회로는 소재 고유의 이온 동역학을 활용하기 때문에 구조적으로 훨씬 단순한 설계만으로도 스파이킹 거동을 효과적으로 모사할 수 있다 [18]. 초기 프로토타입 연구에서는 OEET와 저항, 축전기 등의 수동 소자만을 포함한 최소한의 회로 구성만으로도 누설 적분 및 발화(leaky integrate-and-fire, LIF) 뉴런을 모사할 수 있음을 입증하였다 [71]. 이러한 회로 구조는 생물학적 뉴런의 복잡한 이온-채널 동역학(ion-channel dynamics)을 직접 모사하지 않고도, OEET의 특성만으로 뉴런의 기본 기능인 신경 흥분성(입력 신호의 적분 및 임계값 도달 시 발화)을 재현할 수 있음을 보여주었다. 특히, 이러한 OEEN은 실리콘 스파이킹 회로보다 수십 배 낮은 1 V 미만의 동작 전압으로 작동 가능하며, 이는 저전력 뉴로모픽 시스템 구현을 위해 핵심적인 장점으로 작용한다.

최초의 OEEN 시연은 Harikesh 연구팀에 의해 이루어졌다 [67]. 이들은 상보형(complementary) OEET와 축전기로 구성된 피드백 회로를 결합하여 소형 Axon-Hillock 회로 기반의 OEEN을 제안하고 인쇄 기법을 통해 이를 제작하였다 [그림 8(a)]. 해당 OEEN은 0.6 V 이하의 저전압에서 자극 임계치에 의존한 활동 전위 발화와 불응기 거동과 같은 뉴런의 핵심 특성을 성공적으로 모사하였다 [그림 8(b)]. 이러한 기능은 생물학적 뉴런의 활동 전위

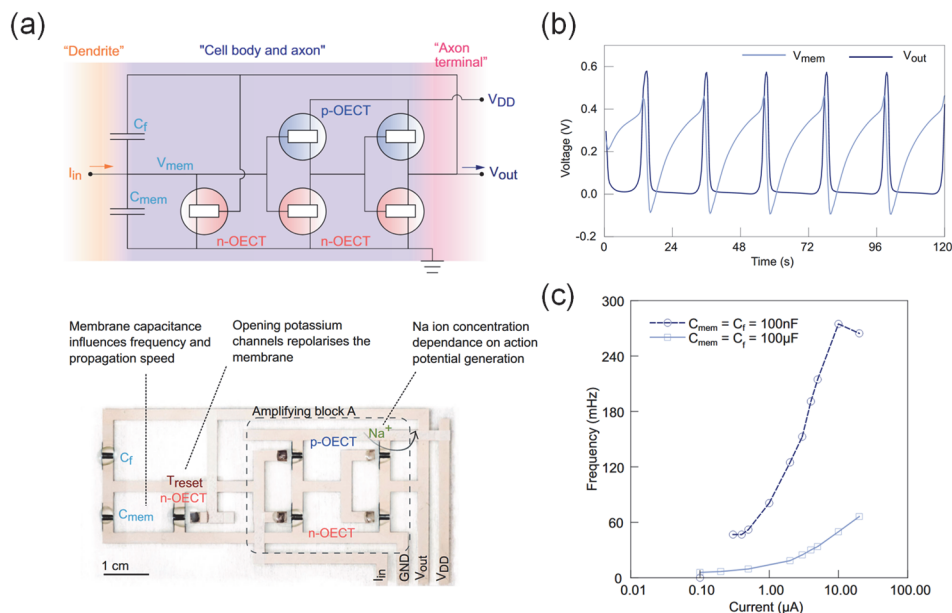


Fig. 8. First demonstration of a fully printed OEEN based on complementary OEET architectures. (a) Axon-hillock circuit schematic using complementary OEETs with capacitive feedback to enable threshold-driven spiking. (b) Voltage traces exhibiting spiking responses of the OEENs. (c) Input-current-dependent modulation of spiking frequency with a variation exceeding 450%. (Reprinted with permission from Ref. [67]. Copyright 2022, Springer Nature.)

발화 메커니즘과 유사하게 축전기를 통한 적분과 이를 기반으로 한 positive feedback 기작을 통해 구현되었다. 특히 주목할 만한 점은 OECT의 이온-전자 복합 전도 특성을 활용하여 이온 농도에 따른 발화 주파수 변조가 가능하다는 것이다. 실제로 전해질의 이온 함량을 조절함으로써 발화율(firing rate)을 450% 이상의 넓은 범위에서 제어할 수 있었다 [그림 8(c)]. 이러한 화학적 조절 능력(chemical tunability)은 실리콘 기반 뉴런에서는 구현이 불가능한 OECT 소자만의 고유한 특성으로, 생체 모사형 스파이킹 제어를 위한 새로운 방법을 제시했다는 점에서 의의가 있다. 끝으로 이 연구는 OECON이 저전압 환경에서도 생물학적으로 유의미한 스파이크 열(spike trains)을 생성하여 정보를 인코딩할 수 있음을 보여주었으며, 향후 OECT 기반 스파이크 신경망(spiking neural networks, SNN)의 개발 잠재력을 나타낸 사례로 볼 수 있다.

4.2 인공 뉴런 성능 고도화 연구

최초 시연에 이어, 고성능 OECON 개발을 위한 다양한 후속 연구가 이어지고 있다. Harikesh 연구팀은 생체 뉴런의 이온-채널이 나트륨 및 칼륨 채널로 분리되어 존재한다는 점을 명시적으로 모사하기 위해 두 종류의 OECT 소자를 사용한 생체 유사(biorealistc) 전도도 기반 OECON을 추가로 보고하였다 [71]. 해당 회로에서는 응답 속도가 빠른 고분자 박막 기반의 OECT가 Na^+ 채널 역할을 수행하여 신속한 내향 전류(inward current)를 공급하고, 두껍고 느린 채널 특성을 가진 두 번째 OECT가 K^+ 채널 역할을 수행하여 지연된 외향 전류(outward current)를 공급

하도록 구성하였다 [그림 9(a)]. 두 소자는 공통 막 축전기(common membrane capacitor, C_{mem})로 결합되었으며, Hodgkin-Huxley 모델과 유사하게 고정된 Na^+ 및 K^+ Nernst 전위로 바이어스 되었다. 두 이온-채널을 명시적으로 모사하는 이러한 접근은 OECON이 생물학적 뉴런의 특징인 순차적 탈분극(depolarization) 및 재분극(repolarization) 동역학을 재현하는 데 필수적이다. 이러한 접근법을 통해 연구진은 과분극(hyperpolarization) 및 불응기 등 생물학적 뉴런과 매우 흡사한 활동 전위 특성을 구현할 수 있었다. 예를 들어, 0.5-1 V 저전압 조건에서 생물학적 뉴런과 유사한 활동 전위를 생성하였는데, 급격한 탈분극 이후 재분극이 뒤따르고 짧은 과분극을 동반하는 거동을 잘 모사하였으며, 발화 주파수는 fast-spiking neuron의 범위에 해당하는 약 100 Hz까지 도달할 수 있었다. 또한 소자 노이즈(device noise)와 이온 드리프트(ionic drift) 현상을 활용하여 실리콘 뉴런으로는 모사가 어려운 상대적 불응기(relative refractory periods) 및 확률적 스파이킹 변동성(stochastic spiking variability)과 같은 고차원적 뉴런 거동을 재현하는 데 성공하였다 [그림 9(b)]. 더불어 OECT 채널이 이온에 의해 직접 게이팅되기 때문에 실제 신경 조절(neuromodulation) 기작과 유사하게, 전해질 내 신경전달물질(neurotransmitters)에 의한 발화 임계치나 주파수 등 스파이킹 특성의 화학적 변조가 가능하였다. 연구진은 이러한 특성을 바탕으로 실제 생체 신경을 자극하는 in vivo interfacing을 시연하였으며, 생성된 신호의 파형과 타이밍이 실제 신경 반응을 유도할 만큼 충분히 생체 유사적임을 확인하였다 [그림 9(c)]. 이 결과는 OECON이 생체 모사형(biomimetic) 저전력 뉴

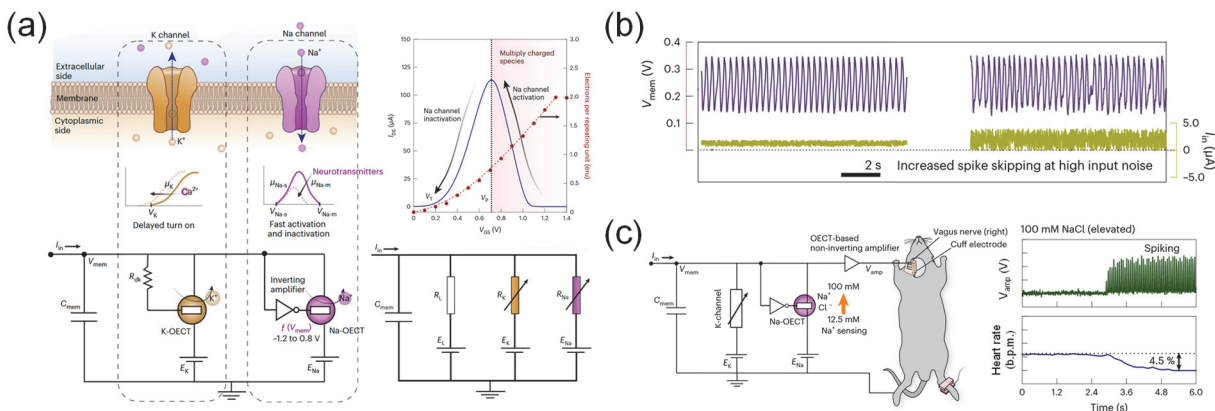


Fig. 9. Biorealistic conductance-based OECON (c-OECON). (a) Circuit architecture comprising two OECTs coupled via a membrane capacitor, emulating ion-channel-driven depolarization and repolarization dynamics of Hodgkin-Huxley neurons. (b) Stochastic spike skipping under high input-noise conditions demonstrated in the c-OECON. (c) In vivo neurotransmitter- and ion-modulated spiking used to regulate vagus nerve activity. (Reprinted with permission from Ref. [71]. Copyright 2023, Springer Nature.)

로모픽 하드웨어의 핵심 구성요소로 발전하고 있음을 보여준다.

또 다른 사례로 Yao 연구팀은 0.13-147 Hz에 이르는 넓은 주파수 대역에서 스파이킹이 가능한 주파수 가변형 OEEN을 개발하였다 [15]. 해당 회로는 기존 평면형 OEEN 대비 빠른 응답속도와 g_m 을 갖는 vOEEN 구조를 채택하였으며, 상보형 vOEEN를 LIF 발진기 회로에 적용함으로써, 생체 뉴런의 활동 범위에 포함되는 1Hz 미만에서 147Hz의 빠른 발화 주파수까지 광범위하게 구현할 수 있었다 [그림 10(a,b)]. 이는 OEEN 소재 및 구조적 개선을 통해 기존 OEEN의 주파수 한계였던 40 Hz 이상을 성공적으로 달성했다는 점에서 의의가 있다 [72]. 또한, 연구진은 해당 회로를 활용한 촉각 감지 인공 신경 시스템을 개발하였다. 구체적으로 유연 압력 센서를 OEEN 입력단에 연결하고 출력단에 OEEN 시냅스를 배치하여 스파이크 신호를 시냅스 후 전류로 변환하도록 시스템을 구성하였다. 이를 통해 센서 배열에 압력이 가해지면 압력 세기에 따라 스파이크 발화 주파수가 변화하고, 시냅스는 이를 다시 시냅스 후 전류로 변환하여 촉각 감지가 가능하다 [그림 10(c)]. 특히 전

체 OEEN 회로는 37 mm^2 이하의 작은 면적을 차지하면서도 mV 수준의 미세한 센서 입력만으로 구동되어, 웨어러블 및 생체 통합형 뉴로모픽 응용 분야 같은 저전력 플랫폼에서 활용될 수 있는 잠재력 나타낸다.

한편 최근에는 정교한 소자 설계를 통해 단일 OEEN 소자만으로도 스파이킹 뉴런 거동을 구현한 연구가 보고되어 주목받고 있다. Ji 연구팀은 antiambipolar 전도 특성을 갖는 단일 트랜지스터 OEEN(1T-OEEN)을 발표하였다 [18]. 해당 소자는 V_G 가 증가함에 따라 채널 도핑에 의해 I_D 가 상승하다가, 특정 전압 이상의 과도핑(over-doping) 영역에서는 전하 이동도 붕괴(mobility collapse)가 발생하여 전류가 다시 감소하는 Gaussian형태의 전달 특성 곡선을 나타낸다 [그림 10(d)] [73]. 이러한 전달 특성을 갖는 경우 peak 근처 V_G 로 OEEN를 바이어싱(biasing)하면 미세한 전압 변화에도 고전도 상태와 저전도 상태 사이를 전이할 수 있는 쌍안정 상태(bistable state)를 형성한다. 또한 이 같은 특성과 hysteresis 현상이 결합되면 전압 트리거 방식의 스파이킹 거동을 단일 소자로 구현할 수 있다. 연구팀은 이러한 hysteresis antiambipolar 1T-OEEN

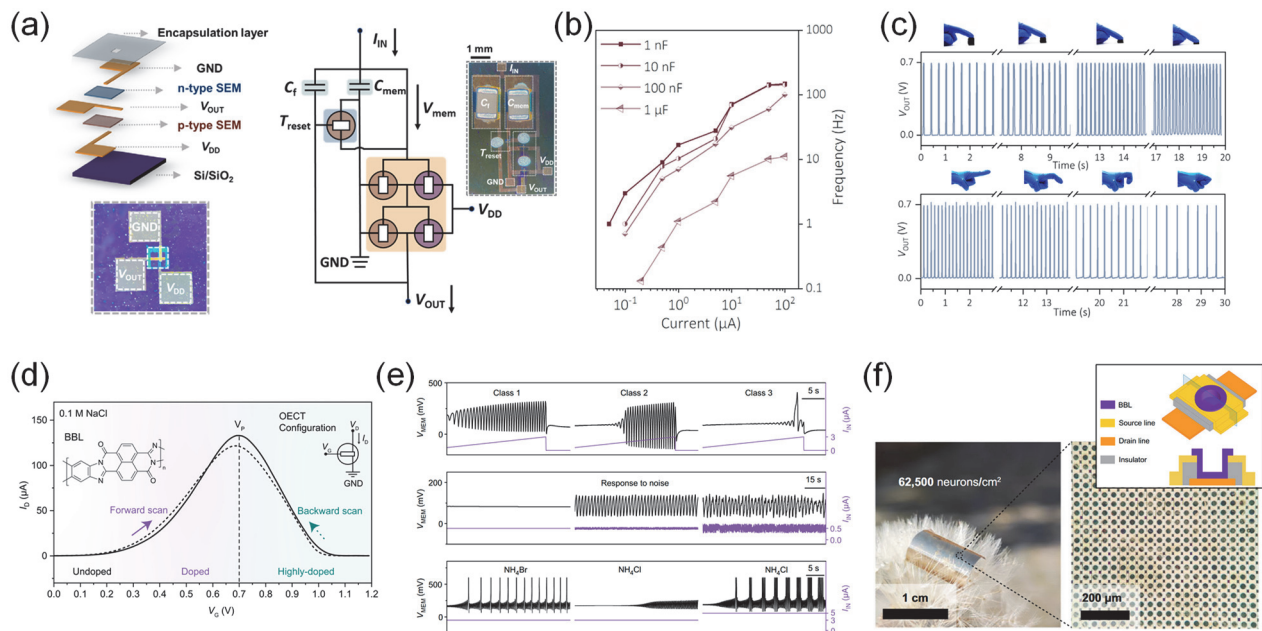


Fig. 10. (a-c) Vertical organic electrochemical neuron (vOEEN). (a) Exploded view of a vOEEN-based complementary inverter (left) and the corresponding vOEEN circuit constructed from the inverters (right). (b) Input-current-dependent spiking dynamics, tunable from slow adaptive firing to fast bursting modes. (c) Integration of the vOEEN with pressure and strain sensors, producing frequency-encoded spiking responses depending on mechanical stimuli. (d-f) Single-transistor organic electrochemical neuron (1T-OEEN). (d) Antiambipolar transfer characteristics of a BBL-based OEEN enabling neuron-like operation. (e) Emulation of diverse neuronal features, including multiple excitability classes, stochastic spiking under noisy input, and ion-dependent modulation of spiking behavior. (f) High-density integration of flexible 1T-OEEN arrays, with an inset highlighting a single neuron unit. ((a-c): Reprinted with permission from Ref. [15]. Copyright 2025, Proceedings of the National Academy of Sciences. (d-f): Reprinted with permission from Ref. [18]. Copyright 2025, Springer Nature.)

을 활용하여 임계치 의존적 스파이킹과 논리 게이트 연산을 성공적으로 시연하였다. 또한 전해질 조성을 통해 antiambipolar peak 위치를 이동시키고 게이트 파형을 조절함으로써 임계치 적분, 불응기, 주파수 적응 등 다양한 동적 스파이킹 패턴과 뉴런 기능을 구현하였다 [그림 10(e)]. 한편, 성능 지표 측면에서 1T-OECN 소자의 면적은 약 $180 \mu\text{m}^2$ 에 불과하며, 이는 유연 기판 위에서 구현된 실리콘 뉴런보다 10배 이상 높은 집적도($\sim 62,500 \text{ neurons/cm}^2$)에 해당된다 [그림 10(f)]. 에너지 효율 측면에서는 1 V 미만의 작동 전압과 nW 수준의 극저전력으로 작동할 수 있음을 입증하였다. 이 연구는 OECT 소자 물리의 정교한 디자인을 통해 뉴로모픽 하드웨어의 소형화와 고성능화를 이끌어낼 수 있음을 보여주는 대표적 사례로, 향후 이러한 고성능 OECN이 OECT 시냅스와 통합될 경우, 뉴로모픽 하드웨어의 구조를 획기적으로 단순화하고 구성 요소 수를 줄여 전체 시스템의 에너지 소비를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

4.3 복합 연산 기능 구현

마지막으로, 최근 연구에서는 OECN을 이용해 단순한 스파이크 생성을 넘어선 복잡한 신경 연산을 모사하려는 시도가 이어지고 있다. Harikesh 연구팀은 인간의 대뇌 피질 뉴런이 수상돌기 칼슘 스파이크(dendritic calcium spikes)를 통해 XOR 논리 문제를 해결하는 기작에서 영감을 얻어, 단일 뉴런 내에서 비일치 검출(anticoincidence

detection, 즉 XOR 논리)이 가능한 수상돌기형 OECN (dendritic OECN, d-OECN)을 구현하였다 [74]. 연구진은 이를 위해 이온 농도 조절이 가능한 antiambipolar d-OECT와 스파이킹 세포체(soma) 회로를 결합하여, 가변형 Gaussian 형태의 전달 특성을 생성하는 OECN 구조를 제작하였다 [그림 11(a)] [73]. 구현된 dOECN은 두 개의 입력이 인가될 때 입력 값이 서로 다를 때만 최대 응답을 생성하는 XOR 논리 연산을 성공적으로 수행하였다 [그림 11(b)]. 이러한 단일 뉴런 XOR 논리 연산 기능은 뉴로모픽 촉각 시스템의 경계 검출(edge detection)과 같은 복합 연산 기능 구현에 활용될 수 있다. 예를 들어, 이 연구에서는 두 개의 압력 센서 신호를 처리하여 대비가 뚜렷한 자극에 대해서만 발화함으로써, 신경생리학에서 언급되는 측면 억제(lateral inhibition) 기능이 활성화된 경계 인지 능력을 입증하였다 [그림 11(c)]. 이러한 연구는 특이적 전달 특성과 이온 농도 조절 기반의 수상돌기형 비선형성을 활용함으로써, 단일 뉴런 시스템만으로도 복잡한 연산 기능을 효과적으로 수행할 수 있음을 시사한다. 또한 OECT가 소자 물리 자체에 연산 기능을 내재화함으로써 최소한의 소자 구성만으로도 고차원의 뉴로모픽 거동을 실현할 수 있다는 점에서 독보적인 이점을 지님을 보여준다. 이러한 OECT 고유의 물리적 특성은 저전압 구동, 이온 기반 생체 모방 회로 설계, 그리고 유연·인쇄 소재 기술과 유기적으로 결합되어, 생물학적 시스템과 긴밀히 통합될 수 있는 차세대 저전력 뉴로모픽 플랫폼의 구현 가능성을 극대화할 것으로 기대된다.

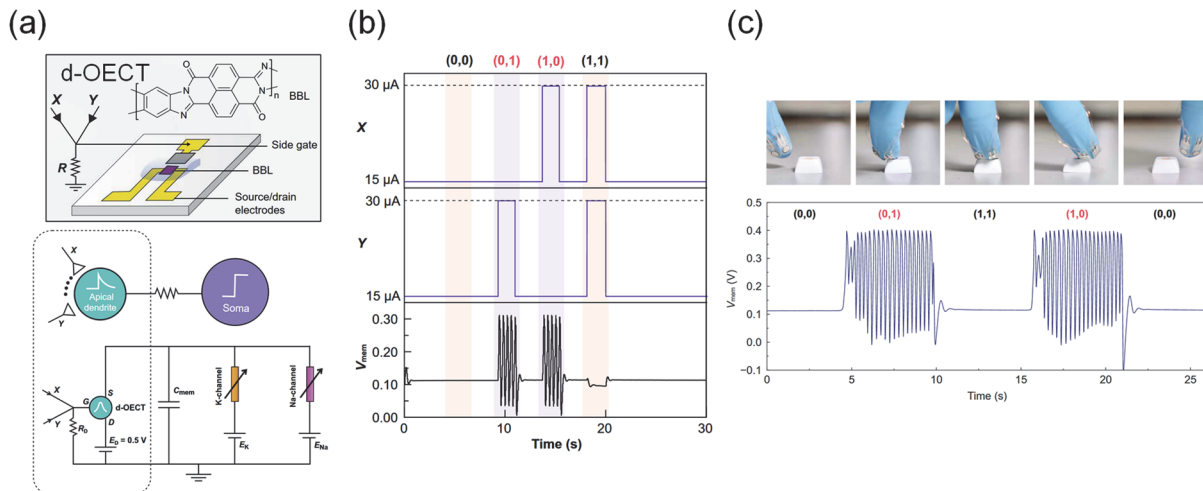


Fig. 11. Demonstration of a dendritic OECT-based artificial neuron for XOR computation and tactile edge detection. (a) d-OECT-based artificial neuron circuit implementing anticoincidence (XOR) detection. (b) XOR spiking response generated by the artificial neuron. (c) Application of the d-OECTN to tactile sensing, where contrasting pressure inputs evoke dendritic spikes for edge detection. (Reprinted with permission from Ref. [74]. Copyright 2024, American Association for the Advancement of Science.)

5. 결론

본 리뷰에서는 OECT 기반 인공 시냅스 및 뉴런 소자 개발에 대한 최근 연구 동향을 고찰하였다. OECT는 OMIEC 채널 내 체적 이온 도핑 메커니즘과 이온-전자 혼합 전도라는 물리적 특성을 통해 시냅스 가소성을 fJ 단위의 초저전력으로 재현하였으며, vOECT, 1T-OECN과 같은 차세대 소재 도입 및 소자 구조 최적화를 통해 생체 뉴런의 활동 전위 주파수 대역에서 작동하는 인공 뉴런을 구현하는 성과를 거두었다. 또한, 도파민과 같은 실제 신경전달물질의 실시간 검출 및 이를 매개로 한 신호 전달 체계의 구축은 전기적 자극 기반의 기존 뉴로모픽 소자의 한계를 넘어 생화학적 자극 기반의 바이오 통합 인공 신경 플랫폼 구축을 위한 핵심 요소기술로 활용될 가능성을 입증하였다.

그러나 OECT의 안정성 및 재현성 문제는 실용화 관점에서 여전히 주요한 병목으로 남아 있다. OMIEC의 전기화학적 열화, 이온 주입에 따른 채널 팽창과 같은 미세구조 변화, 온·습도 등 환경 요인에 대한 민감성은 소자의 장기 구동과 내구성을 제한하는 직접적인 원인이 된다. 또한 소자의 기하학적 구조와 전해질 물성에 따라 민감하게 변화되는 이온 동역학 특성은 소자 간 균일성을 저하시키고 hysteresis를 증폭시켜 대규모 집적화를 저해한다.

이를 극복하기 위해 향후에는 안정적인 OMIEC/전해질 (이온겔·고체 전해질 등) 조합 및 encapsulation을 통한 신뢰성 확보가 필수적이다. 이와 함께 공정·미세구조·특성 간 상관관계를 정립하고, 소재·구조·회로의 상호 최적화(co-optimization)를 통해 동작 속도·이득·에너지 효율 사이의 상충 관계를 정량적으로 관리하는 연구가 요구된다. 또한 고도핑 영역의 이동도 저하, 이온 포획, 시간 지연 등 고차원적 이온 동역학을 모사하는 진일보한 이론적 모델링은 소자 거동 이해와 설계 최적화에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 결론적으로 OECT 기반 인공 시냅스 및 뉴런 기술은 폰 노이만 병목을 해결할 에너지 효율적 연산 장치인 동시에, 뇌-기계 인터페이스 분야에서 생체와 전자 시스템을 연결하는 초저전력 뉴로모픽 하드웨어의 핵심 구성요소로 도약할 것이다.

ORCID

Hyunhak Jeong

<https://orcid.org/0000-0001-9474-5027>

감사의 글

이 논문은 2025년도 한국공학대학교 학술연구진흥사업 및 학술연구비 지원을 받아 연구되었음.

REFERENCES

- [1] J. Bisquert, W. Shim, S. Y. Kim, and B. Linares-Barranco, *Adv. Electron. Mater.*, **11**, 2400903 (2025). doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.202400903>
- [2] J. Tang, F. Yuan, X. Shen, Z. Wang, M. Rao, Y. He, Y. Sun, X. Li, W. Zhang, Y. Li, B. Gao, H. Qian, G. Bi, S. Song, J. J. Yang, and H. Wu, *Adv. Mater.*, **31**, 1902761 (2019). doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201902761>
- [3] N. K. Upadhyay, H. Jiang, Z. Wang, S. Asapu, Q. Xia, and J. J. Yang, *Adv. Mater. Technol.*, **4**, 1800589 (2019). doi: <https://doi.org/10.1002/admt.201800589>
- [4] F. Akopyan, J. Sawada, A. Cassidy, R. Alvarez-Icaza, J. Arthur, P. Merolla, N. Imam, Y. Nakamura, P. Datta, G. J. Nam, B. Taba, M. Beakes, B. Brezzo, J. B. Kuang, R. Manohar, W. P. Risk, B. Jackson, and D. S. Modha, *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, **34**, 1537 (2015). doi: <https://doi.org/10.1109/TCAD.2015.2474396>
- [5] W. Zhang, B. Gao, J. Tang, P. Yao, S. Yu, M. F. Chang, H. J. Yoo, H. Qian, and H. Wu, *Nat. Electron.*, **3**, 371 (2020). doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0435-7>
- [6] E. Li, W. Wang, Y. Liu, R. Wang, C. Luo, H. Zhou, S. Chen, S. Chen, Z. Xie, K. Zhu, W. Li, and J. Chu, *Adv. Mater.*, Accepted (2025). doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202515480>
- [7] M. A. Zidan, J. P. Strachan, and W. D. Lu, *Nat. Electron.*, **1**, 22 (2018). doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-017-0006-8>
- [8] T. Tuma, A. Pantazi, M. Le Gallo, A. Sebastian, and E. Eleftheriou, *Nat. Nanotechnol.*, **11**, 693 (2016). doi: <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.70>
- [9] S. J. Yoon and Y. K. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 311 (2022). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.4.1>
- [10] S. Song, J. Kim, and Y. H. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 215 (2022). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.3.2>
- [11] M. Wu, K. Yao, N. Huang, H. Li, J. Zhou, R. Shi, J. Li, X. Huang, J. Li, H. Jia, Z. Gao, T. H. Wong, D. Li, S. Hou, Y. Liu, S. Zhang, E. Song, J. Yu, and X. Yu, *Adv. Sci.*, **10**, 2300504 (2023). doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202300504>
- [12] Y. Yao, W. Huang, J. Chen, X. Liu, L. Bai, W. Chen, Y. Cheng, J. Ping, T. J. Marks, and A. Facchetti, *Adv. Mater.*, **35**, 2209906 (2023). doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202209906>
- [13] N. Fumeaux, C. P. Almeida, S. Demuru, and D. Briand, *Sci. Rep.*, **13**, 11467 (2023). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38308-1>
- [14] M. Cucchi, C. Gruener, L. Petrauskas, P. Steiner, H. Tseng, A. Fischer, B. Penkovsky, C. Matthus, P. Birkholz, H. Kleemann,

- and K. Leo, *Sci. Adv.*, **7**, eabh0693 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abh0693>
- [15] Y. Yao, R. M. Pankow, W. Huang, C. Wu, L. Gao, Y. Cho, J. Chen, D. Zhang, S. Sharma, X. Liu, Y. Wang, B. Peng, S. Chung, K. Cho, S. Fabiano, Z. Ye, J. Ping, T. J. Marks, and A. Facchetti, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **122**, e2414879122 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2414879122>
- [16] G. M. Matrone, E. R. W. van Doremaele, A. Surendran, Z. Laswick, S. Griggs, G. Ye, I. McCulloch, F. Santoro, J. Rivnay, and Y. van de Burgt, *Nat. Commun.*, **15**, 2868 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47226-3>
- [17] Y. van de Burgt, E. Lubberman, E. J. Fuller, S. T. Keene, G. C. Faria, S. Agarwal, M. J. Marinella, A. A. Talin, and A. Salleo, *Nat. Mater.*, **16**, 414 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1038/nmat4856>
- [18] J. Ji, D. Gao, H. Y. Wu, M. Xiong, N. Stajkovic, C. Latte Bovio, C. Y. Yang, F. Santoro, D. Tu, and S. Fabiano, *Nat. Commun.*, **16**, 4334 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59587-4>
- [19] T. Li, Z. Qu, J. Si, Y. Lee, V. K. Bandari, and O. G. Schmidt, *Sci. Adv.*, **11**, adt5186 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adt5186>
- [20] M. J. Donahue, A. Williamson, X. Strakosas, J. T. Friedlein, R. R. McLeod, H. Gleskova, and G. G. Malliaras, *Adv. Mater.*, **30**, 1705031 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201705031>
- [21] W. Huang, J. Chen, Y. Yao, D. Zheng, X. Ji, L. W. Feng, D. Moore, N. R. Glavin, M. Xie, Y. Chen, R. M. Pankow, A. Surendran, Z. Wang, Y. Xia, L. Bai, J. Rivnay, J. Ping, X. Guo, Y. Cheng, T. J. Marks, and A. Facchetti, *Nature*, **613**, 496 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05592-2>
- [22] J. Rivnay, P. Leleux, M. Ferro, M. Sessolo, A. Williamson, D. A. Koutsouras, D. Khodagholy, M. Ramuz, X. Strakosas, R. M. Owens, C. Benar, J. M. Badier, C. Bernard, and G. G. Malliaras, *Sci. Adv.*, **1**, e1400251 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400251>
- [23] Y. Liang, F. Brings, V. Maybeck, S. Ingebrandt, B. Wolfrum, A. Pich, A. Offenhäusser, and D. Mayer, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1902085 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201902085>
- [24] M. Zabihipour, R. Lassnig, J. Strandberg, M. Berggren, S. Fabiano, I. Engquist, and P. Andersson Ersman, *npj Flex. Electron.*, **4**, 15 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-020-0078-9>
- [25] M. Massetti, S. Zhang, P. C. Harikesh, B. Burtscher, C. Diacci, D. T. Simon, X. Liu, M. Fahlman, D. Tu, M. Berggren, and S. Fabiano, *npj Flex. Electron.*, **7**, 11 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-023-00245-4>
- [26] D. Khodagholy, M. Gurfinkel, E. Stavrinidou, P. Leleux, T. Herve, S. Sanaur, and G. G. Malliaras, *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 163304 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.3652912>
- [27] G. Frusconi, Z. M. Kovács-Vajna, P.W.M. Blom, P. Gkoupidenis, and F. Torricelli, *Adv. Mater. Technol.*, **10**, 2401440 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202401440>
- [28] B. Schmatz, A. W. Lang, and J. R. Reynolds, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1905266 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201905266>
- [29] W. AlChamaa and M. Khraiche, *J. Electrochem. Soc.*, **169**, 087518 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac88fa>
- [30] P. Andersson Ersman, R. Lassnig, J. Strandberg, D. Tu, V. Keshmiri, R. Forchheimer, S. Fabiano, G. Gustafsson, and M. Berggren, *Nat. Commun.*, **10**, 5053 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13079-4>
- [31] U. Boda, I. Petsagkourakis, V. Beni, P. Andersson Ersman, and K. Tybrandt, *Adv. Mater. Technol.*, **8**, 2300247 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202300247>
- [32] M. Zabihipour, D. Tu, J. Strandberg, M. Berggren, I. Engquist, and P. Andersson Ersman, *Adv. Mater. Technol.*, **6**, 2100555 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202100555>
- [33] X. Wu, A. Surendran, M. Moser, S. Chen, B. T. Muhammad, I. P. Maria, I. McCulloch, and W. L. Leong, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 20757 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c04776>
- [34] X. Zhou, L. Zhang, Y. Wang, S. Zhao, Y. Zhou, Y. Guo, Y. Wang, J. Liang, and H. Chen, *Adv. Mater. Technol.*, **8**, 2201272 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202201272>
- [35] M. Nishinaka, H. Jinno, Y. Jimbo, S. Lee, J. Wang, W. Lee, T. Yokota, and T. Someya, *Small Struct.*, **2**, 2000088 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/sstr.202000088>
- [36] J. Wang, S. Lee, T. Yokota, Y. Jimbo, Y. Wang, M.O.G. Nayeem, M. Nishinaka, and T. Someya, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **2**, 3601 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c00668>
- [37] C. Pitsalidis, M. P. Ferro, D. Iandolo, L. Tzounis, S. Inal, and R. M. Owens, *Sci. Adv.*, **4**, eaat4253 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4253>
- [38] M. Gryszel, D. Byun, B. Burtscher, T. Abrahamsson, J. Brodsky, D. T. Simon, M. Berggren, E. D. Glowacki, X. Strakosas, and M. J. Donahue, *J. Mater. Chem. C*, **12**, 5339 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1039/D3TC04730J>
- [39] K. Janzakova, M. Ghazal, A. Kumar, Y. Coffinier, S. Pecqueur, and F. Alibert, *Adv. Sci.*, **8**, 2102973 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202102973>
- [40] J. Tropp, D. Meli, and J. Rivnay, *Matter*, **6**, 3132 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.05.001>
- [41] Y. Wang, S. Wustoni, J. Surgailis, Y. Zhong, A. Koklu, and S.

- Inal, *Nat. Rev. Mater.*, **9**, 249 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00652-7>
- [42] D. Khodagholy, J. Rivnay, M. Sessolo, M. Gurfinkel, P. Leleux, L. H. Jimison, E. Stavrinidou, T. Herve, S. Sanaur, R. M. Owens, and G. G. Malliaras, *Nat. Commun.*, **4**, 2133 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms3133>
- [43] P. R. Paudel, V. Kaphle, D. Dahal, R. K. Radha Krishnan, and B. Lüssem, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2004939 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202004939>
- [44] S. Han, S. Yu, S. Hu, H. Chen, J. Wu, and C. Liu, *J. Mater. Chem. C*, **9**, 11801 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1039/D1TC02215F>
- [45] F. Mariani, F. Decataldo, F. Bonafè, M. Tassarolo, T. Cramer, I. Gualandi, B. Fraboni, and E. Scavetta, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 61446 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.3c10576>
- [46] C. Han, M. Kim, S. J. Park, J. S. Eo, D. Kim, Y. R. Park, S. Jung, and G. Wang, *Adv. Funct. Mater.*, **35**, 2423814 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202423814>
- [47] V. Venkatraman, J. T. Friedlein, A. Giovannitti, I. P. Maria, I. McCulloch, R. R. McLeod, and J. Rivnay, *Adv. Sci.*, **5**, 1800453 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.201800453>
- [48] B. Ding, V. Le, H. Yu, G. Wu, A. V. Marsh, E. Gutiérrez-Fernández, N. Ramos, M. Rimmelé, J. Martín, J. Nelson, A. F. Paterson, and M. Heeney, *Adv. Electron. Mater.*, **10**, 2300580 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.202300580>
- [49] S. Buchmann, P. Stoop, K. Roekevisch, S. Jain, R. Kroon, C. Müller, M. M. Hamed, E. Zeglio, and A. Herland, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 54292 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.4c09197>
- [50] H. Sun, M. Vagin, S. Wang, X. Crispin, R. Forchheimer, M. Berggren, and S. Fabiano, *Adv. Mater.*, **30**, 1704916 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201704916>
- [51] C. Y. Yang, M. A. Stoessel, T. P. Ruoko, H. Y. Wu, X. Liu, N. B. Kolhe, Z. Wu, Y. Puttisong, C. Musumeci, M. Massetti, H. Sun, K. Xu, D. Tu, W. M. Chen, H. Y. Woo, M. Fahlman, S. A. Jenekhe, M. Berggren, and S. Fabiano, *Nat. Commun.*, **12**, 2354 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22528-y>
- [52] S. Zhang, M. Massetti, T. P. Ruoko, D. Tu, C. Y. Yang, X. Liu, Z. Wu, Y. Lee, R. Kroon, P. O. Å. Persson, H. Y. Woo, M. Berggren, C. Müller, M. Fahlman, and S. Fabiano, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2106447 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202106447>
- [53] C. Cendra, A. Giovannitti, A. Savva, V. Venkatraman, I. McCulloch, A. Salleo, S. Inal, and J. Rivnay, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1807034 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201807034>
- [54] L. Zhu, J. Lin, Y. Zhu, J. Wu, X. Wan, H. Sun, Z. Yu, Y. Xu, and C. Tan, *Nanomaterials*, **14**, 1195 (2024).
doi: <https://doi.org/10.3390/nano14141195>
- [55] L. Lu, X. Liu, P. Gu, Z. Hu, X. Liang, Z. Deng, Z. Sun, X. Zhang, X. Yang, J. Yang, G. Zu, and J. Huang, *Nat. Commun.*, **16**, 3831 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59240-0>
- [56] I. del Agua, L. Porcarelli, V. F. Curto, A. Sanchez-Sanchez, E. Ismailova, G. G. Malliaras, and D. Mecerreyes, *J. Mater. Chem. B*, **6**, 2901 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1039/c8tb00201k>
- [57] C. H. Kim, M. Azimi, J. Fan, H. Nagarajan, M. Wang, and F. Cicoira, *Nanoscale*, **15**, 3263 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1039/d2nr06731e>
- [58] D. Ohayon, V. Druet, and S. Inal, *Chem. Soc. Rev.*, **52**, 1001 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1039/d2cs00920j>
- [59] H. Yun, K. Baek, H. Shin, G. Lee, H. Lee, and L. Do, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 12 (2011).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2011.24.1.12>
- [60] D. A. Bernards and G. G. Malliaras, *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 3538 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.200601239>
- [61] V. I. Arkhipov, *Phys. Rev. B*, **71**, 045214 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1103/physrevb.71.045214>
- [62] C. Zhao, J. Yang, and W. Ma, *Nano-Micro Lett.*, **16**, 233 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01452-y>
- [63] R. Shameem, L. M. Bongartz, A. Weissbach, H. Kleemann, and K. Leo, *Appl. Sci.*, **13**, 5754 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/app13095754>
- [64] H. W. Hwang, B. Sneha, Y. S. Song, and T. W. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **38**, 336 (2025).
doi: <https://doi.org/10.4313/jkem.2025.38.3.15>
- [65] C. M. Lee, Y. Kim, W. Kim, E. Lee, and E. K. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, **35**, 2417539 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202417539>
- [66] X. Ji, B. D. Paulsen, G.K.K. Chik, R. Wu, Y. Yin, P.K.L. Chan, and J. Rivnay, *Nat. Commun.*, **12**, 2480 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22680-5>
- [67] P. C. Harikesh, C. Y. Yang, D. Tu, J. Y. Gerasimov, A. M. Dar, A. Armada-Moreira, M. Massetti, R. Kroon, D. Bliman, R. Olsson, E. Stavrinidou, M. Berggren, and S. Fabiano, *Nat. Commun.*, **13**, 901 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28483-6>
- [68] R. Wu, M. Xie, Y. Cheng, D. Zhao, L. W. Feng, J. Chen, and W. Huang, *J. Mater. Chem. C*, **13**, 821 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1039/d4tc03569k>
- [69] M. Sung, D. Seo, J. Kim, H. E. Baek, G. Go, S. Woo, K. Kim, H. Yang, Y. Kim, and T. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2312546 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202312546>
- [70] H. Shu, H. Long, H. Sun, B. Li, H. Zhang, and X. Wang, *ACS*

- Omega*, **7**, 14622 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06864>
- [71] P. C. Harikesh, C. Y. Yang, H. Y. Wu, S. Zhang, M. J. Donahue, A. S. Caravaca, J. D. Huang, P. S. Olofsson, M. Berggren, D. Tu, and S. Fabiano, *Nat. Mater.*, **22**, 242 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41563-022-01450-8>
- [72] T. Sarkar, K. Lieberth, A. Pavlou, T. Frank, V. Mailaender, I. McCulloch, P.W.M. Blom, F. Torricelli, and P. Gkoupidenis, *Nat. Electron.*, **5**, 774 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00859-y>
- [73] P. C. Harikesh, D. Tu, and S. Fabiano, *Nat. Electron.*, **7**, 525 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-024-01200-5>
- [74] S. Fabiano, P. C. Harikesh, H. Y. Wu, C. Y. Yang, and D. Tu, *Sci. Adv.*, **11**, eadv3194 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adv3194>
- [75] Y. Choi, S. Oh, C. Qian, J. H. Park, and J. H. Cho, *Nat. Commun.*, **11**, 4595 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17850-w>
- [76] F. A. Viola, F. Melloni, A. Molazemhosseini, F. Modena, M. Sassi, L. Beverina, and M. Caironi, *Adv. Electron. Mater.*, **9**, 2200573 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.202200573>
- [77] J. Y. Gerasimov, R. Gabrielsson, R. Forchheimer, E. Stavrinidou, D. T. Simon, M. Berggren, and S. Fabiano, *Adv. Sci.*, **6**, 1801339 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.201801339>
- [78] W. Xu, S. Y. Min, H. Hwang, and T. W. Lee, *Sci. Adv.*, **2**, e1501326 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501326>