





2022年 8月 博士學位 論文

2차원 전이금속칼코겐 화합물 기반 듀얼 게이트 전계효과 트랜지스터 특성 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

鄭判儉



2차원 전이금속칼코겐 화합물 기반 듀얼 게이트 전계효과 트랜지스터 특성 연구

A Study on the Characteristics of Dual-gate Field Effect Transistors based on 2D Transition Metal Chalcogenides

2022年 8月 26日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

鄭判儉



2차원 전이금속칼코겐 화합물 기반 듀얼 게이트 전계효과 트랜지스터 특성 연구

指導教授 高 必 周

이 論文을 工學博士學位 申請論文으로 提出함.

2022年 4月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

鄭判儉



鄭判儉의 博士學位論文을 認准함



2022年 6月

朝鮮大學校 大學院



목 차

ABSTRACT

Ⅰ. 서 론	1
Ⅱ. 이론적 배경	4
A. 2차원 물질	4
1. 2차원 물질의 정의	4
2. 2차원 물질의 종류	5
3. 2차원 물질의 제조방법	4
B. 전계효과 트랜지스터	21
1. 전계효과 디바이스 특성 평가	21
2. 금속 절연체 반도체 전계효과 트랜지스터	23
3. MISFET 동작 메커니즘	24
4. 성능 매개 변수	27
Ⅲ. 실험방법	30
A. 소자 제작	30
B. 특성 분석	33
1. 형상학적 분석	33
2. 분광학적 분석	36
3. 전기적 특성 분석	38

Ⅳ. 실험결과 및 고찰	40
A. MoSe2 기반 듀얼 게이트 전계효과 트랜지스터의 특성	40
1. 서 언	40
2. 실험벙법	41
3. 결과고찰	48
B. High-k 게이트 유전체 MoSe₂ 전계효과 트랜지스터의 특성	62
1. 서 언	62
2. 실험벙법	63
3. 결과고찰	63
C. GaSe 기반 듀얼 게이트 전계효과 트랜지스터의 특성	71
1. 서 언	71
2. 실험벙법	72
3. 결과고찰	75
V. 결 론 ··································	92
Reference	



List of Table

Table 1.	Properties of Graphene Material6
Table 2.	Properties of MoS ₂ Material6
Table 3.	Properties of h-BN Material6
Table 4.	Bandgap Characteristics of Typical TMCs Materials11
Table 5.	Various Two-Dimensional Materials12
Table 6.	Comparison of 2D Materials12
Table 7.	Diagrams for Ideal Metal-Semiconductor Schottky Diodes
Table 8.	Determining Factors of a Device's Performance Parameters 29
Table 9.	Comparison of Figures of Merit of MoSe ₂ Dual-gated
	MISFET-based Photodetector with other MoSe ₂ -based
	Structures ·······61
Table 10). Comparison of Figures of Merit of GaSe Dual-gated
	MISFET-based Photodetector with other GaSe-based
	Structures ·······91



List of Figures

Fig.	1.	Examples for 0D, 1D, 2D, and 3D Carbon Nanostructures
Fig.	2.	Diverse Properties of Different 2D Materials5
Fig.	3.	Graphene ······7
Fig.	4.	Structure of h-BN
Fig.	5.	Structure of BP9
Fig.	6.	Various MX ₂ Materials10
Fig.	7.	Structure of TMCs ······13
Fig.	8.	2D TMCs Fabrication Techniques14
Fig.	9.	Mechanical Exfoliation using Scotch Tape15
Fig.	10	Chemical Exfoliation16
Fig.	11.	Representative Set-Ups for Vapor Phase Deposition of TMCs 18
Fig.	12	Electrochemical Exfoliation using Electroysis
Fig.	13	General Thin-Film Transistor Configurations
Fig.	14	Cross Section of Transistor24
Fig.	15.	Structure of MoS ₂ TFT and Transfer($I_D - V_G$) Curve
Fig.	16	Ti/Si/SiO ₂ Optical Image
Fig.	17.	Schematic of 2D-based Field Effect Transistor Fabrication
		Using PDMS32
Fig.	18	Dry Transfer Device Production Process32
Fig.	19	Scanning Electron Microscopy(SEM; Hitachi TM-1000)
Fig.	20.	Atomic Force Microscopy(AFM; PSIA XE-100)



Fig. 21. Raman Scattering and Raman Active Mode of $TMCs(MX_2)$
Fig. 22. Micro Raman System(JASCO; NRS-5100)
Fig. 23. HP 4155A Semiconductor Parameter Analyzer
Fig. 24. Probe Station
Fig. 25. Exfoliated Two-Dimensional Material using PDMS42
Fig. 26. Dual-gate Optical Image of Device Fabrication Process
Fig. 27. AFM Image of Dual-gate Device43
Fig. 28. SEM Image Depicting 2D Materials44
Fig. 29. Schematic of Dual-gated MISFET Device
Fig. 30. Corresponding Raman Spectroscopy Characterization
of 2D Materials46
Fig. 31. Band Structure of Device Before and After Contact
Fig. 32. I _{DS} -V _{DS} Characteristics50
Fig. 33. Dependence of Drain Current on Drain-Source Voltage
at Different Values of Laser Power
Fig. 34. Dependence of Photoresponsivity on Drain-Source Voltage
at Different Values of Laser Power
Fig. 35. Dependence on the Laser Power at Different Values of
Drain-Source Voltage53
Fig. 36. Transfer Characteristics of Dual-gated MISFET Device
Fig. 37. Gate Voltage Dependence of Back-gated MOSFET
with Common Top Gate on Photocurrent at Laser Power
Fig. 38. Dependence on the Laser Power at Different Values of
Drain-Source Voltage61



Fig. 39. Electrical Properties of MoSe ₂ /Dielectrics(SiO ₂)
with MoSe ₂ -based Structures64
Fig. 40. Electrical Properties of MoSe ₂ /Dielectrics(Si ₃ N ₄)
with MoSe ₂ -based Structures65
Fig. 41. SEM and AFM Image of the Device
Fig. 42. The Current Versus bias Voltage Characteristics of the
MoSe ₂ /Dielectrics(SiO ₂) Field-effect Transistor at Various
Fixed Gate Voltage Values
Fig. 43. The Current Versus bias Voltage Characteristics of the
$MoSe_2/Dielectrics(Si_3N_4)$ Field-effect Transistor at Various
Fixed Gate Voltage Values67
Fig. 44. Gate Voltage Dependence of the Drain Current at Different
Values of the Drain-Source Voltage of our MoSe ₂ /Dielectrics(SiO ₂)
Field-effect Transistor
Fig. 45. Gate Voltage Dependence of the Drain Current at Different
Values of the Drain-Source Voltage of our $MoSe_2/Dielectrics(Si_3N_4)$
Field-effect Transistor
Fig. 46. Gate Voltage Dependence of the Drain Current
at $MoSe_2/Dielectrics(SiO_2, Si_3N_4)$ Field-effect Transistor
Fig. 47. Optical Images Depicting the Fabrication Process73
Fig. 48. SEM Image of the Dual-gate Graphene/h-BN/GaSe MISFET 73
Fig. 49. Raman Spectroscopy Characterization and
AFM Images of the Device74
Fig. 50. I _{DS} -V _{DS} Characteristics of our Device



Fig. 51. Dependence of the Drain Current under Dark Conditions and
Various Values of the Laser Power78
Fig. 52. Dependence of the Photocurrent on the Laser Power at Different
Values of Drain-Source Voltage79
Fig. 53. Drain Current Variation as Function of Time under Various Laser
Powers and Polarization Voltages81
Fig. 54. Transfer Characteristics at Different Values of the Laser Power for
the Dual-gated MISFET Device83
Fig. 55. Variation of the Photoresponsivity as Function of the Laser Power 85
Fig. 56. Transfer Characteristics of Dual-gated Devices
Fig. 57. Corresponding Field-effect Mobilities
Fig. 58. Transfer Characteristics of the Dual-gated MISFET Device



ABSTRACT

A Study on the Characteristics of Dual-gate Field Effect Transistors based on 2D Transition Metal Chalcogenides

Jung Pan Gum Advisor : Prof. Ko Pil Ju, Ph.D. Department of Electrical Engineering Graduate School of Chosun University

Two-dimensional Transition-Metal-Chalcogenides and its hetero structure have enormous attraction due to its tremendous electric and physical properties beyond traditional silicon-based semiconducting electronic applications. When applied as a channel layer of a field effect transistor using such characteristics, it exhibits extremely high mobility and blinking ratio characteristics, and optical devices using these characteristics also exhibit excellent performance. TMCs has a relatively good exfoliating property because it forms a Van der waals bond between the layers, Using these characteristics, the Mechanical exfoliation is still being actively studied. In this study, we made a device using the Mechanical exfoliation and confirmed the electrical and optoelectronic properties of the photodetector. In the future, this research expects that MISFET will greatly contribute to the application and commercialization of photodetection.

First, Two-dimensional Molybdenum Diselenide has potential applications in photo-detection. In this study, we examined hetero structures based on Gr/h-BN/MoSe₂ Top-gated Metal-Insulator-Semiconductor Field-effect Transistors and Si/SiO₂/MoSe₂ Back-gated Metal-Oxide-Semiconductor Field-effect Transistors. Also, we carried out electrical and optoelectronic characterizations of the Dual-gated MISFET-based photo-detector. The



photo-detector exhibited effective electrical characteristics of the Back-gated MOSFET with a common top gate configuration and narrow current hysteresis. The responsivity and specific detectivity were, respectively, 314AW⁻¹ and 2.2×10¹²cmHz^{1/2}W⁻¹, rendering the Dual-gated MISFET suitable for photodetection applications.

Second, Recently, Two-dimensional materials improve the properties of existing silicon-based devices and are promising materials for electronic and optoelectronic applications. The Molybdenum Diselenide material has excellent charge mobility and photoresponse, so many studies are being conducted as an excellent material for application in various fields. In this study, a MoSe₂ based field effect transistor was fabricated by mechanical exfoliation of MoSe₂ in the bulk state, and electrical and optical properties were compared by fabricating a device using SiO₂ and Si₃N₄, which are gate oxides, as an oxide film.

Lastly, Two-dimensional Transition-Metal-Chalcogenides are promising for the next generation of electronic devices and sensors. In this paper, we reported on the fabrication and the characterizations of Back-gated Si/SiO₂/GaSe based Metal-Oxide-Semiconductor Field-effect Transistor and Top-gated Gr/h-BN/GaSe based Metal-Insulator-Semiconductor Field-effect Transistor with active layer. We investigated common the morphological, as well as the electrical and optoelectronic properties, where device showed P-type behavior with good electrical tunability performance. The device exhibits photoresponsivity of 90mAW^{-1} at laser power value of 1.147μ , I_{0N}/I_{0FF} ratios exceeding 10^4 and long decay time. These promising experimental results promote the GaSe based MISFET for multifunctional electronic device.



Ⅰ. 서 론

실리콘 기반 반도체는 무어의 법칙이 발표된 이후 실리콘 트랜지스터 개수를 의미하는 집적도는 해마다 빠르게 증가하고 있으며[1], 집적회로의 성능 향상을 위해 동일한 크기의 반도체 칩에 더 많은 트랜지스터가 제작되었으며 크기는 나 노미터 수준으로 소형화 되었다. 2021년에 4nm 크기의 트랜지스터가 개발되었으 며 향후 트랜지스터 크기가 1nm 정도로 소형화 될 것으로 예측된다[2].

실리콘 기반 소자가 포함되는 집적회로는 집적도의 증가에 따라 초소형 소자 에 대한 수요는 점점 증가하는 추세이다. 그러나 실리콘 기반 소자의 소형화가 진행됨에 따라 이동도 감소와 단채널 효과(SCE, short channel effect)의 문제 점들이 발생 되고 있다[1]. 이와 같은 근거로 실리콘을 소재로 하는 소자의 집 적화는 댕글링 본드(Dangling bond)로 인한 이동도 감소 및 단채널 효과 증가에 따라 한계점에 부딪히면서 실리콘을 대체할 2차원 물질에 대한 필요성이 커지게 되었다. 실리콘은 간접천이형 밴드갭(Indirect bandgap) 특성으로 인하여 스스 로 광자(Photon)를 발생시키지 못하며 실리콘 소재의 고유한 특성으로 인해 차 세대 플렉시블 디스플레이(Flexible display) 소자에 응용이 제한되는 단점이 있다[3-4]. 따라서 유연하면서 에너지 손실이 없는 직접천이형 밴드갭(Direct bandgap) 특성을 갖는 소재에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다[5].

따라서, 실리콘을 기반으로 하는 소자가 한계에 부딪히면서 2차원 물질의 종류 중 그래핀(Graphene)을 포함하여 h-BN(Hexagonal boron nitride), Black phosphorus, 전이금속칼코겐 화합물(TMCs, Transition metal chalcogenides)등에 대한 연구가 주목을 받기 시작하였다. 그래핀 및 전이금속칼코겐 화합물과 같은 2차원 물질은 얇은 두께의 특성에서 오는 새로운 전자적 특성으로 인해 주목을 받고 있다. 2차원 물질은 같은 층의 원자들과 강한 공유결합을 하고 있고, 층과 층 사이에는 약한 반데르발스(Van der waals) 결합을 이루고 있는 층상 구조 형 태의 물질이다. 2차원 물질의 구조적 특성상 빛을 투과할 수 있을 정도로 투명하 고 유연하며 기계적 강도가 뛰어난 장점으로 인해 최근 많은 연구가 활발히 진행 되고 있다. 2차원 물질은 우수한 전기적, 광학적, 기계적 특성을 가지고 있으며, 단층이 1nm 미만의 매우 얇은 두께를 가지고 있다[6]. 면간 수직 방향으로는 약 한 반데르발스 결합을 한 층 내에서 평면 방향으로는 강한 공유결합을 하고 있어 층간 박리가 용이한 특징을 가지고 있다. 가장 먼저 연구가 진행된 그래핀의 경 우 실리콘의 100배 이상인 200,000cm²/Vs가 넘는 전자 이동도와 5,300W/mK의 높 은 열전도, 높은 밀도 등 우수한 특성을 이용하여 전자소자와 광학소자를 개발할 수 있는 가능성을 갖고 있다[7]. 그러나 그래핀은 우수한 특성을 가지고 있지만, 밴드갭이 존재하지 않기 때문에 반도체 소자로 사용하기에 어려움이 있다. 반면 에, 전이금속칼코겐 화합물는 두께에 따른 밴드갭 조절이 가능하기 때문에 차세 대 전자 디바이스의 유망한 물질로 주목받고 있다[8].

전이금속칼코겐 화합물은 전이금속(Transition metal)과 칼코겐(Chalcogen) 원자로 구성된 층상 물질로 구조의 적층 순서에 따라 삼각 1T. 육각 2H. 능면 체 3R 상과 같은 구조를 가지며, 구조에 따라 발현되는 성질이 상이해 다양한 특성을 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 여기서 T는 Tetragonal, H는 Hexagonal, R은 Rhombohedral 구조를 의미한다. 반데르발스 힘(Van der waals forces)에 의해 약하게 결합되는 전이금속칼코겐 화합물의 층간 간격은 6~7Å 이며, 간접 밴드갭을 갖는 벌크와는 다르게 직접 밴드갭을 형성하는 특 성을 가지고 있기 때문에 태양전지, 광전자 소자로 응용할 수 있다[9-10]. 전 이금속칼코겐 화합물의 구성과 층수를 간단히 제어함으로써 약 1.0eV ~ 2.1eV의 밴드갭 에너지를 조절할 수 있기 때문에 새로운 구조의 소자를 제작 하여 기존의 반도체 소자를 대체 할 수 있으며, 전이금속칼코겐 화합물는 높 은 온-오프 비, 높은 이동도, 낮은 SS(Subthredshold swing)과 같은 바람직한 전계효과 전이 특성을 나타낸다. 이와 관련하여 전자, 광전자와 같은 다양한 분야에서 전이금속칼코겐 화합물의 응용에 관한 많은 연구가 보고되었다. 또 한, 2차원 물질의 전이금속칼코겐 화합물은 반도체 특성 및 여러 장점을 가지 고 있기 때문에 다양한 응용이 가능할 것으로 전망되며 광전소자 및 광센서 등 다양한 분야에 적용하기 위해 활발한 연구가 진행 중이다. 또한, 2차원 물 질 중 하나인 h-BN은 그래핀과 유사한 결정 구조를 가지고 있으며, 붕소와 질 소가 강한 공유결합으로 연결되어있어 물리적, 화학적 안정성이 높다. h-BN은 6eV 정도의 높은 밴드갭 및 부도체의 특성으로 인해 다른 2차원 물질과 결합 하여 기판으로 사용할 때 해당 2차원 물질의 고유의 특성을 나타낼 수 있게 돕는다. 또한, 공기 중에서 1,000℃까지 구조가 유지되며, 진공 중에서 1,400℃까지 구조가 유지된다. 화학물질과 반응하지 않기 때문에 h-BN으로 다 른 2차원 물질을 외부의 오염 및 자극으로부터 보호할 수 있다. 앞에서 설명 한 바와 같이 이러한 필요에 의해 2차원 물질을 이용해 실리콘 반도체를 대체하 려는 시도들이 이루어지고 있으며, 2차원 물질인 그래핀은 우수한 특성을 가지고 있지만, 밴드갭이 존재하지 않기 때문에 반도체 소자로 사용하기에 어렵다. 반 면, 전이금속칼코겐 화합물은 구조와 재료에 따라 다양한 특성을 가지고 있으며, 두께에 따른 밴드갭 조절이 가능하다. 2차원 전이금속칼코게나이드 및 디칼코게 나이드는 차세대 전자장치 및 센서의 유망한 물질이며, 광검출기에 대한 연구가 이루어지고 있다. N-타입 2차원 물질은 P-타입 2차원 물질의 정공 이동도에 비해 전자 이동도가 높기 때문에 광검출 응용 분야에 더 적합하다. 그러나 PN, 쇼트키 광다이오드(Schottky photodiode) 및 이종접합 구조(Heterostructure) 기반 광검 출기 등의 복잡한 구조를 구현하려면 P-타입 2차원 물질의 전자 및 광전자 특성 이 필요하다.

본 연구에서는 2차원 전이금속칼코겐 화합물의 대표적인 물질인 N-타입의 이셸 렌화몰리브덴(MoSe₂, molybdenum diselenide) 및 P-타입의 갈륨 셸레나이드 (GaSe, gallium selenide)를 사용하여, 2차원 물질 기반의 금속 절연체 반도체 전계효과 트랜지스터(MISFET, metal insulator semiconductor field-effect transistor) 및 금속 산화물 반도체 전계효과 트랜지스터(MOSFET, metal oxide semiconductor field effect transistor)의 이종접합 구조의 광검출기 디바이스 를 제작하여 Dual-gate MISFET의 형태학적, 전기적 및 광학적 특성을 비교 분석 하고자 한다. 또한, 2차원 물질 디바이스의 상용화를 위해서는 전계효과 트랜지 스터(FET)의 특성이 매우 중요하여 기계적 박리법을 이용해 MoSe₂ 기반 전계효과 트랜지스터를 제작하여 검토하고, 게이트 산화물인 SiO₂(ε=3.9), Si₃N₄(ε=7.5) 을 절연막으로 전계효과 트랜지스터의 전기적 특성을 비교 분석하고, 광검출기의 광전자적 응용 가능 여부에 관한 타당성을 입증하고자 한다.



Ⅱ. 이론적 배경

A. 2차원 물질

1. 2차원 물질의 정의

2차원 물질은 원자들의 단일 원자층 두께(1nm)를 가지고 평면에서 결정구조를 이루는 물질이다. 또한, 동일 물질의 벌크 상태와 분자 상태 중간 정도의 특성 을 보이는데, 두께에 따라 에너지 밴드가 달라져 전기적, 광학적 특성이 변하는 물질이다. 물질의 두께가 수십 nm 이하가 되어 1개의 차원에 양자 구속 효과가 나타나 전기/광학적 특성이 달라지면 해당 물질은 2차원 물질에 속하게 된다. 한가지 차원에서 구속 효과가 나타나는 물질은 2차원 물질로 박막과 Quantum well이 해당하며 두가지 차원에서 구속 효과가 나타나는 물질은 1차원 물질로 Quantum wire가 해당한다. 그 다음으로 0차원 물질은 3차원 전반에서 구속 효과 가 나타나는 물질로 Quantum dot가 해당되며 0차원, 1차원, 2차원 모두는 물질 의 구조 변화에 의해 상태 밀도의 변화가 나타나 물질의 특성이 벌크와 달라진 다는 공통점을 갖는다[11]. 또한, 결정구조의 차원 수에 따라 3차원(30), 2차원 (20), 1차원(10), 0차원(00) 물질로 그림 1과 같이 구분이 가능하며, 같은 원소 로 이루어진 물질이라도 차원수가 달리지면 원자들 사이의 결합 특성이 달라지 므로 전자 이동도, 기계적 안정성 등 물질의 특성이 달라진다[12].

	The second secon		
Fullerene	Carbon Nanotube	Graphene	Graphite
OD	1D	2D	3D

Fig. 1. Examples for OD, 1D, 2D, and 3D Carbon Nanostructures

2. 2차원 물질의 종류

2차원 물질은 우수한 기계적, 전기적 특성을 가지며 원자들의 단일 원자층 한층이 약 1nm의 매우 얇은 두께를 가지고 있다. 한 층 내에서 평면 방향으 로는 강한 공유결합을 면간 수직 방향으로는 상대적으로 약한 반데르발스 결 합을 하고 있어 층과 층 사이의 박리가 용이한 특징이 있다. 대표적인 물질로 는 그래핀, h-BN, Black phosphorus, 전이금속칼코겐 화합물 등이 있다.

그림 2와 같이 2차원 물질은 전기적 특성에 따라 도체, 반도체, 부도체로 분 류할 수 있으며[13], 대표적인 도체, 반도체, 부도체 특성을 가지는 물질로는 그래핀, 전이금속칼코겐 화합물, h-BN 등이 있다. 표 1-3에서는 도체, 반도체, 부도체를 대표하는 2차원 물질의 특성을 보여주고 있다[14].



Fig. 2. Diverse Properties of Different 2D Materials



Graphene(Conductor)							
Bandgap	Zero band gap						
Strength	1100Gpa						
Flexibility	up to 20%						
Thermal conductivity	4800W/m·K						
Mobility	~ 10 ⁵ cm²/V·s						
Transparent	optical transmission 97%						

Table 1. Properties of Graphene Material

Table 2. Properties of MoS_2 Material

MoS ₂ (Semiconductor)								
Bandgap	direct band gap 1.8eV (single layer)							
Thermal stability	1100Gpa							
Young's modulus	270Gpa							
Mobility	1 ~ 150cm²/V·s(layer dependence)							
On/off current ratio	$10^7 \sim 10^8$							
Subthreshold Swing	60 ~ 80[mV/dec.](layer dependence)							

Table 3. Properties of h-BN Material

h-BN(Insulator)								
Bandgap	5 ~ 6eV							
Dielectric constant	3 ~ 5							
Thermal conductivity	240 ~ 250W/m·K							
Thermal stability	> 900°C							



a. 그래핀

그래핀[16]은 그림 3과 같이 궤도 혼성화에 의해 결합 된 원자 1개 두께의 탄 소 원자 시트이다. 그림 3(a)-(c)는 2s, 2p, 및 2p, 궤도와 나머지 탄소 원자의 2p, 궤도로 구성된 sp² 혼합 궤도는 각각 σ 결합과 π 결합을 형성한다. 또한, 그래핀은 반데르발스 힘으로 층과 층 간에 상호 작용하여 결합 되어 있는 그라파 이트에서 한 층이 박리 된 소재로 탄소 원자들이 sp² 결합으로 벌집 형태의 구조 를 가지는 2차원 평면 구조 물질이다[15]. 그래핀은 sp² 혼성 궤도에 존재하는 전 자 3개가 In-plane 방향으로 강력한 공유결합을 형성하고 p 궤도의 전자 1개가 Out-of-plane 방향으로 π 결합을 하는 구조를 가진다. p 궤도에 존재하는 전자들 은 쉽게 비편재화 특성이 있으므로 원자 간 전자 이동이 어느 정도 자유로우며 그 래핀이 상당한 전도성을 갖게 되는 원인이 된다. 그래핀의 물성은 이론적으로는 200,000cm²/Vs으로 보고되었다. 이는 실리콘보다 100배 이상 높은 전자 이동도를 보이면서 단일 그래핀의 경우 광투과도가 97.3%인 것이 확인되었다[17]. 또한. 강 철의 200배 이상 인장강도를 가지고 있기 때문에 10% 이상 면적을 늘리고 구부려 도 전기전도도가 감소되지 않는 신축성을 가진다. 그래핀이 가지는 독특한 특성은 결정구조에 의해 나타난다고 알려져 있으며, 밴드갭이 존재하지 않아 반도체 물질 로서의 응용에는 많은 제약이 따른다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 그래핀의 구조를 변경하여 밴드갭을 형성하는 연구들이 진행되었지만, 형성된 밴드갭은 매 우 제한적이기도 하고, 전자 이동도가 급격히 감소하는 등 여러 문제점을 보여 반 도체 소자의 응용에 어려움이 따르고 있다.



(a) Structure of Graphene (b) Layered Graphene
 (c) Distribution of σ and π Bonds for Graphene Structure
 Fig. 3. Graphene



b. h-BN

h-BN(Hexagoal boron nitride)은 붕소와 질소가 1:1 비율로 결합 되어 있는 물 질로 그래핀과 유사하게 붕소와 질소 원자가 육각형의 벌집 모양으로 평평한 결정 구조를 가진다. 또한, 2차원 물질의 종류 중 부도체 특성을 보이는 물질은 h-BN이 유일하며 그림 4에서 보여지듯이 그래핀과 유사한 결정구조를 보이며[22] 육안으 로는 하얗게 보이기 때문에 "white graphene"으로 불리기도 한다. h-BN은 탄소 원자들이 벌집 모양으로 연결된 그래핀에서 탄소 대신 붕소와 질소를 채워 넣어 벌집 모양으로 서로 교대로 구성되어 있다. h-BN은 900℃까지 산화되지 않으며 열 을 견디는 내열성, 차폐성, 계면 안정성 등 기존의 탄소 소재에서는 나타나지 않 는 여러 특성을 가지며, 열역학적으로 안정한 형태의 2차원적 구조로 많은 관심을 끌고 있다[18-21]. 평면 내에서는 강하게 공유결합되어 있지만, 평면 간에서는 약 한 반데르발스 결합을 하므로 그래핀과는 다른 전자적 특성을 보인다.

그래핀과 h-BN은 전기 음성도(Electronegativity)가 다르기 때문에, 밴드가 좁 아짐에 따라 전도성을 잃게 되고 금속성이 아닌 절연체의 특성을 보인다[23]. Al₂O₃, HfO₂ 등 유전체와는 다르게 h-BN은 추가적인 공정이 필요하지 않으므로 천 연상태에서 고품질의 균일한 두께로 수 nm 층을 박리 할 수 있으며, 반데르발스 결합 특성으로 인해 이종접합이 용이하여 SiO₂ 게이트 절연막의 대안으로 연구가 이루어지고 있다.



Fig. 4. Structure of h-BN



c. 흑린

흑린(BP, black phosphorus)는 인화합물로서, 그림 5와 같이 그래핀의 육각 연 결구조가 의자 모양으로 구부러진 형태가 반복된 결정구조를 가지는데, 육각형의 벌집 구조가 규칙적으로 구부러져 있으며, 이로 인해 물질의 방향에 따라 특성도 달라지는 비등방성을 가진다. 수평으로 구부러진 방향을 암체어 방향, 수직인 방 향을 지그재그 방향이라고 하는데 지그재그 방향의 전하 유효질량이 암체어 방향 에 비해 높으며 방향에 따라 전기전도성 및 열전도성의 차이를 보인다. 흑린은 두 께에 따라 밴드갭이 0.3 ~ 2.0eV로 조절되며 항상 직접천이형 밴드갭을 가지므로 광소자 적용에 용이한 장점이 있다[24]. 또한, 실리콘에 비해 높은 전하이동도를 갖고 있다. 그러나 대기중에 노출되었을 때 쉽게 산화되는 불안정한 특성으로 인 해 진공 환경에서 다루어야 한다는 단점이 있다.



Fig. 5. Structure of BP

d. 전이금속칼코겐 화합물

2차원 물질 중 하나인 그래핀의 제로 밴드갭 구조를 해결하기 위한 연구들이 진행되며 그래핀과 유사한 특성을 지닌 여러 2차원 물질들이 주목받기 시작했 다. 그 중에서도 TMCs에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, TMCs 화합물은 1개의 전이금속(M)과 2개의 칼코겐(X)이 MX₂ 구조로 이루어진 화합물로 그림 6의 주기 율표를 통해 어떠한 화합물들이 존재하는지 확인할 수 있다[25]. 이론적으로 40 여 가지의 화합물이 가능하며, 표 4에 대표적인 TMCs 물질들의 밴드갭 특성을 제시하였다[25]. 가장 많이 연구되고 있는 MoS₂의 경우에는 2H 구조의 한 층일 때 1.8eV 정도의 밴드갭을 가지고 있으며, 본 연구에 주가 되는 MoSe₂는 한층 일 때 1.65eV의 밴드갭을 갖는다. X-M-X(M : 금속 원소, X : 칼코겐 원소) 구조 의 TMCs 화합물은 분자의 구조 배치 상태에 따라 1T, 2H, 3R 구조를 갖는다.

여기서 숫자는 그림 7에서 보는 바와 같이 한 단위위 구조를 구성하는 층의 개수를 의미하며, T는 Tetragonal, H는 Hexagonal, R은 Rhombohedral 구조를 의 미한다. 일반적으로 1T 구조는 금속성 2H 구조는 반도체 성질을 나타내지만 3R 구조의 경우 불안정한 상태로 고온, 고압 상태에서만 발견되며 MoSe₂의 경우 1500℃, 400kbar 이상에서 발견되기도 하였다[26].

н				MX ₂													He
Li	Be			M = Tr X = Ct	ansition alcoge	n metal in						в	с	N	0	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	AJ	Si	Ρ	s	CI	Ar
к	Ca	Sc	Ti	v	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Мо	Тс	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Те	T.	Xe
Cs	Ba	La - Lu	Hf	Та	w	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	TI	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac - Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	FI	Uup	Lv	Uus	Uuc

Fig. 6. Various MX₂ Materials

따라서, TMCs는 어떠한 물질들 간의 결합인지 어떠한 구조냐에 따라 다양한 성질을 보이기 때문에 전기적, 광학적으로 원하는 디바이스를 제작하기에 용 이하다. 또한, TMCs는 고유한 특성 변화를 이용하여 디지털회로, 발광 다이오 드 등에 응용 가능하며 2차원 물질이라는 새로운 연구 분야를 개척하였고, 다양한 TMCs 화합물간의 이종접합 구조로 PN 소자를 제작하는 등[27-28] TMCs는 다양한 우수한 성질과 응용 가능성에 각광받고 있다. 대표적인 2차원 물질들을 표 5에서 보여주고 있으며, 표 6에서 2차원 물질들의 특성을 비교 하였다[29].

Bandgap(eV)		Mo	W	Ti	Zr	Hf	۷	Nb	Та	Ni	Pd	Pt
S	mono layer	1.8 2.1	1.8 2.1	0.65	ĩ.2	~ 1.3	~ 1.1	metal	metal	0.6	ĩ.2	~ 1.9
	Bulk	1.0 1.3	1.3 1.4	0.3	1.6	1.6	metal	metal	metal	0.3	~ 1.1	~ 1.8
Se	mono layer	1.4 	1.5 1.7	0.51	0.7	0.7	metal	metal	metal	0.12	- 1.1	ĩ.5
	Bulk	1.1 	1.2 1.5	metal	0.8	0.6	metal	metal	metal	metal	1.3	~ 1.4
Te	mono layer	1.1 	1.03	0.1	0.4	0.3	metal	metal	metal	metal	0.3	0.8
	Bulk	1.0 	metal	metal	metal	metal	metal	metal	metal	metal	0.2	0.8

Table 4. Bandgap Characteristics of Typical TMCs Materials



graphene family	graphene	'whi	hBN te graphene'	BCN	fluorograp	ohene	graphene oxide
2D chalcogenides	MoS ₂ , WS ₂ , MoSe ₂ , WSe ₂		semiconducting dichalcogenides: MoTe ₂ , WTe ₂ , ZrS ₂ , ZrSe ₂ , etc.		metallic dichalcogenides: NbSe ₂ , NbS ₂ , TiS ₂ , NiSe ₂ , etc. layered semiconductors: GaSe, GaTe, InSe, Bi ₂ Se ₃ , etc.		
2D oxides	micas, BSCCO layered Cu oxides	MoO ₃ , WO ₃ TiO ₂ , MnO ₂ , V ₂ O ₅ , TaO ₃ , RuO ₂ , etc.		perovskite-type: LaNb ₂ O ₇ , (Ca,Sr) ₂ Nb ₃ O ₁₀ , Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂ , Ca ₂ Ta ₂ TiO ₁₀ , etc.		hydroxides: Ni(OH) ₂ , Eu(OH) ₂ , etc. OTHERS	

Table 5.	Various	Two-Dimensional	Materials
----------	---------	-----------------	-----------

Table 6. Comparison of 2D Materials

2D material	Bandgap	Bandgap Tunability	Carrier Mobility
Graphene	0eV	+ 0.25eV	10 ⁵ cm²/Vs
h-BN	5.9eV	- 4eV	N/A
BP	1.59eV	0.10eV	10 ³ cm²/Vs
TMCs	0 ~ 3.4eV	±1eV	1 ~ 10 ² cm²/Vs





Fig. 7. Structure of TMCs

3. 2차원 물질의 제조방법

2차원 물질의 제조방법은 벌크(Bulk) 상태에서 2차원 물질을 분리하는 Top-down 방식과 결정을 기판 위에서 성장시키는 Bottom-up 방식으로 분류할 수 있으며, Top-down 방식에는 기계적 박리법(Mechanical exfoliation)과 화학적 박리법 (Chemical exfoliation)으로 나뉠 수 있으며, Bottom-up 방식에 비해 상대적으로 간단하지만 제작된 2차원 물질의 두께를 제어하는 데 어려움이 더 많다는 단점이 있다. Bottom-up 방식에는 기상증착법 등이 있으며 다양한 제조방법을 사용하여 2 차원 물질을 제조할 수 있다. 그림 8은 2차원 물질에 대한 다양한 제조 기술의 방 법을 보여주고 있다.



Fig. 8. 2D TMCs Fabrication Techniques

a. 기계적 박리법

기계적 박리법은 2004년 그래핀의 테이프를 이용한 박리법[30]이 소개된 이후 활발히 연구되기 시작했으며, 일명 "스카치테이프 박리법"으로 알려진 이 방법 은 2차원 물질의 벌크(Bulk)에서 테이프를 이용하여 떼어내고 다시 이를 기판에 전사하는 방법이다. 그림 9와 같이 기계적 박리법은 스카치테이프의 접착력으로 반데르발스 힘이 작용하는 TMCs 면의 수직 방향으로 막을 분리하는 방법이다. 이러한 방법은 단원자층으로 구성된 그래핀 또는 TMCs를 얻기에 좋은 방법이다. 별크 상태의 단결정 물질을 스카치테이프로 떼었다 붙이는 과정을 여러 번 반복 함으로써 단결정 물질의 두께는 점차 얇아지고 마지막으로 원자층 단위의 두께 를 갖는 조각(Flake)이 남게 된다. 스카치테이프에 별크 MoSe₂를 붙인 후 떼어 내길 수차례 반복하여 준비된 기판에 옮겨주기만 하면 쉽게 기판에 MoSe₂ 박막 을 형성할 수 있다[32]. 이렇게 떼어낸 MoSe₂ 박막은 빛의 간섭 효과로 인해 육 안으로도 쉽게 관측된다. 이 방법으로 기판 위에 고순도의 MoSe₂ 박막을 형성할 수 있고 기본적인 소자의 특성도 용이하게 파악할 수 있다. 하지만 물리적인 힘 으로 박막을 떼어내는 방법이므로 두께나 크기의 조절이 매우 어렵다[31].



Fig. 9. Mechanical Exfoliation using Scotch Tape

b. 화학적 박리법

화학적 박리법은 화학반응을 이용하여 벌크 Crystal 분말을 촉매 용액에 넣어 용액 안에서 박막을 분리하는 방법이며, 촉매가 들어간 용액에 벌크 MoSe₂ 분말을 넣은 후 초음파 처리를 하면 그림 10과 같이 단일 층 MoSe₂ 박막들이 떨어져 나오 게 된다. 이후 분리된 MoSe₂ 박막이 섞여 있는 용액을 기판으로 건지면 단일 층 박막이 확보된다. 이때 촉매로는 리튬 이온이 적합하다고 알려져 있으며, n-부틸 리튬을 포함한 용액을 일반적으로 사용한다. 용액속의 리튬 이온이 MoSe₂ 층 사이 에 고루 퍼지는데 약 하루의 시간이 필요하며, 수소가스를 투입한다면 좀 더 빠르 게 반응할 수 있다[33-34].



Fig. 10. Chemical Exfoliation

c. 기상 증착법

박리법은 고품질의 박막을 얻을 수 있지만, 대면적의 균일한 제작이 어렵기 때 문에 실제 소자의 생산에는 적용이 불가능하다. TMCs 화합물의 실제 소자 적용을 위해서는 박막의 대면적, 고품질 생산등은 주요 과제 중 하나이므로, 이를 해결 하려는 노력들이 계속되고 있다. 기상 증착 반응은 기판 위에 2차원 TMCs를 형성 할 수 있는 대표적인 방법이다. 이 방법은 대면적 박막 생산이 가능하며, 두께도 용이하게 조절할 수 있기 때문에 관심을 받고 있으며 이를 통한 대면적 생산과 실제 소자 적용 사례 또한 지속적으로 연구되고 있다.

TMCs는 전이금속(M), 칼코겐 원소(X)의 화합물인 MX₂의 화학식을 가진다. 이에 따라 TMCs 박막의 성장에는 전이금속(M)과 칼코겐(X) 등 두 물질의 전구체가 필 요하고, 반응시키는 과정도 필요하다. 이러한 기상 증착 반응은 전이금속과 칼코 겐의 소스 공급 및 반응 방법에 따라 그림 11과 같이 크게 4가지 공정으로 분류된 다. 그림 11(a)는 TMCs(MX₂) 소스를 직접 증발시켜 가열한 기판 위에 증착하는 방법으로 물리 기상 증착법(PVD, physical vapor deposition)이라고 불리며, MX₂ 소스를 직접 기화시켜 기판에 증착하기 때문에 메탈과 칼코겐의 복잡한 반 응이 불필요하여 간편하다[35-36]. 또한, MX₂ 타켓을 스퍼터(Sputter) 또는 PLD(Pulsed laser deposition)를 이용해 기판에 증착하는 방법들도 보고 되고 있다. 하지만 MX₂ 소스를 직접 기화하는 PVD 방법은 기화 과정 중 M과 X의 조성 비가 깨져 고품질의 TMCs 박막을 얻는데 한계가 있다[37-38]. 그림 11(b)의 방 법은 전이금속 전구체 파우더와 칼코겐 전구체 파우더를 각각 기화시켜 반응시 키는 일반적인 화학 기상 증착법(CVD, chemical vapor deposition)이다. 전구체 소스는 비교적 저온에서 기화시키는 한편 기판과 반응이 이루어지는 쪽에서 고 온으로 M과 X를 반응시켜 MX₂ 구조의 TMCs를 얻게 되는 방법이다.





Fig. 11. Representative Set-ups for Vapor Phase Deposition of TMCs

앞서 말한 PVD 방법에 비해 2개의 전구체를 조절해야 한다는 복잡함이 있지만 소스의 양과 온도를 조절하여 MX₂의 조성비 조절이 가능하다[39-42]. 칼코겐 결합 이 TMCs에서 결함이 되므로 조성비를 조절하는 것은 TMCs 박막 제조에 중요한 이 슈이다. 이러한 장점으로 인해 CVD 방법은 2차원 TMCs 박막을 얻는 방법으로 가 장 많은 연구가 이루어지며, 이를 개선 시도 또한 활발하다. 하지만 그림 11(b)와 같이 CVD 방법은 칼코겐과 전이금속 전구체들간 반응을 이용한 증착으로 소스-기 판 간 거리 조절과 각각 소스의 온도가 개별적으로 조절되어야 하고, 캐리어 가스 의 유량까지 고려해야 하는 등 공정 변수가 까다롭다는 단점이 있다. 또한, 기판 에 대면적 균일한 박막 증착이 어렵기 때문에 아직까지는 실제 소자의 적용과 대 면적 생산의 한계점 극복이 이루어지지 못하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나로 전이금속 전구체를 먼저 기판에 증착하고, 셀렌화 또는 황화 시키는 방법이 있다. 전이금속 전구체의 두께를 조절하여 균일한 박막을 얻을 수 있으며, 웨이퍼 스케일의 대면적 생산이 가능하다는 장점 때문에 이 방법 은 소자 제작에 필요한 대면적 문제를 해결 가능한 방법으로 관심을 받고 있 다[43-45]. 하지만 전구체로 산화 금속을 쓰는 경우에는 유독성의 H₂S 가스가 이용되기도 하며, 기판을 고온으로 가열하기 때문에 SiO₂/Si 기판의 SiO₂ 물질 이 손상되기도 한다. 따라서, 공정 중 발생하는 기판의 손상을 막기 위해 박



막을 다른 기판에 전사해야 한다는 번거로운 과정이 있다. 현재 대면적의 TMCs 박막에서 가장 뛰어난 성능을 보여주는 방법은 유기 금속 화학 증착 (MOCVD, metal organic chemical vapor deposition) 방법이다[46-48]. Metal organic 소스를 이용하여 반응시키는 이 방법은 상온에서 전자 이동도 30cm²/Vs의 높은 이동도를 보여주며, 4inch 크기의 웨이퍼에 균일하게 MoS₂와 WS₂를 성장해냈다[47]. 하지만 MOCVD 방법은 Metal organic 소스가 필요하며, 다른 방법들과 비교할 때 공정 시간이 상대적으로 길다는 단점이 있다. 또한, 저온 공정에서 증착 속도를 증가시키는 만큼 카본(Carbon) 오염 등이 심각해 질 수 있는 등, 아직은 해결해야 할 과제들이 남아 있다.

d. 전기화학적 박리법

최근에는 전기화학적 박리법으로 벌크 MoS₂를 얇게 박리하는 방법도 발견되었 다. 그림 12와 같이 전기화학적 방법은 전기분해에 의해 용액에서 생성되는 라 디칼과 이온들을 이용하여 TMCs 물질 층간의 박리를 이용하는 방법이다. 전해질 인 황산나트륨 용액을 0.5M의 농도로 제작하고 양극에 MoS₂ 벌크 Crystal을 연 결, 음극에는 백금 전선을 연결한다. 여기에 전압을 흘려주면 용액 내에서 아⁻ 라디칼과 0₂ 라디칼, 그리고 SO₄²⁻ 이온 등이 생성되고 이들이 MoS₂ 주변에 흡착 하여 가스 방울들을 형성한다. 이로 인해 층간의 약한 반데르발스 결합은 기포 들에 의해 깨지고 벌크 MoS₂는 얇은 층들로 나뉘게 된다. 이렇게 분해된 MoS₂가 섞인 용액을 기판으로 건져내고 열처리를 진행하면 기판 위에 얇은 MoS₂ 박막이 형성된다[49].



Fig. 12. Electrochemical Exfoliation using Electroysis

B. 전계효과 트랜지스터

트랜지스터는 하나의 단자(게이트)를 제어하여 증폭 및 스위칭 기능을 하도록 하여 다른 두 단자(소스 및 드레인)에 흐르는 전류를 제어할 수 있는 3개의 단자(게이트, 소스, 드레인)를 갖는 소자이다. 전계효과 트랜지스터(FET, field-effect transistor) 는 게이트 전압을 제어하여 결과적인 전기장으로 소스와 드레인 사이에 흐르는 전류 를 제어하는 트랜지스터 유형이다. FET는 전류가 게이트를 통해 흐르지 않도록 방지 하는 방법에 따라 역방향 접합을 사용하는 접합 FET 또는 절연층을 사용하는 금속 산 화물 반도체 전계효과 트랜지스터와 같은 여러 유형으로 분류된다[50-51].

1. 전계효과 디바이스 특성 평가

금속과 반도체 사이의 접촉은 필수적이며, 경계면에서 장벽이 형성될 수 있다. 이 전위 장벽은 금속(qØ_M)의 일함수와 반도체의 페르미 에너지(qØ_S)의 차이에 의존한다. 전위 장벽 높이에 따라 금속-반도체 간 접합에는 쇼트키 접합 (Schottky contact, Rectifying, Blocking)과 오믹 접합(Ohmic contact, Non-Rectifying)으로 분류된다. 표 7은 N-타입 및 P-타입 반도체에 대한 에너지 밴드 다이어그램을 보여준다[52]. Schottky contact은 비선형 전류-전압 특성을 보여주며, 이는 순방향 바이어스 조건에서는 전류가 한 방향으로만 흐르는 반면, 역 바이어스 상태에서는 전류가 흐르지 않음을 보여준다. 이는 내부 전위 (qØ_i = qØ_M-qØ_S)로 인한 금속/반도체 계면에 전위 장벽(qØ_B = qØ_M-qx_S)과 공간 전하 영역이 있기 때문이다. 이 내부 전위는 활성 열평형을 유지하기 위해 전하 캐리어를 공핍시켜 반도체 내에 공핍층 두께까지 공간 전하 영역을 만들어야 한 다. N-타입 반도체의 경우, 공핍층의 두께는 계산식 (1)로 부터 얻어진다[52].

$$\chi_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_D}(\boldsymbol{\varphi}_i - V_a)} \tag{1}$$



	N-type Sen	nicondutor	P-type Semicondutor			
Thermal Equilibrium Band Diagram	Blocking $\Phi_S < \Phi_M$ E_c E_f E_r	Ohmic $\Phi_S > \Phi_M$	Blocking $\Phi_S > \Phi_M$	Ohmic $\Phi_{5} < \Phi_{M}$		
Thermal Equilibrium Charge Distribution	$\rho = \qquad $	$ \xrightarrow{\rho} x'_{d} \xrightarrow{x'_{d}} x$ Extra electrons	$ \xrightarrow{\rho} x_{d} \xrightarrow{x_{d}} x_{d} \xrightarrow{x_{d}} x$	$ \begin{array}{c} \rho \\ \text{Extra holes} \\ x'_{d} \\ \end{array} x$		
Electric Field	x_{i}	x'_d	$x_d \xrightarrow{x_d} x$	$x'_d \longrightarrow x$		
Band Diagram (Forward Bias)	$E_{fm} \xrightarrow{qV_a} V_a > 0$	E _{fm}	$E_{f_m} \downarrow $ $Q_{a} < 0$ $E_{f_m} \downarrow $ $E_{f_m} \downarrow $ $E_{f_m} \downarrow $ $E_{f_m} = E_{f_m}$	Eine Eji		
Band Diagram (Reverse Bias)	$E_{fm} \xrightarrow{QV_a} V_a < 0$	E _{jn}	qV_{a} E_{fm} f	E _{jm}		

Table 7. Diagrams for Ideal Metal-Semiconductor Schottky Diodes

여기서, N_D 는 전자 농도, ε_s 는 반도체 유전상수, V_a 는 적용 전압을 의미한다. 쇼트키 다이오드의 전류 밀도는 순방향 바이어스에서 계산식 (2)에서와 같이 계산 된다.

$$J = AA^{*} T^{2} e \chi p(\frac{q \Phi_{B}}{kT})[e \chi p(\frac{q \Phi_{a}}{\eta kT}) - 1]$$
(2)

여기서 A^* 는 Richardson 상수, T는 절대 온도, $q \mathbf{\Phi}_B$ 는 금속의 일함수와 반도체의 전자 친화력의 에너지 차, V_a 는 순방향 바이어스, η 은 방출계수이다. Non-rectifying contact은 옴의법칙에 의해 선형 전류-전압 곡선을 나타내므로 Ohmic


contact 이라고 하며, 이는 인가된 바이어스 조건하에서 전하 캐리어가 금속으로 부터 반도체로 운반되는 장벽을 무시할 수 있음을 의미한다. Ohmic contact을 정 의하는 한 가지 방법은 금속의 일함수와 반도체 페르미 레벨을 일치시키는 것이 고, 또 다른 방법은 공핍층의 두께를 얇게 함으로써 터널링 동작을 하는 것이 다. 반도체의 캐리어 농도가 매우 높으면 공핍 영역의 두께가 줄어들어 터널링 효과가 높아지고 전하 캐리어 수송이 향상된다. 일반적으로 나노 구조와 반도체 의 대부분의 접촉은 Tunneling contact이며, 반도체에서 Ohmic contact을 위해 일반적으로 반도체의 접촉 영역은 고농도로 도핑되기 때문에 터널 장벽을 얇게 함으로써 터널 확률을 증가시킨다.

2. 금속 절연체 반도체 전계효과 트랜지스터

금속 절연체 반도체 전계효과 트랜지스터의 구조는 그림 13과 같이 4가지 유형으 로 분류될 수 있다[53]. MISFET는 절연체, 활성층, 전극으로 구성되며 두개의 전극 (Source-Drain)은 반도체층과 직접 접촉하고 게이트 전극은 절연체에 의해 활성 채 널로부터 절연된다.



Fig. 13. General Thin-Film Transistor Configurations

디바이스의 구조는 디바이스의 성능뿐만 아니라 디바이스의 제작에서 발생 된 문 제와도 밀접한 관련이 있다. 각각의 구조에는 장단점이 있으며, Top-gate 구조는 국부 게이트 바이어스에 의한 게이트 전극의 어드레싱에 매우 유용하지만, 유기 반 도체는 스퍼터링 및 스핀 코팅과 같은 유전체 증착 공정에 의해 쉽게 손상되기 때문 에 제조 공정 방법의 제한이 있다.

3. MISFET 동작 메커니즘

MISFET의 동작 메커니즘은 활성 박막 전체의 저항차를 사용하여 전류를 스위칭 하는 것이다. 채널은 게이트 금속과 반도체 사이의 일함수 차이에 의해 소모되며, 전하의 축적에 의해 형성된다. 전계효과 트랜지스터와 마찬가지로 선형 영역과 포 화 영역으로 분류된다.

a. 선형 영역

MISFET의 채널은 점진적인 채널 근사를 가정하기 때문에 x는 채널에 수직인 방향, y는 채널에 평행하며 채널의 단위 면적당 캐리어 밀도는 y에 따라 다르며, 채 널의 단위 면적당 캐리어 밀도는 드레인 전위 V_D에 의해 발생하는 전위에 따라 달라진다.



Fig. 14. Cross Section of Transistor

게이트 전위가 임계 전압 V_{th} 보다 높으면 채널 내의 이동 전하 Q_I 는 계산식 (3) 을 통해 게이트 전위 V_G 와 연관된다.

$$Q_I = -C(V_G - V_{th}) \tag{3}$$

여기서, C는 게이트 절연체의 단위 면적당 커패시턴스를 의미한다. 계산식 (3) 에서 채널 전위 V는 0으로 가정하지만, 유도 전하 Q_i 는 계산식 (3)에서 다음 계산식 (4)로 대체된다.

$$Q_I = -C(V_G - V_{th} - V)$$
(4)

한편, 전류 유도 다수 캐리어는 다음 계산식으로 나타낼 수 있으며, 여기서 W는 채널 폭, μ_n은 전자 이동도, *E*_y는 y에서의 전기장을 의미한다.

$$I_D = \frac{dQ_{Total}}{dt} = \frac{d}{dt} (WLQ_I) = WQ_I \frac{dL}{dt} = WQ_I v_y = WQ_I \mu_n E_y$$
(5)

이 방정식은 확산 속도를 무시할 수 있는 것으로 간주 되는 전류 밀도 방정식의 단순화된 계산식이다.

$$J_n = \frac{I_n}{A} = q(\mu_n E + D_n \frac{dn}{dx}) = -q\mu_n n \frac{dE}{dy}$$
(6)

 $E_y = -\frac{dv}{dy}$ 와 계산식 (5)를 계산식 (6)으로 치환하면 다음과 같다.

$$I_D dy = W \mu_n C (V_G - V_{th} - V) dV$$
(7)

y=0에서 L까지, 즉 V=0에서 V_D 까지의 전류 증가분을 적분하면 드레인 전류에 대한 점진적인 채널 식을 얻을 수 있다.



$$\int_{y=0}^{y=L} I_D dy = \int_{V=0}^{V=V_D} W \mu_n C(V_G - V_{th} - V) dV$$
$$I_D = C \mu_n \frac{W}{L} [(V_G - V_{th}) V_D - \frac{1}{2} V_D^2]$$
(8)

선형 영역에서($V_D \ll V_G$),

$$I_D = C\mu_n \frac{W}{L} (V_G - V_{th}) V_D \tag{9}$$

선형 영역의 전계효과 이동도는 계산식 (10)을 사용하여 구한다.

$$\mu_n = \frac{L}{CW(V_G - V_{th})} \cdot \frac{I_D}{V_D}$$
(10)

b. 포화 영역

드레인 전위가 상승하면 드레인의 게이트 전계로 인한 캐리어 밀도가 사라지며, $V_D = V_G - V_{th}$ 이면 전자 채널은 완전히 Pinched off 드레인 전류가 포화된다. $V_D > V_G - V_{th}$ 의 경우 계산식 (9)는 더 이상 유효하지 안으며, 포화 드레인 전류는 $V_D = V_G - V_{th}$ 를 계산식 (8)로 치환하여 얻을 수 있으며, 다음과 같다.

$$I_D = \frac{C\mu_n W}{2L} (V_G - V_{th})^2$$
(11)

포화 영역에서의 전계효과 이동도는 계산식 (11)로 부터 구할 수 있다. 단순 한 단계적 채널 근사로부터의 편차는 종종 접촉 저항 효과 및 게이트 전압에 의 존하는 이동도와 관련된다. 일반적으로 전계효과 이동도의 추출은 TFT의 포화 특성을 형성하며, 특히 채널 길이가 짧아지면 선형 영역에서의 추출보다 높은 값이 된다.

4. 성능 매개 변수

전계효과 트랜지스터는 반도체 응용 소자 중 하나로 채널층에 게이트 유전체 를 통해 전계효과를 주었을 때 전위 장벽(Potential barrier)의 변화가 전자와 정공의 이동을 조절하게 된다. 이때 변하는 저항, 즉 전류 레벨의 차이에 의해 온/오프 상태를 구분할 수 있어 논리 소자 및 메모리 분야 등 널리 사용된다. 이러한 FET는 빠른 동작이 요구되며, 디바이스의 성능을 평가하는 네 가지 중 요한 매개 변수로는 이동도(Mobility), 문턱전압(Threshold voltage), 온/오프 전류 비율(On/off current ratio), SS(Subthreshold Swing)이다. 매개 변수들 은 MISFET의 전달특성($I_D - V_G$) 곡선으로부터 추출된다. 전계효과 이동도는 선 형 이동도와 포화 이동도의 두 종류로 나눌 수 있다. 먼저 $I_D - V_G$ 그래프의 기울기로부터 포화 이동도는 다음 계산식으로 계산 되어진다. 첫째, 포화 이동 도는 다음 공식에 따라 $\sqrt{I_D}$ 와 V_G 그래프의 기울기에서 계산 되어진다.

$$\mu_{sat} = \frac{2(\partial \sqrt{I_D}/\partial V_G)^2}{CW/L} \Leftarrow \sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{WC\mu_{sat}}{2L}} (V_G - V_{th})$$
(12)

선형 이동도는 상호 컨덕턴스에서 (g_m) 로 부터 유도된다.

$$\mu_{lin} = \frac{g_m}{CV_D W/L} \Leftarrow g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_G} = \frac{WC}{L} \mu_{lin} V_D \tag{13}$$

선형 이동도는 V_G 와 최대값에 따라 달라지며, 일반적으로 a-Si TFT의 경 우, 특히 채널 길이가 짧아지면 포화 이동도는 선형 이동도보다 높다. 게다 가, 2개의 이동도의 차이의 원인은 채널 내에 트랩 상태가 존재하기 때문일 수 있다. 문턱전압은 $I_D - V_G$ 그래프와 V_G 축의 기울기 교차점에서 추출되는 TFT의 턴온과 관련이 있다. 문턱전압은 유전체 벌크 트랩(Dielectric bulk trap), 채널/유전체 인터페이스 트랩(Channel/Dielectric interface trap) 및 채널과 소스-드레인 전극 사이의 접촉 저항에 의해 결정된다. 온/오프 전류 비율은 $I_D - V_G$ 전달특성 곡선에 의해 구해지며, 이상적인 트랜지스터의 경우 Off 일 때는 전류가 흐르지 않고, On 상태일 때만 전류가 흘러야 한다. 하지 만 실제 트랜지스터는 Off 상태에서 On 상태로 가는 중간에도 전류가 흐르며 이것을 Subthreshold voltage에서의 누설 전류라 한다. 이때의 $I_D - V_G$ 곡선에 서의 기울기를 Subthreshold slope이라 하며, 이는 On-Off 상태를 구별하기 위한 트랜지스터의 성능 평가로 활용된다. SS는 드레인 전류가 10배로 증가하 기 위해 인가해야 하는 게이트 전압을 의미한다. 이 값이 낮으면 게이트 전압 을 약간만 조절해도 전류의 변화가 크고 누설 전류는 작기 때문에 고성능의 트랜지스터를 나타낸다. SS는 아래의 식을 통해 구할 수 있으며,

$$SS = \frac{d V_G}{d (\log I_D)} = \ln 10 \frac{d V_G}{\ln I_D} = 2.3 \frac{KT}{q} (\frac{C_i + C_{dep}}{C_i})$$
(14)

C_{dep}은 공핍 혹은 결핍(Depletion) 영역의 커패시턴스 값이다. 여기서, q는 전자 전하, k는 볼츠만 상수, T는 온도를 의미한다. 그림 15는 MoS₂를 채널 층 으로 이용한 FET의 구조와 Transfer 특성 곡선이다[54]. MoS₂ 다층 구조를 이용하여 이동도 100cm²/Vs 이상을 얻었으며 SS=60mV/decade로 우수한 트 랜지스터를 얻을 수 있었다. 이렇게 2차원 TMCs를 통해 FET를 만들 때 높 은 이동도를 보여주며, 실리콘 소자의 단채널 효과 한계까지도 극복할 수 있을 것으로 기대되고 있다.



Fig. 15. Structure of MoS₂ TFT and Transfer $(I_D - V_G)$ Curve



Matthiessen's rule 에 따르면 총 이동도는 이동도 제한 요소들에 의한 이동도 의 병렬 합으로 나타낸다.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{impurities}} + \frac{1}{\mu_{phonon}} + \dots$$
(15)

위의 식에서 보여지듯이 이동도를 저해하는 요소는 크게 불순물(Impurities) 이나 포논(Phonon) 격자에 의한 산란 등이다. 이를 해결하기 위해서 그레인 사 이즈를 조절하고, 높은 유전율을 가진 물질을 절연체로 투입하여 높은 이동도 를 보여주는 사례들도 보고되고 있다. 또한, 전극 물질과 반도체 간 계면의 접 촉 저항은 2차원 TMCs 소자의 특성에 상당히 중요한 영향을 미친다. 전체 소 자에서 접촉 저항(Rc)가 가지는 비율은 일반적 반도체에 비해 큰 편이고, 전극 과 TMCs 간에 Ohmic contact을 만드는 것이 어려우므로, TMCs 물질의 FET 적용 에 문제점으로 등장하고 있다. 이러한 접촉 저항을 줄이는 것을 통해 고성능의 트랜지스터를 만들 수 있으므로, 접촉 저항을 줄이기 위한 연구들 또한 활발히 진행되고 있다. 전극 금속의 일함수(Work function) 차이를 이용한 쇼트키 배 리어 감소[55-56], 또는 도핑을 통한 배리어 조절[57-58], 그리고 그래핀 접촉 을 통한 Ohmic contact[46] 등 다양한 방법들이 시도되고 있다. 표 8은 디바이 스의 성능 매개변수를 결정하는 주요 요소들을 보여주고 있다.

디바이스 성능 매개변수	주요 결정 요소
이동도(Mobility)	· 채널/유전층 계면 상태 · 채널 형태·채녈
문턱전압(Threshold voltage)	· 채널/유전층 계면 · 게이트 금속/채널의 일함수 차이
온오프전류비(On/Off current ratio)	· W/L 비율 · 드리프트 이동도 · 계면 상태 · Ohmic Contact
SS(Subthreshold swing)	· 채널/유전층 계면 상태

Table 8. Determining Factors of a Device's Performance Parameters



Ⅲ. 실험방법

A. 소자 제작

2차원 층상구조의 MoSe₂는 소자에서 채널 역할이며 높은 On/Off 비율과 전자 이동 도 등 우수한 전기적 특성을 가진다[59]. 2차원 층상구조 물질들은 두께에 따른 밴 드갭 구조 조절이 가능하므로 발광소자 및 수광소자 등에 적용할 수 있는 장점이 있 다. 실험에 사용된 2차원 물질(MoSe₂, Gase, h-BN, Graphene)을 스카치테이프를 이용하여 흑연에서 Graphene을 분리해낸 방식으로 스카치테이프를 이용하여 기 판에 전사할 경우 접착제 잔류물로 인한 디바이스의 오염을 방지하기 위하여 PDMS(Polydimethylsiloxane, Dow Corning, Toray Co., Ltd.)를 사용하여 박리 하였 다. 박리 된 2차원 물질(MoSe₂, Gase, h-BN, Graphene)은 기계적 박리법을 사용하여 순차적으로 실리콘 기판 전국 위에 전사하였다. 소자 제작에 사용된 전국은 300nm 의 SiO₂로 도포된 실리콘 기판 위에 전자빔 증착(Electron-beam evaporation) 공정에 의해 증착된 50nm 티타늄(Ti) 전국을 사용하여 4단자 소자를 제작하였다. 그림 16은 Ti/Si/SiO₂ 기판의 광학 이미지로 실험에 사용된 채널의 길이와 폭은 각각 20,4m, 30,4m 및 7,4m이다.



Fig. 16. Ti/Si/SiO₂ Optical Image

그림 17은 PDMS를 사용한 2차원 물질 기반 전계효과 트랜지스터를 제작하는 공정 과정의 개략도를 보여주고 있다. 그림 18은 기계적 박리법으로 PDMS를 사용하여 전계효과 트랜지스터를 제작하는 과정을 보여주고 있으며[60], PDMS 전사 방법은 다른 전사 방법에 비해 전사 공정이 짧고 빠른 장점이 있으며, PDMS 전사 방법을 사용하여 2차원 물질들을 전사하였다. PDMS는 폴리머의 일종으로 SiO₂ 기판에 비 해 표면 거칠기가 상대적으로 크며, 따라서 얇은 재료는 PDMS에서 주름지거나 찢 어지는 경향이 있다. 슬라이드글라스에 PDMS를 부착한 후 PDMS에 벌크 상태의 2 차원 물질들을 박리하여 광학 현미경을 이용하여 PDMS에서 박리 된 물질을 x, y, z 스테이션을 통해 Ti 전극과 2차원 물질을 CCD 카메라와 연결한 모니터로 Ti 전 극 위에 전사하여 소자를 제작하였다. 스카치테이프로 2차원 물질을 전극에 전사 하면 스카치테이프에 발라져 있는 접착제의 잔여물로 소자가 오염 될 수 있으므 로 박리 및 전사 매개체로 PDMS를 제작하여 사용하였다.





Fig. 17. Schematic of 2D-based Field Effect Transistor Fabrication Using PDMS



Fig. 18. Dry Transfer Device Production Process



B. 특성 분석

1. 형상학적 분석

기계적 박리법을 사용하여 제작 된 디바이스의 형상학적 분석은 주사 전자 현 미경(SEM, scanning electron microscope) 및 원자 힘 현미경(AFM, atomic force microscopy)을 사용하여 디바이스의 형태 및 두께를 측정하였다. 그림 19는 제작된 디바이스의 형태학적 분석에 사용된 주사 전자 현미경 시스템을 보여주고 있다.



Fig. 19. Scanning Electron Microscopy(SEM; Hitachi TM-1000)

주사 전자 현미경은 전자를 이용하여 빛의 회절 한계를 극복한 전자현미경으로, 높은 공간 해상도를 가진다. 주사 전자 현미경은 Electron gun에 의해 가속되어진 전자빔을 시료 표면에 주사해서 발생하는 이차전자(SE, secondary electron)를 이 용하여 시료의 3차원적인 표면 정보, 두께 및 크기 등을 얻을 수 있다[61]. 시편 준비에 있어서는 크기나 모양에는 제한을 받지 않지만, 시편에 전도성이 있어야 한다. 그 이유는 전자빔이 비전도성 물질에 충돌하게 되면 전자가 시편에 Charging 되어 누적된 전자로 인해 이차전자가 Deflect 되어 실제 상과 다른 상 을 나타낸다. 따라서 주사 전자 현미경으로 관찰할 시편은 일반적으로 Sputtering method 방법으로 전도성 코팅재료를 이용해 시편에 코팅한다. 또한, 주사 전자 현미경은 광학 현미경에 비해 초점 심도가 2배 이상 깊고, 광범위하



게 접점을 맞출 수 있어 3차원적인 상을 얻는 것이 가능하다. 이는 전자빔이 시 료면 위를 주사 할 때 시료에서 나타나는 여러 신호 중 발생확률이 가장 높은 이차전자 또는 후방 산란 전자(Back scattered electron)를 검출하는 것으로 시 편을 관찰하는 방법에 이용한다. 따라서 주사 전자 현미경 장비는 기판 위의 복 잡한 표면구조나 적층결함, 계면 등의 분석에 유용하다.

원자 힘 현미경은 원자간의 상호작용을 통해서 시료의 표면을 측정할 수 있 는 나노미터 스케일의 고분해능 현미경이다. 그림 20은 제작된 디바이스의 두 께 측정에 사용된 원자 힘 현미경 시스템을 보여주고 있다.



Fig. 20. Atomic Force Microscopy(AFM; PSIA XE-100)

원자 힘 현미경을 사용할 때에는 캔틸레버(Cantilever)라고 불리는 미세한 막대 탐침을 사용하며 측정하고자 하는 목적, 방법에 따라 측정하는 힘이 다 르다. 원자 힘 현미경은 탐침(Probe)을 통해 시료의 표면 형태 분석이 가능하 며, 물질의 두께 또는 크기를 결정하는데 사용한다. 일반적으로 원자 힘 현미 경은 캔틸레버라는 미세한 탐침이 사용된다. 이러한 미세한 탐침이 시료에 접 근할 때 발생하는 인력과 척력에 의해 진동이 발생하고, 측정된 검출기를 통 해 표면에 이미지를 얻는다. 원자 힘 현미경은 비접촉 모드와 접촉 모드로 2 가지 측정 모드를 가지고 있으며, 비접촉 모드에서는 측정 소자와 캔틸레버가 어느 정도 떨어져 있기 때문에 척력보다는 인력이 주된 힘으로 작용하게 된 다. 접촉 모드와 달리 캔틸레버에 공진 주파수를 가하고 이러한 캔틸레버가 소자의 표면과 상호작용 하는 것을 PSPD를 통해 감지하여 이미지를 얻을 수 있다. 접촉 모드와는 달리 캔틸레버의 팁이 소자의 표면에 직접 닿는 것이 아 니기 때문에 손상의 위험이 적다. 접촉 모드는 캔틸레버의 탐침이 시료와 직 접적으로 닿기 때문에 시료의 표면과 탐침 사이에서 척력이 주된 힘으로 작용 한다. 또한, 시료의 표면과 근접한 곳에서 미세한 척력에 의해 캔틸레버가 움 직이므로 해상도가 높은 편이다.

접촉 모드를 사용하면 소자의 손상을 방지하기 위하여 부드러운 팁을 사용하 며, 접촉 모드로 측정할 때, 측정하고자 하는 소자와 팁이 너무 가까우면 2차원 물질 측정 중 손상이 될 수 있기 때문에 주로 표면이 단단한 소자를 측정 할 때 사용한다. 하지만 표면을 직접 긁어준다는 특성을 이용하여 접촉 모드를 통해 표 면의 미세 유기 잔여물을 제거해주는 물리적 클리닝 방법으로도 사용할 수 있다. 비접촉식 원자 힘 현미경은 탐침을 가까이 했을 때, 시료 사이에 작용하는 인력을 측정한다. 접촉식과 비교하였을 때, 시료의 손상은 줄이지만 거리가 멀 기 때문에 분해능은 접촉 모드 보다 낮다. 반면에 접촉식 원자 힘 현미경은 탐 침이 시료 표면에 수직하게 발생되는 척력을 측정한다. 척력은 수 나노미터 정 도로 미세하지만, 탐침이 0.01nm 수준의 미세한 움직임까지도 측정이 가능하 다. 이처럼 원자 힘 현미경은 시료의 상관없이 표면의 상태를 알 수 있으며, 본 연구에서는 박막에 대한 손상을 줄이기 위한 비접촉 모드를 이용하여 표면 의 거칠기 및 박막의 두께를 측정하였다.

2. 분광학적 분석

라만 산란은 분자의 진동에서 분자의 정보를 알아내는 분석법이며, 2차원 물질의 분석에 유용하게 사용되는 방법이다. 1928년에 C. V. Raman과 K. S. Krihann에 의하여 빛의 파장을 변화시키는 산란 현상인 라만 효과가 발견되었 다. 이들은 용액에 파란색 빛을 비추었을 때 초록색 빛이 산란 되어 나오는 것을 관찰함으로써 라만 효과를 발견했다. 라만 분광법은 물질에 빛을 조사한 후 산란 된 빛을 분석하여 물질의 특성을 확인하는 방식이다. 조사한 빛의 에 너지와 진동수가 동일하여도 물질마다 보유한 고유 진동수에 의해 산란 되는 정도가 다르다. 그림 21과 같이 산란 된 빛은 에너지에 따라 크게 세 가지로 분류된다. 입사한 빛 에너지와 방출된 빛 에너지가 동일한 경우를 Rayleigh scattering라 하고, 방출된 빛 에너지가 입사한 빛 에너지보다 큰 경우를 Anti-stokes scattering이라고 하며, 방출된 빛 에너지가 입사한 빛 에너지보 다 작은 경우를 Stokes scattering이라 한다[62-63]. Rayleigh scattering의 경우 입사한 광원의 에너지에 의해 분자가 여기 된 후 동일한 에너지의 빛을 방출하며 바닥 생태로 내려오게 된다. 반면 Stokes scattering의 경우 분자의 여기와 빛의 방출 과정에서 포논의 진동 준위만큼의 에너지 변화가 생기게 된 다. 이렇게 에너지가 변화하며 산란 되는 과정을 Raman scattering이라고 하 며 이는 각 물질의 고유 진동수에 의해 다른 특성을 갖는다. 따라서 산란 된 빛의 분석을 통해 물질의 특성을 확인하는 분광법이 라만 분광법이며, 라만 분광법을 통해 해당 물질의 구조 및 특성, 분자 상호간의 결합상태 등 분자 구조를 확인하였다[64]. 그림 22는 분광학적 분석에 사용된 마이크로 라만 시스 템을 보여주고 있다.





Fig. 21. Raman Scattering and Raman Active Mode of $TMCs(MX_2)$



Fig. 22. Micro Raman System(JASCO; NRS-5100)

3. 전기적 특성 분석

반도체 파라미터 분석기 및 프로브스테이션은 반도체 소자를 전기적으로 특성 화하는 데 사용된다. 프로브스테이션의 금속 팁에 측정 소자를 연결한 후 파라미 터 분석기에서 전기적 신호를 입력한 후, 프로브스테이션을 통하여 전기 신호가 인가되면 측정하고자 하는 출력값을 반도체 파라미터 분석기를 통하여 얻을 수 있기 때문에 반도체 파라미터 분석기 및 프로브스테이션은 연결되어 함께 사용된 다. 따라서 반도체 파라미터 분석기는 전기 신호의 입력값과 출력값을 얻을 수 있으며, 프로브스테이션은 반도체 파라미터 분석기로부터 받은 전기 신호를 소자 에 전달하거나 소자의 측정 신호를 반도체 파라미터 분석기로 전달하는 역할을 한다. 반도체 파라미터 분석기를 사용하면 다양한 전기적 특성을 측정할 수 있 다. 제작된 전계효과 트랜지스터는 상온 및 암실에 배치하고 소자의 전기적 특성 0 분석하기 위해 그림 23-24에서 보여지는 반도체 파라미터 분석기 (Semiconductor parameter analyzer) HP 4155A 및 프로브스테이션으로 구성되며, 소스(Source)-드레인(Drain)과 게이트 전극에 전압을 인가하여 전류를 변화를 측 정하였다.





Fig. 23. HP 4155A Semiconductor Parameter Analyzer





Ⅳ. 실험결과 및 고찰

A. MoSe₂ 기반 듀얼 게이트 전계효과 트랜지스터의 특성

2차원 물질을 기반으로 한 광검출기는 광범위하게 연구되고 있으며, 광응답성 측면에서 높은 성능을 보이는 것으로 보고되고 있다. 2차원 전이금속칼코겐 화합 물을 대표하는 이셀렌화몰리브덴(MoSe₂)은 광검출기등 다양한 분야에 응용할 수 있으며, 본 연구에서는 Gr/h-BN/MoSe₂ Top-gate 금속 절연체 반도체 전계효과 트랜 지스터 및 Si/SiO₂/MoSe₂ Back-gate 금속 산화물 반도체 전계효과 트랜지스터를 기 반으로 한 이종접합 구조에 대해 연구하였으며, Dual-gate MISFET 기반 광검출기 의 전기적 특성과 광전자 특성을 조사하였다. 광검출기는 SiO₂/MoSe₂ 인터페이스에 서 가장 낮은 트랩 농도로 인해 공통 Top-gate 구성을 가진 Back-gate MOSFET에 대해 우수한 전기적, 광학적 특성을 보여주었다.

1. 서언

2차원 물질인 전이금속칼코게나이드(TMCs)의 이셀렌화몰리브덴(MoSe₂)은 독특한 전기적, 기계적 특성으로 인해 차세대 나노전자공학의 유망한 반도체 로 주목받고 있다[65-68]. 2차원 물질은 상보형 금속 산화 반도체(CMOS, complementary metal oxide semiconductor) 기술을 위한 유망한 구성 요소이 다[69]. 게이트 산화물로서 이산화규소(SiO₂)의 실리콘 기반 금속 산화물 반 도체 전계효과 트랜지스터 디바이스는 Si/SiO₂ 계면에서의 오염에 노출되지 않으므로 불순물 농도가 낮아진다. 2차원 물질 기반 MISFET 디바이스 제작 및 MOSFET를 포함한 상향식 접근법을 사용하면 흡착물과 불순물로 인해 게이트 유전체와 활성층 채널 사이의 계면에서 높은 오염이 발생한다[70].

문헌의 일부 보고에서는 게이트 산화물로서 이산화규소(SiO₂)를 파릴렌-C (Parylene-C)[71], h-BN[72], 폴리스티렌(Polystyrene) 브러쉬 폴리머[73] 등의 다 른 물질로 대체하는 것에 대해 설명하였다. 본 연구에서는 활성 채널로서 다층 MOSFET을 갖춘 Dual-gate MISFET 기반 광검출기를 제작하여 Dual-gate MISFET의 전기적 특성에 대한 게이트의 유전체 특성의 영향을 조사하였으며, Si/SiO₂/MoSe₂ Back-gate 디바이스에서 높은 드레인 전류 특성을 보여주었다. 또한, 드레인 전류는 Si/SiO₂/MoSe₂ Back-gate 및 Gr/h-BN/MoSe₂ Top-gate 모 두에서 히스테리시스 특성을 보였으며, Top-gate MISFET 구조에서는 더 강한 히스테리시스를 보였다. 이는 h-BN/MoSe₂ 계면에서의 트랩 효과로 인한 것일 수 있으며, 플로팅 게이트 구성에서 Dual-gate MISFET 기반 광검출기의 광전 자 특성을 조사하였다. 광검출기는 각각 약 58AW⁻¹과 2.36×10¹¹cmHz^{1/2}W⁻¹의 광응 답성(responsivity) 및 비검출성(specific detectivity)의 값을 보였으며, Back-gate MOSFET 구조에서는 각각 약 314AW⁻¹과 2.2×10¹²cmHz^{1/2}W⁻¹로 광응답성과 비검출성이 향상 된 값을 확인하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 2차원 물질(MoSe₂, h-BN, Graphene)은 HQ graphene에서 구매 하였으며, 스카치테이프를 이용하여 흑연에서 Graphene을 분리해낸 방식으로 스카치테이프를 이용하여 기판에 전사할 때 접착제 잔류물로 야기되는 디바 이스의 오염을 방지하기 위하여 PDMS를 사용하였다. PDMS는 투명하고 유연하 기 때문에 2차원 물질을 박리하거나 전사하는데 사용하기 적합하다. 박리 된 2차원 물질 MoSe₂(33nm), h-BN(181nm), Graphene(42nm)은 기계적 박리법을 사 용하여 Ti/SiO₂/Si 디바이스의 4개의 티타늄(Ti) 금속 접점에 순차적으로 전 사하였다. Silicon oxide(SiO₂, 300nm)/Si(doped p+, resistivity: < 0.005요 cm)는 저압화학증착법(LPCVD)에 의해 증착되었다. 전극으로 사용된 Ti(50nm) 는 전자빔 증착 장치로 증착되었으며, 그림 25-26은 MoSe₂, h-BN, Graphene 의 광학 이미지를 보여주고 있으며, PDMS를 사용하여 박리 및 전사하였다. 박리 된 2차원 물질은 그림 26과 같이 티타늄(Ti) 전극에 PDMS를 사용하여 Dry-transfer Processing을 통해 Top-gate로 사용할 전극을 제외하고 2개 또 는 3개의 Ti 전극 위에 MoSe₂ 물질을 전사하였다. MoSe₂ 물질을 전사한 다음 h-BN을 전극 위에 전사하며, 이때 4단자 전극 전체를 덮을 수 있도록 전사를 진행하였다. 4단자 전극을 덮는 이유는 Top-gate 물질로 전사될 Graphene과 채널 형성을 위한 MoSe₂와의 직접적인 컨텍을 방지하기 위함이며, 또한, High-k 물질인 h-BN을 게이트 절연막으로 사용하기 위함이다. 채널의 길이와 폭은 각각 30㎞ 및 7㎞이며, MoSe₂ 플레이크의 활성 영역은 0.313×10⁻⁴cm² 로 확인하였다.





Fig. 25. Exfoliated Two-Dimensional Material using PDMS



Fig. 26. Dual-gate Optical Image of Device Fabrication Process

제작된 디바이스는 소자의 불순물을 제거하고 금속과의 접촉 상태를 개 선 시키기 위해 급속 열처리 장비로 400℃에서 2시간의 열처리를 진행하였 다. 형태 및 층 두께는 주사 전자 현미경(SEM; Hitachi TM-1000) 및 원자 힘 현미경(AFM; XE-200, PSIA Corp.)을 사용하여 측정하였다. 라만 분광계 (JASCO, NRS-5100) 장비를 사용하여 2차원 물질(MoSe₂, h-BN, Graphene)들의 라만 피크를 확인하였다. 그림 27에서는 AFM 이미지를 보여주고 있으며, AFM 측정을 통해 전극 위에 전사 된 2차원 물질(MoSe₂, h-BN, Graphene)들의 두께를 확인할 수 있었으며, 각각 32nm, 181nm, 42nm 정도의 두께를 확인하였다.





(b) AFM Image of MoSe₂



x1.0k

(a) SEM Image and AFM Measurement



(c) AFM Image of h-BN



1:42nm

Distance[#]





그림 28에서는 MoSe₂, h-BN, Graphene의 SEM 이미지를 보여주고 있으며, MoSe₂, h-BN, Graphene을 각각 선으로 표시하였다.



Fig. 28. SEM Image Depicting 2D Materials

그림 29에서는 제작된 디바이스의 개략도를 보여주고 있으며, 박리 된 2 차원 물질 MoSe₂(33nm), h-BN(181nm), Graphene(42nm)은 기계적 박리법을 사용 하여 Ti/SiO₂/Si 디바이스의 4개의 티타늄(Ti) 금속 접점에 순차적으로 전사 하였다.



Fig. 29. Schematic of Dual-gated MISFET Device

2차원 물질(MoSe₂, h-BN, Graphene)의 라만 분광 측정에는 532nm 레이저를 사용하여 여기(Excitation) 시킨 후 산란 된 빛의 파장 변화 및 강도(Intensity) 를 CCD 검출기로 측정하여 분자의 진동에너지 구조를 스펙트럼으로 얻을 수 있 다. 특정 파장의 레이저를 샘플에 조사함으로써 발생 되는 라만 산란을 이용, 산란 된 빛 중 레일리 산란에 비해 Stokes/Anti-stokes 산란이 얼마만큼 변이 되었는가를 통해 해당 물질의 구조와 특성, 분자 상호간의 결합상태 등 분자 구조를 확인할 수 있다. 그림 30은 2차원 물질(MoSe₂, h-BN, Graphene)과 헤테 로 구조의 라만 분광법에 의한 특성 평가를 보여주고 있으며, 약 1587cm⁻¹ 및 2722cm⁻¹의 라만 시프트에서 관찰된 2개의 피크는 각각 그래핀의 G 및 2D 밴드 에 해당하며[74], 약 960cm⁻¹ 및 1372cm⁻¹, 244cm⁻¹ 에서 관찰된 피크는 각각 Si 기판 및 h-BN의 E_{2g}^{high} , MoSe₂의 A_{1g} 에 해당한다[75]. 라만 측정을 통해 고 유한 라만 피크와 일치함을 확인할 수 있었다.





Fig. 30. Corresponding Raman Spectroscopy Characterization of 2D Materials

그림 31에서는 접촉 전의 MISFET 디바이스의 밴드 구조를 보여주고 있으 며, 에너지 밴드갭과 일함수는 P-Si[76-77]의 경우 각각 1.1eV 및 4.9eV, 다 층 MoSe₂의 경우 1.55eV 및 5.1eV이며[78-79], 그래핀의 일함수는 4.52eV이 다[80]. SiO₂와 h-BN의 전자 친화력은 각각 0.9eV와 2.0eV이다[81-82]. 접촉 후, 디바이스는 MTL MoSe₂/h-BN 및 MTL MoSe₂/SiO₂ 계면에서 전자의 축적을 나 타낸다. 디바이스의 전기 및 광전자 특성화는 HP 4155A(Hewlett Packard) 반도체 파라미터 분석기를 사용하여 측정하였다. 또한, 디바이스의 전기적 및 광전자적 특성은 532nm의 레이저 조사 파장 및 0.015 ~ 13.95 에의 출 력에서 측정하였다.



Fig. 31. Band Structure of Device Before and After Contact



3. 결과고찰

제작된 Dual-gate MISFET 디바이스는 다양한 분극 조건하에서 전기적으로 특성 화 되었으며, 그림 32는 N 채널 축적 모드 MISFET를 나타낸다[83]. Back-gate 전압과 Top-gate 전압의 값은 10V 단위로 -40V에서 +40V의 전압을 인가하여 전 류 변화를 측정하였다. 디바이스는 쇼트키 M-S 동작을 보였으며, 이는 티타늄 전 극과 MoSe₂ 플레이크 사이의 오믹 접촉이 불충분하기 때문일 수 있으며, 접촉 저 항은 게이트 전압이 증가함에 따라 감소하였다. Back-gate MOSFET의 경우, 디바 이스는 더 높은 드레인 전류를 나타냈으며, Back-gate MOSFET와 Top-gate MISFET의 측정된 드레인 전류값의 차이는 SiO₂/MoSe₂와 h-BN/MoSe₂의 계면에서의 계면 조건의 차이에 기인 할 수 있다.



(a) Floating Top Gate





(c) Floating Back Gate

(continued on next page)





디바이스의 광전자 특성을 관찰하기 위해 암실에서 측정을 진행하였으며, MISFET의 I_{DS} - V_{DS} 특성은 그림 33에 나타내었다. 드레인 전류는 레이저 출력의 증가 및 광 발생 캐리어의 수가 증가함에 따라 증가하였다[84].

광전류(Photocurrent)는 빛을 조사한 상태에서 측정된 전류의 크기와 어두운 상태에서 측정된 전류의 크기의 차로 정의된다. 광전류는 다음의 계산식 (16)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$I_{bh} = I(light) - I(dark)$$
(16)

광응답성(Photoresponsivity)은 식 $R_{\lambda} = I_{ph}/P$ 를 사용하여 계산하였으며, 이 식에서 P는 레이저 출력을 의미한다. 비검출성은 다음의 계산식 (17)을 사용하여 계산되어 진다[85].

$$D^* = R_{\lambda} \times (A)^{0.5} / (2eI_{dark})^{0.5}$$
(17)

여기서 e는 기본 전자의 전하, A는 MoSe₂ 플레이크의 유효 면적을 의미한다.





Fig. 33. Dependence of Drain Current on Drain-Source Voltage at Different Values of Laser Power

그림 34는 레이저 출력의 다양한 값에서 드레인-소스 전압의 함수로서의 광응 답성을 보여준다. 광응답성은 드레인-소스간 전압이 증가함에 따라 증가하였으 며, 10V의 드레인-소스 전압에서 약 58AW⁻¹의 최대값을 확인하였다.

그림 35(a), (b), (c) 그래프는 광전류, 광응답성, 비검출성을 보여주고 있 다. 광응답성은 드레인-소스 간 전압이 증가함에 따라 증가하였으며, 드레인-소 스 간 전압 10V에서 최대값은 약 58AW⁻¹이었다. 그림 35(a)에서 보듯이, 광전류 는 *I_{ph}∝ P^a* 방정식에 따라 레이저 출력이 증가함에 따라 증가하였으며, 여기서, 지수 α는 드레인-소스 전압의 다양한 값에서 계산되었다. 레이저 출력의 함수 로서 광전류의 비선형 의존성은 표면 및 계면 트랩으로부터의 긴 수명 캐리어로 인한 포토게이팅 효과에 해당하며[86-88], 지수 α는 거의 일정한 값을 가지며 인가된 드레인-소스 전압과 무관하다.





Fig. 34. Dependence of Photoresponsivity on Drain-Source Voltage at Different Values of Laser Power



(continued on next page)





(c) Specific Detectivity

Fig. 35. Dependence on the Laser Power at Different Values of Drain-Source Voltage

트래핑 효과에 대한 게이트 유전체 특성의 영향을 설명하기 위해 그림 36과 같이 4개의 구성으로 Dual-gate MISFET의 전달 특성을 측정하였다. 그림 36(a) 는 플로팅 Top-gate를 갖는 Back-gate MOSFET, 그림 36(b)는 공통 Top-gate를 갖는 Back-gate MOSFET, 그림 36(c)는 플로팅 Back-gate를 갖는 Top-gate MISFET, 그림 36(d)는 공통 Back-gate를 갖는 Top-gate MISFET의 전달 특성을 보여주고 있다. 전달 특성에서 관찰된 히스테리시스는 트래핑 효과에 해당하며 [89-91], Top-gate MISFET 구성의 경우 h-BN/MOSFET 인터페이스에서 트랩 효과 로 인해 히스테리시스 폭이 증가하였다[92]. 또한, 공통 Top-gate 구성의 Back-gate MOSFET의 경우 히스테리시스 폭은 더 작았다. 따라서 공통의 Top-gate가 있는 구성의 Back-gate MOSFET가 광검출 애플리케이션에 더 적합하 며, 이러한 최적 조건하에서 광검출기의 광전자 특성을 조사하기 위해 동일한 구성으로 추가 실험을 진행하였다.



(a) Floating Top Gate

(continued on next page)





(c) Floating Back Gate

(continued on next page)





(d) Grounded Back Gate

Fig. 36. Transfer Characteristics of Dual-gated MISFET Device

광전류는 그림 37(a)-(e)에 도시된 바와 같이 드레인-소스 전압 및 레이저 출력 의 다양한 값으로 Back-gate 전압의 함수로서 측정되었다. 광전류는 약 -16V의 게이트 전압과 10V의 드레인-소스 전압에서 최대값을 나타냈으며, 이는 티타늄 접 점과 MoSe₂ 플레이크 사이의 계면에서 장벽 최소화로 인한 것일 수 있다[93].





(a) Laser Power 0.015µW



(continued on next page)





(continued on next page)




(e) Laser Power 13.95µW

Fig. 37. Gate Voltage Dependence of Back-gated MOSFET with Common Top Gate on Photocurrent at Laser Power

그림 38(a)는 드레인-소스 전압의 다양한 값에서 레이저 출력에 대한 광전류 의 의존성을 보여준다. 광전류는 레이저 출력에 비선형 의존성을 보였으며, 드 레인-소스 전압이 1V에서 10V로 증가함에 따라 지수 α는 0.21에서 0.10으로 변 화 하였다. 공통 Top-gate를 갖는 Back-gate MOSFET의 경우, 지수 α는 플로팅 게이트 구성의 MISFET에서 추정된 값보다 낮아 포토게이팅 효과가 향상되었다. 동일한 조건(V_{BG} = -16V 및 공통 Top-gate)에서 드레인-소스 간 전압(V_{DS}) 및 레 이저 출력(P)의 값을 변경하여 광응답성 및 비검출성을 측정하였다. 그림 38(b) 와 (c)는 각각 광응답성과 비검출성에 해당한다. 플로팅 게이트 구성에서의 광 응답성과 비검출성을 각각 58AW⁻¹과 2.36×10¹¹cmHz^{1/2}W⁻¹의 값에서 공통 Top-gate 구성을 가진 Back-gate MOSFET에 대해 각각 314AW⁻¹과 2.2×10¹²cmHz^{1/2}W⁻¹의 값으로 광응답성과 비검출성을 향상시켰다. 마지막으로 표 9에 나타낸 바와 같이, 이전 에 보고된 2D MoSe₂ 기반 디바이스와 비교하여 비검출성 측면에서 MoSe₂ Dual-gate MISFET 기반 광검출기의 성능을 비교하였으며, Lee et al.에 의해 보 고된 값보다 향상 된 값을 확인하였다[94].





(continued on next page)







Fig. 38. Dependence on the Laser Power at Different Values of Drain-Source Voltage

Table 9. Comparison of Figures of Merit of MoSe₂ Dual-gated MISFET-based Photodetector with other MoSe₂-based Structures

Device structure	Wavelength (nm)	Detectivity (Jones)	Responsivity (A·W ⁻¹)	Reference
MoSe ₂ Dual-gated MISFET	532	2.2×10 ¹²	314	This work
Gr/MoSe ₂ /Si	650	7.13 × 10 ¹⁰	2.7×10 ⁻³	[95]
MoSe ₂ /Ge heterojunction	1550	1 × 10 ¹¹	35	[96]
MoSe ₂ rolled-up nanomembranes	808	1.96 × 10 ¹¹	282.5	[97]
Multilayer fake	650	1.3×10 ¹²	519	[94]

B. High-k 게이트 유전체 MoSe₂ 전계효과 트랜지스터의 특성

최근, 2차원 물질은 기존의 실리콘 기반 소자의 특성을 향상시키고 전자 및 광 전자 응용 분야에 유망한 물질이다. 이셀렌화몰리브덴(MoSe₂) 물질은 우수한 전 하 이동도 및 광응답성을 가지고 있어 여러분야에 적용하기에 우수한 물질로써 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 벌크 상태의 MoSe₂를 기계적 박리법 으로 MoSe₂ 기반 전계효과 트랜지스터를 제작하였으며, 게이트 산화물인 SiO₂, Si₃N₄을 절연막으로 디바이스를 제작하여 전기적 특성을 비교 및 분석하였다.

1. 서언

2차원 물질을 대표하는 물질인 그래핀은 우수한 광학적, 전기적, 물리적 특 성에도 불구하고 에너지 밴드갭이 존재하지 않는 근본적인 한계점을 가지고 있어 트랜지스터, 태양전지, 발광다이오드와 같은 전자소자 및 광전자 소자의 반도체 활성층으로 사용하기 어려운 문제점을 가지고 있다[29,98-100].이러한 그래핀의 한계를 해결하기 위해 2차원 층상구조 반도체, 전이금속칼코겐 화합 물의 우수한 전기적 특성, 광학적 투명성과 기계적 유연성을 이용한 다양한 플랙시블 디스플레이, 전자소자, 광소자 등의 다양한 연구가 이루어지고 있 다. TMCs 물질들은 층상 구조로 분자간 결합을 하고 있다. 층간 결합은 약한 반데르발스 결합으로 이루어져 있으며, TMCs는 MX2의 화학식을 가지며 전이금속 원소, 칼코겐 원소로 Sandwich structure로 구성된다[101-102]. 최근 TMCs 중에 1~2eV의 에너지 밴드갭을 갖는 MoS₂(molybdenum disulfide), MoSe₂(molybdenum diselenide), WSe₂(tungsten disulfide), WSe₂(tungsten diselenide) 등의 다양 한 연구들이 이루어지고 있으며, 단층에서 직접천이형 밴드갭 특성과 벌크에 서 간접천이형 밴드갭 특성으로 인해 높은 온-오프 비율, 높은 전하이동도, 우수한 광응답성과 높은 양자 효율(quantum efficiency)을 갖는다. 특히 MoSe₂ 으로 제작된 트랜지스터는 10⁶이 넘는 온-오프 비율과 높은 이동도(50 ~200cm²/Vs) 등 우수한 소자 특성을 가지는 것으로 알려져 있다[103-105]. 본 연구에서는 MoSe2를 이용하여 전계효과 트랜지스터를 제작하였으며, 게이트 산화 물인 SiO₂(ε=3.9), Si₃N₄(ε=7.5)에 대한 전기적 특성을 측정하였다. 또한, 게이트 산화물에 따른 Mobility[106] 및 SS를 계산하여 이를 분석하였다.



2. 실험방법

2차원 물질 전이금속칼코겐 화합물인 이셀레화몰리브덴(MoSe₂, HQ graphene)을 전사 매체인 Polydimethylsiloxane(PDMS, Dow Corning, Toray Co., Ltd.)를 이용 하여 각각 MoSe₂/SiO₂/Si와 MoSe₂/Si₃N₄/Si에 Dry method로 전사하였다[31]. Silicon oxide(SiO₂, 300nm)/Si(doped p+, resistivity: < 0.005Ωcm) 및 Silicon nitride(Si₃N₄, 300nm)/Si는 저압화학증착법(LPCVD)에 의해 증착되었으며, 전극으 로 사용된 Ti(50nm)는 전자빔 증착 장치로 증착되었다. 제작된 MoSe₂ 디바이스는 아르곤 가스 분위기 하에서 400℃에서 2시간 동안 열처리를 진행하였다. MoSe₂ 전 계효과 트랜지스터의 전기적 특성 분석에는 HP 4155A(Hewlett Packard) 반도체 파라미터 분석기 및 Probe station을 사용하여 측정하였다. MoSe₂ 전계효과 트랜 지스터의 형태 및 층 두께는 주사 전자 현미경(SEM; Hitachi TM-1000) 및 원자 힘 현미경(AFM; XE-200, PSIA Corp.)을 사용하여 측정하였다.

3. 결과고찰

그림 39-40은 SiO₂와 Si₃N₄의 게이트 산화물로 제작된 MoSe₂ 기반 전계효과 트랜지스터를 제작하여 두께에 따른 I_{DS} - V_G의 전기적 특성을 확인하였다. 그 림 39는 다른 두께(7nm, 21nm, 63nm, 90nm)의 MoSe₂/SiO₂ 기반 전계효과 트랜 지스터에 게이트 전압 -40V에서 +40V의 전압을 인가하였으며, 드레인-소스 전 압 15V를 인가하여 전류의 변화를 측정하였다. 그림 40은 다른 두께(29nm, 36nm, 47nm, 87nm)의 MoSe₂/Si₃N₄ 기반 전계효과 트랜지스터를 제작하여 동일 한 조건하에서 전류의 변화를 측정하였다.

다양한 두께의 MoSe₂ 기반 FET는 Positive 게이트 전압에서 게이트 산화물과 MoSe₂ 사이의 계면에 전자가 축적되는 N-타입 거동을 보였으며, MoSe₂/SiO₂ 와 MoSe₂/Si₃N₄ 기반 전계효과 트랜지스터는 두께가 두꺼워질수록 측정된 게이트 전압이 Negative 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다[107]. 또한, MoSe₂의 두께가 증가할수록 드레인 전류는 증가하였으며, 전계효과 이동도(field effect mobility)는 다른 두께(7nm, 21nm, 63nm, 90nm)의 MoSe₂/SiO₂ 기반 전계효과 트 랜지스터에서 0.8cm²/Vs, 70.4cm²/Vs, 116.5cm²/Vs, 43.4cm²/Vs¹로 계산되었으며, 다른 두께(29nm, 36nm, 47nm, 87nm)의 MoSe₂/Si₃N₄ 기반 전계효과 트랜지스터에서 64.7cm²/Vs, 55.4cm²/Vs, 51.3cm²/Vs, 164.1cm²/Vs로 계산되었다. 전계효과 이동도 (μ_{FE})는 $\mu_{FE} = (dI_d/dV_G)/(L/(WC_TV_{ds}))$ 의 식을 사용하여 계산하였다. 여기서, I_d 와 V_{ds} 는 드레인-소스 전류 및 전압이며, L과 W는 채널의 길이와 폭으로 각각 20µm 와 7µm에 해당한다. 게이트 커패시턴스(C_T)는 방정식 $C_T = (C_1 \times C_2)/(C_1 + C_2)$ 를 사 용하여 측정할 수 있으며, 여기서 $C_i(i = 1, 2) = \epsilon_0 \epsilon_{ri}/d_i$ 로 d_i 는 절연체의 두께, ϵ_0 는 공기의 투과율이다. SiO₂와 Si₃N₄의 유전율은 각각 3.9와 7.5이다. dI_d/dV_G 는 전달 특성 곡선에서 계산된 기울기를 의미한다. 그림 39-40에 삽입 된 I_{DS} - V_{DS} 그래프는 선형적인 증가를 보여주며 접촉 저항의 명확한 MoSe₂ 두께 의존성을 나타내고 있 다[108]. MoSe₂ 두께의 증가에 따른 접촉 저항 감소로 인해 Charge screening 효 과로 인해 Scattering이 감소하고 전계효과 이동도의 변화를 야기시킬 수 있다.



Fig. 39. Electrical Properties of MoSe₂/Dielectrics(SiO₂) with MoSe₂-based Structures





Fig. 40. Electrical Properties of $MoSe_2/Dielectrics(Si_3N_4)$ with $MoSe_2$ -based Structures

그림 41(a), (d)는 기계적 박리법으로 SiO₂/Si와 Si₃N₄/Si에 전사된 MoSe₂ 기 반 전계효과 트랜지스터의 SEM 이미지를 보여주고 있으며, 채널의 길이와 폭은 각각 20㎞ 및 7㎞이다. 그림 41(b), (c)는 각각 MoSe₂/SiO₂/Si 기반 전계효과 트 랜지스터의 AFM 3차원 이미지와 회색선은 지형분석으로 약 21mm의 MoSe₂ 박막의 두께를 확인하였으며, 그림 41(e), (f)는 각각 MoSe₂/Si₃N₄/Si 기반 전계효과 트 랜지스터의 3차원 AFM 이미지와 회색선은 지형분석으로 약 29nm의 MoSe₂ 박막의 두께를 확인하였다. 본 연구에서는 Charge screening 효과를 최소화하기 위해 비슷한 두께의 전계효과 트랜지스터를 제작하여 비교 분석하였다.





Fig. 41. SEM and AFM Image of the Device

그림 42-43은 전계효과 트랜지스터의 I_{DS} - V_{DS}의 출력 특성으로 드레인-소스 전압 OV ~ 15V, Back-gate 전압은 -30V ~ +30V까지 5V 간격으로 전압을 인가하 여 전류의 변화를 각각 측정하였다. 전압이 낮은 영역에서도 선형적으로 증가하 였으며, MoSe₂ 박막과 드레인-소스 전극이 오믹 접합이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 또한, MoSe₂/Si₃N₄/Si 기반 전계효과 트랜지스터의 높은 유전율 값에 의해서 MoSe₂/SiO₂/Si 기반 전계효과 트랜지스터 보다 전류가 증가하는 경향을 확인하였다.





Fig. 42. The Current Versus bias Voltage Characteristics of the MoSe₂/Dielectrics(SiO₂) Field-effect Transistor at Various Fixed Gate Voltage Values



Fig. 43. The Current Versus bias Voltage Characteristics of the MoSe₂/Dielectrics(Si₃N₄) Field-effect Transistor at Various Fixed Gate Voltage Values

그림 44-45는 MoSe₂/Si₀2/Si 기반 전계효과 트랜지스터 및 MoSe₂/Si₃N₄/Si 기반 전계효과 트랜지스터의 드레인-소스 전압에 따른 I₀ - V₆의 전달 특성을 보여주 고 있다. 일정 범위의 드레인-소스 전압(1V, 5V, 10V, 15V)과 Back-gate 전압 (-40V ~ +40V)을 인가하여 전류의 변화를 측정하였다. 게이트 전압이 Positive 전압으로 커지면 이동할 수 있는 전하량이 증가하여 전류가 많이 흐르지만 게이 트 전압이 Negative 전압이 되면 이동할 수 있는 전하가 없기 때문에 전류가 거 의 흐르지 않는 것을 확인하였다. 또한, 그림 44에서 MoSe₂/Si₀2/Si 기반 전계효 과 트랜지스터의 드레인-소스 전압을 각각 1V, 5V, 10V, 15V 전압을 인가했을 때 전류 온-오프 비는 각각 약 6.32 × 10², 3.49 × 10³, 8.04 × 10³, 1.22 × 10⁴으로 계 산되었으며, 그림 45에서 MoSe₂/Si₃N₄/Si 기반 전계효과 트랜지스터의 드레인-소 스 전압을 각각 1V, 5V, 10V, 15V 전압을 인가했을 때 전류 온-오프 비는 각각 약 5.92 × 10¹, 5.88 × 10², 5.27 × 10², 1.27 × 10⁴으로 계산되었다. 이는 게이트 산 화물과 상관없이 드레인-소스 전압이 증가할수록 전류 온-오프 비가 증가하는 것 을 확인할 수 있었다.





Fig. 44. Gate Voltage Dependence of the Drain Current at Different Values of the Drain-Source Voltage of our MoSe₂/Dielectrics(SiO₂) Field-effect Transistor



Fig. 45. Gate Voltage Dependence of the Drain Current at Different Values of the Drain-Source Voltage of our MoSe₂/Dielectrics(Si₃N₄) Field-effect Transistor



그림 46은 21nm 두께의 MoSe₂/SiO₂ 전계효과 트랜지스터 및 29nm 두께의 MoSe₂/Si₃N₄ 전계효과 트랜지스터에 게이트 전압(-40V ~ +40V), 드레인-소스 전 압 15V를 인가하였을 때 MoSe₂/SiO₂ 기반 전계효과 트랜지스터의 전계효과 이동 도(µ_{FE})는 70.4cm²/Vs, 문턱전압(V_{th}) -8V, SS(Subthredshold Swing) 1.43V/dec, I_{On/Off} 비율 1.22 x 10⁴으로 계산되었다. 또한, MoSe₂/Si₃N₄ 기반 전계효과 트랜지 스터의 전계효과 이동도(µ_{FE})는 64.7cm²/Vs, 문턱전압(V_{th}) 3V, SS(Subthredshold Swing) 2.55V/dec, I_{On/Off} 비율 1.27 x 10⁴으로 계산되었다. 게이트 산화물로서 SiO₂ 가 아닌 High-k 유전체 재료를 사용할 경우 문턱 전압의 감소와 더불어 I_{On/Off} 비율이 개선된 것을 확인하였다[109].



Fig. 46. Gate Voltage Dependence of the Drain Current at MoSe₂/Dielectrics(SiO₂, Si₃N₄) Field-effect Transistor



C. GaSe 기반 듀얼 게이트 전계효과 트랜지스터의 특성

2차원 전이금속칼코겐 화합물(TMCs)은 차세대 전자장치 및 센서의 유망한 물 질이며, 광검출기에 대한 연구가 이루어지고 있다. N-타입 2차원 물질은 P-타입 2차원 물질의 정공 이동도에 비해 전자 이동도가 높기 때문에 광검출 응용 분야 에 더 적합하다. 그러나 PN, 쇼트키 광다이오드(Schottky photodiode) 및 헤테 로 구조 기반 광검출기 등의 복잡한 구조를 구현하려면 P-타입 2차원 물질의 전 자 및 광전자 특성이 필요하다. 본 연구에서는 Si/SiO₂/GaSe Back-gate 기반 금 속 산화물 반도체 전계효과 트랜지스터 및 Gr/h-BN/GaSe Top-gate 기반 금속 절연체 반도체 전계효과 트랜지스터을 제작하여 디바이스의 형태학적, 전기적 및 광전자적 특성을 연구하였으며, 디바이스는 우수한 전기적 조정 가능성과 함 께 P-타입의 거동을 확인하였다.

1. 서언

전계효과 트랜지스터는 상보형 금속 산화 반도체의 구성 요소이다[69]. 실 리콘 기반의 FET는 실리콘 산화물 절연층의 불순물 농도가 낮아 전자장치 에 적합하다. 그러나 지난 10년 동안 2차원 물질은 차세대 전자장치 및 센 서에 대한 유망한 특성을 보였으며[110-112], 이전 연구에서 2차원 물질을 사용하여 Gr/h-BN/MoSe2 및 Si/SiO2/MoSe2의 디바이스를 제작하여 전기적 특성 및 광전자 특성을 연구하였다[113]. 최근, 2차원 물질을 채널로 사용하는 FET 에 대해 Zhang et al은 Memtransistor를 제안하였다[114]. Memtransistor는 Memristor와 Transistor의 합성어로 2단자 Memristor의 스위칭 특성과 3단자 Transistor의 게이팅 효과가 결합 된 독특한 특성을 가지며[115-117], 2차 원 물질인 MoS₂는 수평구조에서도 저항성 스위칭 특성이 나타나 Memtransistor 로 적용할 수 있다[118]. 본 연구에서는 2차원 물질인 P-타입의 갈륨 셀레나이 드 기반의 새로운 헤테로 구조를 제작하였다. 다층 GaSe는 기계적 박리를 사용하여 P-타입의 산화 실리콘 기판에 증착하였으며, 제작된 GaSe 디바이 스를 h-BN으로 덮고, 다층(MTL, multi-layer transfer and lamination) 그 래핀을 Top-gate 접점으로 사용하였다. GaSe 기반 Dual-gate MISFET의 전기 적 특성 및 광전자 특성에 대한 게이트의 유전 특성 SiO₂ 및 h-BN의 영향을 연구하였다. 제작된 디바이스는 두 구성(Back-gate Si/SiO₂/GaSe 및 Top-gate Gr/h-BN/GaSe) 모두에서 Back-gate 및 Top-gate 전압 및 히스테리시스에 대 한 높은 의존성과 함께 명확한 P-타입의 동작을 보여주었다. 이러한 실험 결과는 큰 전류 히스테리시스로 인해 GaSe 기반의 MISFET는 memtransistor 로 적용 가능성을 확인하였으며, 제작된 디바이스(Back-gate Si/SiO₂/GaSe 및 Top-gate Gr/h-BN/GaSe)의 최대 광응답성은 각각 90mAW⁻¹ 및 80mAW⁻¹으로 P-타입 광검출기로 사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 2차원 물질(Gase, h-BN, Graphene)은 HQ graphene에서 구매 하였으며, 스카치테이프를 이용하여 흑연에서 graphene을 분리해낸 방식으로 스카치테이프를 이용하여 기판에 전사할 경우 접착제 잔류물로 인한 디바이 스의 오염을 방지하기 위하여 Polydimethylsiloxane를 사용하였다. 박리 된 2차 원 물질(Gase, h-BN, Graphene)은 기계적 박리법을 사용하여 순차적으로 전사하였 다. Silicon oxide(SiO₂, 300nm)/Si(doped p+, resistivity: < 0.005요cm)는 저압화 학증착법에 의해 증착되었으며, 전극으로 사용된 Ti(50nm)는 전자빔 증착 장 증착되었다. 형태 및 층 두께는 주사 전자 현미경(SEM; Hitachi 치로 TM-1000) 및 원자력 힘 현미경(AFM; XE-100, PSIA Corp.)을 사용하여 측정하 였다. 라만 분광계(JASCO, NRS-5100) 장비를 사용하여 2차원 물질(Gase, h-BN, Graphene)들의 라만 피크를 확인하였다. 또한, 디바이스의 전기 및 광 전자 특성화는 HP 4155A(Hewlett Packard) 반도체 파라미터 분석기를 사용하 여 측정하였다. 여기서 레이저 출력의 값은 1.147₩ ~ 9.0₩로 고정하였고, 레이저의 파장과 스폿 직경은 각각 532nm와 20㎞였다. 그림 47에서는 기계적 박리법을 사용하여 제작된 제작 공정 및 Gase, h-BN, Graphene이 증착된 광 학 이미지를 보여주고 있다. 그림 48에서는 Gase, h-BN, Graphene의 주사 전자 현미경(SEM) 이미지를 보여주고 있으며, 각각 점선으로 표시하였다.





Fig. 47. Optical Images Depicting the Fabrication Process



Fig. 48. SEM Image of the Dual-gate Graphene/h-BN/GaSe MISFET

그림 49(a), (b), (c)는 2차원 물질(Gase, h-BN, Graphene)과 헤테로 구조의 라만 분광법에 의한 특성 평가를 보여주고 있다. 그림 49(a)에서 관찰된 약 1587cm⁻¹ 및 2722cm⁻¹의 피크는 각각 그래핀의 G 및 2D 밴드에 해당한다[119]. 그림 49(b)에 나 타낸 바와 같이, 약 1372cm⁻¹에서 관찰된 피크는 h-BN의 E_{2g}^{high} 에 해당한다[120]. GaSe는 131.7cm⁻¹(A_{1g}^1), 206.1cm⁻¹(E_{2g}^2), 252.2cm⁻¹(E_{2g}^1), 307.9cm⁻¹(A_{2g}^1)의 라만 피크를 가 지고 있으며[121], 라만 측정을 통해 고유한 라만 피크와 일치함을 확인하였다. 그 림 49(d), (e)는 AFM 이미지를 보여주고 있으며, 그림 49(d)의 선은 그래핀의 단면 을 그림 49(e)의 선은 각각 h-BN 및 GaSe의 단면을 보여준다. AFM을 사용하여 Gase, h-BN, Graphene의 두께를 확인하였으며, 두께는 각각 110nm, 160nm, 80nm이다.



Fig. 49. Raman Spectroscopy Characterization and AFM Images of the Device



3. 결과고찰

Si/SiO₂/GaSe 기반 MOSFET 및 Gr/h-BN/GaSe 기반 MISFET의 전기적 특성 및 플 로팅 Top-gate, 플로팅 Back-gate, 접지 Top-gate, 접지 Back-gate에 대한 I_{DS} - V_{DS} 특성은 그림 50에서 보여주고 있다. 소자는 상부 게이트가 접지되었 을 때 가장 낮은 전기적 성능을 나타내었고, h-BN 절연체를 통한 터널링 효과로 인한 다층 그래핀과 GaSe 사이의 누설 전류 때문일 수 있다.





(a) Floating Top Gate



(continued on next page)





(c) Grounded Top Gate





Fig. 50. I_{DS} - V_{DS} Characteristics of our Device

광전류(Photocurrent)는 빛을 조사한 상태에서 측정된 전류의 크기와 어두운 상 태에서 측정된 전류의 크기 차로 정의된다. 광전류는 $I_{ph} = I(light) - I(dark)$ 의 식 을 사용하여 계산할 수 있다. 게이트 전압이 없는 경우의 소자의 광전자 특성을 그림 51에서 보여주고 있으며, 광전류는 방정식 I(light) - I(dark)에 따라 측정되며 그림 52에 나타내었다. 도시된 바와 같이, 드레인-소스 전류와 광전류는 활성층의 광생성 캐리어로 인해 레이저 출력에 따라 증가하였다.



Fig. 51. Dependence of the Drain Current under Dark Conditions and Various Values of the Laser Power





Fig. 52. Dependence of the Photocurrent on the Laser Power at Different Values of Drain-Source Voltage

그림 53은 게이트 전압 0V, 드레인-소스 전압 0.1V 및 5V에서의 레이저 출력 에 따른 I_{0n}/_{off}의 실시간 드레인 전류 변화를 보여준다. 광검출기의 동적 응답 시간은 식 $I = I_0(1 - e^{-t/t_r})$ 의해 구해지며, 여기서 t_r 은 상승 단계에 대한 시간 상수이다[122]. 상승 시간은 그림 53(c)와 같이 2.5초로 확인하였다. 또한, 그 림 53(c)에서 소자의 감쇠 시간이 길다는 것을 보여주며, 이는 SiO₂/GaSe 및 GaSe/h-BN 계면에서의 트래핑 및 디트랩핑으로 인한 것일 수 있다.







(continued on next page)





(c) Drain Current Variation when the Device is Excited by a Laser Power of 9^{JM} showing the Fitting Curve and Rise Time

Fig. 53. Drain Current Variation as Function of Time under Various Laser Powers and Polarization Voltages





(b) Floating Back Gate

(continued on next page)





(d) Grounded Back Gate

Fig. 54. Transfer Characteristics at Different Values of the Laser Power for the Dual-gated MISFET Device

광응답성은 식 $R_{\lambda} = I_{ph}/P$ 로 계산하였는데, P는 레이저 출력을 의미한다. 그림 55(a), (b)는 Si/SiO₂/GaSe 기반의 MOSFET 및 Gr/h-BN/GaSe 기반의 MISFET의 레 이저 출력에 따른 광응답성을 보여주고 있다. 광응답성의 최대값은 1.147₩의 레이저 출력에 대해 Back-gate Si/SiO₂/GaSe 및 Top-gate Gr/h-BN/GaSe에서 각 각 90mAW⁻¹ 및 80mAW⁻¹으로 계산되었다. 이 값은 거의 동일한 레이저 출력에서 이 전에 보고된 2D GaSe 기반 FET와 비교하여 비슷한 결과를 확인하였다[123]. 광응 답성은 GaSe 층의 정공 축적으로 인해 게이트 전압이 -40V로 감소하면 증가하고 레이저 출력이 증가함에 따라 감소하였다. 이것은 트래핑 효과를 확인시켜 주었 으며[89], 광전류는 레이저 출력 그래프에 비해 방정식 $I_{ph} = bP^{\alpha}$ 에 의해 계산될 수 있다. 여기서 α는 무차원 지수이고 b는 광검출기의 응답성과 관련된 파라미터 이다[124]. Back-gate MOSFET와 Top-gate MISFET에 대해 그림 55(a) 및 (b)의 삽입도에 표시된 것처럼 지수 α는 게이트 전압의 각 값에 대해 계산되었다. Back-gate MOSFET 및 Top-gate MISFET에서 게이트 전압이 -40V로 감소할 때 지 수 α는 각각 0.19와 0.18로 감소하였다. 이것은 포토게이팅이 주요 메커니즘임을 보여주며, 지수 α는 게이트 전압이 40V로 증가했을 때 Top-gate MISFET에서 1의 값을 나타내었고, 이것은 광전도 효과에 해당하는 광전류와 레이저 출력의 선형 관계를 보여준다[125].





(b) Photoresponsivity of Gr/h-BN/GaSe based MISFET

Fig. 55. Variation of the Photoresponsivity as Function of the Laser Power

그림 56은 디바이스의 Dual-gate 효과를 연구하기 위해 Si/SiO₂/GaSe 기반 의 MOSFET에 다양한 Top-gate 전압 및 Gr/h-BN/GaSe 기반의 MISFET에 다양 한 Back-gate 전압을 인가하여 전달 특성을 측정하였다. 두 게이트 전압(TG 및 BG)을 낮춤으로써 드레인 전류가 증가하였으며, 디바이스는 잘 작동하였다. 또한, 그림 56(b)에서 -40V의 Back-gate 전압에서 Positive 값으로 전류가 증 가하는 것이 관찰되었으며, 이는 전자를 계면 SiO₂/GaSe로 부터 활성층으로 밀 어내고 전기 수송에 기여하는 자유 캐리어를 생성함으로써 일어날 수 있다.

그림 56(a)와 (b)에서 전계효과 이동도(μ_{FE})는 μ_{FE} = (dI_d/dV_G)/(L/(WC_TV_{ds})) 의 식을 사용하여 계산하였다[110]. 여기서, I_d 와 V_{ds}는 드레인-소스 전류 및 전압이며, L과 W는 채널의 길이와 폭으로 각각 30µm와 7µm에 해당한다. 게이 트 커패시턴스(C_T)는 방정식 C_T = (C₁×C₂)/(C₁+C₂)를 사용하여 측정할 수 있 으며, 여기서 C_i(i=1,2) = ε₀ε_{ri}/d_i로 d_i는 절연체의 두께,ε₀는 공기의 투과율이 다[126]. SiO₂와 h-BN의 유전율은 각각 3.9와 3.4이다[127-128]. dI_d/dV_G는 그 림 56(a) 및 (b)의 전달 특성 곡선에서 계산된 기울기를 나타내며, 그림 57(a) 와 (b)는 -40V의 게이트 전압이 인가될 때 Back-gate 및 Top-gate 구성에서 전계효과 이동도(μ_{FE})는 각각 약 0.113cm²/Vs 및 약 0.067cm²/Vs로 증가하는 것 을 확인하였다.





(b) Gr/h-BN/GaSe based MISFET

Fig. 56. Transfer Characteristics of Dual-gated Devices







Fig. 57. Corresponding Field-effect Mobilities

마지막으로 그림 58에서는 4개의 구성으로 Dual-gate 디바이스의 전달 특성 의 Sweep 모드를 측정하였다. 모든 구성에서 히스테리시스가 관찰되었으며 이는 트래핑 효과에 해당한다. 디바이스의 I_{0n}/_{off} 비율은 그림 58(a)에서 3.4×10⁴, 그 림 58(b)에서 1.4×10⁴, 그림 58(c)에서 1.6×10⁴, 그림 58(d)에서 0.4×10⁴으로 계산되었다. I_{0n}/_{off} 비율은 게이트 접점 중 하나가 접지되면 전기장이 전기 전송 방향(접지된 게이트와 드레인 접점 사이)에 수직으로 생성되어 드레인 전류에 영 향을 미치기 때문에 감소한다. 그림 58에서 관찰된 히스테리시스와 그림 53에서 긴 감쇠 시간은 제작된 디바이스가 멤트랜지스터로서 잠재적으로 응용할 수 있 음을 보여주었으며, 메모리 장치로서의 성능을 확인하려면 추가 연구가 진행되 어야 한다. 마지막으로 표 10에 나타낸 바와 같이, 이전에 보고된 2D Gase 기반 FET와 Gase Dual-gate MISFET 기반 광검출기의 성능을 비교하였다. I_{0n}/_{off} 비율 은 이전 보고된 FET 값보다 높은 값을 확인하였으며, 광응답성 비슷한 값을 확인 하였다.



(a) Floating Top Gate

(continued on next page)





(continued on next page)





(d) Grounded Back Gate

Fig. 58. Transfer Characteristics of the Dual-gated MISFET Device

Table 10. Comparison of Figures of Merit of GaSe Dual-gated MISFET-based Photodetector with other GaSe-based Structures

Device structure	Wavelength (nm)		Responsivity (mA·W ⁻¹)	Reference
GaSe Dual-gated MISFET	532	10 ⁴	90	This work
GaSe Back FET	532	10 ³	90	[123]

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는, 2차원 물질 기반 Dual-gate 금속 절연체 반도체 전계효과 트랜 지스터의 전기적, 광학적 특성을 중심으로 기술하였으며, 논문의 3가지 실험을 통하여 각각 2차원 물질 기반 Dual-gate의 특성에 대해 설명하였다. 기계적 박리 법을 통하여 2차원 물질 기반의 금속 절연체 반도체 전계효과 트랜지스터 및 금 속 산화물 반도체 전계효과 트랜지스터의 이종접합 구조의 디바이스를 제작하여 광검출기의 전기적 및 광전자 특성화 연구를 수행하였다. 또한, N-타입의 2차원 물질을 이용하여 전계효과 트랜지스터(FET)를 제작하였으며, 게이트 산화물인 SiO₂(ε=3.9), Si₃N₄(ε=7.5)을 절연막으로 전계효과 트랜지스터의 전기적 특성을 비교 분석하였다.

첫째, MoSe₂ 기반 Dual-gate 전계효과 트랜지스터의 특성 연구에서는 활성 채 널로서 다층 MOSFET를 갖춘 Dual-gate MISFET 기반 광검출기를 제작하여 Dual-gate MISFET의 전기적 특성에 대한 게이트의 유전체 특성의 영향을 조사하 였으며, Si/SiO₂/MoSe₂ Back-gate 디바이스에서 높은 드레인 전류 특성을 보여주 였다. 또한, 드레인 전류는 Si/SiO₂/MoSe₂ Back-gate 및 Gr/h-BN/MoSe₂ Top-gate 모두에서 히스테리시스 특성을 보였으며, Top-gate MISFET 구조에서는 더 강한 히스테리시스를 보였다. 이는 h-BN/MoSe₂ 계면에서의 트랩 효과로 인한 것일 수 있으며, 플로팅 게이트 구성에서 Dual-gate MISFET 기반 광검출기의 광전자 특성 을 조사하였다. 광검출기는 각각 약 58AW⁻¹과 2.36×10¹¹cmHz^{1/2}W⁻¹의 광응답성 및 비 검출성의 값을 보였으며, Back-gate MOSFET 구조에서는 각각 약 314AW⁻¹과 2.2×10¹²cmHz^{1/2}W⁻¹로 광응답성과 비검출성이 향상 된 값을 확인하였다. 이는 보고된 값보다 향상 된 값을 확인할 수 있었으며, 태양전지, 광전자 소자, 바이오 센서, 가스 센서, 압전 소자 등 다양한 분야에 응용할 수 있음을 확인하였다.

둘째, High-k 게이트 유전체 MoSe₂ 전계효과 트랜지스터의 전기적 특성 연구 에서는 기계적 박리를 통해 MoSe₂ 기반 전계효과 트랜지스터를 제작하였으며, 게이트 산화물인 SiO₂, Si₃N₄를 절연막으로 다양한 두께의 디바이스를 제작하여 전기적 특성을 비교 분석하였다. 다양한 두께의 MoSe₂ 기반 전계효과 트랜지스 터는 Positive 게이트 전압에서 게이트 산화물과 MoSe₂ 사이의 계면에 전자가 축 적되는 N-타입 거동을 보였으며, MoSe₂/SiO₂ 와 MoSe₂/Si₃N₄ 기반 전계효과 트랜 지스터는 두께가 두꺼워질수록 측정된 게이트 전압이 Negative 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, MoSe₂의 두께가 증가할수록 드레인 전류는 증가 하였으며, 절연막 SiO₂, Si₃N₄의 전계효과 이동도(μ_{FE})는 각각 70.4cm²/Vs, 64.7cm²/Vs로 계산되었으며, I_{on}/_{off} 비율은 각각 1.22 x 10⁴, 1.27 x 10⁴으로 계 산되었다. 게이트 산화물로서 High-k 유전체 재료를 사용할 경우 문턱 전압 의 감소와 I_{on}/_{off} 비율의 향상을 확인하였다.

섯째, GaSe 기반 Dual-gate 전계효과 트랜지스터의 특성 연구에서는 2차원 물질인 P-타입의 갈륨 셀레나이드 기반의 새로운 헤테로 구조를 제작하였다. 다층 GaSe는 기계적 박리를 사용하여 P-타입의 산화 실리콘 기판에 증착하였으며, 제 작된 GaSe 디바이스를 h-BN으로 덮고, 다층 그래핀을 Top-gate 접점으로 사용하 였다. Gr/h-BN/GaSe Top-gate 금속 절연체 반도체 전계효과 트랜지스터 및 Si/SiO₂/GaSe Back-gate 금속 산화물 반도체 전계효과 트랜지스터의 전기적 특 성 및 광전자 특성에 대한 게이트의 유전 특성 SiO> 및 h-BN의 영향을 연구하였 다. 제작된 디바이스는 두 구성(Si/SiO₂/GaSe Back-gate 및 Gr/h-BN/GaSe Top-gate) 모두에서 Back-gate 및 Top-gate 전압 및 히스테리시스에 대한 높은 의존성과 함께 명확한 P-타입의 동작을 보여주었다. 이러한 실험 결과는 큰 전류 히스테리시스로 인해 GaSe 기반의 MISFET는 멤트랜지스터로 적용 가능성을 확인 하였다. 제작된 디바이스 10⁴을 초과하는 I_{0n}/_{0ff} 비율과 제작된 디바이스 (Si/SiO₂/GaSe Back-gate 및 Gr/h-BN/GaSe Top-gate)의 최대 광응답성은 1.147 ≠₩의 레이저 출력에서 각각 90mAW⁻¹ 및 80mAW⁻¹으로 이전 보고된 GaSe 기반 FET와 비교하여 높은 Im/off 비율과 비슷한 광응답성의 결과를 확인하였으며, P-타입 광 검출기로 사용될 수 있음을 확인하였다.

이와 같은 본 논문의 연구 결과들은 향후 새로운 디바이스의 연구 및 상용화에 기여할 수 있을 것이며, 향후 2차원 물질 PN 다이오드 기반의 자가 동력 소자 및 인공지능(AI) 반도체 분야에 대한 연구를 진행할 계획이다.



Reference

- [1] Tekinerdogan, B. (2017). Engineering connected intelligence: a socio-technical perspective. Wageningen University & Research.
- [2] Zamiri, Reza, et al. "The structural and optical constants of Ag₂S semiconductor nanostructure in the Far-Infrared." Chemistry Central Journal 9.1 (2015): 1-6.
- [3] Wang, Qing Hua, et al. "Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides." Nature nanotechnology 7.11 (2012): 699-712.
- [4] Novoselov, Kostya S., et al. "Two-dimensional atomic crystals." Proceedings of the National Academy of Sciences 102.30 (2005): 10451-10453.
- [5] Radisavljevic, B., Radenovic, A., & Brivio, J. (2011). i. V. Giacometti and A. Kis. Nat. Nanotechnol, 6(3), 147-150.
- [6] Geim, A. K., & Grigorieva, I. V. (2013). Van der Waals heterostructures. Nature, 499(7459), 419-425.
- [7] Chowdhury, Shamik, and Rajasekhar Balasubramanian. "Three-dimensional graphene-based macrostructures for sustainable energy applications and climate change mitigation." Progress in Materials Science 90 (2017): 224-275.
- [8] Chhowalla, Manish, Debdeep Jena, and Hua Zhang. "Two-dimensional semiconductors for transistors." Nature Reviews Materials 1.11 (2016): 1-15.
- [9] Chhowalla, Manish, et al. "The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets." Nature chemistry 5.4 (2013): 263-275.
- [10] Novoselov, Kostya S., et al. "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene." nature 438.7065 (2005): 197-200.
- [11] Edvinsson, Tomas. "Optical quantum confinement and photocatalytic properties in two-, one-and zero-dimensional nanostructures." Royal society open science 5.9 (2018): 180387.
- [12] Machado, F. M., Fagan, S. B., Silva, I. Z. D., & Andrade, M. J. D. (2015). Carbon nanoadsorbents. In Carbon nanomaterials as adsorbents for environmental and biological applications (pp. 11-32). Springer, Cham.
- [13] Seo, Seung-Beom, Byeong-Cheol Jang, and Seong-Yul Choe. "이차원 소재 및 응용 소자 기술 동향." Information Display 17.3 (2016): 3-15.
- [14] Lv, Ruitao, et al. "Two-dimensional transition metal dichalcogenides: Clusters,
ribbons, sheets and more." Nano Today 10.5 (2015): 559-592.

- [15] Adetayo, A., & Runsewe, D. (2019). Synthesis and fabrication of graphene and graphene oxide: A review. Open journal of composite materials, 9(02), 207.
- [16] Kumar, A., & Lee, C. H. (2013). Synthesis and biomedical applications of graphene: present and future trends. Advances in graphene science, 5772-5578.
- [17] Sun, Ziqi, et al. "Generalized self-assembly of scalable two-dimensional transition metal oxide nanosheets." Nature communications 5.1 (2014): 1-9.
- [18] Butler, Sheneve Z., et al. "Progress, challenges, and opportunities in two-dimensional materials beyond graphene." ACS nano 7.4 (2013): 2898-2926.
- [19] Ma, R., & Sasaki, T. (2015). Two-dimensional oxide and hydroxide nanosheets: controllable high-quality exfoliation, molecular assembly, and exploration of functionality. Accounts of chemical research, 48(1), 136-143.
- [20] Zhao, Jijun, et al. "Rise of silicene: A competitive 2D material." Progress in Materials Science 83 (2016): 24-151.
- [21] Liu, H., Neal, A. T., Zhu, Z., Luo, Z., Xu, X., Tománek, D., & Ye, P. D.
 (2014). Phosphorene: an unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility. ACS nano, 8(4), 4033-4041.
- [22] Zhao, Z. W., Wu, H. W., & Zhou, Y. (2016). Surface-confined edge phonon polaritons in hexagonal boron nitride thin films and nanoribbons. Optics Express, 24(20), 22930-22942.
- [23] Zhao, Z. W., Wu, H. W., & Zhou, Y. (2016). Surface-confined edge phonon polaritons in hexagonal boron nitride thin films and nanoribbons. Optics Express, 24(20), 22930-22942.
- [24] Du, H., Lin, X., Xu, Z., & Chu, D. (2015). Recent developments in black phosphorus transistors. Journal of Materials Chemistry C, 3(34), 8760-8775.
- [25] Dong, R., & Kuljanishvili, I. (2017). Progress in fabrication of transition metal dichalcogenides heterostructure systems. Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 35(3), 030803.
- [26] Towle, Laird C., et al. "Molybdenum diselenide: rhombohedral high pressure-high temperature polymorph." Science 154.3751 (1966): 895-896.
- [27] A. M. S. Dresselhaus and H. K. K. a Muller, 2 Dimentional Metal Dichalchogenides. 2016.



- [28] Sung, Ji Ho, et al. "Coplanar semiconductor-metal circuitry defined on few-layer MoTe₂ via polymorphic heteroepitaxy." Nature Nanotechnology 12.11 (2017): 1064-1070.
- [29] Bolotsky, Adam, et al. "Two-dimensional materials in biosensing and healthcare: from in vitro diagnostics to optogenetics and beyond." Acs Nano 13.9 (2019): 9781-9810.
- [30] Novoselov, Kostya S., et al. "Electric field effect in atomically thin carbon films." science 306.5696 (2004): 666-669.
- [31] Novoselov, K. S., & Neto, A. C. (2012). Two-dimensional crystals-based heterostructures: materials with tailored properties. Physica Scripta, 2012(T146), 014006.
- [32] Li, H., Wu, J., Yin, Z., & Zhang, H. (2014). Preparation and applications of mechanically exfoliated single-layer and multilayer MoS₂ and WSe₂ nanosheets. Accounts of chemical research, 47(4), 1067-1075.
- [33] Zeng, Zhiyuan, et al. "Single-layer semiconducting nanosheets: high-yield preparation and device fabrication." Angewandte Chemie 123.47 (2011): 11289-11293.
- [34] Nicolosi, V., Chhowalla, M., Kanatzidis, M. G., Strano, M. S., & Coleman, J. N. (2013). Liquid exfoliation of layered materials. Science, 340(6139), 1226419.
- [35] Liu, B., Abbas, A., & Zhou, C. (2017). Two-dimensional semiconductors: from materials preparation to electronic applications. Advanced Electronic Materials, 3(7), 1700045.
- [36] Zhou, Hailong, et al. "Large area growth and electrical properties of p-type WSe₂ atomic layers." Nano letters 15.1 (2015): 709-713.
- [37] Wu, S., Huang, C., Aivazian, G., Ross, J. S., Cobden, D. H., & Xu, X. (2013). Vapor-solid growth of high optical quality MoS₂ monolayers with near-unity valley polarization. ACS nano, 7(3), 2768-2772.
- [38] Kim, Hong-Sik, et al. "Growth of wafer-scale standing layers of WS₂ for self-biased high-speed UV-visible-NIR optoelectronic devices." ACS applied materials & interfaces 10.4 (2018): 3964-3974.
- [39] Chen, Jianyi, et al. "Chemical vapor deposition of high-quality large-sized MoS₂ crystals on silicon dioxide substrates." Advanced Science 3.8 (2016):



1500033.

- [40] Liu, Bilu, et al. "Chemical vapor deposition growth of monolayer WSe₂ with tunable device characteristics and growth mechanism study." ACS nano 9.6 (2015): 6119-6127.
- [41] Özden, Ayberk, et al. "CVD growth of monolayer MoS₂: Role of growth zone configuration and precursors ratio." Japanese Journal of Applied Physics 56.6S1 (2017): 06GG05.
- [42] Jeon, Jaeho, et al. "Layer-controlled CVD growth of large-area two-dimensional MoS₂ films." Nanoscale 7.5 (2015): 1688-1695.
- [43] Huang, Jing-Kai, et al. "Large-area synthesis of highly crystalline WSe₂ monolayers and device applications." ACS nano 8.1 (2014): 923-930.
- [44] Kumar, Prabhat, et al. "An experimental study: Role of different ambient on sulfurization of MoO₃ into MoS₂." Journal of Alloys and Compounds 671 (2016): 440-445.
- [45] Wu, Chong-Rong, et al. "The growth mechanism of transition metal dichalcogenides by using sulfurization of pre-deposited transition metals and the 2D crystal hetero-structure establishment." Scientific Reports 7.1 (2017): 1-8.
- [46] Guimaraes, Marcos HD, et al. "Atomically thin ohmic edge contacts between two-dimensional materials." ACS nano 10.6 (2016): 6392-6399.
- [47] Kang, Kibum, et al. "High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity." Nature 520.7549 (2015): 656-660.
- [48] Kang, Kibum, et al. "Layer-by-layer assembly of two-dimensional materials into wafer-scale heterostructures." Nature 550.7675 (2017): 229-233.
- [49] Liu, Na, et al. "Large-area atomically thin MoS₂ nanosheets prepared using electrochemical exfoliation." ACS nano 8.7 (2014): 6902-6910.
- [50] Streetman, B. G., & Banerjee, S. (2006). Solid state electronic devices (Vol. 10). Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall.
- [51] Olson, A. MOSFETs (EELE 414, Electrical and Computer Engineering, Montana State University).
- [52] R. S. Muller, T. I. Kamins, M. Chan, Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley & Sons, New York, USA, 2003.
- [53] Vidor, Fábio F., Thorsten Meyers, and Ulrich Hilleringmann. "Flexible electronics:



integration processes for organic and inorganic semiconductor-based thin-film transistors." Electronics 4.3 (2015): 480-506.

- [54] Kim, Sunkook, et al. "High-mobility and low-power thin-film transistors based on multilayer MoS₂ crystals." Nature communications 3.1 (2012): 1-7.
- [55] Zhang, Wenjing, et al. "Role of metal contacts in high-performance phototransistors based on WSe₂ monolayers." ACS nano 8.8 (2014): 8653-8661.
- [56] Smyth, Christopher M., et al. "WSe₂-contact metal interface chemistry and band alignment under high vacuum and ultra high vacuum deposition conditions." 2D Materials 4.2 (2017): 025084.
- [57] Ko, Seungpil, et al. "Few-layer WSe₂ Schottky junction-based photovoltaic devices through site-selective dual doping." ACS applied materials & interfaces 9.49 (2017): 42912-42918.
- [58] Chuang, Hsun-Jen, et al. "Low-resistance 2D/2D ohmic contacts: a universal approach to high-performance WSe₂, MoS₂, and MoSe₂ transistors." Nano letters 16.3 (2016): 1896-1902.
- [59] Liu, Han, Adam T. Neal, and Peide D. Ye. "Channel length scaling of MoS₂ MOSFETs." ACS nano 6.10 (2012): 8563-8569.
- [60] 이동진. (2018). 광전소자 응용을 위한 2차원 층상구조의 MoSe₂ 기반 전계효과 트랜지스터 연구 (Doctoral dissertation, 조선대학교 대학원).
- [61] Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods (pp. 17-43). Woodhead Publishing.
- [62] Dacosta, Ralph S., Brian C. Wilson, and Norman E. Marcon. "New optical technologies for earlier endoscopic diagnosis of premalignant gastrointestinal lesions." Journal of gastroenterology and hepatology 17 (2002): S85-S104.
- [63] Tsuda, H., & Arends, J. (1997). Raman spectroscopy in dental research: a short review of recent studies. Advances in Dental Research, 11(4), 539-547.
- [64] Tonndorf, Philipp, et al. "Photoluminescence emission and Raman response of monolayer MoS₂, MoSe₂, and WSe₂." Optics express 21.4 (2013): 4908-4916.
- [65] Jariwala, D., Sangwan, V. K., Lauhon, L. J., Marks, T. J., & Hersam, M. C. (2014). Emerging device applications for semiconducting two-dimensional transition metal dichalcogenides. ACS nano, 8(2), 1102-1120.



- [66] Akinwande, D., Petrone, N., & Hone, J. (2014). Two-dimensional flexible nanoelectronics. Nature communications, 5(1), 1-12.
- [67] Amani, Matin, et al. "Near-unity photoluminescence quantum yield in MoS₂." Science 350.6264 (2015): 1065-1068.
- [68] Choi, K., Lee, Y. T., & Im, S. (2016). Two-dimensional van der Waals nanosheet devices for future electronics and photonics. Nano Today, 11(5), 626-643.
- [69] Akinwande, Deji, et al. "Graphene and two-dimensional materials for silicon technology." Nature 573.7775 (2019): 507-518.
- [70] Ji, Hyunjin, et al. "Tunable mobility in double-gated MoTe₂ field-effect transistor: Effect of coulomb screening and trap sites." ACS applied materials & interfaces 9.34 (2017): 29185-29192.
- [71] Chamlagain, Bhim, et al. "Mobility improvement and temperature dependence in MoSe₂ field-effect transistors on parylene-C substrate." ACS nano 8.5 (2014): 5079-5088.
- [72] Ghiasi, Talieh S., Jorge Quereda, and Bart J. Van Wees. "Bilayer h-BN barriers for tunneling contacts in fully-encapsulated monolayer MoSe₂ field-effect transistors." 2D Materials 6.1 (2018): 015002.
- [73] Jeong, Yeonsu, et al. "2D MoSe₂ Transistor with Polymer-Brush/Channel Interface." Advanced Materials Interfaces 5.19 (2018): 1800812.
- [74] Ferrari, Andrea C., et al. "Raman spectrum of graphene and graphene layers." Physical review letters 97.18 (2006): 187401.
- [75] Li, Xiaoli, et al. "Temperature dependence of Raman-active in-plane E_{2g} phonons in layered graphene and h-BN flakes." Nanoscale Research Letters 13.1 (2018): 1-6.
- [76] Jiang, Chaoran, et al. "Photoelectrochemical devices for solar water splitting -materials and challenges." Chemical Society Reviews 46.15 (2017): 4645-4660.
- [77] Kleshch, Victor I., et al. "A Comparative Study of Field Emission From Pristine, Ion-Treated and Tungsten Nanoparticle-Decorated p-Type Silicon Tips." physica status solidi (b) 256.9 (2019): 1800646.
- [78] Li, Juncheng, et al. "Sub-millimeter size high mobility single crystal MoSe₂ monolayers synthesized by NaCl-assisted chemical vapor deposition." RSC Advances 10.3 (2020): 1580-1587.
- [79] Tsoutsou, Dimitra, et al. "Epitaxial 2D MoSe₂ (HfSe₂) semiconductor/2D TaSe₂ metal



van der Waals heterostructures." ACS applied materials & interfaces 8.3 (2016): 1836-1841.

- [80] Singh, A., Guha, P., Panwar, A. K., & Tyagi, P. K. (2017). Estimation of intrinsic work function of multilayer graphene by probing with electrostatic force microscopy. Applied Surface Science, 402, 271-276.
- [81] Williams, R. (1965). Photoemission of electrons from silicon into silicon dioxide. Physical Review, 140(2A), A569.
- [82] Qiu, D., Lee, D. U., Lee, K. S., Pak, S. W., & Kim, E. K. (2016). Toward negligible charge loss in charge injection memories based on vertically integrated 2D heterostructures. Nano Research, 9(8), 2319-2326.
- [83] Xu, Jing, et al. "A two-dimensional semiconductor transistor with boosted gate control and sensing ability." Science advances 3.5 (2017): e1602246.
- [84] Ko, Pil Ju, et al. "High-performance near-infrared photodetector based on nano-layered MoSe₂." Semiconductor Science and Technology 32.6 (2017): 065015.
- [85] Wu, Chun-Yan, et al. "Graphene-Assisted Growth of Patterned Perovskite Films for Sensitive Light Detector and Optical Image Sensor Application." Small 15.19 (2019): 1900730.
- [86] Ko, Pil Ju, et al. "Thickness dependence on the optoelectronic properties of multilayered GaSe based photodetector." Nanotechnology 27.32 (2016): 325202.
- [87] Huang, Hai, et al. "Highly sensitive visible to infrared MoTe₂ photodetectors enhanced by the photogating effect." Nanotechnology 27.44 (2016): 445201.
- [88] Yamamoto, M., Ueno, K., & Tsukagoshi, K. (2018). Pronounced photogating effect in atomically thin WSe₂ with a self-limiting surface oxide layer. Applied Physics Letters, 112(18), 181902.
- [89] Island, J. O., Blanter, S. I., Buscema, M., van der Zant, H. S., & Castellanos-Gomez,
 A. (2015). Gate controlled photocurrent generation mechanisms in high-gain In₂Se₃
 phototransistors. Nano letters, 15(12), 7853-7858.
- [90] Xie, C., Mak, C., Tao, X., & Yan, F. (2017). Photodetectors based on twodimensional layered materials beyond graphene. Advanced Functional Materials, 27(19), 1603886.
- [91] Di Bartolomeo, A., Genovese, L., Giubileo, F., Iemmo, L., Luongo, G., Foller, T., & Schleberger, M. (2017). Hysteresis in the transfer characteristics of MoS₂

transistors. 2D Materials, 5(1), 015014.

- [92] Lim, J. Y., Kim, M., Jeong, Y., Ko, K. R., Yu, S., Shin, H. G., ... & Im, S. (2018). Van der Waals junction field effect transistors with both n-and p-channel transition metal dichalcogenides. npj 2D Materials and Applications, 2(1), 1-7.
- [93] Abderrahmane, A., Ko, P. J., Jung, P. G., Kim, N. H., & Sandhu, A. (2018). Optoelectronic characterizations of two-dimensional h-BN/MoSe₂ heterostructures based photodetector. Science of Advanced Materials, 10(5), 627-631.
- [94] Lee, Hyejoo, et al. "High-responsivity multilayer MoSe₂ phototransistors with fast response time." Scientific reports 8.1 (2018): 1-7.
- [95] Mao, Jie, et al. "Ultrafast, broadband photodetector based on MoSe₂/silicon heterojunction with vertically standing layered structure using graphene as transparent electrode." Advanced Science 3.11 (2016): 1600018.
- [96] Dhyani, Veerendra, et al. "Self-powered room temperature broadband infrared photodetector based on MoSe₂/germanium heterojunction with 35A/W responsivity at 1550 nm." Applied Physics Letters 114.12 (2019): 121101.
- [97] Zhou, Xuefei, et al. "Rolling up MoSe₂ nanomembranes as a sensitive tubular photodetector." Small 15.42 (2019): 1902528.
- [98] Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. Nature nanotechnology, 5(7), 487-496.
- [99] Chen, Jian-Hao, et al. "Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂." Nature nanotechnology 3.4 (2008): 206-209.
- [100] Schwank, James R., et al. "Radiation effects in MOS oxides." IEEE Transactions on Nuclear Science 55.4 (2008): 1833-1853.
- [101] Mak, Kin Fai, et al. "Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor." Physical review letters 105.13 (2010): 136805.
- [102] Ramasubramaniam, A. (2012). Large excitonic effects in monolayers of molybdenum and tungsten dichalcogenides. Physical Review B, 86(11), 115409.
- [103] Britnell, Liam, et al. "Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films." Science 340.6138 (2013): 1311-1314.
- [104] Ganatra, R., & Zhang, Q. (2014). Few-layer MoS₂: a promising layered semiconductor. ACS nano, 8(5), 4074-4099.
- [105] Larentis, S., Fallahazad, B., & Tutuc, E. (2012). Field-effect transistors and intrinsic mobility in ultra-thin MoSe₂ layers. Applied

Physics Letters, 101(22), 223104.

- [106] Nasr, Joseph R., et al. "Mobility deception in nanoscale transistors: an untold contact story." Advanced Materials 31.2 (2019): 1806020.
- [107] Kwon, Junyoung, et al. "Thickness-dependent Schottky barrier height of MoS₂ field-effect transistors." Nanoscale 9.18 (2017): 6151-6157.
- [108] Niu, Yue, et al. "Thickness-dependent differential reflectance spectra of monolayer and few-layer MoS₂, MoSe₂, WS₂ and WSe₂." Nanomaterials 8.9 (2018): 725.
- [109] Boucart, Kathy, and Adrian Mihai Ionescu. "Double-gate tunnel FET with high-k gate dielectric." IEEE transactions on electron devices 54.7 (2007): 1725-1733.
- [110] Chen, Xiang, and Jong-Hyun Ahn. "Biodegradable and bioabsorbable sensors based on two-dimensional materials." Journal of Materials Chemistry B 8.6 (2020): 1082-1092.
- [111] Mathew, Minu, et al. "Flexible and wearable electrochemical biosensors based on two-dimensional materials: Recent developments." Analytical and Bioanalytical Chemistry 413.3 (2021): 727-762.
- [112] Zhao, Jinlai, et al. "Recent advances in anisotropic two-dimensional materials and device applications." Nano Research 14.4 (2021): 897-919.
- [113] Jung, Pan-Gum, et al. "Optoelectronic properties of two-dimensional molybdenum diselenide dual-gated MISFET-based photodetector." Optik 224 (2020): 165427.
- [114] Zhang, Panpan, et al. "Transition from trap-mediated to band-like transport in polycrystalline monolayer molybdenum disulfide memtransistors." Applied Physics Letters 117.22 (2020): 223101.
- [115] Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R., & Williams, R. S. (2008). The missing memristor found. nature, 453(7191), 80-83.
- [116] Sawa, A. (2008). Resistive switching in transition metal oxides. Materials today, 11(6), 28-36.
- [117] Waser, Rainer, et al. "Redox-based resistive switching memories-nanoionic mechanisms, prospects, and challenges." Advanced materials 21.25-26 (2009): 2632-2663.
- [118] Sangwan, Vinod K., et al. "Gate-tunable memristive phenomena mediated by grain boundaries in single-layer MoS₂." Nature nanotechnology 10.5 (2015): 403-406.
- [119] Graham, Matt W., et al. "Transient absorption and photocurrent microscopy show that hot electron supercollisions describe the rate-limiting relaxation step

in graphene." Nano letters 13.11 (2013): 5497-5502.

- [120] Arenal, Raul, et al. "Raman spectroscopy of single-wall boron nitride nanotubes." Nano letters 6.8 (2006): 1812-1816.
- [121] Yuan, Xiang, et al. "Arrayed van der Waals vertical heterostructures based on 2D GaSe grown by molecular beam epitaxy." Nano letters 15.5 (2015): 3571-3577.
- [122] Lu, Fangyuan, et al. "Gas-dependent photoresponse of SnS nanoparticles-based photodetectors." Journal of Materials Chemistry C 3.6 (2015): 1397-1402.
- [123] Abderrahmane, Abdelkader, et al. "Gate-tunable optoelectronic properties of a nano-layered GaSe photodetector." Optical Materials Express 7.2 (2017): 587-592.
- [124] Zhao, Qinghua, et al. "The role of traps in the photocurrent generation mechanism in thin InSe photodetectors." Materials Horizons 7.1 (2020): 252-262.
- [125] Fang, Hehai, and Weida Hu. "Photogating in low dimensional photodetectors." Advanced science 4.12 (2017): 1700323.
- [126] Radisavljevic, B., & Kis, A. (2013). Reply to'Measurement of mobility in dual-gated MoS₂ transistors'. Nature nanotechnology, 8(3), 147-148.
- [127] Nazir, Ghazanfar, et al. "Comparison of electrical and photoelectrical properties of ReS₂ field-effect transistors on different dielectric substrates." ACS applied materials & interfaces 10.38 (2018): 32501-32509.
- [128] Wirth-Lima, A. J., and W. Bezerra-Fraga. "Graphene-based BPSK and QPSK modulators working at a very high bit rate (up Tbps range)." Optical and Quantum Electronics 53.5 (2021): 1-16.