Recent Research Progresses in 2D Nanomaterial-based Photodetectors

Hye Yeon Jang*, Jae Hyeon Nam*, and Byungjin Cho†

Department of Advanced Material Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Republic of Korea

2D 나노소재기반 광 센서 소자의 최근 연구 동향

장혜연*, 남재현*, 조병진†
충북대학교 신소재공학과

(Received February 19, 2019; Accepted March 5, 2019)

Abstracts

Atomically thin two-dimensional (2D) nanomaterials, including transition metal dichalcogenides (TMDs), graphene, boron nitride, and black phosphorus, have opened up new opportunities for the next generation optoelectronics owing to their unique properties such as high absorbance coefficient, high carrier mobility, tunable band gap, strong light-matter interaction, and flexibility. In this review, photodetectors based on 2D nanomaterials are classified with respect to critical element technology (e.g., active channel, contact, interface, and passivation). We discuss key ideas for improving the performance of the 2D photodetectors. In addition, figure-of-merits (responsivity, detectivity, response speed, and wavelength spectrum range) are compared to evaluate the performance of diverse 2D photodetectors. In order to achieve highly reliable 2D photodetectors, in-depth studies on material synthesis, device structure, and integration process are still essential. We hope that this review article is able to render the inspiration for the breakthrough of the 2D photodetector research field.

Keywords: 2D photodetector, heterostructure, contact, interface, passivation

1. 서론

빛을 전기 신호 형태로 변환하는 기술은 광통신, 차량

용 비전, 의료 영상, 거리 감지 등과 같은 다양한 광학 장치에 주로 사용되어 왔으며 응용 및 확장성이 뛰어나 관련 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 특히, 광 검출 기술

*공동 제1저자 (*Co-first author)

Fig. 1. Schematic diagram of 2D material-based photodetector including (a) 2D channel layer, (b) contact, (c) interface and (d) passivation layer.

에는 빛과 물질 사이의 상호 작용을 통해 입사된 광자를 전하 형태의 전기 신호로 변환할 수 있는 광 흡수 물질이 핵심 기술로 알려져 왔다. 그 중에서도 원자 두께 수준의 매우 얇은 2차원(2D, two-dimensions) 소재는 두께에 비해 광 흡수 계수가 상당히 크다. 또한, 층 수에 따라 광 전자 특성을 쉽게 제어할 수 있을 뿐만 아니라 투명하고 유연하지만 기계적 특성이 우수하여 플렉서블 광전자 분야로도 유망하다. 밴드 갭(band gap)이 서로 다른 2D 소재를 활용하면 매우 좁은 영역의 파장의 빛을 선택적으로 검출하거나 또는 매우 넓은 영역의 빛 스펙트럼을 검출하는 것이 모두 구현 가능하며, 특히, 2D 소재의 표면에는 땀글링 본드(dangling bond)가 없고 수직방향으로 약한 반데르발스(van der Waals) 결합으로 이루어져 있기 때문에 격자 매칭에 제한없는 다양한 헤테로 접합(heterojunction) 소자를 제작하는 것이 가능하다.

그래핀(graphene)은 가장 널리 알려진 2D 광 흡수 물질 중의 하나이다. 하지만 에너지 밴드 갭이 없어 암 전류(dark current)가 상당히 높으며 이는 광 소자의 검출 성능을 크게 저하시킨다. 최근 그래핀과 유사한 honeycomb 구조를 갖고 있으면서도 밴드 갭이 존재하는 전이금속 디칼코게나이드(TMD, Transition Metal Dichalcogenides) 소재가 광 검출 소재로 주목받고 있다. 2D TMD는 MX_2 (M: 전이금속, X: 칼코젠) 조성을 갖는 화합물로 층 수, 결정 구조, 원소 조성에 따라 다양한 전기적 또는 광학적 특성을 갖는다. 예를 들면, MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 , WSe_2 , SnS_2 와 같은 TMD는 높은 캐리어 이동도(mobility)를 갖고 있으며 가시광선 스펙트럼 범위에서 효율적인 광 흡수 특성을 이용한 광전자

소자에 응용이 가능하다.¹⁻⁴⁾ TMD 소재와 비슷한 에너지 밴드 특성과 에너지 스펙트럼을 가지는 BP(Black Phosphorus)에 대한 광 특성 연구도 활발하게 진행되었다.^{5,6)}

광전 변환 효율은 광 흡수로 생성된 전자-홀 쌍(EHP, Electron Hole Pair)의 생성률과 이후 분리된 전하들의 이동의 용이성에 의존한다. 그리고 광 소자의 검출 성능을 나타내는 필수적인 성능 지수는 응답성(R: Responsivity), 검출도(D: Detectivity), 응답속도(τ : Response time) 등이 있으며 특히, R과 D 지수는 다음과 같이 정의된다: $R = I_{photo}/P_{light}$, $D = (RA^{1/2})/(2eI_{dark})$. 광 검출 소자의 성능에 영향을 미치는 요소는 매우 다양하기 때문에 Fig. 1의 소자 구조에서처럼 2D 소재 채널(channel), 컨택(contact), 계면(interface), 보호 층(passivation layer)과 같은 중요한 요소 기술들에 대해서 순차적으로 설명할 것이다. 구체적으로, 최근에 연구가 가장 활발하게 진행되고 있는 2D 헤테로 구조(hetero structure) 채널 층의 광 특성 연구 동향에 대해 설명하고 2D 소재와 전극과의 컨택 기술, 기판과 2D 소재와의 계면 최적화 기술, 마지막으로 2D 소재 위에 보호 층 적용 기술에 대한 연구 동향에 대해 기술하였다.

2. 2D 헤테로 구조 기반 광 센서

일반적으로 단일 2D TMD 소재를 이용하여 매우 높은 감도를 가지거나 또는 넓은 파장의 빛을 검출하는 특성을 갖는 소자를 구현하는데 한계가 있다. 이는 2D 소재의 광 흡수 특성이 두께에 상당히 민감하여 제어하기 쉽지 않

Fig. 2. (a) Schematic illustration of an ML(monolayer) WSe₂/N-GQD photodetector.¹¹⁾ (b) Time-dependent photocurrent of ML WSe₂ (black line) and ML WSe₂/N-GQD devices after fabrication (red line) and after 30 days under ambient (blue line) at VDS = 1V and VG = 0V.¹¹⁾ (c) Schematic model of the PQDs/MoSe₂ device and its inset shows a typical TEM image of the PQDs.¹⁴⁾ (d) Transfer characteristics for pristine MoSe₂ and PQDs/MoSe₂ hybrid phototransistors both in dark and under illumination of 532nm at VD=1V.¹⁴⁾ (e) Schematic illustration of the synthesis of MoSe₂-Cu₂S.¹⁵⁾ (f) Semi-log plots of the current-voltage characteristics of MoSe₂ NSs(Nanosheets) with and without thiol(DDT), MoSe₂-Cu₂S in the dark and under illumination of a 514nm laser source.¹⁵⁾

며 단일 밴드 갭이 흡수할 수 있는 빛의 스펙트럼 범위 또한 제한적이기 때문이다. 반면, 서로 다른 광학적 특성을 갖는 소재 간의 하이브리드(hybrid)화는 광 특성 엔지니어링을 상당히 용이하게 만든다. 서론에서 언급한 것처럼 반데르발스 결합력으로 적층된 2D 소재는 다양한 차원(0, 1, 2, 3차원)의 소재와 이종 헤테로 구조를 만들기 쉬울 뿐만 아니라 특정 2D 소재가 가지고 있는 고유 결정 방위나 에너지 밴드 갭 값에 상관없이 완전히 새로운 광학 특성을 발현하는 것이 가능해진다. 일반적으로 2D 헤테로 구조는 층간 반데르발스 결합으로 이루어진 수직 구조와 횡 방향에서 공유결합으로 이루어진 수평 구조로 나뉘며 하이브리드 후보 물질은 금속, 반도체, 절연체에 이르기까지 매우 다양하다.⁷⁾ 수직 구조는 트랜스퍼(transfer) 같은 적층 공정을 적용해 쉽게 제작이 가능한 반면, 횡 방향 헤테로 구조 소자는 비교적 합성이 어려워 구현하기 쉽지 않다. 하지만 층 내에서 캐리어 이동이 용이해 광 응답속도가 상당히 빠른 장점이 있다.^{8,9)}

2.1 2D-0D 수직 헤테로 구조 광 센서

2D 소재는 높은 흡수 계수 값에도 불구하고 원자 층 수준의 얇은 두께로 인해 빛에 대한 흡수 및 방출 능력에 대

한 물성 한계치가 존재한다. 이런 한계점을 극복하기 위한 다양한 접근법이 존재한다. 예를 들면, PL(photoluminescence) 특성을 향상시키기 위해 결함을 제어하거나 플라즈몬 공명 효과를 도입하는 방식이다. 또는, QDs(Quantum Dots)를 이용하여 2D 물질과 하이브리드화 하는 방식이 있다. 특히, 2D 반도체는 다른 0차원 소재와 헤테로 구조를 형성하는 것이 쉽고 이종 물질 간 에너지 밴드 엔지니어링을 통해 전하 수송 거동과 광 특성을 손쉽게 변화시킬 수 있다. 최근 밴드 갭이 다른 콜로이드 퀀텀닷(CQDs: Colloidal Quantum Dots)을 활용하여 빛 검출 감도, 검출 속도, 그리고 스펙트럼 범위를 향상시킨 2D 광 소자 연구가 진행되었다. 예를 들면, p형 WSe₂ 반도체 표면 위에 그래핀 퀀텀닷(GQDs, Graphene Quantum Dots)을 코팅하여 광 검출 능력을 향상시킨 연구가 있다. GQD는 용액 공정을 통해 낮은 공정 비용으로 제작이 가능해 다양한 2D 반도체 소재에 적용이 가능하다.¹⁰⁾ 한편, 성균관대학교 연구팀은 질소가 도핑된 그래핀 퀀텀닷(N-GQDs, Nitrogen-doped Graphene Quantum Dots)으로 덮인 2D WSe₂ 헤테로 구조를 개발했다(Fig. 2a). 개발된 소자는 단일 층 WSe₂보다 480% 높은 광 응답성과 30일 이후에도 46%의 성능

Fig. 3. (a) Schematic illustration of the Multilayer WSe₂-In₂O₃ NW(Nanowire) phototransistor.¹⁶⁾ (b) Energy band diagram at the junction formed by the WSe₂-In₂O₃ NW. (c) AFM topography of the SiO₂ NW.¹⁷⁾ (d) Transient photocurrent for p-n heterojunction (red squares), n-n heterojunction (blue circles), and MSM devices (black triangles) acquired with a temporal resolution of 12 μs (30 kHz bandwidth) at V_g=-8V.¹⁷⁾ (e) Time-dependent photocurrent of the photodetector as a function of light intensity.¹⁸⁾ (f) The photoresponse of the photodetector based on the MoS₂-rGO film (black), Zn-doped MoS₂-rGO film (red), and Zn-doped MoS₂ layer (blue).¹⁸⁾

을 유지하는 우수한 광 특성 결과를 보여주었다(Fig. 2b).¹¹⁾ 단일 층의 WS₂와 PbS CQDs를 이용한 헤테로 구조는 적외선 영역에서 ~200 μs의 빠른 응답시간을 보여주었다.¹²⁾ 한편, 화중 과학기술대학교 연구팀이 개발한 PbS/WS₂ 광 소자는 7×10¹³ Jones의 우수한 검출도와 2×10⁵ A/W의 높은 응답성을 보여주었다.¹³⁾ 이외에도, 페로브스카이트(perovskite) CsPbI_{3-x}Br_x QD의 우수한 광 흡수 특성을 이용하는 MoS₂ 헤테로 구조가 제안되었으며(Fig. 2c), 개발된 헤테로 소자는 단일 MoS₂ 광 소자보다 15배 정도 높은 광 전류 특성을 보여주었다(Fig. 2d).¹⁴⁾ 인도델리공과대학교 연구팀은 DDT (Dodecanethiol)를 S 공급원으로 활용하여 MoSe₂ 표면에 존재하는 Se 결합 위에 Cu₂S island를 성장시켜 광 응답성이 우수한 p-n접합 광 센서 소자를 개발하였다(Fig. 2e).¹⁵⁾ 관련 소자는 기존 MoSe₂와 비교하여 3500배 높은 광 특성을 보여주었고 온/오프 비율은 26배나 향상되었다(Fig. 2f).

2.2 2D-1D 수직 헤테로 구조 광 센서

나노 튜브(nanotube) 또는 나노와이어(nanowire)와

같은 1차원 반도체는 2D TMD소재와 쉽게 접합이 가능해 광 검출 소자로 응용될 수 있다. Fig. 3a에서 나타난 것처럼 In₂O₃ 나노와이어를 채널로 하고 그 위에 WSe₂ 나노시트(nanosheet)를 전사함으로써 WSe₂/In₂O₃ 2D-1D 헤테로 구조의 포토트랜지스터(phototransistor)가 제작되었다.¹⁶⁾ WSe₂와 In₂O₃의 독특한 에너지 밴드 정렬로 인해 극도로 낮은 암전류(~10⁻¹⁴ A)를 가지며 높은 응답성(~10⁴ A/W)과 검출도(~10¹⁷ Jones)가 확보된 광 센서 소자가 구현되었다(Fig. 3b). 또한 상대적으로 작은 밴드갭을 갖고 있는 다층 WSe₂로 인해 광 검출 파장 영역이 가시광선에서 근적외선까지 넓어졌다. 또다른 2D-1D 광 센서 연구로 p-Si 나노와이어에 다층 MoS₂를 접합하여 형성된 헤테로 구조의 광 특성 결과를 보고하였으며 특히 기존에 보고된 bulk Si/MoS₂ 구조의 광 반응 응답시간보다 10배 이상 빠른 우수한 광 특성을 보였다(Fig. 3c, d).¹⁷⁾ 한국화학연구원 연구팀은 1차원 환원 그래핀산화물(rGO, reduced Graphene Oxide) fiber와 2D MoS₂ 소재로 이루어진 플렉서블(flexible) 광 센서 소자를 개발하였으며 특별히 metalloporphyrin층을 이용하여 MoS₂에 Zn을 도핑함으로써 광 검출기의 성능을 더

Fig. 4. (a) Schematic of a graphene/InSe/MoS₂ photodetector.²¹⁾ (b) Schematics of the simplified device models based on InSe/MoS₂ and graphene/InSe/MoS₂ heterostructures.²¹⁾ (c) Schematic 3D and side views of Gr-WS₂/MoS₂-Gr photodetector.²⁴⁾ (d) Photoresponsivity versus irradiation power.²⁴⁾

속 향상시켰다(Fig. 3e-f).¹⁸⁾ 1차원 나노 소재를 2D-1D 헤테로 구조의 광 센서 소자로 활용하는 이유는 서로 다른 이종 물질로 인한 밴드 엔지니어링이 가능할 뿐만 아니라 1차원 소재의 독특한 양자역학적인 에너지 상태를 이용하여 광 검출 특성을 향상시키는 것이 가능하기 때문이다. 또한 관련 헤테로 광 센서 소자를 유연 기판에 제작하면 플렉서블 광 센서 플랫폼을 구축하는 것이 용이해진다. 그럼에도 불구하고, bottom-up 공정으로 합성된 1차원 소재를 2D 소재와 쉽게 어레이(array) 형태로 집적화할 수 있는 재현성 있는 공정이 개발되어야 상업화 기술로 활용이 가능할 것이다.

2.3 2D-2D 수직 헤테로 구조 광 센서

일반적으로 2D 소재는 다른 2D 소재들과 하이브리드하여 2D-2D 수직 헤테로 구조 형태로 적층하여 제작하는 것이 훨씬 수월한 것으로 알려져 있다. 동일 차원의 평평한 플랫폼 위에 Si-CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)공정을 적용하여 집적화하는 공정을 적용하기도 훨씬 유리하다. 이 때문에 대부분의 2D 소재 기반의 헤테로 소자 연구는 2D-2D 형태로 적층된

형태를 띠고 있다.

광학적 이방성(anisotropic)을 가지고 있는 BP 소재와 MoS₂를 수직 방향으로 적층한 헤테로 접합 포토다이오드(photodiode)가 제작되었고 이전에 보고된 BP로만 이루어진 포토트랜지스터보다 10²~10³배 더 빠른 빛 검출 반응 속도를 보여주었다.¹⁹⁾ 한편, 2D TMD 소재의 밴드 갭은 주로 가시광선 스펙트럼 범위에 제한되어 있기 때문에 이런 한계점을 극복하기 위해 p-WSe₂/n-MoS₂ 헤테로 구조 사이에 그래핀을 위치시킨 p-g-n 헤테로 구조 광 센서가 새롭게 제안되었다.²⁰⁾ 관련 광 센서 소자는 근적외선 범위에서 최대 ~10¹¹ Jones 검출 능력을 가지고 있었으며 광대역 스펙트럼 검출 소자로 응용이 가능하였다. 단일 층의 n-MoS₂ 위에 다층의 n-InSe를 전사하고 최종 상부에는 그래핀을 덮어 광 센서 소자가 보고되었다(Fig. 4a).²¹⁾ 이 구조는 그래핀과 n-InSe간의 오믹 컨택(ohmic contact)을 통해 접합 특성을 향상시켰으며 그래핀의 효율적인 전하 이동 특성으로 인해 재결합을 최소화시킬 수 있었다(Fig. 4b). 또한 그래핀 층은 외부 대기와의 접촉을 막는 보호층으로 기능하여 한달 동안 광 전류 특성이 거의 변하지 않는 안정적인 소자 특성을 구현할

Fig. 5. (a) Schematic diagram of MoS₂/WS₂ vertical heterojunction preparation and corresponding devices fabrication.²⁷⁾ (b) Responsivity as a function of V_{DS} from 0 to 0.1V under the light irradiation at 94μW.²⁸⁾ (c) Schematic illustration of a flat-lying ZnPc molecule on monolayer MoS₂.³¹⁾ (d) The time-dependent photoresponse dynamics for a MoS₂ device after varied ZnPc treatments are plotted in the respective linear scale.³¹⁾

수 있었다.

성균관대학교 연구팀은 초소형 나노 graphene/h-BN (hexagonal Boron Nitride)/1L-MoS₂로 구성된 새로운 MIS(Metal Insulator Semiconductor) 다이오드 구조를 개발했으며 MIS구조는 MS기반 다이오드보다 전하 이동에 대한 장벽 높이가 커서 암전류를 상당히 낮출 수 있었다.²²⁾ 옥스포드대학교 연구팀은 화학기상증착법 (CVD, Chemical Vapor Deposition)으로 합성된 2D 나노소재를 이용하여 graphene-WS₂-graphene 헤테로 광 소자를 개발하였다.²³⁾ 또한, Fig. 4c에서 보이는 것처럼 WS₂/MoS₂ 헤테로 구조에 그래핀을 사이에 접촉시켜 고성능 포토트랜지스터를 제작하였으며,²⁴⁾ 개발된 헤테로 소자는 TMD 단일 소자에 비해 광 응답성이 상당히 개선될 수 있음을 보도하였다(Fig. 4d). 관련 연구들은 모두 이중 소재내 반데르발스 갭을 통한 전하 이동을 제어함으로써 궁극적으로 광 센서 소자의 성능을 크게 향상시켰다. 서로 다른 이중 소재의 계면 상태를 최적화하기 위한 방법으로 가장 선호되는 공정법은 epitaxial 증착 방

법이다. 단일 층의 MoS₂ 기판 위에 CVD를 이용하여 CdS를 epitaxial 성장시킨 CdS/MoS₂ 헤테로 구조가 최근 보고되었다. 일반적으로 CVD epitaxial 성장은 결정 방위와 적층 구조를 정밀하게 제어할 수 있어 2D 소재 적층공정에서 빈번하게 사용된다. CdS/MoS₂ 광 검출 소자는 넓은 스펙트럼 영역의 파장을 검출하는 것이 가능하였으며 광 응답 속도 역시 ~50배 향상되었다.²⁵⁾ 유사한 방법으로 후난대학교 연구팀은 CVD epitaxial 성장을 활용하여 대면적 WSe₂/SnS₂ p-n접합을 제작하여 광 검출 성능을 측정해본 결과, 매우 깨끗한 계면 특성 때문에 500 μs의 빠른 광 응답속도와 10⁻¹⁴ A의 매우 낮은 암전류 값을 확보하였다.²⁶⁾

2D 헤테로 구조를 제작하기 위해서 성장 공정이 상당히 중요해지는데 한 종류의 프리커서(precursor)를 미리 증착하는 방식이 공정 용이성 및 소자 집적화 측면에서 유리하다. 쑤저우대학교 연구팀은 TRSP(Thermal Reduction Sulfurization Process)를 통해 MoS₂/WS₂의 주기적으로 배열된 패턴 소자들을 제작하였다(Fig.

5a).²⁷⁾ TRSP는 먼저 감광제(photoresist)를 이용하여 기판 위에 Square hole들을 배열시킨 후 그 hole에 WO_3 를 열 증착하고 마지막으로 CVD 챔버에 황 분말을 넣어 WS_2 나노시트를 형성하는 합성법이다. 유사하게 Mo금속을 열 증착하여 MoS_2 나노시트를 WS_2 와 겹치게 합성한 방법이 보고되었는데 이 방법은 시트의 크기, 밀도, 형상을 원하는 대로 조절할 수 있어 대용량 어레이 소자를 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다. 그래핀 위에 bilayer MoS_2 를 저기압 화학기상증착법(LPCVD, Low Pressure Chemical Vapor Deposition)을 이용하여 센티미터 스케일의 균일한 필름을 성장시켜 헤테로 구조를 완성한 연구도 보고되었다.²⁸⁾ Ttransferred MoS_2 보다 LPCVD로 합성한 growing MoS_2 에서 고감도 빛 반응 특성을 보였으며 40번의 사이클 평가에서도 안정적인 광 특성 결과를 보여주었다(Fig. 5b).

새로운 2D 소재 기반의 반데르발스 헤테로 구조 연구도 활발하게 진행되고 있다. 예를 들면, p-GaTe/n- MoS_2 헤테로 구조 소자에서 GaTe는 intrinsic한 p형 반도체 소재이며 두께 상관없이 직접천이형 밴드 갭(direct band gap)을 가지고 있어 고효율 광 특성 구현에 유리하다.²⁹⁾ 개발된 소자는 자가 구동이 가능하며 전자 및 정공들로 인해 ambipolar 거동을 보여주었다.³⁰⁾ 또 다른 연구로 Fig. 5c에서와 같이 단일 층 MoS_2 와 ZnPc(Zinc Phthalocyanine) 유기 분자를 결합하여 제작한 반데르발스 헤테로 구조가 있다.³¹⁾ ZnPc 분자쪽으로 정공을 유도시켜 PPC(persistent photoconductance)를 억제해 궁극적으로 순수한 MoS_2 소자에 비해 응답속도가 상당히 향상되었다(Fig. 5d). 런던대학교 연구팀은 전사 기법을 통해 MGH(MoS_2 /Glassy-graphene Heterostructure) 기반의 투명 광 검출기를 개발하였다.³²⁾ 일반적으로 MoS_2 와 그래핀의 접촉은 쇼트키 컨택(schottky contact)이지만 glassy-graphene을 사용하여 전하 이동 장벽을 낮추어 옴믹 컨택이 형성되게 하였다. 그 결과로 전하 이동을 향상시켜 고성능 광 센서 특성이 구현되었다. $MoTe_2/MoS_2$ 헤테로 구조에서 서로 다른 극의 게이트 전압을 인가해주면 전압에 따라 소자 특성이 달라지는 것을 확인했으며 이 구조는 적외선 영역에서 광 응답 특성을

나타내어 투명 적외선 센서로 활용이 가능할 것이다.³³⁾

2.4 2D-3D 수직 헤테로 구조 광 센서

일반적으로 기존에 가장 많이 활용되는 3차원 벌크 플랫폼은 2D 소재와 융합되기 가장 손쉬운 소재이기 때문에 2D-3D 헤테로 구조 광 센서 연구 또한 상당히 많은 연구가 진행 되었다. 단순하게는 3차원 반도체 위에 2D 소재를 적층하여 p-n 포토다이오드를 구현한 것과 MSM(Metal Semiconductor Metal) 구조를 포토컨덕터(photoconductor) 또는 포토트랜지스터로 활용한 연구가 있다.

2D/3D 헤테로 구조를 갖는 포토다이오드는 기존의 3D/3D 포토다이오드와 비교하여 얇은 2D 층상 물질을 이용하기 때문에 접합 면까지 빛 에너지가 도달할 가능성이 증가해 광 검출 특성이 향상되는 장점이 있다. 또한, 2D와 3D 소재 사이의 물리적 접합부는 공유결합으로만 형성된 기존의 실리콘 p-n 접합과는 완전히 다른 에너지 밴드 프로파일을 가질 것으로 예측된다. 이에 부응하여 라이스대학교 연구팀은 단일 층 n- MoS_2 /p-Si 헤테로 접합에 대한 새로운 3차원 밴드 다이어그램을 제시하고 외부 전압이 인가된 상황에서의 전하 흐름을 규명하였다.³⁴⁾ 한편, 상업적으로 활용이 가능한 2D/3D 헤테로 접합 포토다이오드를 구현하기 위해서는 광 검출 면적이 넓어야 하기 때문에 top-down 방식의 스카치테이프 박리법을 통한 전사보다는 bottom-up 방식의 대면적 합성법이 요구된다. 최근 재료연구소와 충북대학교 공동연구팀은 대기압 플라즈마 화학기상증착법(AP-PECVD, Atmospheric Pressure Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)을 이용하여 MoS_2 /p-Si 및 WS_2 /p-Si 헤테로 구조 포토다이오드를 제작하였다(Fig. 6a).³⁵⁾ 이 합성법은 고품위의 2D TMD소재를 대기압 저온($\sim 200^\circ C$)에서 매우 빠르게 성장시킬 수 있을 뿐만 아니라 유연한 PET 기판 위에도 직접적으로 합성을 가능하게 하였다. 이 외에도 용액 공정을 이용하여 아민기가 있는 폴리스티렌($PS-NH_2$)으로 개질한 $MoSe_2$ 나노시트를 물 표면에 분산시킨 후 용매 증발을 이용해 균일한 두께의 $MoSe_2$ 복합 필름을 합성하는 연구도 진행되었다(Fig.

Fig. 6. (a) Schematic illustration of plasma synthesis reaction mechanism between H_2S molecules and MoO_3 (or WO_3) film. And High-resolution cross-sectional TEM image of an MoS_2 multilayer on Si substrate.³⁵⁾ (b) $\text{MoSe}_2/\text{PS-NH}_2$ nanocomposite film was readily transferred on a substrate, the schematic illustration shows an individual $\text{MoSe}_2/\text{PS-NH}_2$ photodiode.³⁶⁾ (c) Log scale current-voltage characteristics of a p-n junction vertical photodiode with a $\text{MoSe}_2/\text{PS-NH}_2$ film before (black) and upon NIR exposure (red).³⁶⁾ (d) Cross-sectional TEM image of the PtSe_2 selenized from Pt layer.⁴⁰⁾ (e) Absolute spectral response plots of the $\text{PtSe}_2/\text{n-Si}$ Schottky barrier diodes under various reverse DC biases.⁴⁰⁾ (f) Schematic description of a $\text{ZnIn}_2\text{S}_4/\text{Si}$ photodetector.⁴¹⁾ (g) Photo-switching behavior of the $\text{ZnIn}_2\text{S}_4/\text{Si}$ device under weak signal excitation.⁴¹⁾

6b, c).³⁶⁾ MoSe_2 복합 필름은 p형의 poly(9,9-di-n-octylfluorenyl-2,7-diyl) 또는 p-Si 기판에 손쉽게 전사될 뿐만 아니라 PET기판에도 적용해 플렉서블한 광 검출 디바이스를 구현하였으며 1000회 굽힘 테스트 후에도 일정하게 성능이 유지되었다. 또한 용액기반으로 합성된 MoSe_2/Si 헤테로 접합 광 센서는 32MHz 이상의 3dB 예측 대역폭에서 ~30 ns의 매우 빠른 응답 속도를 보여주었다.³⁷⁾

인천대학교 연구팀은 기존보다 진보된 구조의 헤테로 접합 포토다이오드를 고안하였다.³⁸⁾ CVD로 합성된 3층의 MoS_2 를 이용하여 $\text{MoS}_2/\text{n-Si/p-Si}$ 광 센서 소자를 제작하였고 이 광 센서 소자는 두개의 정류 접합을 갖는 특이한 구조로 되어있어 우수한 광 응답성과 30 μs 의 빠른 반응시간을 보여주었다. 또 다른 방법으로 기상증착법(vapor phase deposition)을 이용하여 성장시킨 다층 WS_2 를 p-Si에 단순히 적층하는 방법을 통해 고성능 제너(zener) 포토다이오드를 개발하였다.³⁹⁾ 보고된 결과에 의하면 2D 소재 기반 제너 포토다이오드는 상업적으로 이용 가능한 Si 포토다이오드보다 우수한 광 응답성을 가지기 때문에 고성능 광 검출기로서 잠재적인 활용이 가능

할 것으로 판단된다.

최근에 새로운 2D 소재들을 이용한 포토다이오드 연구들이 발표되고 있다. 2D-PtSe₂는 벌크에서 단일 층으로 두께가 얇아질수록 반금속(semimetal) 특성에서 반도체 성질로 물성이 바뀌게 되고 상대적으로 작은 밴드 갭으로 인해 적외선 검출이 가능하다. PtSe₂를 400℃ 이하의 저온에서 CVD 공정을 통해 대면적으로 합성하여 제작한 PtSe₂/n-Si 헤테로 포토다이오드는 넓은 파장 영역의 빛을 검출할 수 있는 광 특성을 보여주었다(Fig. 6d, e).⁴⁰⁾ 최근에는 고품위의 2D-ZnIn₂S₄ 나노시트를 간단한 습식 화학방법으로 합성하여 ZnIn₂S₄/n-Si 포토다이오드 어레이를 제작한 연구가 진행되었다(Fig. 6f).⁴¹⁾ 개발된 광 센서 소자는 ZnIn₂S₄/n-Si의 우수한 계면 전하 이동 특성 덕분에 매우 낮은 암전류(~18 pA) 값과 우수한 신호 대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio) 특성을 보여주었다(Fig. 6g).

2D-3D포토다이오드 외에 MSM 구조 기반의 포토컨덕터 또는 포토트랜지스터를 제작한 연구가 있다. 3D 물질을 광 검출 액티브(active) 채널로 이용하고 2D 물질을 헤테로 접합한 연구가 진행되었는데, 예를 들면, RF 스

Fig. 7. (a) Schematic illustrations showing the energy band alignment and the photoinduced charge transfer mechanism of the heterostructured MoS₂/a-IGZO stack without (left) or with (right) an applied positive gate bias.⁴²⁾ (b) Transfer characteristics ($V_D=10V$) of a-IGZO, MoS₂, and MoS₂/a-IGZO phototransistors as a function of the illuminating light wavelength at a fixed optical power (0.5mW).⁴²⁾ (c) Schematic device structure of the hybrid WS₂/perovskite photoconductor fabricated on a C-plane (0001) sapphire substrate.⁴⁴⁾ (d) UV-Vis absorption spectra for the pristine WS₂, perovskite, and heterostructured WS₂/perovskite samples.⁴⁴⁾ (e) Schematic illustration of SAL-doped BP photodetector under laser illumination ($P_{\text{light}}=6\text{mW}/\text{cm}^2$) and descriptive diagram showing the changes of photocarrier recombination in (i) APTES- and (ii) OTS-doped BP films.⁴⁸⁾ (f) $I_{\text{photo}}-V_G$ characteristics of the undoped (dotted line) and APTES (pink solid line)/OTS (green solid line)-doped BP photodetectors.⁴⁸⁾

퍼터링으로 증착한 비정질 IGZO(InGaZnO)필름 위에 용액기반으로 간편하게 합성한 MoS₂를 전사 시켜 대면적의 MoS₂/IGZO 포토트랜지스터 구조를 제안하였다.⁴²⁾ IGZO와 MoS₂소재가 가지고 있는 서로 다른 밴드 갭 특성 때문에 자외선부터 가시광선까지 넓은 영역의 빛을 검출하는 것이 가능하였다(Fig. 7a, b). 유사하게 스퍼터링된 비정질 IGZO필름 위에 스카치 테이프를 박리한 MoS₂ flake를 올려 MoS₂/IGZO 헤테로 구조의 포토트랜지스터를 제작하였다.⁴³⁾ 개발된 헤테로 구조의 소자는 MoS₂ 층이 없는 IGZO 광 검출 소자보다 무려 5배 높은 광 응답성을 보여주었다. 다층 MoS₂는 가시광선을 흡수하여 전자를 생성시키고 IGZO필름은 생성된 전자를 이동시키는 층으로 사용되어 자외선부터 근적외선까지의 광대역 파장을 가지고 있는 빛의 검출을 가능하게 하였다.

반대로 2D 소재를 광 흡수 액티브 채널로 활용하고 3D 물질은 헤테로 접합을 형성하는데 이용된 광 센서 소자 연구 또한 활발히 진행되었다. KAUST 연구팀은 단층 WS₂와 광 흡수 특성이 뛰어난 페로브스카이트 CH₃NH₃PbI₃소재를 하이브리드하여 고성능 광 검출 소

자를 개발하였다(Fig. 7c, d).⁴⁴⁾ 광 검출 소자의 암전류 크기뿐만 아니라 재결합 특성이 현저하게 억제되어 최종적으로 광 전류는 10배 상승하였고 단층 WS₂의 높은 이동도 특성과 수평방향으로의 뛰어난 전하 분리 특성에 의해 응답속도 역시 10⁴배 증가하였다.

최근 2D/3D 플랫폼에서 도핑이나 결함 특성을 이용하여 광 센서 특성을 향상시킨 연구가 진행되었다. 성균관대학교 연구팀은 PPh₃(Triphenylphosphine)를 이용하여 h-BN 층 상에 제조된 p-WSe₂를 n형으로 도핑시킨 광 센서 연구 결과를 발표하였다.⁴⁵⁾ 또한 BP/MoO₃ 및 BP/Cs₂CO₃ 헤테로 구조를 통해 각각 p형과 n형 도핑이 되는 것을 확인하였고 궁극적으로 응답속도가 향상된 광 센서 소자를 구현하였다.⁴⁶⁾ 이와 유사하게 2D TMD에 자가 조립 단분자막(SAM, Self Assembled Monolayer)을 이용하여 헤테로 구조를 구현한 연구가 최근 발표되었다.⁴⁷⁾ OTS(octadecyltrichlorosilane)는 WSe₂를 p형으로 도핑 시키기 때문에 28.2배 향상된 응답성을 보였으며 APTES(aminopropyltriethoxysilane)는 n-type 도핑 시키기 때문에 MoS₂ 기반 헤테로 구조 광 센서의 응

Fig. 8. (a) Schematic diagram illustrating fabrication process of all-2D Bi_2Te_3 -SnS- Bi_2Te_3 photodetector. (b) Power density dependent responsivity upon 370, 447, 635, and 808nm illumination (source - drain voltage: 5V). (c) A typical digital photograph of a bended Bi_2Te_3 -SnS- Bi_2Te_3 photodetector. (d) Photocurrent of the device upon different bend cycles.⁵²

답성을 26.4배 향상시켰다. 동일 연구 그룹은 BP에 APTES를 이용한 n-type 도핑시 광 검출 퍼포먼스가 줄어드는 반면 OTS를 이용한 p-type 도핑시 광 검출 퍼포먼스가 눈에 띄게 향상된다는 것을 보고하였다(Fig. 7e-f).⁴⁸⁾ 다른 한편으로, 결함 특성을 제어하는 연구로 단층의 WSe_2 에 레이저 빔을 조사해 healing 한 후 페로브스카이트 물질을 얇게 코팅해주면 단일 층의 WSe_2 광 센서 소자 대비 10^3 배 이상의 성능이 향상된다는 것을 보고하였다.⁴⁹⁾

2.5 2D 소재 기반 수평 헤테로 구조 광 센서

광 센서 소자의 경우 응답성, 검출도, 응답 속도와 같은 성능 지수를 증가시키는 것이 중요하다. 2D 적층 헤테로 구조에서 발생하는 반데르발스 갭을 통한 전하 이동 보다는 횡 방향의 공유결합을 통해 전하가 이동하면 빛의 검출 속도를 크게 증가시킬 수 있다. CVD 합성법을 통해 제조된 대면적 수직 구조인 graphene/ MoS_2 소자에 비해 동일 평면상에 제조된 수평 2D-2D 헤테로 구조의 graphene/ MoS_2 소자에서 더 큰 정류 특성을 보여주었다.⁵⁰⁾ 또한, 화중과학기술대학교 연구진은 CVD를 이용하여 MoS_2 와 WS_2 가 횡 방향으로 epitaxial하게 연결된

수평 헤테로 구조를 처음으로 제안하였고 이 소자는 외부 바이어스 없이도 EHP가 빠르게 분리되는 덕분에 4.36 mA/W의 높은 광 응답성과 4.36×10^{13} Jones의 높은 검출도 값을 보여주었다.⁵¹⁾ 한편, PLD(Pulsed Laser Deposition) 방식으로 Bi_2Te_3 나노 필름을 만들고 일부를 FIB(Focus Ion Beam) 공정으로 일부를 에칭(etching) 시킨 후 다시 PLD를 이용하여 에칭 된 부분에 SnS를 성장시켜 Bi_2Te_3 -SnS- Bi_2Te_3 소자를 완성하였다(Fig. 8a).⁵²⁾ 이 구조에서 SnS 부분에서 빛을 흡수하여 생성된 전자들은 SnS/ Bi_2Te_3 /Ti 계면 전극을 통해 손쉽게 이동하는 작동 방식으로 광 검출 특성을 나타내었다. 자외선부터 근적외선 영역까지 검출이 가능할 뿐만 아니라 100 회 동안 우수한 내구성을 보여주었다. 2D 금속 전극과 반도체 채널을 횡 방향으로 합성시켜 All-2D소재 기반의 플렉서블 광 센서가 구현되었다(Fig. 8b-d).

2D-2D 수평 구조 광 센서뿐만 아니라 2D-3D 구조의 광 센서에 대한 연구도 진행되었다. 기존 벌크 단결정 Si와 횡 방향으로 연결되는 헤테로 구조를 이루기 위해서는 Si 위에 2D 소재 물질을 수직으로 증착해야 한다. 예를 들어, Fig. 9a처럼 대면적 성장이 가능한 스퍼터링법을 이용하여 p-Si 위에 수직 방향으로 WS_2 를 증착하여

Fig. 9. (a) Schematic and photograph of the sputtering based WS₂/p-Si heterojunction device (an active area of 1 cm²).⁹⁾ (b) Top-down and (c) cross-sectional SEM images of vertical-MoS₂. (d) Schematic illustration of the photoresponse of the vertical-MoS₂/Si heterojunction device.⁸⁾ The magnified plots of one response cycle for 0.1 MHz at laser (e) being turned on and (f) being turned off.⁸⁾

WS₂/Si 수평 헤테로 구조를 제작하였다.⁹⁾ 2D WS₂의 높은 캐리어 이동도로 인하여 1.5×10^{10} Jones의 높은 검출 성능을 보여주었다. 또, 다른 연구진은 CVD를 공정을 이용하여 수직 방향의 MoS₂(V-MoS₂, Vertically oriented few layered MoS₂) 나노시트를 합성 후 Si 기판 위에 전사하였다(Fig. 9b-d).⁸⁾ V-MoS₂/Si 헤테로 접합 광 센서 소자는 908.2 mA/W의 광 응답성과 1.889×10^{13} Jones의 검출도를 띄며 가시광선에서 근적외선까지의 넓은 광대역 검출을 가능하게 하였다. 관련 소자는 매우 빠른 광 스위칭 응답속도(rising time: 56 ns, fall time: 825 ns)도 나타냈었다(Fig. 9e, f).

3. 2D-전극 접촉 물성 엔지니어링 연구

2D 기반의 광 센서 소자를 상업화하기 위해서 절대적으로 필요한 부분은 광 특성의 신뢰성이다. 이런 광 센서 소자의 신뢰성을 향상시키기 위한 하나의 접근법은 2D 액티브 채널 층과 금속 전극 사이에 발생하는 계면 결함을 최소화하는 것이다. 일반적으로 광 생성 캐리어는 이러한 결함에 쉽게 포획되고 결국 높은 접촉 저항을 유발

시켜 광 센서 소자의 성능을 크게 저하시킨다. 또한 2D-전극 접촉면의 에너지 밴드 프로파일에 의해 생성된 광 전자의 거동이 달라지므로 적절한 엔지니어링 기술이 요구된다.

MoS₂와 금속 전극 사이 계면에 TiO₂ 필름을 원자증착법(ALD, Atomic Layer Deposition)법으로 형성한 포토 트랜지스터가 개발되었다(Fig. 10a).⁵³⁾ TiO₂ 필름 도입은 페르미 레벨(fermi level) pinning 현상을 해결해 컨택 저항을 크게 감소시켰으며 급격적으로 광 응답성 및 응답속도를 현저히 향상시켰다(Fig. 10b). 한편, 채널과 금속 사이의 중간 버퍼층으로 산화물을 사용하지 않고 2D 소재를 삽입해 컨택 저항을 줄인 연구도 진행되었다. 2D WSe₂를 채널 물질로 사용하고 전극과의 컨택 층으로 Nb-doped WSe₂를 사용하면 2D/2D 오믹 컨택을 형성할 수 있으며 이는 고성능 포토트랜지스터로 활용 가능하다(Fig. 10c).⁵⁴⁾ Nb-doped WSe₂는 WSe₂ 채널과 금속 전극을 연결하여 낮은 컨택 저항을 형성하고 광 조사 시 여기된 EHP의 수집 효율을 향상시킨다. 개발된 포토트랜지스터는 상업용 Si 및 InGaAs 기반의 광 검출기와 비슷하거나 또는 진공상태에서 더 높은 검출 능력($\sim 10^{13}$

Fig. 10. (a) Schematic of an exfoliated MoS₂ device with a TiO₂ interlayer.⁵³⁾ (b) The band diagram of the interface between Ti and MoS₂.⁵³⁾ (c) WSe₂ phototransistors with 2D contacts formed between degenerately p-doped WSe₂ and undoped WSe₂ channel.⁵⁴⁾ (d, e) 3D schematic device structure of the metal–WSe₂–metal (MSM) photodetectors with asymmetric contact geometries, and symmetric contact geometries. A net current is generated when the (d) device is illuminated by the light under zero bias for structure, (e) while no net current results under the same condition for structure. (f) Measured I–V curves of asymmetric MSM photodetector under illumination at different light wavelengths.⁵⁶⁾

Jones)을 나타내었다.

한편, 광 검출기의 접촉 저항을 줄이려는 연구 이외에도 접촉면의 구조를 엔지니어링 하여 광 센서 소자의 검출 성능을 향상시킨 연구도 진행되었다. MoTe₂와 접촉하는 소스 드레인 사이의 접촉면적이 서로 다른 비대칭 접촉 형태의 MoTe₂ 포토트랜지스터를 제안하였다.⁵⁵⁾ 이런 비대칭 구조에서는 서로 다른 접합 특성 때문에 강한 광전지 특성이 발생되어 빛 에너지만으로 자가 작동이 가능한 광 센서를 구현 가능해진다. 유사하게 다른 연구진은 비대칭 접촉 구조를 갖는 WSe₂ 소재 기반의 MSM 광 소자를 제안하였다(Fig. 10d, e).⁵⁶⁾ 관련 소자는 비대칭 접촉 구조 덕분에 ~1 fA의 극도로 낮은 암전류를 보여주며 기존의 광 검출기와 다르게 외부 전압이 없이도 작동이 가능한 자체 구동 광 센서로 활용이 가능하다(Fig. 10f).

4. 2D-기판 계면 물성 엔지니어링 연구

일반적인 SiO₂ 기판 위에 놓여진 2D 소재의 고유 특성

을 발현시키는 것이 쉽지 않은데 이는 SiO₂ 표면에 존재하는 유기물 및 불순물 때문이다.⁵⁷⁾ 특히 3차원 소재에 비해 원자 층 두께의 소재에서는 전하가 이동하는 유효 영역이 2D 평면 내로 한정되어 전하의 이동 특성은 기판 표면 품질에 상당한 영향을 받게 된다. 이러한 이유로 단일 층의 MoS₂ flake를 이용하지 않고 다층의 MoS₂를 이용하여 전하가 이동할 수 있는 유효 면적을 증가시킨 후 표면 결함으로 인한 성능 저하를 최소화시킨 연구결과를 얻기도 하였다.⁵⁸⁾ 한편, 실리콘 산화물 기판 표면에 h-BN을 전사시켜 2D 그래핀 및 TMD의 전하 이동도를 획기적으로 향상시킨 연구결과가 보고되었다.^{59,60)} 망글링 본드가 없는 h-BN을 2D 액티브 채널 층과 게이트 유전체 사이에 삽입하여 전하 트랩을 감소시킴으로써 2D 소재의 전계 효과 이동도가 크게 향상된 것이다. 이 방법은 FET(Field Effect Transistor)뿐만 아니라 2D 물질 기반의 광 검출기에도 적용되었다. 예를 들면, h-BN flake 위에 액티브 채널로 WSe₂를 적층하여 포토트랜지스터를 구현한 결과가 있으며,⁵⁴⁾ h-BN과 MoS₂를 RF 마

Fig. 11. (a) Schematic of the h-BN/FL-ReS₂/h-BN device.⁶² (b) FL-ReS₂/SiO₂ and (c) FL-ReS₂/h-BN devices.⁶² All measurements were performed in vacuum at room temperature. The FL-ReS₂ flakes have the same channel length of 6.8 μ m with a width of 3.3 μ m. (d) Schematic diagram of typical MoS₂/TiO₂/HgTe hybrid photodiode.⁶⁴ (e) Band alignment of MoS₂, TiO₂, and HgTe QDs, performing type-II band alignment at the HgTe/TiO₂ interface. Light power density dependence of the responsivity of MoS₂, HgTe and hybrids photodetectors. Dynamic response of photocurrent in different devices with light wavelength of 635nm and 1310nm.⁶⁴ (f) Schematic of the two-step transfer-free fabrication process for MoS₂/graphene van der Waals heterostructures: (1) metal-free CVD growth of graphene directly on substrate and (2) printing the (NH₄)₂MoS₄ precursor on graphene followed by annealing to form 2D MoS₂/graphene heterostructures.⁶⁵

그네트론 스퍼터링법을 이용하여 SiO₂ 기판 위에 h-BN, MoS₂를 차례로 증착하여 대면적의 포토트랜지스터를 제작한 연구결과도 보고되었다.⁶¹ 유사하게, WSe₂ 채널 아래에 h-BN 층을 삽입함으로써 계면에서의 산란 현상을 억제하여 높은 응답 속도와 빠른 스위칭 속도를 갖춘 WSe₂ 기반 광 검출기 또한 구현되었다.⁴⁵ SiO₂ 기판에 다층 ReS₂를 채널 물질로 사용하고 h-BN 필름을 기판과의 계면에 삽입한 ReS₂ 포토트랜지스터에서 향상된 광 검출 특성이 보고되었다(Fig. 11a).⁶² 최근 개발된 ReS₂ 2D 소재는 벌크 형태에서도 직접 밴드 갭 특성을 보유하고 있어 광 소자로 상당히 유망한 후보로 인식되었다. 추가로 h-BN을 capping층으로 이용함으로써 다층 ReS₂ 포토트랜지스터 소자의 EQE값이 5배 상승하였다(Fig. 11b, c).

이 외에도 h-BN을 헤테로 접합 계면에 적용함으로써 광 센서 소자의 성능을 향상시킨 연구가 있다. 예를 들면,

graphene/h-BN/MoTe₂ 구조의 다이오드 광 소자에서 1145nm 파장영역에서 강한 광 응답성을 보였으며 h-BN 터널링 층(tunneling layer)으로 인하여 빠른 응답시간과 극도로 낮은 암전류(~ 5 pA)의 성능을 나타내었다.⁶³ 또한, 유사하게 HgTe CQDs/MoS₂ 헤테로 접합 계면에 터널링 층인 TiO₂를 삽입한 구조의 포토트랜지스터가 개발되었다(Fig. 11d).⁶⁴ HgTe CQDs는 용액 공정으로 간편하게 합성이 가능하고 적외선의 단파장부터 중파장까지의 광 검출이 가능해 유망한 소재로 알려졌으나 낮은 이동도 및 광학 이득(optical gain)으로 인해 실제적으로 낮은 광 응답 특성을 보인다. 하지만 TiO₂를 삽입한 구조로 개발된 MoS₂/TiO₂/HgTe CQDs 포토트랜지스터는 HgTe QD 연구분야에서 발표된 결과치의 최고 광 응답성을 나타내었다(Fig. 11e). 게이트 전압의 변조를 통해 노이즈 전류를 억제시킴으로써 2 μ m의 긴 파장영역에서도 큰 검출도($\sim 10^{12}$ Jones)를 구현하는 것이 가능했다.

Fig. 12. (a) Schematic illustration outlining the preparation of 3L h-BN/WSe₂ and exposure to the laser in the presence of a water droplet.⁶⁸⁾ (b) Variation in PL peak areas for WSe₂, 1L h-BN/WSe₂, and 3L h-BN/WSe₂ in the presence of a water droplet.⁶⁸⁾ (c) Schematic image of WSe₂/MoS₂ transparent solar cell and Teflon AF2400, a fluoropolymer that we have utilized as a passivation layer. J-V characteristics under dark state and related diode parameters extracted from the fitted line for the initial device and the one with passivation.⁶⁹⁾ (d) Transfer curve I_{DS}-V_G, drain current during 1 cycle of light modulation for MoS₂ devices, and a 3D sketch of MoS₂ devices before and after ALD encapsulation.⁷⁰⁾

한편, 합성된 MoS₂층을 그래핀 위에 옮긴 것이 아닌 그래핀 위에서 직접 성장시킨 transfer-free 합성을 이용해 매우 깨끗한 인터페이스를 얻는 공정법이 개발되었다.⁶⁵⁾ CVD로 합성된 대면적의 graphene 위에 MoS₂의 전구체 물질인 (NH₄)₂MoS₄ 솔루션을 프린팅 한 후 저온에서 합성시켜 MoS₂/graphene 광 검출 소자를 제작하였다(Fig. 11f). 개발된 광 소자는 이전에 보고된 MoS₂/transferred-graphene 보다 높은 광 검출 성능을 띠고 있었으며 이는 광 소자에서 깨끗한 계면 특성이 상당히 중요함을 인지시키는 연구결과이다.

5. 보호 층-2D 구조 기반의 광 특성 향상 연구

2D 나노 소재는 대기의 습기 또는 다른 기체 분자의 흡착으로 인해 전기적, 광학적 특성이 상당히 변할 수 있다. 흡착된 분자는 표면 포획 사이트로 작용하거나 전하 이동을 방해하는 요소로 작동한다. 이를 해결하기 위해서는 액티브 채널 층 위에 다양한 보호 층을 추가로 형성시키

는 간단한 전략이 매우 효과적이다.

최근 연구에 의하면 TMD 소재는 산소, UV 조사, 오존, 대기중 가열에 의해 쉽게 분해 될 수 있다는 연구결과가 보고되었다.^{66,67)} 이런 2D TMD 소재의 분해는 주로 결정립계에서 먼저 시작하며 특히 BP 물질에서는 이런 현상이 더욱 심각해진다. 울산과학기술대학교 연구팀은 레이저(532nm) 노출에 의한 WSe₂ 및 MoSe₂의 광분해와 h-BN 보호 층에 의한 광분해 방지 효과에 대한 최근 연구결과를 보고하였다(Fig 12a).⁶⁸⁾ WSe₂의 광분해는 레이저 출력이 0.5mW 이상에서는 빠르게 발생했으며 0.1mW 미만에서는 관찰되지 않았다. 그러나, WSe₂ 표면에 물방울이 존재하면 WSe₂의 광분해는 더욱 가속될 뿐만 아니라 0.1mW에서도 일어났다. h-BN으로 WSe₂를 encapsulation하면 광 분해를 효과적으로 방지할 수 있다는 것을 발견했다(Fig. 12b). 또한, h-BN 기반 위에 ReS₂를 채널물질로한 FL(Few Layer)-ReS₂/h-BN 포토트랜지스터와 그 위에 h-BN층을 추가로 적층한 h-BN/FL-ReS₂/h-BN 포토트랜지스터의 광 검출 성

Fig. 13. (a) Schematic diagrams of 2D material based multimodal photodetector platform including both a vertical photodiode and a lateral phototransistor structure and experimental setup.⁷¹⁾ (b) 3D schematic view of the WS₂ phototransistor with gold nanoparticles (AuNPs) embedded in the gate dielectric.⁷²⁾ (c) Output characteristics of the WS₂ device with and without illumination in the program state. The inset shows similar measurements in the erase state.⁷²⁾ (d-f) The cross-section structures of the device and equilibrium energy band diagrams of three different ferroelectric polarization states with V_{sd}=0V. For the band diagrams of different states, small Schottky barriers at the source and drain electrodes are considered.⁷³⁾ (g) Photoswitching behavior of ferroelectric polarization gating triple layer MoS₂ photodetector at three states (λ=635nm, V_{sd}=100mV, P=100nV).⁷³⁾

능을 비교한 연구결과가 보고되었다.⁶²⁾ 그 결과 h-BN/FL-ReS₂/h-BN 디바이스에서 더욱 우수한 광 검출 성능이 보였는데 이는 ReS₂ 위에 적층한 h-BN이 추가적인 보호 층으로 작용했기 때문이다.

연세대학교 연구팀은 유리기판 위에 다층의 WSe₂와 MoS₂를 증착하고 전극은 ITO를 사용하여 투명한 태양전지를 제작하였다(Fig. 12c).⁶⁹⁾ 두께가 매우 얇은 2D 소재를 이용하기 때문에 ~80%로 높은 투과도를 얻을 수 있었으며 표면 흡착을 방지하기 위해 비정질 fluoropolymer Teflon AF2400를 스핀코팅 공정을 이용하여 얇게 증착하였다. 그 결과 기존 대비 광전 변환 효율을 10% 향상시킬 수 있었다. 금속산화물을 소자 보호 층으로 사용한 연구도 보고되었다. MoS₂/ZnPc 헤테로 접합 포토트랜지스터에 30nm의 Al₂O₃층을 증착하여 소자 성능을 향상시켰다.³¹⁾ MoS₂ 포토트랜지스터의 열화 및 습기를 방지하

기 위해 ALD를 이용하여 초박형 HfO₂ 보호 층을 증착한 연구도 진행되었다(Fig. 12d).⁷⁰⁾ HfO₂/MoS₂ 소자는 외부 환경에 의한 열화를 방지해 MoS₂ 광 소자 대비 광 응답성 및 응답속도를 크게 향상시킬 수 있었다. 위의 연구 결과들을 통해 확인된 것처럼 소자 보호 층의 도입은 외부 흡착물이 2D 채널 소재에 흡착되는 것을 막아줌으로써 결국 빛에 의한 광분해를 지연시킬 수 있게 해주고 또한 전하의 포획 현상도 상당히 줄일 수 있게 도와주어 궁극적으로 광 소자의 신뢰성 및 안정성을 높여준다. 하지만 보호 층으로 인해 발생하는 소자 특성의 급격한 변화가 단순히 대기의 분자 흡착을 막아서 발생하는 것인지 아니면 의도하지 않은 채널 도핑의 결과인지를 밝혀내는 것 또한 중요할 것이다. 이를 위해 2D 채널 소재와 보호 층의 종류에 따른 광 특성 변화에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

6. 광 특성 향상 연구 (기타)

일반적으로 수평 방향의 광전자 전도를 활용하는 포토 트랜지스터 구조는 높은 광학 이득을 얻는 장점이 있고 수직 포토다이오드 구조는 빠른 응답 및 저전력 작동이 가능한 장점이 있다. 이에 부응하여 미네소타대학교 연구팀은 포토트랜지스터와 다이오드 각각의 장점을 활용하기 위해 트랜지스터/다이오드 구조가 통합된 다기능의 광 검출기를 개발하였다.⁷¹⁾ 미리 제작된 소스/드레인 전극에 다층 MoS_2 소재를 전사한 후 ionic liquid를 코팅 후 상부 전극을 최종 증착함으로써 광 센서 소자를 완성하였다. 수평 방향의 MoS_2 채널은 포토트랜지스터의 채널로 이용하였으며 전극과 MoS_2 의 쇼트키 접촉면을 포토다이오드로 이용하여 고속 응답은 물론 높은 광학 이득을 얻을 수 있었다(Fig. 13a). 한편, MoS_2 또는 WS_2 는 채널, AuNPs(Au nanoparticles)는 플로팅 게이트, HfO_2 는 터널링 및 블로킹 유전체로 활용한 플로팅 게이트 형태의 포토트랜지스터 연구도 최근 진행되었다 (Fig. 13b).⁷²⁾ 플로팅 게이트 AuNPs는 전자 포획을 유도함으로써 암전류를 크게 낮추는 역할을 하고 20mV의 낮은 드레인 전압 하에서 게이트 전압 인가 없이도 1090 A/W의 큰 응답성을 갖는 포토트랜지스터를 구현하였다 (Fig. 13c).

중국과학원 연구팀은 P(VDF-TrFE) 강유전성 폴리머 필름을 게이트 유전체로 활용하여 MoS_2 포토트랜지스터를 제작하였다.⁷³⁾ 폴리머 필름의 강유전성에 의해 transfer 곡선의 히스테리시스(hysteresis)가 크게 관찰되었으며 게이트 전압의 인가를 없애도 분극이 남아있었다. 분극이 없을 때와 분극의 방향이 채널 쪽(P down state)을 향할 때와 비교했을 때 분극이 게이트 전극 쪽(P up state)을 향할 때 광 응답성이 현저하게 상승하였으며, zero 게이트 전압에서도 검출기의 감도가 우수하게 유지되었다. 이러한 특수한 성질을 바탕으로, 2570 A/W의 높은 응답성을 가진 광 검출기를 개발하였으며 광 응답 파장 영역이 가시광선으로부터 근적외선(0.85–55 μm)까지 더 확장된 것을 보여주었다(Fig. 13d–g). 또한 같은 강유전성 폴리머를 In_2Se_3 flake에도 적용하여 낮은 암전류와 빠른 응답(200 μs)속도를 달성하였다.⁷⁴⁾

7. 결론

2D 소재는 높은 광 흡수 계수 및 높은 전하 이동 특성 때문에 고성능 광 센서에 대한 큰 가능성을 보여주었다. 본 리뷰논문에서는 2D 소재를 기반으로 하는 광 검출 소자에서 중요한 구성 요소 기술들(채널, 콘택, 계면, 보호층)과 관련된 연구 결과들을 살펴보고 광 센서 소자의 성능을 정량적으로 평가하기 위한 다양한 성능 지수(응답성, 검출도, 반응속도, 검출 파장 범위 등)를 비교 검토하였다.

광 센서의 채널 층은 단일물질보다는 주로 하이브리드의 헤테로 구조를 형성하는 방향으로 연구가 진행되고 있는 추세이다. 2D 소재의 반데르발스 결합은 다양한 차원의 광 소자 플랫폼(2D–0D, 2D–1D, 2D–2D, 2D–3D 등)을 가능하게 하였고 이런 헤테로 구조의 광 센서 소자는 전반적으로 광 흡수 효율을 증가시킬 뿐만 아니라 검출 파장 스펙트럼 범위를 넓히는 효과가 있었다. 전극과 2D 소재의 접촉 물성은 광 검출기의 검출 성능에 상당히 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나이다. 금속/2D 재료의 접촉면에 형성되는 쇼트키 장벽은 전하 이동을 어렵게 해 소자 성능의 저하를 초래한다. 따라서 접촉 계면에 금속산화물 또는 2D 절연체 소재를 삽입한 연구가 보고되었다. 계면에 대한 연구로는 2D 물질과 기판과의 계면, 2D 물질과 헤테로 접합한 다른 차원의 소재에서 발생하는 결합을 최소화하는 연구가 주로 진행되었다. 2D 광 센서 소자 보호 층은 대기중의 습기와 공기 분자에 대한 노출을 억제시켜 광분해 열화 현상을 막는 중요한 기술로 부상하고 있다.

기존 상용화된 광 검출기를 대체할 정도로 적합한 2D 기반의 광 검출기를 구현하기 위해서는 여전히 상당한 연구가 필요한 실정이다. 특히 광 검출 성능 지수(응답성, 검출도, 반응속도, EQE, 파장 스펙트럼 범위 등)를 향상시키는 연구뿐만 아니라 2D 소재 물질 자체에 대한 고품위의 대면적 성장 및 집적화 어레이 공정 기술이 필수적이다. 뿐만 아니라 장기 안정성 및 신뢰성을 확인하기 위한 테스트가 필수적이다. 2D 물질이 광 센서 소자 분야에서 상당한 장점을 갖고 있음에도 불구하고 여전히 재료

합성 연구, 소자 구조 설계 기술 고도화, 집적화 공정 기술, 양자 기반 시뮬레이션 예측 기술 등이 융합될 때 2D 광 검출기의 비약적인 발전이 가능할 것으로 보인다.

8. 감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B1005076)

참고문헌

1. Yao, J. D., Zheng, Z. Q., Shao, J. M. & Yang, G. W. "Stable, highly-responsive and broadband photodetection based on large-area multilayered WS₂ films grown by pulsed-laser deposition". *Nanoscale* **7**, 14974–14981 (2015).
2. Octon, T. J., Nagareddy, V. K., Russo, S., Craciun, M. F. & Wright, C. D. "Fast High-Responsivity Few-Layer MoTe₂ Photodetectors". *Adv. Optical Mater.* **4**, 1750–1754 (2016).
3. Yim, C. *et al.* "High-Performance Hybrid Electronic Devices from Layered PtSe₂ Films Grown at Low Temperature". *ACS Nano* **10**, 9550–9558 (2016).
4. Jiao, L., Jie, W., Yang, Z., Wang, Y. & Chen, Z. "Layer-dependent photoresponse of 2D MoS₂ films prepared by pulsed laser deposition". *J. Mater. Chem. C* **7**, 2522–2529 (2019).
5. Huang, M. *et al.* "Broadband Black-Phosphorus Photodetectors with High Responsivity". *Adv. Mater.* **28**, 3481–3485 (2016).
6. Miao, J. *et al.* "Single Pixel Black Phosphorus Photodetector for Near-Infrared Imaging". *Small* **14**, 1702082–1702088 (2018).
7. Jia, Z. *et al.* "Enhanced Photoresponse of SnSe-Nanocrystals-Decorated WS₂ Monolayer Phototransistor". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 4781–4788 (2016).
8. Qiao, S. *et al.* "A vertically layered MoS₂/Si heterojunction for an ultrahigh and ultrafast photoresponse photodetector". *J. Mater. Chem. C* **6**, 3233–3239 (2018).
9. Kim, H., Patel, M., Kim, J. & Jeong, M. S. "Growth of Wafer-Scale Standing Layers of WS₂ for Self-Biased High-Speed UV-Visible-NIR Optoelectronic Devices". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 3964–3974 (2018).
10. Sun, M. *et al.* "Heterostructured graphene quantum dot / WSe₂ / Si photodetector with suppressed dark current and improved detectivity". *Nano Research* **11** (6), 3233–3243 (2018).
11. Nguyen, D. A. *et al.* "Highly Enhanced Photoresponsivity of a Monolayer WSe₂ Photodetector with Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 10322–10329 (2018).
12. Yu, Y. *et al.* "PbS-Decorated WS₂ Phototransistors with Fast Response". *ACS Photonics* **4**, 950–956 (2017).
13. Hu, C. *et al.* "Synergistic Effect of Hybrid PbS Quantum Dots / 2D-WSe₂ Toward High Performance and Broadband Phototransistors". *Adv. Funct. Mater.* **27**, 1603605–1603612 (2017).
14. Wu, H. *et al.* "All-Inorganic Perovskite Quantum Dot-Monolayer MoS₂ Mixed-Dimensional van der Waals Heterostructure for Ultrasensitive Photodetector". *Adv. Sci.* **5**, 1801219–1801227, (2018).
15. Bera, S., Gupta, D., Ray, S. K. & Sapra, S. "MoSe₂-Cu₂S Vertical p-n Nanoheterostructures for High-Performance Photodetectors". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11**, 4074–4083, (2019).
16. Guo, N. *et al.* "Hybrid WSe₂-In₂O₃ Phototransistor with Ultrahigh Detectivity by Efficient Suppression of Dark Currents". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 34489–34496 (2017).
17. Henning, A. *et al.* "Charge Separation at Mixed-Dimensional Single and Multilayer MoS₂/Silicon Nanowire Heterojunctions". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 16760–16767 (2018).
18. Kim, S. J. *et al.* "Fabrication of high-performance flexible photodetectors based on Zn-doped MoS₂/graphene hybrid fibers". *J. Mater. Chem. C* **5**, 12354–12359 (2017).
19. Ye, L., Li, H., Chen, Z. & Xu, J. "Near-Infrared Photodetector Based on MoS₂/Black Phosphorus Heterojunction". *ACS Photonics* **3**, 692–699 (2016).
20. Long, M. *et al.* "Broadband Photovoltaic Detectors Based on an Atomically Thin Heterostructure". *Nano Lett.* **16** (4), 2254–2259 (2016).
21. Chen, Z. A. "high performance self-driven photodetector based on a graphene/InSe/MoS₂ vertical heterostructure". *J. Mater. Chem. C* **6**, 12407–124122 (2018).

22. Jeong, H. *et al.* "Metal-Insulator-Semiconductor Diode Consisting of Two-Dimensional Nanomaterials". *Nano Lett.* **16**, 1858-1862 (2016).
23. Tan, H. *et al.* "Ultrathin 2D Photodetectors Utilizing Chemical Vapor Deposition Grown WS₂ With Graphene Electrodes". *ACS Nano* **10** (8), 7866-7873 (2016).
24. Tan, H. *et al.* "Lateral Graphene-Contacted Vertically Stacked WS₂ / MoS₂ Hybrid Photodetectors with Large Gain". *Adv. Mater.* **29**, 1702917-1702924 (2017).
25. Zheng, W. *et al.* "Anisotropic Growth of Nonlayered CdS on MoS₂ Monolayer for Functional Vertical Heterostructures". *Adv. Funct. Mater.* **16**, 2648-2654 (2016).
26. Yang, T. *et al.* "Van der Waals epitaxial growth and optoelectronics of large-scale WSe₂/SnS₂ vertical bilayer p-n junctions". *Nat. Commun.* **8**, 1906-1914 (2017).
27. Xue, Y. *et al.* "Scalable Production of a Few-Layer MoS₂/WS₂ Vertical Heterojunction Array and Its Application for Photodetectors". *ACS Nano* **10**, 573-580 (2016).
28. Chen, C. *et al.* "Large-Scale Synthesis of a Uniform Film of Bilayer MoS₂ on Graphene for 2D Heterostructure Phototransistors". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** (29), 19004-19011 (2016).
29. Wang, F. *et al.* "Tunable GaTe-MoS₂ van der Waals p-n Junctions with Novel Optoelectronic Performance". *Nano Lett.* **15**, 7558-7566 (2015).
30. Yang, S. *et al.* "Self-Driven Photodetector and Ambipolar Transistor in Atomically Thin GaTe-MoS₂ p-n vdW Heterostructure". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** (4), 2533-2539 (2016).
31. Huang, Y. *et al.* "Van der Waals Coupled Organic Molecules with Monolayer MoS₂ for Fast Response Photodetectors with Gate-Tunable Responsivity". *ACS Nano* **12**, 4062-4073 (2018).
32. Xu, H. *et al.* "High Detectivity and Transparent Few-Layer MoS₂/Glassy-Graphene Heterostructure Photodetector". *Adv. Mater.* **30** (13), 1706561-1706569, (2018).
33. Zhang, K. *et al.* "Interlayer Transition and Infrared Photodetection in Atomically Thin Type-II MoTe₂ / MoS₂ van der Waals Heterostructures". *ACS Nano* **10**, 3852-3858 (2016).
34. Li, B. *et al.* "3D Band Diagram and Photoexcitation of 2D - 3D Semiconductor Heterojunctions". *Nano Lett.* **15**, 5919-5925 (2015).
35. Kim, Y. *et al.* "Facile Fabrication of a Two-Dimensional TMD/Si Heterojunction Photodiode by Atmospheric-Pressure Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 36136-36143 (2018).
36. Hwang, I., Kim, J. S., Cho, S. H., Jeong, B. & Park, C. "Flexible Vertical p-n Diode Photodetectors with Thin N-type MoSe₂ Films Solution-Processed on Water Surfaces". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 34543-34552 (2018).
37. Geng, X. *et al.* "Design and construction of ultra-thin MoSe₂ nanosheet-based heterojunction for high-speed and low-noise photodetection". *Nano Research* **9**, 2641-2651 (2016).
38. Kim, H.-S. *et al.* "High-performing MoS₂-embedded Si photodetector". *Materials Science in Semiconductor Processing* **71**, 35-41 (2017).
39. Lan, C. *et al.* "Zener Tunneling and Photoresponse of a WS₂ /Si van der Waals Heterojunction". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 18375-18382 (2016).
40. Yim, C. *et al.* "Wide Spectral Photoresponse of Layered Platinum Diselenide-Based Photodiodes". *Nano Lett.* **18**, 1794-1800 (2018).
41. Zheng, Z. *et al.* "Fabrication of a high performance ZnIn₂S₄/Si heterostructure photodetector array for weak signal detection". *J. Mater. Chem. C* **6**, 12928-12939 (2018).
42. Yang, J. *et al.* "MoS₂ - InGaZnO Heterojunction Phototransistors with Broad Spectral Responsivity". *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 8576-8582 (2016).
43. Pak, S. W., Chu, D., Song, D. Y., Lee, S. K. & Kim, E. K. "Enhancement of near-infrared detectability from InGaZnO thin film transistor with MoS₂ light absorbing layer". *Nanotechnology* **28**, 475206 (2017).
44. Ma, C. *et al.* "Heterostructured WS₂/CH₃NH₃PbI₃ Photoconductors with Suppressed Dark Current and Enhanced Photodetectivity". *Adv. Mater.* **28** (19), 3683-3689 (2016).
45. Jo, S. *et al.* "A High-Performance WSe₂/h-BN Photodetector using a Triphenylphosphine (PPh₃)-Based n-Doping Technique". *Adv. Mater.* **28**, 4824-4831 (2016).
46. Xiang, D. *et al.* "Surface transfer doping induced effective modulation on ambipolar characteristics of few-layer black phosphorus". *Nature Communications* **6**, 6485 (2015).
47. Kang, D. *et al.* "High-Performance Transition Metal

- Dichalcogenide Photodetectors Enhanced by Self-Assembled Monolayer Doping”. *Adv. Funct. Mater.* **25**, 4219–4227 (2015).
48. Kang, D. *et al.* “Self-Assembled Layer (SAL)-Based Doping on Black Phosphorus (BP) Transistor and Photodetector”. *ACS Photonics* **4**, 1822–1830 (2017).
 49. Lu, J. *et al.* “Hybrid Bilayer WSe₂-CH₃NH₃PbI₃ Organolead Halide Perovskite as a High-Performance Photodetector”. *Angew. Chem.* **128**, 12124–12128 (2016).
 50. Lee, K. H., Kim, T., Shin, H. & Kim, S. “Highly Efficient Photocurrent Generation from Nano-crystalline Graphene - Molybdenum Disulfide Lateral Interfaces”. *Adv. Mater.* **28**, 1793–1798 (2016).
 51. Wu, W. *et al.* “Self-Powered Photovoltaic Photodetector Established on Lateral Monolayer MoS₂-WS₂ Heterostructures”. *Nano Energy* **51**, 45–53 (2018).
 52. Yao, J. & Yang, G. “Flexible and High-Performance All-2D Photodetector for Wearable Devices”. *Small* **14**, 1704524–1704531 (2018).
 53. Pak, Y., Park, W., Mitra, S., Devi, A. A. S., Loganathan, K., Kumaresan, Y., Kim, Y., Cho, B., Jung, G.-Y., Hussain, M. M., & Roqan, I. S. “Enhanced Performance of MoS₂ Photodetectors by Inserting an ALD-Processed TiO₂ Interlayer”. *Small* **14**, 1703176–1703181 (2018).
 54. Mandrus, D., Zhou, Z. & Xu, Y. “High-Performance WSe₂ Phototransistors with 2D/2D Ohmic Contacts”. *Nano Lett.* **18**, 2766–2771 (2018).
 55. Liu, J. *et al.* “Pronounced Photovoltaic Response from Multi-layered MoTe₂ Phototransistor with Asymmetric Contact Form”. *Nanoscale Research Letters* **12**, 603–610 (2017).
 56. Zhou, C. *et al.* “Self-Driven Metal-Semiconductor-Metal WSe₂ Photodetector with Asymmetric Contact Geometries”. *Adv. Funct. Mater.* **28**, 1802954–1802961 (2018).
 57. Chen, J., Jang, C., Xiao, S., Ishigami, M. & Fuhrer, M. S. “Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂”. *Nature Nanotechnology* **3**, 206–209 (2008).
 58. Phys, A. “MoS₂ nanosheet photodetectors with ultrafast response”. *Appl. Phys. Lett.* **111**, 153502 (2017).
 59. Britnell, L. *et al.* “Electron Tunneling through Ultrathin Boron Nitride Crystalline Barriers”. *Nano Lett.* **12**, 1707–1710 (2012).
 60. Britnell, L. *et al.* “Field-Effect Tunneling Transistor Based on Vertical Graphene Heterostructures”. *Science* **335**, 947–950 (2012).
 61. Samassekou, H. *et al.* “Viable route towards large-area 2D MoS₂ using magnetron sputtering”. *2D Mater.* **4**, 021002 (2017).
 62. Nazir, G. *et al.* “Comparison of Electrical and Photoelectrical Properties of ReS₂ Field-Effect Transistors on Different Dielectric Substrates”. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 32501–32509 (2018).
 63. Zhu, Y. *et al.* “High-Efficiency Monolayer Molybdenum Ditelluride Light-Emitting Diode and Photodetector”. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 43291–43298 (2018).
 64. Huo, N., Gupta, S. & Konstantatos, G. “MoS₂-HgTe Quantum Dot Hybrid Photodetectors beyond 2 μm”. *Adv. Mater.* **29**, 1606576–1606580 (2017).
 65. Liu, Q. *et al.* “Printable Transfer-Free and Wafer-Size MoS₂/Graphene van der Waals Heterostructures for High-Performance Photodetection”. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 12728–12733 (2017).
 66. Parzinger, E. *et al.* “Photocatalytic Stability of Single- and Few-Layer MoS₂”. *ACS Nano* **9** (11), 11302–11309 (2015).
 67. Yamamoto, M., Dutta, S., Aikawa, S., Nakaharai, S. & Wakabayashi, K. “Self-Limiting Layer-by-Layer Oxidation of Atomically Thin WSe₂”. *Nano Lett.* **15**, 2067–2073 (2015).
 68. Ahn, S. *et al.* “Prevention of Transition Metal Dichalcogenide Photodegradation by Encapsulation with h-BN Layers”. *ACS Nano* **10** (9), 8973–8979 (2016).
 69. Cho, A., Song, M., Kang, D. & Kwon, J. “Two-Dimensional WSe₂/MoS₂ p-n Heterojunction-Based Transparent Photovoltaic Cell and Its Performance Enhancement by Fluoropolymer Passivation”. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 35972–35977 (2018).
 70. Kufer, D. & Konstantatos, G. “Highly Sensitive, Encapsulated MoS₂ Photodetector with Gate Controllable Gain and Speed”. *Nano Lett.* **15**, 7307–7313 (2015).
 71. Namgung, S., Shaver, J., Oh, S. & Koester, S. J. “Multimodal Photodiode and Phototransistor Device Based on Two-Dimensional Materials”. *ACS Nano* **10** (11), 10500–10506 (2016).
 72. Gong, F. *et al.* “High-Sensitivity Floating-Gate Phototransistors Based on WS₂ and MoS₂”. *Adv.*

- Funct. Mater.* **26**, 6084–6090 (2016).
73. Wang, X. et al. “Ultrasensitive and Broadband MoS₂ Photodetector Driven by Ferroelectrics”. *Adv. Mater.* **27**, 6575–6581 (2015).
74. Wu, G., Wang, X., Wang, P., Huang, H. & Chen, Y.

“Visible to short wavelength infrared In₂ Se₃-nanoflake photodetector gated by a ferroelectric polymer.” *Nanotechnology* **27**, 364002–364008 (2016).

장혜연

- 2018년 충북대학교 신소재공학과 학사
- 2018년-현재 충북대학교 재료공학과 석사 과정

남재현

- 2018년 충북대학교 신소재공학과 학사
- 2018년-현재 충북대학교 재료공학과 석사 과정

조병진

- 2007년 하이닉스 반도체 공정엔지니어
- 2012년 광주과학기술원 신소재공학과 박사
- 2013년 UCLA 기계항공우주공학과 Post-doc
- 2013년-2017년 재료연구소 선임연구원
- 2017년-현재 충북대학교 신소재공학과 조교수