

Electrical response of tungsten diselenide to the adsorption of trinitrotoluene molecules

Chan Hwi Kim, Suyeon Cho*, Hyeongtae Kim**, Won Joo Lee and Jun Hong Park*,**,†

Aerospace and Defence Reliability Center, Korea Testing Laboratory, Jinju 52852, Korea

**School of Materials Science and Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea*

***Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea*

(Received October 23, 2023)

(Revised November 6, 2023)

(Accepted November 10, 2023)

Abstract As demanding the detection of explosive molecules, it is required to develop rapidly and precisely responsive sensors with ultra-high sensitivity. Since two-dimensional semiconductors have an atomically thin body nature where mobile carriers accumulate, the abrupt modulation carrier in the thin body channel can be expected. To investigate the effectiveness of WSe₂ semiconductor materials as a detection material for TNT (Trinitrotoluene) explosives, WSe₂ was synthesized using thermal chemical vapor deposition, and afterward, WSe₂ FETs (Field Effect Transistors) were fabricated using standard photo-lithograph processes. Raman Spectrum and FT-IR (Fourier-transform infrared) spectroscopy reveal that the adsorption of TNT molecules induces the structural transition of WSe₂ crystalline. The electrical properties before and after adsorption of TNT molecules on the WSe₂ surface were compared; as -50 V was applied as the back gate bias, 0.02 μA was recorded in the bare state, and the drain current increased to 0.41 μA with a dropping 0.6% (w/v) TNT while maintaining the p-type behavior. Afterward, the electrical characteristics were additionally evaluated by comparing the carrier mobility, hysteresis, and on/off ratio. Consequently, the present report provides the milestone for developing ultra-sensitive sensors with rapid response and high precision.

Key words Tungsten diselenide, Trinitrotoluene, Adsorption, Explosives detection, Electrical response

폭발물 감지 시스템 개발을 위한 TNT 분자 흡착에 대한 WSe₂ 소자의 전기적 반응 특성 평가

김찬휘, 조수연*, 김형태**, 이원주, 박준홍*,**,†

한국산업기술시험원 항공국방신뢰성센터, 진주, 52852

*경상국립대학교 나노신소재공학부, 진주, 52828

**경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 진주, 52828

(2023년 10월 23일 접수)

(2023년 11월 6일 심사완료)

(2023년 11월 10일 게재확정)

요약 분자 단위의 폭발물질을 탐지하기 위하여, 고감도 응답성 센서의 개발이 요구되고 있다. 2차원 반도체는 얇은 적층형 구조를 가져 전하 캐리어가 축적될 수 있어, 전하 캐리어의 급격한 신호 변조 특성을 기대할 수 있다. WSe₂ 반도체 소재의 TNT(Trinitrotoluene) 폭발물질에 대한 탐지 효용성을 연구하기 위해, CVD(Chemical Vapor Deposition) 공정을 이용해 WSe₂ 박막을 합성하여 FET(Field Effect Transistors)을 제작하였다. 라만 분석과 FT-IR(Fourier-transform infrared) 분광 결과는 TNT 분자의 흡착과 WSe₂ 결정질의 구조적 전이 분석 정보를 나타내었다. 또한, WSe₂ 표면의 TNT 분자 흡착 전후의 전기적 특성을 비교하였다. TNT 도포 전, WSe₂ FET에 백 게이트 바이어스로 -50 V를 인가함에 따라 0.02 μA의 최대 전류 값이 관측되었고, 0.6%(w/v) TNT 용액을 도포하였을 때 Drain 전류는 p-type 거동을 보이면서 0.41 μA의 최대 전류 값을 기록하였다. 이후 On/Off Ratio 및 캐리어 이동도, 히스테리시스를 추가적으로 평가하였다. 본 연구에서는 WSe₂의 TNT 분자에 대한 고감도와 신속한 응답성을 통해 폭발물질 탐지 센서 소재로서의 가능성을 제시하였다.

†Corresponding author

E-mail: yakte@gnu.ac.kr

1. 서 론

세계 질서가 다극화되면서, 전 국가적으로 테러 및 사회시스템을 위협하는 안보 이슈에 대응하기 위한 수요가 증대되고 있으며, 특히 현대 반도체 기술 기반의 극미량 검출을 위한 초고감도 센서 기술이 개발이 진행되고 있다[1]. 특히, 폭발물에 의한 인명 및 재산 피해를 방지하기 위해 보안 시스템의 구축 및 고도화가 전세계적으로 진행되고 있으며, 2001년 미국의 911 테러 이후, 전 세계는 폭발물을 탐지할 수 있는 기술에 대한 관심도가 더욱 증대되었다. 이러한 추세에 맞추어, 미국과 유럽이나 중국 등 주요 국가에서는 폭발물 탐지와 관련된 법령 및 제도를 구체화하였고, 폭발물 탐지 기술을 적극적으로 연구하기 시작하였다. 미국의 경우, 교통보안국 소속기관인 교통보안청을 설치하였고, 이 교통보안청은 X-ray Scanning을 기반으로 한 폭발물탐지장비(Explosive Detection System, EDS)과 같이 공항 내 항공보안장비의 개발과 시험 및 인증에 대해 매우 큰 예산을 투자하고 전문적인 인력을 보강하고 있다. 국내 또한, 폭발물 탐지 장비와 같은 보안장비를 연구하고, 관련 인프라를 구축하는 등 폭발물로 인한 피해를 막기 위해 정부와 민간에서 끊임없이 노력하고 있다[2]. 하지만, 기상 상태의 극미량의 폭발물을 탐지 가능한 시스템 구축을 위해서는 검출 시스템의 열적 안정적 구동 문제와 별도의 검출 설비를 요구하는 등의 한계점이 있으며 반도체 소재의 전기적 특성을 이용하여 다른 상의 폭발물질을 탐지할 수 있는 특정 반도체 소재의 전기적 유효성의 탐구가 요구되고 있다. 최근에는 폭발물을 탐지할 수 있는 광학적 분광법 뿐만 아니라, 표면에서의 분자 거동에 따른 반도체 소재의 전기적 변조 특성을 이용하여 TNT(Trinitrotoluene)와 같은 폭발물질을 탐지할 수 있는 반도체 연구가 계속되고 있다[3].

TNT는 나이트로계 폭발물 중 대표적인 폭약 물질로, IUPAC 명명법으로 2,4,6-Trinitrotoluene이다. TNT는 군용 폭약 중 하나이며 나이트로화 반응을 기반으로 합성할 수 있다[4]. 최근에는 TNT를 안전하고 신속하게 탐지할 수 있는 나노 소재에 대한 연구는 계속되고 있다. 2021년 Mishra 연구 그룹에서는 TNT의 TiO_2 (110) 표면 상 흡착 및 기능적 변형에 대한 연구를 통해, 전자구조 계산 및 MD 시뮬레이션을 사용해 TiO_2 (110) 표면에서 TNT의 흡착과 촉매 변환 특성을 연구하였으며, TNT의 흡착은 공극 농도에 따라 달라지며 공극이 있는 경우 나이트로 그룹은 TiO_2 결정 구조에서 산소정공에 결합을 형성하였다[5]. 2018년 Wang 연구 그룹은 황산 용액에서 TNT를 검출할 수 있는 SiNWs-FET 기반 센서 기술을 연구하였다. 이는 TNT의 제조 합성 과정이 산성 용액에서 진행되기 때문에 생산 단계의 TNT를 정

확하게 검출하는 것이 매우 어렵기에 Wang 그룹은 황산 용액에서 작동할 수 있는 TNT 센서의 유용성을 확인하기 위해 빠른 응답시간에 황산 내에서 TNT를 검출할 수 있는 SiNWs-FET 기반의 센서를 연구하였다[6]. 또한, 0.7 nm 두께를 갖는 박막상태에서 분자 흡착에 따라 전자 구조의 급격한 변화 특성을 갖는 2차원 소재인 전이 금속 칼코겐 화합물(Transition Metal Dichalcogenides, TMDCs)을 활용하여 고감도의 센서 특성을 기대할 수 있다는 연구가 있다[7].

TMDCs는 폭발물질의 흡착 특성에 대한 전기적 제어를 할 수 있는 대표적인 소재로, 주기율표의 4족에서 7족 또는 9족에서 10족에 존재하는 전이금속 원소(M)와 16족의 칼코겐 원소(X)가 1:2의 비율로 결합한 화합물이다. 이는 X-M-X 층상형 구조를 가지는 매우 흥미로운 2D 타입의 소재이다. 가장 일반적으로 적층하는 형태는 1T, 2H, 3R 구조이며, 각각 삼각, 육각 및 능면체를 나타내며 구조의 숫자는 원자 단위 수를 나타낸다. 특히, 구조적 특성으로 금속성과 절연성 그리고 반도체 성질을 모두 갖고 있으며, 넓은 표면적과 우수한 전기 전도도, 빠른 전자 이동도를 포함하고 있다[8,9]. TMDCs의 반도체 성질은 밴드 갭(Band Gap)의 조정 가능성과 관련성이 크며, 층 수에 따라 밴드 갭 에너지의 차이가 발생한다는 연구가 있다[10]. TMDCs의 개발 및 응용 분야는 매우 다양하다. 그 중 특정 대상 분자에 선택적 반응하는 특성을 활용한 전계 효과 트랜지스터(FET)로 응용하여 화학 센서, 바이오 센서 등에 사용할 수 있다[11].

TMDCs 소재 중 텅스텐 다이셀레나이드(WSe_2)는 6족·6주기 전이금속 원소인 텅스텐(W)과 16족·4주기 칼코겐 원소인 셀레늄(Se)이 1:2의 비율로 공유 결합한 화합물 반도체이다[12]. 이는 높은 전류 On/Off ratio($\sim 10^8$)와 낮은 유효 전하 질량으로 인한 전자 이동도($>100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)를 갖고 있어, 반도체 뿐만 아니라, 센서 분야에서도 그 연구가 활발히 진행되고 있다[13].

이와 같은 배경을 기반으로, 본 연구는 CVD를 이용해 합성된 WSe_2 를 FET로 제작하여, TNT에 대한 센서 소재로서의 유효성을 확인하고자 하였으며, TNT를 가스가 아닌 용액화하여 비교적 열적으로 안전하고 빠르게 편리하게 탐지할 수 있는 기술 연구를 목적으로 하였다.

2. 실험 방법

핵심 소재인 WSe_2 은 Thermal Chemical Vapor Deposition (CVD)을 활용하여 600°C 이상의 고온에서 산화 실리콘 웨이퍼를 기판에 증착하였다[14]. CVD를 통해 합성된 WSe_2 박막은 PMMA stamp를 활용, 열 산화 공정을 통해 형성된 300 nm 두께의 SiO_2 기판에 전사하였으며, 그

뒤, 반도체 공정을 활용하여, FET를 제작하였다. FET는 WSe_2 표면에 채널 사이즈 $50\ \mu\text{m}$ 인 금속 그리드 마스크를 고정하고 E-beam을 조사하여 증발된 Ni 전극을 Source와 Drain 전극으로 증착하였다. TNT 분자의 흡착 실험을 위해, 순도 99.0% 이상의 에탄올 용액에 고체 TNT를 농도별(0.2%(w/v), 0.4%(w/v), 0.6%(w/v), 0.8%(w/v), 1.0%(w/v))로 녹여 제조하였다. WSe_2 FET의 TNT 분자의 흡착에 대한 전기적 특성을 평가하기 위하여, 약 0.1 ml의 농도별 TNT 용액을 표면에 떨어뜨리고 에탄올이 모두 증발할 수 있도록 25°C 에서 30분 간 건조시켰다. 도포된 WSe_2 FET의 표면 상 TNT 분자 흡착에 대한 화학적 분석 및 전기적 특성 평가를 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 활용된 WSe_2 은 Fig. 1(a)과 같이 2H 상에서 W 원자 층을 위 아래로 각각 Se 원자층이 샌드위치 형태로 화학결합으로 구성되어 있으며, 분자 분위기에 노출 시 hexagonal 형태로 배열된 Se 층 표면에 흡착되어, WSe_2 층 내 전기적 구조에 전하의 축적 및 분자의 dipole에 의한 산란 등의 변조가 가능하다. 따라서

Fig. 1(b)와 같이 다층 WSe_2 반도체 채널 소재를 CVD로 합성하여, 산화 실리콘 기판에 증착을 하였으며, 샘플을 반도체 소자 제작을 위해, 별도로 클리닝 된 기판에 전사 후, 금속 전극을 형성하여, 실험을 수행하였다.

CVD를 이용하여 합성 및 증착된 Bare 상태의 WSe_2 와 농도별 TNT 용액이 도포된 WSe_2 의 구조적 특성 변화를 관측하고자, 라만 분석과 FT-IR 분석을 수행하였다. 라만 분석 시 $532\ \text{nm}$, $5.2\ \text{mW}$ 의 레이저를 사용하였다. Figure 2(a)는 WSe_2 FET의 표면의 광학 현미경 촬영 사진이며, 'P' 지점에서 라만 분석을 수행하였다. Bare 상태의 WSe_2 의 라만 스펙트럼은 E_{2g}, A_{1g} 그리고 B_{2g} 모드에서 피크가 확인되었다. Figure 2(b)는 WSe_2 의 Bare 상태와 농도별 TNT 용액을 도포한 후 $100\ \text{cm}^{-1}$ 에서 $1800\ \text{cm}^{-1}$ 까지의 범위의 라만 스펙트럼을 나타낸 것이다. 다층형 WSe_2 는 $258\ \text{cm}^{-1}$ 에서 intensity가 증가하며, $306.6\ \text{cm}^{-1}$ 에서 $307.7\ \text{cm}^{-1}$ 까지의 범위에서 intensity가 증가함을 보였다. Figure 2(c)는 $1300\ \text{cm}^{-1}$ 에서 $1400\ \text{cm}^{-1}$ 까지의 범위에서 TNT 용액의 농도가 증가할수록 $1360\ \text{cm}^{-1}$ 에서 TNT의 메인 피크가 확인되었다. 따라서 라만 분석 결과에서는 TNT 분자 흡착 시 WSe_2 결정구조에 큰 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

Bare 상태의 WSe_2 의 표면에 TNT 입자의 흡착을 유

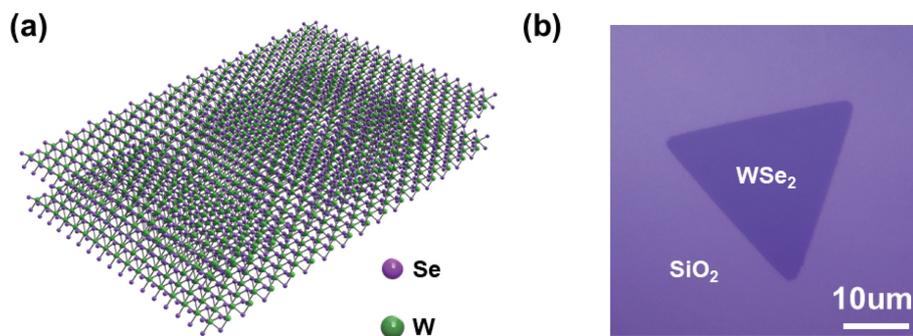


Fig. 1. (a) Schematic diagram of 2H WSe_2 . (b) Optical image of CVD grown WSe_2 on SiO_2 substrate.

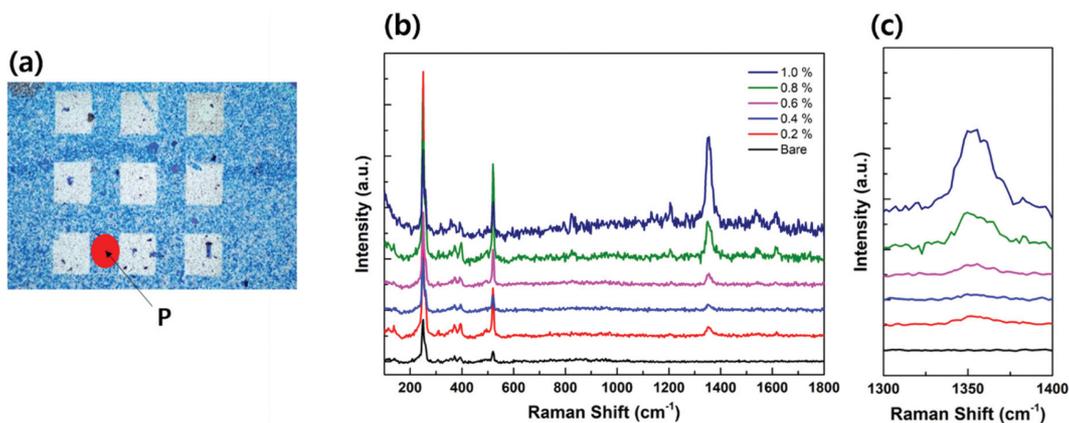


Fig. 2. (a) Optical image of the surface on WSe_2 FET device. (b) Large scale of Raman shift from 100 to $1800\ \text{cm}^{-1}$. (c) Zoomed Raman signal from 1300 to $1400\ \text{cm}^{-1}$.

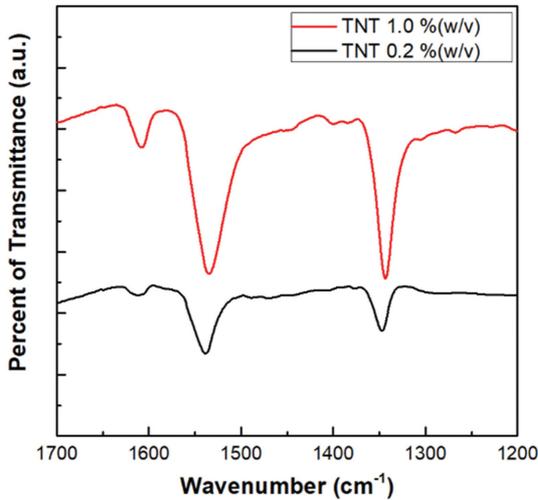


Fig. 3. FT-IR Transmittance of TNT EtOH solution 0.2 % (w/v) and 1.0 % (w/v).

도하기 위한 농도별 TNT 에탄올 용액은 최소 농도 0.2 % (w/v)와 최고 농도 1.0 % (w/v)를 선정하여 FT-IR ATR (Attenuated Total Reflectance) 분석을 수행하였다. Figure 3는 0.2 % (w/v) 및 1.0 % (w/v) TNT 용액의 FT-IR 투광도를 나타낸 것으로, 1200 cm^{-1} 에서 1700 cm^{-1} 까지의 범위에서의 메인 피크는 각각 1352 cm^{-1} , 1536 cm^{-1} , 1607 cm^{-1} 에서 나타났다. 선행 분석 정보에 따르면, 0.2 % (w/v) TNT 용액을 도포 후, 나타나는 1352 cm^{-1} 및 1536 cm^{-1} 시그널은 TNT 분자의 시성기인 나이트로기(NO_2)의 N-O 결합의 스트레칭 특성으로 인해 나타난다[15]. TNT의 농도가 1 % (w/v)로 증가하자, 1352 cm^{-1} 및 1536 cm^{-1} 시그널 모두 intensity가 크게 증가하였으며, 이는 TNT 농도 증가에 비례해서 WSe_2 표면에 흡착되어 있는 나이트로기(NO_2)의 coverage 또한 증가되었음을 의미한다. NH_2 결합에 의한 IR 시그널 또한 0.2 % (w/v) 및 1.0 % (w/v) TNT 용액 도포된 샘플에서 1607 cm^{-1} 위치에 관측이 된다. 유사하게, 농도 증가와 1607 cm^{-1} IR 시그널의 intensity 모두 비례적인 관계가 관측이 된다. 따라서 TNT 용액 도포 후, Fig. 3의 FT-IR 분광 결과를 통해 WSe_2 표면에 TNT 분자가 흡착되어 안정된 상태로 존재함을 확인할 수 있다.

TNT 분자 흡착에 따른 WSe_2 FET의 전기적 특성 분석을 하기 전, TNT 도포 공정에 용매로 사용되는 ethanol에 의한 영향도 평가와 TNT 분자 흡착에 대한 선택적 반응을 확인하였다. Figure 4에서 bare 상태의 WSe_2 다층 소자의 transfer 특성이 검은색 그래프로 보여지고 있다. 기존에 보고된 결과와 같이 (-) 전압대에서 전류가 출력되는 p-type 특성이 관측이 된다[16]. 대조실험으로 ethanol을 WSe_2 채널에 도포 및 30분간 상온에서 건조한 뒤, -50 V에서의 최대 전류값이 살짝 감소되었지만,

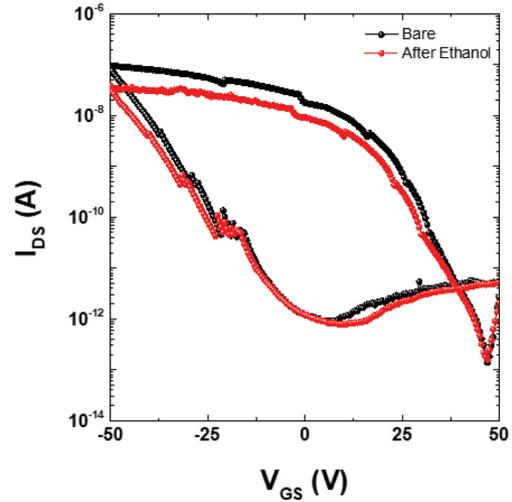


Fig. 4. Log scale of WSe_2 FET I-V transfer forward (50 V to -50 V) for bare and ethanol exposed samples.

여전히 강한 p-type 특성이 유지가 되었으며, 거의 유사한 전류 구동 특성이 관측이 되어, ethanol 도포는 WSe_2 반도체 소자의 전기적 특성을 거의 영향을 주지 않는다고 확인된다.

Figure 5(a)는 WSe_2 FET의 대표적인 전기적 특성을 평가하기 위해 Drain 전류의 거동을 분석한 것이다. 이 때, FET는 Back Gate에 전극을 연결하고, Drain과 Source 전극에 전류가 흐르도록 전위차(V)를 발생시켰을 때의 출력 전류를 Linear Scale로 측정하였다. Drain의 인가 전압은 -50 V에서 50 V까지 지정하였으며, 전류 거동을 관찰하였다. 0.2~1.0 % (w/v) 농도별 TNT 용액 도포 후 Drain의 전류 세기를 측정하였을 때, 0.6 % (w/v) TNT 분자를 흡착한 경우 다른 농도에 비해 동일 전압에서 상대적으로 많은 전류가 흘렀고, Bare한 상태의 -50 V에서 Drain 전류는 0.02 μA 를, 0.6 % (w/v)에서는 0.41 μA 를 나타냈다. 이는 Bare한 상태보다 0.6 % (w/v)를 도포하였을 때 WSe_2 FET의 Drain에 더 큰 전류가 흐르는 것으로 분석할 수 있다. 이는 농도별 TNT 용액을 도포한 WSe_2 FET의 Drain 전류 특성으로, TNT 용액 농도가 0.6 % (w/v) 정도에서 높은 전류 특성을 나타내고, TNT 분자의 흡착에 따라 Hole(+) 우위의 거동을 보이는 p-type 경향을 나타내는 것으로 해석된다. Figure 5(b)는 Bare 상태와 농도별 TNT 용액을 도포하였을 때 WSe_2 FET의 최대-최소 전류의 On/Off Ratio를 그래프로 나타낸 것이다. 이 때, 0.6~0.8 % (w/v) TNT 용액을 도포하였을 때 On/Off Ratio는 $3.40 \times 10^4 \sim 3.93 \times 10^4$ 를 나타내고 있다. 0.8과 1.0 % (w/v) TNT 용액이 도포된 WSe_2 소자의 경우 약 1.02×10^4 의 On/Off Ratio가 감소하였는데, 이는 과량의 TNT 분자가 흡착됨에 따라 전극과 WSe_2 계면에 화학적/전기적 스트레스가 발생하여, On 영역의

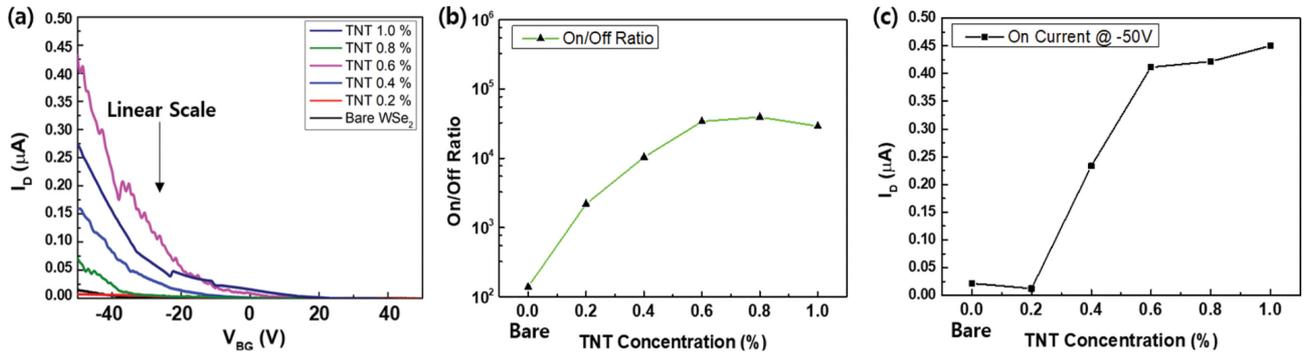


Fig. 5. (a) Linear scale of WSe₂ FET I-V transfer forward (50 V to -50 V). (b) On/Off ratio of WSe₂ FET. (c) On current curve of WSe₂ FET at -50 V.

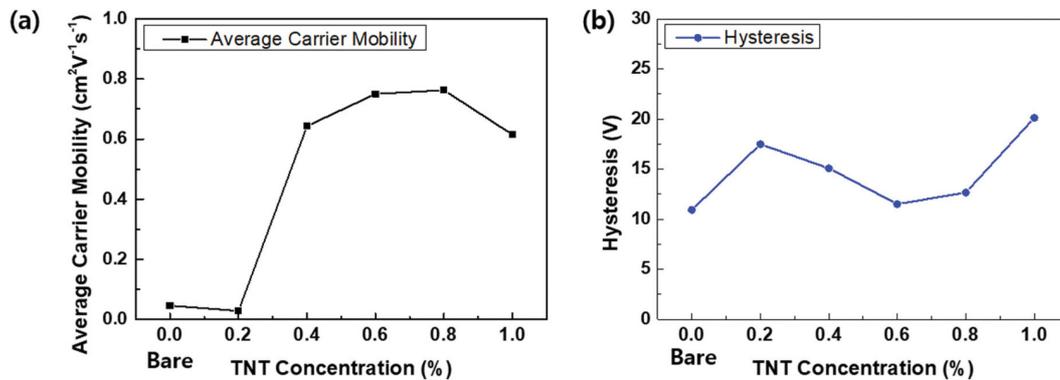


Fig. 6. (a) Average carrier mobility. (b) Hysteresis of WSe₂ FET by TNT concentration.

전류가 감소한 것으로 추측된다. Figure 5(c)는 농도별 TNT 용액을 도포한 WSe₂ FET의 -50 V에서의 On current를 그래프로 나타낸 것으로, Bare 상태에서 0.02 μA를 나타내었고, 0.2%(w/v) 농도에서 0.01 μA, 0.4%(w/v) 농도에서 0.23 μA, 0.6%(w/v) 농도에서 0.41 μA, 0.8%(w/v) 농도에서 0.42 μA, 1.0%(w/v) 농도에서 0.45 μA를 나타낸다. 이는 TNT 용액의 농도가 0.4%(w/v)부터 급격히 On current의 변화가 있음을 알 수 있다.

WSe₂ FET의 I-V 거동 특성으로 전하 캐리어의 이동도(Mobility) 특성이 있으며, Fig. 6(a)는 WSe₂ FET의 평균 전하 캐리어 이동도를 그래프로 나타낸 것이다. 실험에서의 전기적 거동을 통한 이동도 특성 평가 시 WSe₂ 채널의 폭과 길이는 각각 10.7 μm, 50 μm이며, WSe₂의 유전율은 4.63이며, V_{DS} 는 1 V이다[17]. 평균 전하 캐리어 이동도는 채널의 길이를 채널의 폭과 WSe₂의 정전용량 및 V_{DS} 의 곱으로 나눈 값의 평균으로 나타내었으며, 농도별 TNT 용액을 도포한 WSe₂ FET 각각의 농도별 평균 전하 캐리어 이동도는 0.6~0.8%(w/v)에서 0.75~0.76 cm²V⁻¹s⁻¹의 값을 나타내었다. 이는 앞선 Drain 전류 특성과 유사하게, 0.6~0.8%(w/v)의 TNT 용액을 도포하였을 때 상대적으로 큰 전하 이동도 특성을 보이는 것을 나타낸다. 일반적으로 외부 분자와 같은 불순물이

흡착함에 따라 TMDCs 표면의 전하 캐리어는 산란과 같은 방해 현상이 나타나 이동도가 감소할 수 있는데, 본 연구에서 TNT 용액의 농도가 증가할수록 이동도가 큰 점에 있어서는 TNT 분자의 표면 흡착성 및 함유하고 있는 NO₂의 농도에 따라 전하 캐리어의 이동에 영향을 준 것으로 추측된다[18,19].

Figure 6(b)는 WSe₂ FET의 히스테리시스 너비를 비교한 것으로, 히스테리시스 너비는 forward와 backward 특성의 추출된 V_{TH} (문턱 전압)의 차이로 정의된다. 인가한 전압에 대해 출력된 전압이 결정될 때 입력 전압이 커지면서 결정되는 출력 전압과 입력 전압이 작아질 때 결정되는 출력 전압이 달라서 생기는 전압 특성이다. 본 연구에서 Bare 상태를 포함 TNT 용액을 도포한 WSe₂ FET의 히스테리시스 너비가 10 V에서 23 V 사이에 위치된 것이 확인된다. 따라서 WSe₂ 소자의 전기적 특성 분석을 통해 TNT 분자 흡착에 의해 선택적인 전기적 반응을 유도 가능성이 확인이 된다.

4. 결 론

본 연구는 TNT를 용액화하여 WSe₂ FET 표면에 적

접 도포하여, 흡착시킴으로써 가스상의 TNT 분자를 탐지하는 연구에 발생할 수 있는 열적 위험성 및 특정 설비의 요구 등 제한성을 완화하고 TNT 입자를 빠르고 용이하게 탐지하는 방법으로 WSe₂의 TNT 탐지 소재로서의 전기적 유효성을 확인하였다. 이는 WSe₂ 소재의 p-type 전기적 거동의 변화를 통해 TNT 입자를 탐지하는 소재로서 유효성이 존재함을 알 수 있었다. 특히, 0.6~0.8 % (w/v) TNT 용액을 도포하여 흡착한 경우 전기적 특이성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 나아가, 본 연구를 통해 현존하는 폭발물질 중 나이트로계 외에도 다양한 종류의 폭발물질(TATP, 질산염 기반 등)에 대해 전기금속 칼코겐 화합물의 탐지 소재로서의 가치를 연구할 수 있는 기회가 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 경상국립대학교 나노신소재공학부 세라믹공학과 생체모방반도체 연구실과 한국산업기술시험원 항공국방신뢰성센터 교통보안팀의 물질·인적 지원이 있었으며, 항공보안장비 성능인증제 추진을 위한 시험인증기술개발(국토교통부, 1615013118) 연구사업을 기반으로 수행되었기에, 이에 감사드립니다. 본 결과물은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-003) 및 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 결과입니다. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2021R1C1C1012209).

References

- [1] W. Lee and K. Lee, "Recent research trends in explosive detection through electrochemical methods", *Appl. Chem. Eng.* 30 (2019) 399.
- [2] S. Moon, W. Lee and K. Lee, "Research trends in chemical analysis based explosive detection techniques", *Appl. Chem. Eng.* 33 (2021) 1.
- [3] S. Dhara, H. Jawa, S. Ghosh, A. Varghese, D. Karmakar and S. Lodha, "All-electrical high-sensitivity, low-power dual-mode gas sensing and recovery with a WSe₂/MoS₂ pn heterodiode", *ACS Appl. Mater. Interfaces* 13 (2021) 30785.
- [4] W. Lee, "Introduction to explosives", Goomibook (2021).
- [5] S.B. Mishra, S. Marutheswaran, S.C. Roy, V. Nataraajan, P.K. Rai and B.R.K. Nanda, "Adsorption and degradation mechanism of 2,4,6-trinitrotoluene on TiO₂ (110) surface", *Elsevier B.V. Surface Science* 713 (2021) 121902.
- [6] H. Wang, S. Chen, A. Gao, Y. Wang and Tie Li, "Detection of TNT in sulfuric acid solution by SiNWs-FET based sensor", *IEEE. 2018 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS* (2018).
- [7] H. Fang, S. Chuang, T. Chia Chang, K. Takei, T. Takahashi and A. Javey, "High-performance single layered WSe₂ p-FETs with chemically doped contacts", *ACS Nano Lett.* 12 (2012) 3788.
- [8] Y. Wang, K. Huang and X. Wu, "Recent advances in transition-metal dichalcogenides based electrochemical biosensors: A review", *Elsevier B.V. Biosensors and Bioelectronics* 97 (2017) 305.
- [9] M. Chhowalla, H. Shin, G. Eda, L. Li, K. Loh and H. Zhang, "The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets", *Nat. Chem.* 5 (2013) 263.
- [10] L. Wang, D. Xu, L. Jiang, J. Gao, Z. Tang, Y. Xu, X. Chen and H. Zhang, "Transition metal dichalcogenides for sensing and oncotherapy: Status, challenges, and perspective", *Adv. Funct. Mater.* 31 (2021) 2004408.
- [11] W. Choi, N. Choudhary, G. Han, J. Park, D. Akinwande and Y. Lee, "Recent development of two-dimensional transition metal dichalcogenides and their applications", *Mater. Today* 20 (2017) 116.
- [12] C. Jung, S. Kim, H. Moon, G. Han, J. Kwon, Y. Hong, I. Omkaram, Y. Yoon, S. Kim and J. Park, "Highly crystalline CVD-grown multilayer MoSe₂ thin film transistor for fast photodetector", *Sci. Rep.* 5 (2015) 15313.
- [13] M. Tosun, S. Chuang, H. Fang, A.B. Sachid, M. Hettick, Y. Lin, Y. Zeng and A. Javey, "High-gain inverters based on WSe₂ complementary field-effect transistors", *ACS Nano.* 8 (2014) 4948.
- [14] W.S. Hong, "Thin film vacuum process technology via chemical vapor deposition methods", *The Korean Vacuum Society* 1 (2014) 9.
- [15] N. Shukla, V. Gupta, A.S. Rawat, V.K. Gahlot, S. Shrivastava and P.K. Rai, "2, 4-Dinitrotoluene (DNT) and 2, 4, 6-Trinitrotoluene (TNT) removal kinetics and degradation mechanism using zero valent iron-silica nanocomposite", *J. Environ. Chem. Eng.* 6 (2018) 5196.
- [16] H. Fang, S. Chuang, T.C. Chang, K. Takei, T. Takahashi and A. Javey, "High-performance single layered WSe₂ p-FETs with chemically doped contacts", *Nano Lett.* 12 (2012) 3788.
- [17] Z. Huang, W. Zhang and W. Zhang, "Computational search for two-dimensional MX₂ semiconductors with possible high electron mobility at room temperature", *MDPI Mater.* 9 (2016) 716.
- [18] J. Jang, J. Kim, J. Shin, J. Kim, K. Baek, J. Park, S. Park, Y. Kim, S.S.P. Parkin, K. Kang, K. Cho and T. Lee, "Reduced dopant-induced scattering in remote charge-transfer-doped MoS₂ field-effect transistors", *Sci. Adv.* 8 (2022) eabn3181.
- [19] A. Moumen, R. Konar, D. Zappa, E. Teblum, I. Perelshtein, R. Lavi, S. Ruthstein, G.D. Nessim and E. Comini, "Robust room-temperature NO₂ sensors from exfoliated 2D few-layered CVD-grown bulk tungsten Di-selenide (2H-WSe₂)", *ACS Appl. Mater. Interfaces* 13 (2021) 4316.