



반데르발스 소재 기반의 태양전지 적용에 관한 최신 연구동향 리뷰

박형기^{1,*} · 이재현² · 허근^{3,*}

¹아주대학교 AI 초융합 KIURI 질환경북 중개연구단

²아주대학교 첨단소재공학과 & 에너지시스템학과

³전북대학교 반도체과학기술학과

A Short Review of Recent Trends in Photovoltaics Research Using Van-der Waals Materials

Hyeong Gi Park^{1,*}, Jae-Hyun Lee², and Keun Heo^{3,*}

¹*AI-superconvergence KIURI Translational Research Center, Ajou University, Suwon 16499, Republic of Korea*

²*Department of Materials Science and Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Republic of Korea*

³*Department of Semiconductor Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea*

Abstract: In recent years, the exploration of van der Waals materials has taken center stage in the field of advanced materials research. Studies have delved deeply into the multifaceted characteristics of these materials, and in particular their potential applications in solar cell technology. Van der Waals materials, named after the unique forces binding their layers, are of high interest because of their unparalleled physical and chemical properties. Their two-dimensional (2D) nature offers a plethora of advantageous features, including a high surface-to-volume ratio, which is crucial to enhanced light absorption and electron transport. The tunable electronic properties of these materials also offer a versatile platform for customizing behavior to meet the specific requirements of solar cell applications. Their distinctive optical characteristics can also be enhanced to improve light absorption and reduce energy losses, thereby increasing overall solar cell efficiency. Recent research has not only investigated the inherent properties of van der Waals materials but also explored various techniques to combine and stack them. Such methodologies aim to exploit and optimize the synergistic effects of different materials, paving the way for next-generation solar cells with improved performance metrics. A comprehensive examination of the operating principles of these materials provides insights into their interaction with light and their subsequent electrical behavior. The study concludes with a forward-looking perspective, emphasizing how the integration of van der Waals materials could very well revolutionize the solar cell industry. Their potential to significantly boost the efficiency and stability of solar cells positions them as promising candidates for future sustainable energy solutions.

(Received 21 September, 2023; Accepted 20 November, 2023)

Keywords: Van der Waals, 2D Transition Metal Dichalcogenides, Interface Engineering, Photovoltaics

1. 서 론

태양전지는 태양광 에너지를 전기 에너지로 변환하는 광

전 소자로, 지속 가능한 에너지를 공급하는 중심적인 역할을 하며 환경 보호와 에너지 자립성, 기후 변화 대응 등의 글로벌 문제 해결책으로 각광받고 있다 [1]. 특히 태양전지의 중요성은 태양광 발전 과정에서 온실 가스를 배출하지 않기 때문에 대기 오염과 기후 변화의 불확실성을 줄일 수 있고 태양전지를 활용함에 따라 국가적, 개인적으로 에너지 안보 측면, 즉 다시 말하면 안정성 및 독립성을 강화한다. 전력 공급의 외부 의존도를 줄이고 특히 접근이 어려

- 박형기, 이재현, 허근: 교수

*Corresponding Author: Hyeong Gi Park

[Tel: +82-10-7540-5572, E-mail: hgpark007@ajou.ac.kr]

*Corresponding Author: Keun Heo

[Tel: +82-10-7702-8988, E-mail: kheo@jbnu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

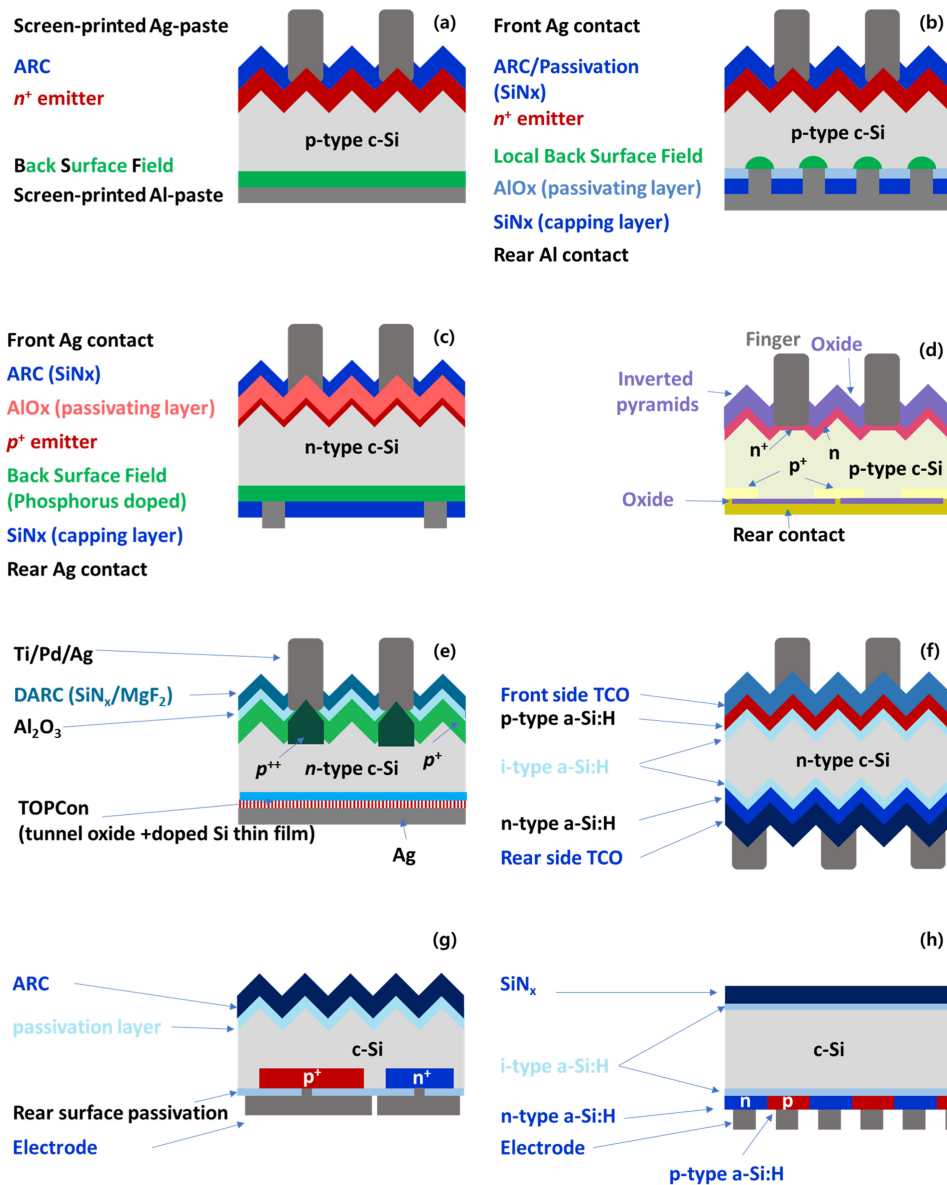


Fig. 1. Comparison of various types of Silicon-based solar cells. (a) standard Solar cells; Al-BSF, (b) PERC; Passivated emitter rear contact, (c) PERT; Passivated emitter rear T, (d) PERL; Passivated emitter rear L, (e) TOPCon; Tunnel oxide passivation contact, (f) SHJ; Silicon heterojunction, (g) IBC; Interdigitated back contact, (h) HBC; heterojunction back contact [2-6, 8-10].

운 지역이나 개발도상국에서도 에너지 접근성을 크게 향상시킨다. 과거에는 태양전지의 효율이 상대적으로 떨어져 대규모 상업적 적용에 제약이 있었지만, 지속적인 태양전지 기술의 발전과 변환효율의 향상의 큰 성과는 더욱 경제적이고 효율적인 에너지 생산을 가능하게 할 것이라는 등의 이유로 설명할 수 있다. 다시 말하면, 태양전지는 무한한 청정 에너지원으로 환경보호와 에너지 자립성 강화를 위한 중요한 해결책으로 기술 발전과 함께 태양광 에너지의 활용 범위가 확대되는 미래를 기대할 수 있다.

그림 1은 실리콘 웨이퍼 기반의 다양한 종류로 제작한 태양전지를 나타낸 것인데 그림 1 (a, b)는 후면에 Al 전극을 스크린 인쇄법으로 하여 전계 혹은 국부적으로 후면에 전계를 형성하고 p-type의 결정질 실리콘 기판을 n-type의 emitter가 접합된 형태의 aluminum alloy back surface field (Al-BSF) 태양전지이다. 그림 1 (b)에서 나타낸 passivated emitter and rear contact cell (PERC) 태양전지 구조가 (c)의 passivated emitter and rear totally diffused cells (PERT) 혹은 (d) passivated emitter and rear locally

diffused cells (PERL) 구조의 태양전지에 비해 확실한 장점은 기존 스크린 인쇄 장비와 호환되므로 제조 업체들이 기존 생산 라인을 업그레이드하는 것이 매우 용이하여 비용 절감효과와 더불어 현재 전 세계 태양광 시장의 90% 이상을 차지하는 제품으로 평균효율은 약 23%라는 효율성이다. 참고로 PERC 기술의 태양전지는 후면에서 반사막을 삽입해 빛을 반사시켜 발전효율을 높인 제품으로 평균 효율은 약 23%이다. 현재 태양전지 기술 중 가장 주목받고 있는 것은 그림 (e)와 같은 tunnel oxide passivated contact (TOPCon) 태양전지인데, 금속막과 실리콘 표면 사이에 실리콘 박막을 활용한 얇은 산화물 계층을 삽입하는 기술로 기존보다 발전효율이 1% 높고 실리콘 전자와 정공이 재결합해 전류가 손실되는 것을 방지해 광전 효율을 향상시키는 특징을 가지며 최근에 26.4%의 높은 효율을 달성한 것으로 확인되었다 [2-6].

하지만 이러한 공정은 주로 800~900°C 이상의 고온에서 제작하기에 공정을 진행하면 추가적인 비용 발생과 thermal budget 문제가 잔존할 수 있다 [7]. 여기서, thermal budget은 열 소모 비용이란 뜻으로 웨이퍼의 온도를 가공 온도까지 상승시키는데 걸리는 시간과 고온에서 가공된 웨이퍼의 온도를 상온으로 하강하는데 걸리는 시간을 의미한다. 이러한 열 소모 비용을 최소화하면서 태양전지의 효율은 25% 이상으로 달성할 수 있는 태양전지로 그림 1 (f-h)와 같이 이종접합 (heterojunction) 구조이다 [8-10]. 실리콘 이종접합 태양전지는 주로 200 μm 이하의 얇은 단결정 실리콘 웨이퍼와 비정질 실리콘 박막과 접합된 형태로 마치 샌드위치와 같은 구조다. 단결정 실리콘은 높은 순도와 결정구조를 가지며, 비정질 실리콘은 생산 비용을 낮추는 장점을 가지고 있어 두 소재를 이용하여 이종 접합을 형성하면 전하를 효율적으로 수집하고 에너지 변환 효율을 높일 수 있다.

실리콘 이종접합 태양전지의 시초는 Sanyo (현 Panasonic)에서 1990년부터 개발을 선언하여 그 동안 약 25%까지 효율을 개선하였으며, 현재는 중국 Suzhou Maxwell Technologies Co. Ltd에서 25.26%로 높은 효율을 달성하였고 Kaneka 그룹은 26.63%를 초과하는 효율을 달성하였다 [10-12]. 이들이 제시한 구조는 마치 손가락이 서로 깎지 낀 형태의 interdigitated back contact (IBC)로 이뤄졌는데 좀 더 자세히 설명하면 빛이 입사되는 전면은 피라미드 구조와 반사방지막 (Anti reflection film, ARF) 과 passivation 층으로 구성되어 있다. 후면부에는 도핑층의 p-와 n-층이 깎지 낀 손가락처럼 국부적으로 형성되었으며, 그 위에 금속전극이 위치하게 되어 있다. 이들 태양전지의

장점은 고효율, 장기적인 안정성, 다양한 조건에서의 우수한 성능 등이 있는데 이를 통해 태양광 발전의 경제성과 지속 가능성을 향상시키는데 기여한다 [13]. 하지만 고온 프로세스와 다단계 공정의 필요성으로 인해 생산 비용이 상대적으로 높다는 단점이 있다. 또한 실리콘은 가시광선 영역에서의 작동은 하지만 그 외 파장 (자외선 및 적외선)에서 빛을 흡수하지 못하는 한계, 태양전지가 고온 환경에서 작동할 경우 전력 변환 효율이 감소하고 곡면 및 유연한 기기에서의 적용 어려움, 태양전지를 구성하는 일부 소재는 희소성으로 인해 값이 비싸기 때문에 대량 생산과 경제적인 측면에서 도전에 직면할 수 있다.

반데르발스 소재는 물질의 층과 층 사이 결합력이 약한 반데르발스 결합으로 이루어진 것으로 단일 원자층으로 쉽게 분리되고 평면 형태로 만들 수 있어 이것을 2차원 물질이라고도 부른다. 이렇게 분리된 층 간의 상호작용은 장기적인 안정성을 제공하며 태양전지의 성능 저하나 노화 현상을 줄여준다. 유연성과 가벼움, 넓은 스펙트럼 흡수는 보다 많은 에너지를 변환하여 전력 생산량을 높일 수 있다. 반데르발스 소재를 활용한 다층 구조 태양전지는 서로 다른 파장 범위의 태양광을 효율적으로 흡수할 수 있고 이를 통해 단일 층 구조보다 더 높은 전력 변환 효율을 달성할 수 있다. 이번 리뷰 논문에서는 반데르발스 소재의 특성과 태양전지에 이용되는 그래핀, 전이금속칼코겐화물, 흑린 등의 다양한 반데르발스 소재에 대해 설명하고 태양전지에 관한 최신 연구동향과 함께 태양전지의 효율과 성능을 개선하는 방법에 대해 알아보려고 한다. 아울러 반데르발스 소재를 활용한 태양전지의 안정성, 확장성과 미래 연구 방향성에 대해 논의하고자 한다.

2. VAN-DER WAALS 재료의 기본 특성

반데르발스 소재는 원자나 분자 사이에 사이의 약한 반데르발스 상호작용에 의해 결합된 2차원 물질을 말한다 [14]. 이러한 2D 물질은 한 방향으로서는 매우 얇지만 다른 방향으로서는 넓게 퍼져 있는데 그래핀, 전이금속칼코겐화물, 흑린 등이 대표적인 예로 들 수 있다 [15-17]. 우선 그래핀은 탄소 원자들이 2차원의 벌집 구조로 배열된 물질로 높은 전도도, 양의 홀 및 전자 모두를 이동시킬 수 있어, p-type, n-type 반도체로 동작할 수 있고, 그래핀의 표면은 다양한 화학물질과 반응할 수 있어 센서나 촉매로의 응용이 가능하다. 높은 인장 강도를 가지는데 이는 기계적으로 매우 견고하다는 것을 의미한다. 아울러 탄성능력이 좋아 소재가 변형되었을 때 복원되는 능력이 뛰어나다. 이러한

Table 1. Summary of conversion efficiency for van-der Waals materials-based photovoltaics.

Ref	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF (%)	E_{ff} (%)	Remark (Device structures)
[21]	620	6.05	34.8	1.29	Au/MoSe ₂ /p-GaN
[22]	600	4.78	54	1.55	MoO _x /WS ₂ /Au
[23]	597	5.37	55	1.8	Au/220 nm MoS ₂
[24]	280	20.9	47	2.8	120 nm MoS ₂
[25]	520	15.6	37	3.03	Au/SpiroOmetad/MoS ₂ /InSe/TiO ₂
[26]	360			3.4	0.6 nm Gr/9 nm WSe ₂ /3 nm MoS ₂ /Au
[27]	350	26	46	4.1	GQDs/InP/MoS ₂
[28]				4.6	n-WS ₂ /p-BP
[29]	480	0.69*	45	5	Gr/1.7 nm WO _x /49 nm WSe ₂ /19 nm MoS ₂
[30]	476	17.3	61.7	5.1	10 nm MoO _x /0.34 nm Gr/~200 nm WSe ₂ /135 nm Au
[31]	470	19.61	59	5.44	0.3 nm Gr/6 nm WO _x /242 nm WSe ₂ /2 nm Pt/50 nm Au

*The unit of this value was μA

특성으로 인해 에너지 저장, 센서, 전자기기 및 복합재료와 같은 다양한 분야에서 활용되고 있다. 흑린은 인 (P, Phosphorus) 원자로만 이루어진 2D 소재로 그래핀과 유사한 구조이지만 전기적 특성이 다른 점이 있는데 반도체와 같이 밴드갭을 갖는 소재로 트랜지스터에 유용하게 사용할 수 있다. 흑린 또한 높은 전자 및 홀의 이동도를 가지고 있어 전자의 높은 전송 속도를 보이며 층상 구조의 흑린은 각 층의 약한 반데르발스 힘으로 결합되어 있어 쉽게 단일 층으로 분리될 수 있으나 구조적으로 특정 방향에 따라 다른 특성을 보이기 때문에 다양하게 응용할 수 있는 소재이다 [15, 18]. 그렇지만 공기나 빛에 민감하게 반응하여 특성이 변할 수 있어 보관 및 처리에 주의가 요구된다. 그래핀과 마찬가지로 높은 강도와 유연성 등의 기계적 특성을 가지고 있다.

전이금속칼코겐화물(Transition Metal Dichalcogenides, TMDCs)은 2차원 소재로, 그래핀과 함께 많은 관심을 받고 있는 연구 분야로 반도체 특성을 보이고 있는데 이는 층 수 제어에 따라 전자구조와 함께 band gap 특성이 바뀔 수 있다. TMDCs은 쉽게 단일 층으로 분리될 수 있는데 반데르발스 힘으로 결합되어 있기 때문이다. 이 또한 구조적으로 보게 되면 각 층의 중앙에는 전이금속 원자와 양쪽의 칼코젠 원자로 구성되어 있는데 대표적으로 이황화 몰리브덴 (Molybdenum disulfide MoS₂) 이 그에 해당된다 [16, 19]. 이들은 화학적으로 안정하며 공기나 물에 잘 반응하지 않아서 센서나 촉매로의 응용이 가능한 것이다. 이들 소재는 유연성 및 기계적인 스트레스에는 잘 견디는 특성을 보이지만 기계적 강도가 비교적 낮은 단점이 있다. 반데르발스 소재의 공통적인 장점을 살펴보면 높은 전도도, 얇고 경량화의 특징을 보임에 따라 경량화 기기

제작에 유용하다. 전이금속칼코겐화물 소재는 화학적 조성에 따라 특성을 조절할 수 있으나 약한 내구성으로 인해 기계적 특성이 약할 수 있으며 박리 정도를 제어하는 것은 어렵다 [17, 20].

3. VAN DER WAALS 재료를 이용한 태양광 발전에 관한 최신 연구 사례

이번 절에서 반데르발스 소재인 그래핀 및 TMDCs를 이용한 태양전지 적용 사례에 대한 최신 연구 동향 및 태양전지의 효율과 성능을 개선하는 방법에 대해 알아보고 이를 바탕으로 하는 안정성과 확장성 등의 과제를 해결하기 위한 연구 사례와 함께 미래 연구 방향성에 대해 논의하고자 한다. 아래 표1은 반데르발스 소재를 기반으로 하여 태양전지 성능에 대한 결과를 요약한 것이다. 2020년 이후부터 반데르발스 소재의 태양전지 효율이 5% 이상이 넘어서기 시작하였다 [21-31]. 여기서 주목할 만한 공통적인 내용은 그래핀 (Gr, Graphene)과 WSe₂ 소재가 공통적으로 사용되었는데 좀 더 자세히는 표 1, 그림 2-4의 내용을 통해 확인하고자 한다.

그림 2는 WSe₂-MoS₂ p-n 접합 태양전지의 효율을 향상시키기 위해 원자 두께의 텅스텐 산화막 (Tungsten oxide, WO_x) 층은 텅스텐 디셀레나이드 (Tungsten diselenide, WSe₂)의 층별 산화법으로 홀 추출을 촉진하는 전하 전송 층으로 사용하였으며 이를 바탕으로 WSe₂-MoS₂ p-n 접합 태양전지의 광응답성을 크게 향상했음을 S. Yang et al. 그룹에서 보고하였다 [29]. WSe₂ 소재 위에 WO_x 원자 수준의 두께로 사용하여 변환 효율 0.7%에서 5.0%로 증가했는데 낮은 쇼트키 장벽 (Schottky barrier)과 유리한

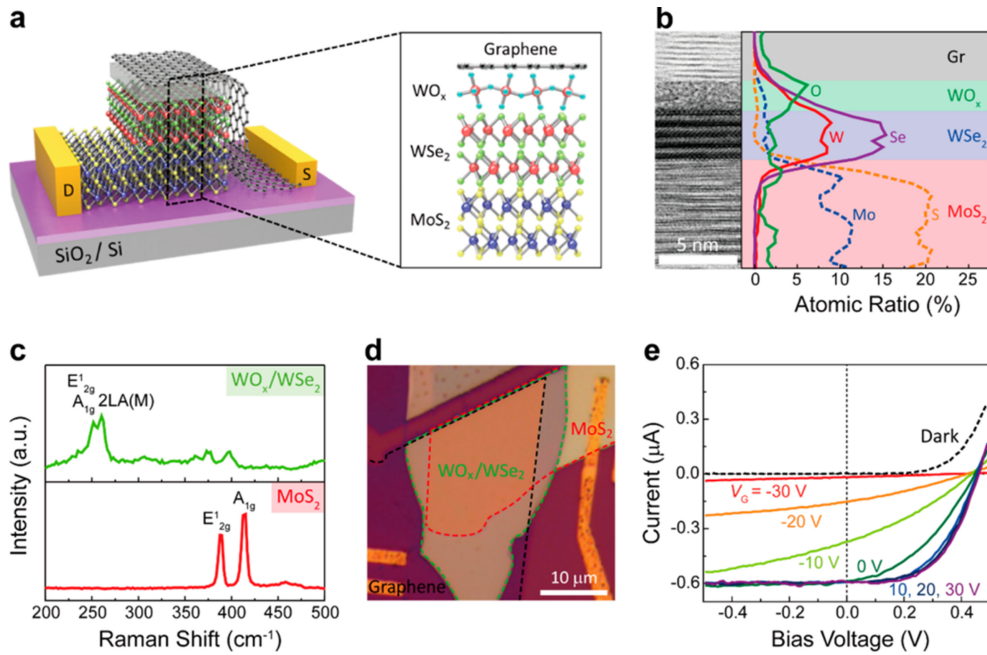


Fig. 2. Interface contact engineering based on WSe_2 - MoS_2 p-n photovoltaic heterojunction [29]. (a) Device structure of graphene/ WO_x / WSe_2 / MoS_2 on SiO_2/Si . (b) Cross-section HR-TEM image and EDS line profiles such as tungsten (W), selenium (Se), oxygen (O), molybdenum (Mo), and sulfur (S) across WO_x / WSe_2 / MoS_2 heterointerfaces. (c) Raman spectra of MoS_2 (red line in the bottom panel) and WO_x / WSe_2 (green line in the top panel). (d) Optical image of the active area for photovoltaic heterojunction device, (e) I-V curves in the dark and under illumination at different gate voltage with a focused 532 nm laser.

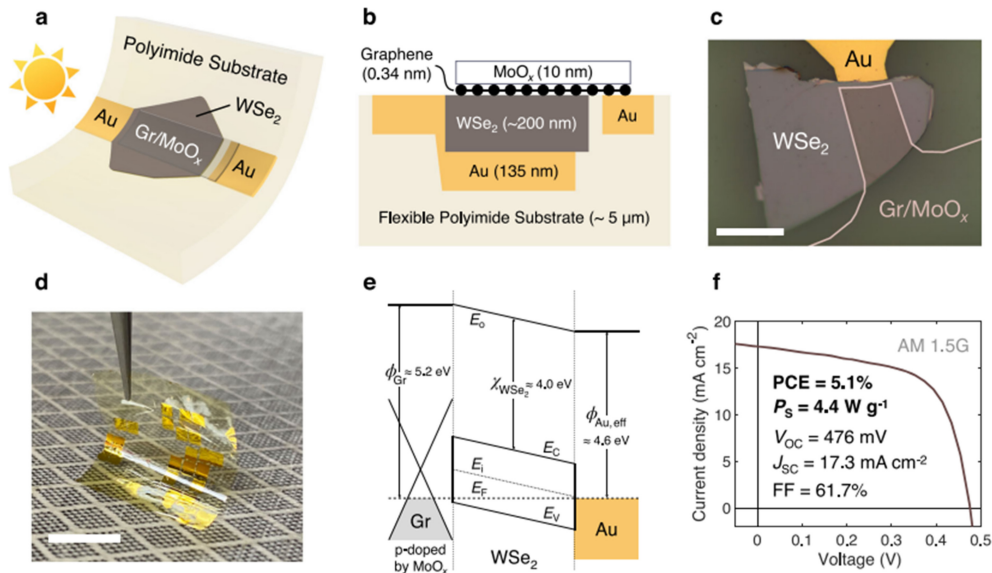


Fig. 3 (a) Device schematic and (b) cross-section of flexible WSe_2 solar cells. (c) Top-view image of the device, scale bar of 50 μm . (d) Photograph of WSe_2 solar cells on a flexible substrate (PI, polyimide), scale bar of 1 cm, (e) Energy band diagram of the device (Gr/ WSe_2 /Au), (f) I-V characteristic curve under AM 1.5G illumination [30].

인터페이스 밴드 정렬 (band alignment)의 형성에 의한 것으로 분석하였다. K. N. Nazif et al. 그룹에서는 유연 기판에 전이금속 이황화물 태양전지에 대해 그림 3과 같이

나타내었는데 투명한 그래핀을 사용하였으며 폴리브데늄 산화물 (Molybdenum, MoO_x) capping을 통해 도핑, 패시베이션 및 반사 방지막으로 활용하였다 [30]. 이를 통해

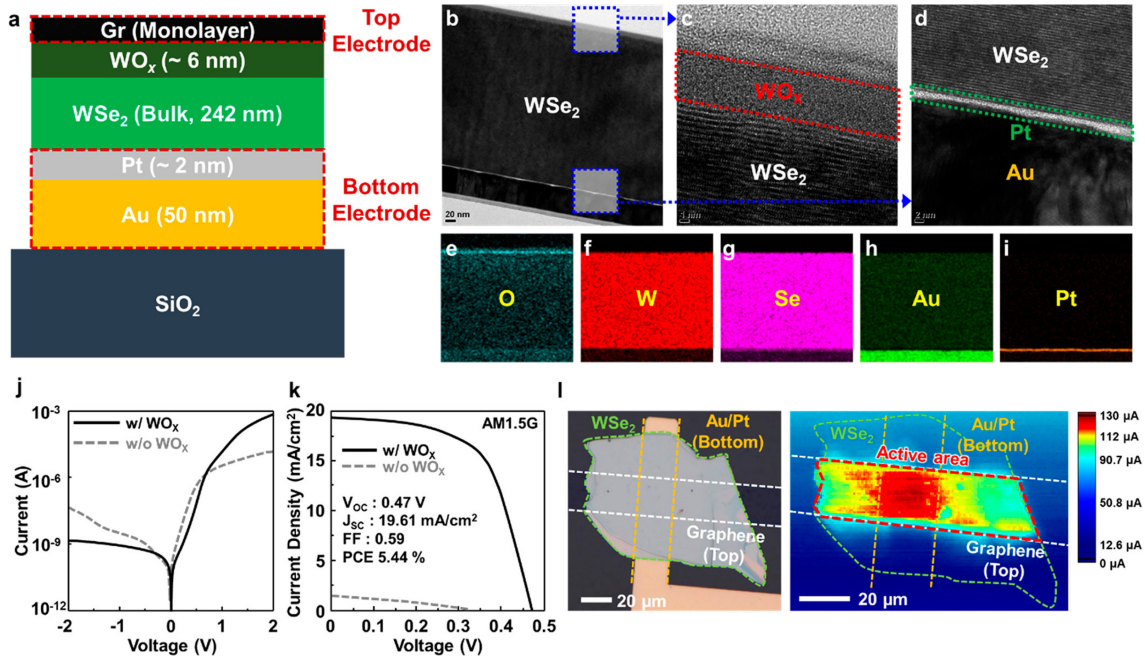


Fig. 4 (a) Schematic structure of the photovoltaic (PV) device (b) Cross-section TEM images of PV device and higher magnification images of (c) the top contact region and (d) bottom contact region. EDS images for (e) O, (f) W, (g) Se, (h) Au, and (i) Pt. (j) Dark and (k) light I-V characteristics of the PV devices with WO_x and without WO_x . (l) Top-view optical image of the PV device and corresponding spatial photocurrent map with the active area denoted with the red dashed line [31].

유연한 WSe_2 태양전지의 효율을 5.1%로 높였으며 특정 전력은 4.4 W/g로 기존 박막 태양전지 기술과 비슷한 수준까지 도달했으며 이는 Fermi-level pinning 문제를 해결하는 역할을 했다. 앞으로는 고효율을 달성을 위해서 메타표면 기반의 플라즈모닉 기술을 이용해 광포획으로 더욱 향상된 빛 흡수로 전류 향상과 알루미늄 산화막 (Aluminum oxide, AlO_x) 및 타이타늄 산화막 (Titanium oxide, TiO_x)와 같은 극박막 금속 산화물을 이용하거나 낮은 일함수를 가진 금속 소재의 대체 (예를 들어, Au)와 더불어 전하 선택형 접촉 소재를 활용하게 되면 전압 특성 개선이 될 것으로 내다봤다 [30]. K. -H. Kim 그룹은 WSe_2 기반의 태양전지를 통해 5.44%의 높은 변환효율을 달성하였는데 242 nm 두께의 WSe_2 , WO_x 6 nm 두께 및 단일층의 그래핀을 활용하여 제작한 것이다. 이들 또한 WO_x 가 WSe_2 계면에서 Fermi-level pinning에 의한 한계를 극복하는 기술로 강한 내부 전계를 촉진하여 전자를 선택적으로 접촉하는 것으로 보고하였다 [31].

세 그룹이 공통적으로 사용한 WSe_2 와 MoSe_2 는 광학적 밴드갭 약 1.3 eV로 알려져 있는데 앞서 언급한 것과 같이 최대 5.44%의 변환효율을 달성했으나 여전히 변환효율을 개선할 여지가 있음을 알 수 있다. 세 그룹이 공통적으로 470~480 mV의 개방전압 (Open-circuit voltage, V_{OC}),

60%의 충전율 (Fill factor, FF)을 보였는데, 이러한 변환효율 문제를 극복하려면 몰리브덴 디셀렌화물 (Molybdenum diselenide, MoSe_2)를 활용하는 것도 하나의 대안이 될 수 있다. MoSe_2 는 실리콘 소재와 공통적으로 1.1 eV의 광학적 밴드갭으로 유사하지만 두 소재 사이의 차이점이 분명히 존재한다 [32]. 우선은 실리콘의 원자 배열은 다이아몬드 구조로 각 실리콘 원자가 인접한 4개의 실리콘 원자와 공유 결합을 형성하는데 비해 MoSe_2 는 2차원 hexagon 구조로 몰리브덴 (Mo) 원자 사이에 셀레늄 (Se) 원자 두개가 끼어 있는 triple layer 구조이다. 그 외에도 실리콘 두께는 수백 마이크로의 매크로 스케일이지만 MoSe_2 는 몇 개의 원자 층의 두께라는 점이며 두께가 증가함에 따라 밴드 구조는 변화하며 다층 구조에서 간접 밴드갭을 나타내기도 하고 값이 다소 감소할 수 있다. 이러한 특성으로 말미암아 MoSe_2 를 활용하여 반데르발스 기반의 태양전지를 제작한다면 개방전압을 약 600 mV, 충전율 70% 이상으로 향상됨에 따라 변환효율이 8.4%로 크게 향상될 것으로 기대한다 (전류밀도를 약 $20\text{mA}/\text{cm}^2$ 를 얻었다고 가정한 경우임). 아울러, Graphene 사용은 Top electrode 외에도 광투과 손실을 최소화하는 역할로 쓰임을 알 수 있으며 향후에 적응형 Graphene 또한 Top electrode와 함께 외부 환경의 보호층으로써 역할을 기대할 것으로 보고 있다 [33, 34].

4. 결 론

반데르발스 소재는 그 특별한 물리적 및 화학적 특성 때문에 태양전지 분야에서 주목받고 있다. 이러한 소재의 2D 특성, 높은 표면-부피 비율, 조절 가능한 전자적 특성, 그리고 고유한 광학적 특성은 태양전지의 효율과 안정성을 개선하는데 큰 잠재력을 보유하고 있다. 반데르발스 소재의 레이어간 상호작용은 약하므로, 다양한 두께와 조합의 구조를 탐구하는 것이 가능하고, 이로 인해 새로운 밴드갭 및 전자적 특성을 갖는 소재를 설계할 수 있어 태양전지의 효율을 극대화하는 데 기여하리라 예상된다. 또한, 공기와 수분에 상대적으로 안정하며, 전통적인 실리콘 태양전지 소재보다 더 긴 수명을 가질 가능성이 있으며, 지속 가능한 에너지원으로 이 분야의 혁신을 주도할 것이라 본다. 더 높은 효율과 안정성을 제공하며, 향후 태양전지의 비용 효과성과 대규모 상용화를 가속화하는 데 기여할 것으로 예상된다.

가까운 미래에는 다양한 반데르발스 소재를 조합하거나 적층 (Stacking) 기술의 탐구, 소재 안정성과 태양전지 수명 연장을 위한 보호 코팅 및 봉지화 (Encapsulation) 기술 개발, 소재의 동작 원리 및 광학/전기 특성에 대해 고찰하고 탐구하기 위한 기초연구의 강화, 반데르발스 소재와 기존 태양전지소재 간의 계면 최적화 연구가 필요할 것으로 보인다. 아직 연구가 초기 단계에 불과하지만 잠재력과 무한한 가능성은 충분히 열려 있으며, 연구의 지속성과 혁신을 통해 소재의 활용은 지속 가능한 에너지 솔루션의 중심으로 성장할 것으로 보고 있다.

감사의 글

This research was supported by National University Development Project at Jeonbuk National University in 2021.

REFERENCES

1. S. H. Kim, H. S. Park, D. P. Pham, Y. K. Kim, S. H. Kim, E.-C. Cho, Y. H. Cho, and J. Yi, *Optik* **235**, 166580 (2021).
2. Q. Tang, H. Yao, B. Xu, J. Ge, Y. Xu, and K. Gao, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **237**, 111576 (2022).
3. H.B. Tang, S. Ma, Y. Lv, Z.P. Li, W.Z. Shen, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **216**, 110712 (2020).
4. A. Ingenito, C. Allebé, S. Libraro, C. Ballif, B. P. Saloman, S. Nicolay, and J. J. D. Leon, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **249**, 112043 (2023).
5. A. Cavalli, J. Buencuerpo, M. Steger, E. E. Perl, M. A. Steiner, and J. F. Geisz, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **231**, 111294 (2021).
6. Q. Wang, H. Peng, S. Gu, K. Guo, W. Wu, B. Li, L. Li, N. Yuan, and J. Ding, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **259**, 112458 (2023).
7. T. Tachibana, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, T. Shimoda, I. Masada, and E. Nishijima, *AIP Advances* **7**, 045111 (2017).
8. B. Santos, Longi claims world's highest efficiency for p-type, indium-free HJT solar cells, <https://www.pv-magazine.com/2022/12/22/longi-claims-worlds-highest-efficiency-for-p-type-indium-free-hjt-solar-cells/> (2022).
9. F. Haase, C. Hollemann, S. Schäfer, A. Merkle, M. Rienäcker, J. Krügener, R. Brendel, and R. Peibst, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **186**, 184 (2018).
10. K. Yoshikawa, W. Yoshida, T. Irie, H. Kawasaki, K. Konishi, H. Ishibashi, T. Asatani, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, and K. Yamamoto, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **173**, 37 (2017).
11. K. Wakisaka, M. Taguchi, T. Sawada, M. Tanaka, T. Matsuyama, T. Matsuoka, S. Tsuda, S. Nakano, Y. Kishi, Y. Kuwano, *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, p. 887, Las Vegas, Nevada, USA (1991).
12. G. Dong, J. Sang, C.-W. Peng, F. Liu, Y. Zhou, and C. Yu, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **30**, 1136 (2022).
13. Z. Song, C. L. McElvany, A. D. Phillips, I. Celik, P. W. Krantz, S. C. Watthage, G. K. Liyanage, D. Apul, and M. J. Heben, *Energy Environ. Sci.* **10**, 1297 (2017).
14. M. Velický, and P. S. Toth, *Appl. Mater. Today* **8**, 68 (2017).
15. K. S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho, and A. H. Castro Neto, *Science* **353**, aac9439 (2016).
16. J.-Y. Kim, X. Ju, and K.-W. Ang, and D. Chi, *ACS Nano* **17**, 1831 (2023).
17. S. Huang, G. Zhang, F. Fan, C. Song, F. Wang, Q. Xing, C. Wang, H. Wu, and H. Yan, *Nat. Commun.* **10**, 2447 (2019).
18. M. Van Druenen, *Adv. Mater. Interfaces* **7**, 2001102 (2020).
19. X. Li, and H. Zhu, *J. Materiomics* **1**, 33 (2015).
20. S. Alam, M. A. Chowdhury, A. Shahid, R. Alam, and A. Rahim, *FlatChem* **30**, 100305 (2021).
21. Z. Chen, H. Liu, X. Chen, G. Chu, S. Chu, and H. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 20267 (2016).
22. K. N. Nazif, A. Kumar, J. Hong, N. Lee, R. Islam, C. J. McClellan, O. Karni, J. Van de Groep, T. F. Heinz, E. Pop, M. L. Brongersma, and K. C. Saraswat, *Nano Lett.* **21**, 3443

- (2021).
23. M. Shanmugam, C. A. Durcan and B. Yu, *Nanoscale* **4**, 7399 (2012).
24. S. Wi, H. Kim, M. Chen, H. Nam, L. J. Guo, E. Meyhofer, and X. Liang, *ACS Nano* **8**(5), 5270 (2014).
25. R. K. Ulaganathan, K. Yadav, R. Sankar, F. C. Chou, and Y.-T. Chen, *Adv. Mater. Interfaces* **6**, 1801336 (2019).
26. J. Wong, D. Jariwala, G. Tagliabue, K. Tat, A. R. Davoyan, M. C. Sherrott, and H. A. Atwater, *ACS Nano* **11**, 7230 (2017).
27. P. Wang, S. Lin, G. Ding, X. Li, Z. Wu, S. Zhang, Z. Xu, S. Xu, Y. Lu, W. Xu, and Z. Zheng, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 163901 (2016).
28. D.-H. Kwak, H.-S. Ra, M.-H. Jeong, A.-Y. Lee, and J.-S. Lee, *Adv. Mater. Interfaces* **5**, 1800671 (2018).
29. S. Yang, J. Chan, J. C. Kim, D. Lee, W. Huh, Y. Kim, S. W. Lee, H.-G. Park, H. Y. Jeong, S. Hong, G.-H. Lee, and C.-H. Lee, *Nano Lett.* **20**, 2443 (2020).
30. K. N. Nazif, A. Daus, J. Hong, N. Lee, S. Vaziri, A. Kumar, F. Nitta, M. E. Chen, S. Kananian, R. Islam, K.-H. Kim, J.-H. Park, Ada S. Y. Poon, M. L. Brongersma, E. Pop, and K. C. Saraswat, *Nat. Commun.* **12**, 7034 (2021).
31. K.-H. Kim, M. Andreev, S. Choi, J. Shim, H. Ahn, J. Lynch, T. Lee, J. Lee, K. N. Nazif, A. Kumar, P. Kumar, H. Choo, D. Jariwala, K. C. Saraswat, and J.-H. Park, *ACS Nano* **16**, 8827 (2022).
32. C. Li, Q. Cao, F. Wang, Y. Xia, Y. Li, J.-J. Delaunay, and H. Zhu, *Chem Soc. Rev.* **47**, 4981 (2018).
33. H. -I. Moon, S. G. Jo, Y. Shin, Y. Kang, and J. W. Lee, *Korean J. Met. Mater.* **60**, 564 (2022).
34. S. G. Jo, H. -I. Moon, Y. W. Kim, H. S. Dow, and J. W. Lee, *Korean J. Met. Mater.* **60**, 570 (2022).