

이차원 소재 기반 유연 전자소자 응용

Flexible Device Applications Based on Two-Dimensional Materials

이은호 | Eunho Lee

Department of Chemical Engineering, Kumoh National Institute of Technology (KIT),
61, Daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk 39177, Korea
E-mail: leeeh@kumoh.ac.kr

1. 서론

2004년 Andre Geim과 Kostya Novoselov의 그래핀 발견은 이차원 소재의 급속한 발전을 이끌었다.¹⁻³ 이러한 물질에는 그래핀과 같은 단일 원소 물질, 전이 금속 칼코게나이드(transition metal chalcogenides, TMCs), 전이 금속 이칼코게나이드(transition metal dichalcogenides, TMDs), 및 질화물(MXene) 등이 포함된다. 이중 그래핀은 우수한 물리적, 화학적 성능을 가진 전형적인 이차원 물질이며 실험적으로 발견되기 수십 년 전부터 연구되어 왔다. 특히, 그래핀은 $10^4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 에 해당하는 높은 캐리어 전계 효과 이동도를 가지고 있을 뿐만 아니라 뛰어난 유연성을 지니고 있다.⁴⁻⁵ 뿐만 아니라, 산화 그래핀(graphene oxide, GO)은 산화된 형태인 sp^3 의 G-O 결합 및 C-C sp^2 결합으로 혼성화 되어 있다. 이때, GO에서 선택적으로 산소를 제거함으로써 절연-반도체-반금속 전이를 나타내어 그래핀의 전도도를 산화/환원 정도에 따라 제어할 수 있다.⁶⁻⁷

최근에는 그래핀 외에도 흑인(black phosphorous, BP), Mxene 등과 같은 새로운 이차원 소재가 발견되기도 하였다. BP는 vdW 힘을 통해 각 층이 결합된 층 구조의 이차원 소재다. 각 층에서 하나의 인 원자는 sp^3 혼성화에서 3개의 인접한 인 원자에 공유 결합되어 단층 BP가 그래핀과 마찬가지로 우수한 유연성을 지닐 수 있다. BP의 전기적 특성은 이방성이며 층 수로 조절할 수 있다. x 방향을 따라 단층 BP는 $1100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 전자(정공) 이동도를 나타내는 반면, y 방향의 경우 $80 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 로 큰 차이를 보인다.⁸⁻⁹ 또한 MXene은 층 구조를 가진 전이 금속 탄화물 및 질화물을 나타내는데, 일반적인 MXene의 공식은 $\text{M}_{n+1}\text{-X}_n\text{T}_x$ ($n=1, 2, 3$)로 나타낼 수 있다. M, X 및 T는 각각 전이 금속, 탄소 또는 질소 및 작용기를 나타낸다. 일반적으로 모든 M_2X 상은 밴드갭이 없는 금속성 거동을 나타내는 반면, 대부분의 MXene은 밴드갭이 약 0.24-1.8 eV인 반도체 특성을 보이기에 다양한 반도체 소자에 응용될 수 있다.¹⁰⁻¹¹ 뿐만 아니라, 이차원 소재의 얇은 두께 효과로 인해 그래핀과 마찬가지로 뛰어난 유연성을 가지고 있기에 다양한 유연 전자 소자에 응용될 수 있다는 가능성을 가지고 있다.

최근 포스트 실리콘 시대에서의 유연 전자소자는 전자, 산업, 의료, 군사, 우주 탐사 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 유연 전자소자에 사용되는 기존 재료에는 무기 재료인 실리콘, 금속 산화물 및 유기 재료인 고분자 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 재료를 유연 전자소자에 적용하기에는 높은 강도, 낮은 전기 전도성과 같은 재료의 고유 특성 측면과 높은 비용이 드는 생산 측면이라는 치명적인 단점이 존재하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해, 이차원 소재인 그래핀, TMDs 및 Mxene은 층 구조를 지니고 있는 신소재로 지난 10년 동안 연구자들에게 큰 관심을 받고 있다. 이차원 소재는 층 수 조절이 가능하며, 전기적, 광학적 특성을 조절할 수 있고, 반도체/금속 전이, 직접/간접 밴드갭 제어 및 높은 투명도를 지니고 있어 차세대 유연 전자소자에 대해

Author



이은호

2012 포항공과대학교 화학공학과 (학사)
2018 포항공과대학교 화학공학과 (박사)
2018-2019 포항공과대학교 나노기반소프트 일렉트로닉스 연구단 (Post-Doc.)
2019-2021 University of North Texas (Post-Doc.)
2021-현재 금오공과대학교 화학소재공학부 화학공학전공 조교수

유망한 전자재료로써 기대되고 있다. 따라서 본 특집에서는 이차원 소재 기반 유연 전자소자에 대한 다양한 최근 연구를 소개하고, 미래의 연구 및 산업적인 동향에 대한 종합적인 논의와 전망을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 Flexible Thin Film Transistors(TFTs)

이차원 반도체 소재인 TMDs의 다양한 합성법은 유연 전자 소자의 제작 및 구현을 용이하게 한다. 유연 전자 소자의 핵심이 되는 TMD 기반 박막 트랜지스터(thin film transistors, TFTs)는 제어가 가능한 밴드갭, 높은 유연성, 높은 표면적을 바탕으로

다수의 연구자들에 의해 집중적인 관심을 받아왔다. 벌크 전계 효과 트랜지스터(field-effect transistors, FETs)와 달리 TFT는 표면 상태가 스위칭 특성에 큰 영향을 미치는 이차원을 가지고 있다. 예를 들어, 단층 MoS_2 는 벌크 상태보다 황 공공(sulfur vacancy)의 밀도가 더 높아 잠재적인 전하 트랩이며 전하 누출의 원인이 된다. 또한 고유한 전자-포논 산란, 불순물, 표면 거칠기, 전하 트랩 등도 TFT의 전자 성능을 저해하는데, 이러한 문제를 해결하기 위해 도핑 및 이종 구조화, 전하 산란을 최소화하기 위한 고유전율 유전체 사용, 쇼트키 장벽을 줄이기 위한 계면 및 표면 제어, 전하 수송을 향상시키기 위한 소자 구조 개발 등과 같은 전략이 연구되고있다.^{12,13} 예를 들어, 우수한 유연성과 뛰어난 스위칭 특성 때문에 TMDs 기반

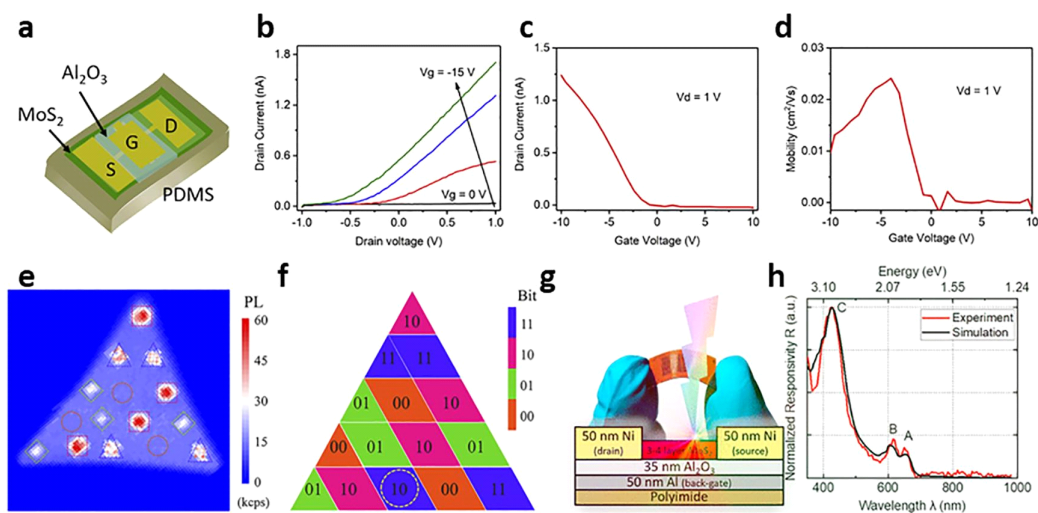


그림 1. (a) 유연 PDMS 기판에서 제작된 MoS_2 FET의 소자 구조 모식도 및 (b-d) 전기 특성 그래프.¹⁴ (e) 다양한 모양을 지닌 Laser writing을 통한 MoS_2 의 이차원 PL 맵핑 이미지와 (f) 서로 다른 에너지를 지닌 PL 피크를 활용하여 이진수로 표기된 코딩.¹⁵ (g) 유연 PI 기판 위에서 제작된 유연 광검출기 모식도 및 (h) 광학적 특성.¹⁶

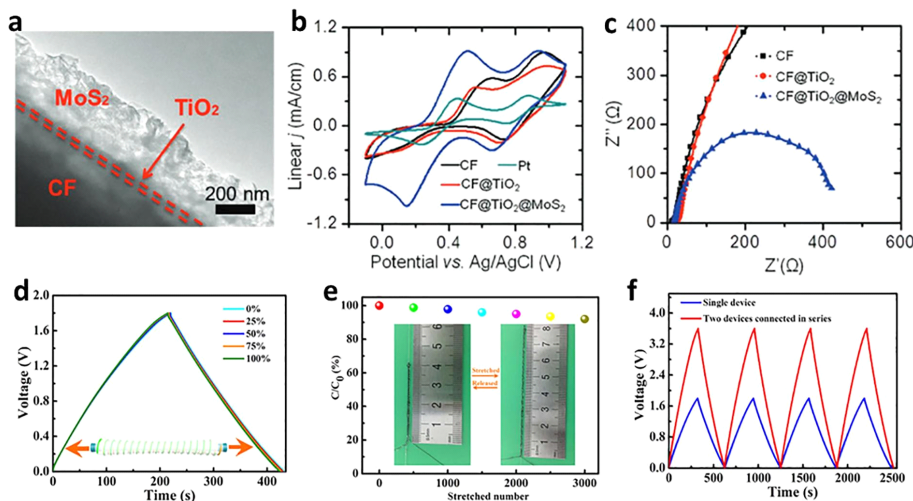


그림 2. (a) CF/ MoS_2 / TiO_2 합성 섬유의 단면 TEM 이미지. (b,c) CF/ MoS_2 / TiO_2 전극 기반 전기화학적 특성.²¹ (d) 변형률에 따른 전압 그래프. (e) 반복되는 구부림에 따른 정전용량 변화 그래프 및 (f) 직렬연결에 따른 전압 그래프.²²

TFT는 다양한 분야에서 널리 사용되어 왔다. Sirota 그룹은 스퍼터 공정을 통해 PDMS 기판에 비정형 MoS₂를 합성하여 p-type TFT를 개발했다.¹⁴ 이후, 레이저 유도 위상 공학을 사용하여 2H-MoS₂ 결정을 얻을 수 있었는데, 이러한 공정은 p-type 유연 전자소자가 등장할 수 있는 새로운 접근 방법을 제시하였다.

이러한 기존 응용 분야를 넘어 TMDs의 밴드갭을 활용하는 광검출기에도 응용이 가능하다. 또한, 적당한 밴드갭(약 ~2 eV)과 두께에 따른 간접/직접 밴드갭 전이는 자외선에 근적외선 용도에 적용할 수 있다. TMDs의 층수를 제어하거나 복잡한 이중 구조를 활용함으로써 밴드갭은 원하는 응용 분야에 맞춰 특정 파장 범위의 빛 탐지에 활용될 수 있다. Qin 그룹은 레이저를 활용하여 단층 MoS₂를 합성하였고, 이를 통해 MoS₂ 단일층의 광발광 스펙트럼은 1.77 eV에서 1.82 eV 사이에서 제어될 수 있다는 것을 밝혀냈다.¹⁵ 또한, Schneider 그룹은 약 1.83 eV-1.96 eV의 광발광 스펙트럼을 나타내는 다층 MoS₂(3~4 층)를 기반으로 한 소프트 광검출기를 보고했다.¹⁶ 또한 이 장치는 $V_g = 0$ V에서 540 AW⁻¹의 responsivity를 보였으며, 추가적인 MoS₂ 층 증착을 통해 이러한 특성이 더욱 향상될 수 있음을 보여주었다. 뿐만 아니라, MoS₂의 구조체를 제어할 경우 광학적 특성 및 유연성이 더욱 향상될 수 있다. 일반적으로 층 구조와 더불어 나노 구조가 들어갈 경우 응력을 분산시켜 유연성을 크게 향상시킬 수 있다. 이러한 광학 및 기계적 특성을 살린 Nanoflower를 기반으로 하는 광검출기는 높은 특정 영역은 채널의 유효 영역을 강화하고 장치 감도를 향상시킬 수 있었다.¹⁷ 뿐만 아니라, 전체 가시광 범위에서 빠른 반응을 보일 수 있으며 0.75 cm에서 굽힘 상태에서는 열화가 거의 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 이 외에도, TMDs 기반 TFT를 활용하여 유연 소자 센서에도 적용할 수

있다.¹⁸ 예를 들어 단층, 2층, 3층 MoS₂의 경우 변형률 -0.05, -0.12, -0.3%의 비율로 변형률에 따라 밴드갭이 감소한다. 이러한 특성을 활용하여 MoS₂와 같은 반도체 TMDs를 채널로 하는 TFT는 10⁴의 큰 ON/OFF 전류 비율과 최대 0.9 cm의 구부림 반경에서 180 회 이상에 걸쳐 신뢰할 수 있는 안정성을 제공하며 높은 민감도를 보여주었다.

2.2 Flexible Energy Storages

슈퍼커패시터(supercapacitor, SC)는 강력한 출력, 초고속 충방전을, 긴 수명, 환경 오염이 없는 등 친환경 에너지 소자로 각광받고 있다. 최근 인간 친화형 유연하고 착용 가능한 웨어러블 소자에 따른 SC에 대한 수요가 증가함에 따라 더 낮은 무게, 우수한 기계적 강도, 긴 사이클 안정성 및 고전력 밀도를 갖는 재료가 요구되고 있다. 이러한 요구에 맞게 이차원 소재인 TMDs는 유연성이 높고 비표면적이 크며 정전용량이 탁월하여 유연한 SC 전극에 이상적인 재료로써 각광을 받고 있다. 게다가, TMDs는 그래핀과 유사하여 용액 상에 분산되어 있는 TMDs 나노 시트를 graphene oxide(GO), reduced GO(rGO), CNT, 탄소 섬유(CF) 등으로 쉽게 합성할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 TMDs 나노 시트는 SC의 정전용량을 크게 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라, 사이클링 특성을 크게 개선해왔다. 또한, TMDs는 소수성 특성을 지닌 탄소 재료를 작용기를 도입함으로써 전기 촉매로써 활용할 수 있다. 예를 들어, rGO 코팅된 CNT, MoS₂ 나노 시트로 구성된 매우 유연한 전극이 개발되었다. 이렇게 제작된 전극은 CNT의 극도의 전도성 네트워크와 층 구조의 MoS₂의 장점을 동시에 취할 수 있다는 점을 보여주고 있다. 또한, rGO는 MoS₂ 나노 시트에 대한 강한 결합을 위해 CNT의 계면 거칠기를 향상시킴으로써 0.1 mA cm⁻²에서 126.8 mFcm⁻²로 증가된 정전 용량을 가질 수 있음을 보여주었으며, 10,000 회의 반복 테스트 이후에도 초기 정전용량의 96.6%를 유지하는 우수한 특성을 보여주었다.¹⁹

SC의 저장 성능을 더욱 향상시키기 위해 복합체 형태인 TMDs와 polypyrrole(PPy) 및 polyaniline(PANI)과 같은 전도성 폴리머를 도입할 수 있다. 전도성 고분자를 기반으로 다공성 구조를 만들어 넌으로 신축성 있는 지지체를 제공할 뿐만 아니라 높은 비면적을 제공하여 높은 정전용량을 이끌어 낼 수 있다.²⁰ 또는 코어/셸 구조는 정전용량이 큰 유연한 SC에 널리 사용되었는데 예를 들어, 탄소 섬유 기반 코어와 TiO₂@MoS₂ 셸이 있는 와이어 모양의 전극이 개발되었다.²¹ 제작된 전극은 MoS₂ 나노 입자의 활성 부위의 결과로 0.02 mA에서 1740 mFcm⁻¹의 높은 선형 정전용량을 가질 수 있음을 보여주었다. 게다가, 섬유를 기반으로 제작된 복합체는 유연 웨어러블 소자 제작에 유리하다. Zhang의 그룹은 MnO₂@PEDOT:PSS@산화 탄소나노튜브 섬유(OCNTF)의 양극과 MoS₂@CNTF의

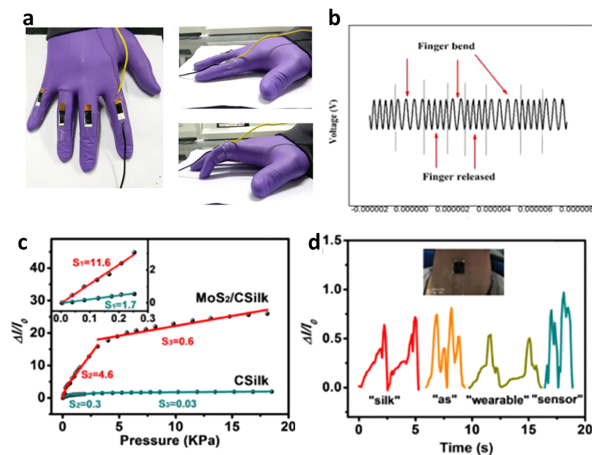


그림 3. (a) MoS₂ 기반 유연 센서를 인간의 손등에 붙인 이미지 및 (b) 손가락 움직임에 따라 변하는 전압 및 전류 그래프.²⁵ (c) MoS₂/Csilk 복합체 및 단일 Csilk의 압력에 따른 민감도 그래프 및 (d) 제작된 압력 센서를 인간의 목에 부착하여 다양한 단어에 따른 전류 변화 그래프.²⁶

음극을 가진 섬유 모양의 비대칭 타입의 SC를 개발하였다.²² 두 전극은 각각 837.6 및 723 mFcm⁻²의 높은 정전용량을 나타냈고, 이 조합으로 비대칭 SC는 전류 밀도가 0.6 mA cm⁻²일 때 278.6 mFcm⁻²의 개선된 커패시턴스를 나타내며 해당 전력 밀도는 540 mWcm⁻²에 도달할 수 있음을 보여주었다. 더욱이, 제작된 SC는 100%의 외부 변형률의 조건 하에 3,000 번 이상의 반복 실험 동안 정전용량의 92.0%를 유지하는 뛰어난 유연성을 보여주었다. 또한, Kumar 그룹은 rGO 및 WO₃/WS₂ 코어/셸 전극을 포함하는 개별 전극을 활용하여 55 mFcm⁻² 이상의 정전 용량과 10,000 회 동안 90% 이상의 정전 용량 유지를 나타내는 실험 결과를 보고하였다.²³ 그 결과 제작된 캐패시터는 1.5 V의 큰 전압 창과 10,000 회 후 70%의 용량 유지를 보여 우수한 기계적 안정성을 보여주었다.

2.3 Wearable Sensors

이차원 소재는 우수한 전기적, 기계적 특성 및 넓은 비면적을 바탕으로 다양한 센서에 활용되고 있다. 특히, 유연 특성이 우수한 이차원 소재인 TMDs는 외부 변형률에 따라 바뀌는 전기적인 특성을 활용하여 다양한 스트레인 센서에 적합한 재료로 각광을 받고 있다. TMDs 이러한 특성을 바탕으로 압력 감지를 위한 압력 센서 혹은 전자 스킨(electronic skin, e-skin)에 직접 활용될 수 있다. 제작된 압력 센서는 심장 박동 및 손목 맥박과 같은 미묘한 신호와 신체 움직임과 같은 집중 신호를 감지할 수 있다. Selamneni 그룹은 MoS₂/셀룰로오스 종이를 활용하여 유연 압력 센서를 개발하여 복용하는 약 캡슐에 적용했다.²⁴ 이렇게 제작된 센서는 덮개에서 약물을 제거할 때 적용된 압력을 감지하여 약물 투여량을 직접 관찰이 가능하였고, 모니터링 할 수 있다는 것을 보여주었다. 제작된 센서는 압력에 대한 전기 신호를 전달할 수 있으며, 압축 시 MoS₂와 그래핀 전극 사이의 접촉 면적 증가로 인한 향상된 전기 전도도를 활용하였다. 뿐만 아니라, Sahatiya 그룹은 인간의 움직임 감지를 위한 MoS₂ 기반 웨어러블 캐패시터를 보고하였다.²⁵ 제작된 소자는 MoS₂/Al 호일/셀룰로오스 종이의 샌드위치 구조를 가지고 있는데, Al 층과 셀룰로오스는 각각 커패시터와 유전체의 전극 역할을 하고 있다. MoS₂의 압전 효과와 커패시터의 에어 갭 효과를 기반으로 손가락에 부착하면 2.0% 미만의 변형률에 대한 변화를 통해 정전 용량 및 주파수의 변화를 유발하였다. 이 외에도, MoS₂/Al 캐패시터는 500번의 구부림 안정성 테스트에서도 높은 신뢰성을 보여주었다. Lu 그룹은 MoS₂ 기반의 웨어러블 저항식 압력센서를 제작하기 위해 탄소 기반 실크 직물(CSilk)을 기판으로 사용했다.²⁶ 압력 하에서 CSilk 사이의 변화된 거리는 접촉 저항의 변화를 일으키고 전기적 변화를 일으켰다. CSilk에서 수직으로 성장한 MoS₂는 높은 거칠기와 특정 영역을 생성하여 감도를 향상시켜 각각 0.25, 0.25-3 및 3 kPa의 압력에서

11.6, 4.6 및 0.6 kPa⁻¹ 높은 민감도를 지닌 소자를 구현하였다. 뿐만 아니라, 기계적 안정성 또한 500 Pa 및 1 Hz의 조건에서 5,000 회 반복 테스트에도 감도가 유지되었기 때문에 우수하게 나타났다. 또한 MoS₂/CSilk 센서는 10 mV의 낮은 작동 전압이 가능하여 신체 착용 소자 및 다양한 감지 응용 분야에 적합하다.

3. 결론

그래핀 및 다양한 TMDs와 같은 이차원 소재는 우수한 전기적, 기계적 특성을 토대로 다양한 유연 전자소자에 응용되는 연구가 전세계적으로 활발히 연구되고 있다. 기존의 금속 및 금속산화물과 같은 재료를 기반으로 구조 제어를 통한 유연 전자소자에 적용하려 하던 수동적인 접근 방법이 아닌, 재료 자체의 특성을 활용하는 능동적인 접근 방법은 보다 견고하고 기계적 안정성이 우수한 전자 소자를 만드는 접근 방법이 될 수 있다. 이러한 측면에서 이차원 소재를 유연 전자소자에 적용하려는 시도가 전세계에서 현재까지도 활발하게 연구되고 있고, 이에 대한 관심과 발전은 점점 증가할 것으로 기대된다. 그러나, 이차원 소재를 대면적으로 합성하는 연구, 기존 재료와의 계면 특성 제어, 패터닝 및 구조 제어, 공정 호환성 및 현재까지 밝혀지지 않은 다양한 특성에 대한 기초적인 연구가 여전히 숙제로 남아있다. 본 총설을 통해 이차원 소재 기반 유연 논리 소자, 에너지 소자 및 다양한 센서 등과 같은 응용 분야 소개를 통해 현재까지 활발하게 연구되고 있는 분야에 대해 알아보았다. 이 외에도, 태양전지, 촉매, 바이오 분야 등 다양하게 접할 수 있을 만큼 이차원 소재의 활용 가능성이 기술이 발전할수록 다양해지고 있다. 이러한 소재에 대한 기초적인 연구와 더불어 소자 기술의 발전은 앞으로 새로운 차세대 유연 전자 소자의 모습을 보여줄 것으로 기대된다.

참고문헌

1. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, *Science*, **306**, 666 (2004).
2. R.R. Nair, P. Blake, A.N. Grigorenko, K.S. Novoselov, T.J. Booth, T. Stauber, N.M.R. Peres, and A.K. Geim, *Science*, **320**, 1308 (2008).
3. C. Lee, X. Wei, J.W. Kysar, and J. Hone, *Science*, **321**, 385 (2008).
4. A. K. Geim and K. S. Novoselov, *Nat. Mater.*, **6**, 183 (2007).
5. E. Lee, S. G. Lee, and K. Cho, *Chem. Mater.*, **31**, 4451 (2019).
6. G. Eda, C. Mattevi, H. Yamaguchi, H. Kim, and M. Chhowalla, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 15768 (2009).
7. J. Kim, L. J. Cote, and J. Huang, *Acc. Chem. Res.*, **45**, 1356 (2012).

8. L. Li, Y. Yu, G. J. Ye, Q. Ge, X. Ou, H. Wu, D. Feng, X. H. Chen, and Y. Zhang, *Nat. Nanotechnol.*, **9**, 372 (2014).
9. J. Qiao, X. Kong, Z.-X. Hu, F. Yang, and W. Ji, *Nat. Commun.*, **5**, 4475 (2014).
10. Q. Wu, S. Chen, Y. Wang, L. Wu, X. Jiang, F. Zhang, X. Jin, Q. Jiang, Z. Zheng, J. Li, M. Zhang, and H. Zhang, *Adv. Mater. Technol.*, **4**, 1800532 (2019).
11. M. Khazaei, M. Arai, T. Sasaki, C.-Y. Chung, N. S. Venkataraman, M. Estili, Y. Sakka, and Y. Kawazoe, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 2185 (2013).
12. G. Nazir, A. Rehman, and S. J. Park, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 47127 (2020).
13. Z. Yu, Z.-Y. Ong, S. Li, J.-B. Xu, G. Zhang, Y.-W. Zhang, Y. Shi, and X. Wang, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1604093 (2017).
14. B. Sirota, N. Glavin, and A. A. Voevodin, *Vacuum*, **160**, 133-138 (2019).
15. C. Qin, Y. Gao, L. Zhang, X. Liang, W. He, G. Zhang, R. Chen, J. Hu, L. Xiao, and S. Jia, *AIP Adv.*, **10**, 045230 (2020).
16. D. S. Schneider, D. S. Schneider, A. Grundmann, A. Bablich, V. Passi, V. Passi, S. Kataria, H. Kalisch, M. Heuken, M. Heuken, A. Vescan, D. Neumaier, D. Neumaier, M. C. Lemme, and M. C. Lemme, *ACS Photonics*, **7**, 1388 (2020).
17. R. Sha, N. Vishnu, and S. Badhulika, *Sens. Actuators, B*, **279**, 53 (2019).
18. M.-Y. Tsai, A. Tarasov, Z. R. Hesabi, H. Taghinejad, P. M. Campbell, C. A. Joiner, A. Adibi, and E. M. Vogel, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 12850 (2015).
19. H. Ji, A. Luan, C. Dai, M. Li, G. Yang, and W. Hou, *Solid State Commun.*, **297**, 45 (2019).
20. Y. Tian, J. Liu, X. Song, L. Zhao, P. Zhang, and L. Gao, *Compos. Sci. Technol.*, **197**, 108263 (2020).
21. J. Liang, G. Zhu, C. Wang, Y. Wang, H. Zhu, Y. Hu, H. Lv, R. Chen, L. Ma, T. Chen, Z. Jin, and J. Liu, *Adv. Energy Mater.*, **7**, 1601208 (2017).
22. Q. Zhang, J. Sun, Z. Pan, J. Zhang, J. Zhao, X. Wang, C. Zhang, Y. Yao, W. Lu, Q. Li, Y. Zhang, and Z. Zhang, *Nano Energy*, **39**, 219 (2017).
23. K. S. Kumar, N. Choudhary, D. Pandey, L. Hurtado, H.-S. Chung, L. Tetard, Y. Jung, and J. Thomas, *Nanotechnology*, **31**, 435405 (2020).
24. V. Selamneni, P. Barya, N. Deshpande, and P. Sahatiya, *IEEE Sens. J.*, **19**, 11255 (2019).
25. P. Sahatiya, C. Madhava, A. Shinde, and S. Badhulika, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, **17**, 338 (2018).
26. W. Lu, P. Yu, M. Jian, H. Wang, H. Wang, X. Liang, and Y. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 11825 (2020).