



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019年

2月

碩士學位論文

광전소자 응용을 위한 2차원 층상구조의 MoSe<sub>2</sub> 기반 전계효과 트랜지스터 연구

李同眞

2019年 2月

碩士學位 論文

광전소자 응용을 위한 2차원 층상구조의  
MoSe<sub>2</sub>기반 전계효과 트랜지스터 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李 同 眞

광전소자 응용을 위한 2차원 층상구조의  
MoSe<sub>2</sub>기반 전계효과 트랜지스터 연구

A Study on Two Dimensional-layered MoSe<sub>2</sub> based Field  
Effect Transistors for Opto-electronic device Applications

2019年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李 同 眞

광전소자 응용을 위한 2차원 층상구조의  
MoSe<sub>2</sub>기반 전계효과 트랜지스터 연구

指導教授 高 必 周

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함.

2018年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

李 同 眞

# 李同眞의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 조금배 印

委員 朝鮮大學校 教授 김남훈 印

委員 朝鮮大學校 教授 고필주 印

2018年 11月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

## ABSTRACT

I. 서론.....	1
II. 이론.....	3
A. 2차원 물질.....	3
B. High- $k$ 유전체.....	7
C. MoSe <sub>2</sub> 박막 형성 방법.....	11
III. 실험방법 및 측정장비.....	14
A. 실험방법.....	14
1. PDMS(polydimethylsiloxane) 제작.....	14
2. 웨이퍼 세정 공정.....	15
3. MoSe <sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터의 제작 방법.....	16
B. 급속 열처리(RTA, rapid thermal annealing)공정.....	17
C. MoSe <sub>2</sub> 물성 측정법.....	19
1. 주사 전자 현미경(SEM, scanning electron microscope).....	19
2. 원자 힘 현미경(AFM, atomic force microscopy).....	20
3. 라만 분광법(Raman spectroscopy).....	21
4. 전기적 분석.....	22
IV. 실험결과 및 고찰.....	23
A. MoSe <sub>2</sub> 박막의 형성 및 두께 측정.....	23
B. MoSe <sub>2</sub> 박막의 라만분광분석.....	25

C. 두께 변화에 따른 MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 전기적 특성 ..... 26

1. MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 V<sub>DS</sub>-I<sub>D</sub> 특성 ..... 27

2. MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 V<sub>g</sub>-I<sub>D</sub> 특성 ..... 28

3. MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 광학적 특성 ..... 34

V. 결 론 ..... 44

참고문헌

## List of Table

표 1. 대표적인 2차원 물질 목록.....	4
표 2. 급속 열처리 공정표.....	18
표 3. $V_{DS}=15V$ 일 때 $MoSe_2$ 의 두께에 따른 전기적 특성.....	33



# List of Figures

그림 1. 그래핀의 결정구조와 밴드 구조.....	3
그림 2. 반데르발스 이종 구조.....	5
그림 3. (a) MoSe <sub>2</sub> 의 원자 결합 구조 (b) MoSe <sub>2</sub> 의 층간 결합구조 및 간격.....	6
그림 4. HfO <sub>2</sub> 의 원자 구조 .....	8
그림 5. h-BN의 결정구조와 밴드 구조.....	9
그림 6. MoS <sub>2</sub> 전기화학적 박리법 공정 개략도.....	12
그림 7. CVD 합성법을 이용한 그래핀 성장 개략도.....	13
그림 8. 박리 및 전사용 PDMS 제작과정.....	14
그림 9. 초음파세척기를 통한 아세톤, IPA, DIW 내 3단계 세정 과정.....	15
그림 10. PDMS를 사용한 MoSe <sub>2</sub> 기반의 전계효과 트랜지스터 제작 개략도 .....	16
그림 11. 급속 열처리 장비(GD Tech).....	17
그림 12. 시료에 전자가 입사할 경우 발생하는 여러 종류의 전하입자.....	19
그림 13. 원자 힘 현미경의 기본 원리.....	20
그림 14. 라만 산란의 종류.....	21
그림 15. 반도체 특성 분석기 HP4155-A(Hewlett Packard).....	22
그림 16. 4 프로브 스테이션.....	22
그림 17. 6nm 두께의 MoSe <sub>2</sub> SEM 이미지 및 AFM 측정값.....	23
그림 18. 30nm 두께의 MoSe <sub>2</sub> SEM 이미지 및 AFM 측정값 .....	24
그림 19. 45nm 두께의 MoSe <sub>2</sub> SEM 이미지 및 AFM 측정값 .....	24
그림 20. 90nm 두께의 MoSe <sub>2</sub> SEM 이미지 및 AFM 측정값 .....	24
그림 21. 라만 스펙트럼 .....	25
그림 22. MoSe <sub>2</sub> 기반소자 제작 개략도.....	26

그림 23. 두께의 변화에 따른  $I_D$ - $V_{DS}$  특성 ..... 27  
 그림 24. (a) 6nm, (b) 30nm, (c) 45nm, (d) 90nm 두께의  
         MoSe<sub>2</sub>에서  $V_g$ - $I_D$  특성 ..... 30  
 그림 25.  $V_{DS}$  전압에 따른 MoSe<sub>2</sub> 소자의 전자 이동도 ..... 32  
 그림 26. (a) 6nm, (b) 30nm, (c) 45nm, (d) 90nm 소자의  
          $V_{DS}$  및 레이저 출력에 대한  $I_D$  의존성 ..... 36  
 그림 27. (a) 6nm, (b) 30nm, (c) 45nm, (d) 90nm 소자의  
         레이저 출력의 변화에 의한 광 응답성 ..... 39  
 그림 28. (a) 6nm, (b) 30nm, (c) 45nm, (d) 90nm 소자의  
         레이저 출력의 변화에 의한 외부양자효율 ..... 42  
 그림 29. MoSe<sub>2</sub> 두께 변화에 따른 소자의 광 응답성 및 외부양자효율 ..... 43

## ABSTRACT

### A Study on Two Dimensional-layered MoSe<sub>2</sub> based Field Effect Transistors for Opto-electronic device Applications

Lee, Dong Jin

Advisor : Prof. Ko, Pil-Ju, Ph.D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

Silicon-based semiconductor devices are constrained in the development of a variety of silicon-based electronic devices due to their energy loss and rigid properties resulted from indirect transitional band gap. In recent years, research has been actively done on transparent and flexible devices due to the rapid technological development of semiconductor manufacturing processes. Silicon-based semiconductor devices have many problems in application to flexible devices due to inherent characteristics of silicon as a main material. Graphene was discovered while researching new materials to cope with this problem, however, graphene has many limitations in its application as a semiconductor device due to its zero band gap structure. While research on new materials to improve these problems has been accelerated, the researchers have focused on two-dimensional materials that exhibit varying band gap energy as a function of thickness. In the transition metal chalcogenides (TMDCs), which are the most attracting attention, the selenized molybdenum (MoSe<sub>2</sub>) has a band gap energy of 1.5eV in case of a single layer and 1.1eV when it is a multi- Variations and Direct Transitions Due to the direct transition type band gap structure change in the band gap, the transistor fabricated with this selenized molybdenum has superior on-off ratio and high mobility (50-200cm<sup>2</sup>/Vs). And also the molybdenum selenide is

expected to be more useful than it is applied to a photoelectric device due to a relatively small band gap energy as compared with other two-dimensional materials. In addition, the two-dimensional material has a strong covalent bond between the atoms and can bond with weak van der Waals forces to peel each layer relatively easily, because the layers are stacked at intervals of 0.7nm and the thickness of the molybdenum selenide peeled through AFM (atomic force microscopy) can be predicted. Despite these advantages, research on thickness and gate control is still incomplete.

In this paper, nano-sized field effect transistors (FETs) were fabricated on the basis of two-dimensional  $\text{MoSe}_2$  with various thicknesses and electrical, optical characteristics were analyzed. A metal-semiconductor-metal (MSM) structure field-effect transistor was fabricated at room temperature using the mechanical stripping method of layered  $\text{MoSe}_2$ . The changes of photoresponsivity, mobility, external quantum efficiency, threshold voltage ( $V_{th}$ ) and threshold voltage over the thickness changes of the nano-sized  $\text{MoSe}_2$  layer were analyzed.

The results obtained from this paper will provide important physical properties of opto-electronic devices based on two dimensional materials, and will be based on nano-layered structure energy conversion devices and flexible device research applications.

## 1. 서 론

실리콘(Silicon)은 지구상에 존재하는 원소들 중 모래에서 추출하기 때문에 고갈의 우려가 적으며, 제조 공정 기술의 비약적인 발전으로 인하여 현재 거의 모든 반도체 소자에 사용되고 있다. 실리콘은 간접천이형 밴드갭(Indirect band gap) 특성과 기계적 특성의 한계로 인해 차세대 유연 디스플레이, 웨어러블 소자등의 응용에 제한을 받고 있다[1-2]. 최근 이러한 실리콘을 대체하기 위해서 다양한 신소재 연구가 활발히 이루어지고 있다[3]. 특히, 2004년에 발견된 층상 물질 그래핀(graphene)은 육각형으로 배열된 탄소원자의 단일층으로 물리적, 광학적, 기계적 특성이 우수하며  $10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 의 높은 전자 이동도를 보여주지만, 다양한 물질적 특성에도 불구하고 에너지 밴드갭(Energy band gap)이 존재하지 않는 ‘제로 밴드갭’ 구조와 낮은 on/off 전류비로 인해 전계효과 트랜지스터(field effect transistor) 및 광전자(opto-electronic) 분야에 응용하기에 많은 제약이 따른다[4-7]. 이러한 그래핀의 제한적 특성인 밴드갭을 형성하기 위한 도핑(doping) 및 그래핀의 구조를 변형시켜 밴드갭을 형성 하였지만, 제한적인 밴드갭 구조와 급격한 전자 이동도의 감소 등 여러 문제점이 발생 되었다[6]. 최근에는 국내외 연구진들은 이러한 문제점을 극복하기 위한 방안으로  $h$ -BN, MoS<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>등과 같은 다양한 밴드갭을 갖는 2차원 물질(2-dimensional material)들에 대해 주목 하기 시작했다. 층상 2차원 물질들은 금속(metal), 반금속(semimetal), 절연체(insulator)와 반도체(semiconductor)를 포함하는 다양한 범위의 물리적 특성을 가지고 있으며, 밴드갭은 780~2000nm 파장을 가진 적외선(infrared ray), 380~780nm 파장의 가시광선(visible ray), 100~380nm 파장의 자외선(ultraviolet rays) 영역까지 다양하게 포함되어 있어 광범위한 응용이 가능하다. 다양한 전기적, 광학적 성질을 가진 칼코게나이드(chalcogenide), 산화물 등을 포함한 상당수의 2차원 물질이 존재한다[8]. 특히, 2차원 물질들은 약한 반데르발스 힘(Van der Waals forces)으로 결합된 층상구조를 나타내고 있으며[9-10], 반데르발스 힘으로 결합된 2차원 물질의 약한 결합 특성으로 인해 기계적 박리법(mechanical exfoliation)을 통해 고가의 장비 없이 간단하게 단층으로 분리가 되며, 결정학적으로 서로 상이한 물질 간에도 이종구조(heterostructure)를 제작할 수 있는 장점이 있다[11].

특히 전이금속 칼코겐화합물(TMDCs, transition metal dichalcogenides)은 그래핀과 유사한 특성을 지닌 2차원 물질로 실리콘 등 기존 반도체의 한계점을 극복하기 위한 차세대 반도체 재료로 최근 많은 주목을 받고 있으며 연구가 진행되고 있다[1].

본 논문에서는 다양한 두께의 2차원  $\text{MoSe}_2$ 를 기반으로 나노규격의 전계효과 트랜지스터(FETs, field effect transistors)를 제작하여 전기적, 광학적 특성 분석 및 층상  $\text{MoSe}_2$ 의 기계적 박리 방법을 이용하여 금속-반도체-금속(MSM) 구조의 전계효과 트랜지스터를 상온에서 제작 하였으며, 나노규격의 2차원  $\text{MoSe}_2$ 의 두께 변화에 따른 광 응답성(photoresponsivity), 이동도(mobility), 외부양자효율(external quantum efficiency), 문턱전압( $V_{th}$ , threshold voltage) 등의 변화를 분석 하였다. 본 논문을 통해 확보된 결과는 2차원 소재 기반의 광-전자 소자의 중요한 물성들을 제공함과 동시에 나노층상구조 에너지 변환소자 및 유연성 소자연구 응용에 기반이 될 것이다.

## II. 이 론

### A. 2차원 물질

그래핀(graphene)은 2004년 영국 맨체스터대학의 Geim과 Novoselov 교수 그룹에서 실험을 통해 흑연(graphite)에서 원자 한 층을 떼어낼 수 있는 방법이 발표되면서 그래핀의 존재가 확인 되었다. 그래핀은 그림 1과 같이 탄소 원자의 결합이 육각형의 벌집구조로 이루어진 이차원 구조체를 이루는 물질로 철의 200배 이상 높은 강도, 5,000W/mk의 높은 열전도도, 구리보다 100배 정도 높은 전기 전도도와 뛰어난 유연성, 단일층의 경우 ITO 보다 높은 투명도, 신축성과 빛의 2.3%만 흡수하는 우수한 물리적, 광학적, 기계적 특성으로 인해 슈퍼 커패시터(super capacitor), 에너지 저장장치, 유연성 소자, 전극 물질로 응용이 가능해 차세대 반도체 소재로 주목을 받아 왔다[6, 12]. 그래핀이 가지고 있는 흥미로운 특성은 그래핀의 결정 구조에 의해서 나타나는 것으로 알려져 있으며, 밴드갭이 존재하지 않으므로 반도체 물질로서 응용에 많은 제약이 따른다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 그래핀의 구조를 변경하여 밴드갭을 형성하거나, 도핑 등의 연구들이 진행되고 있다. 또한, 형성된 밴드갭이 매우 제한적이며, 전자 이동도의 급격한 감소 등 여러 문제점을 가지고 있어 반도체 소자의 응용에는 어려움이 있다.

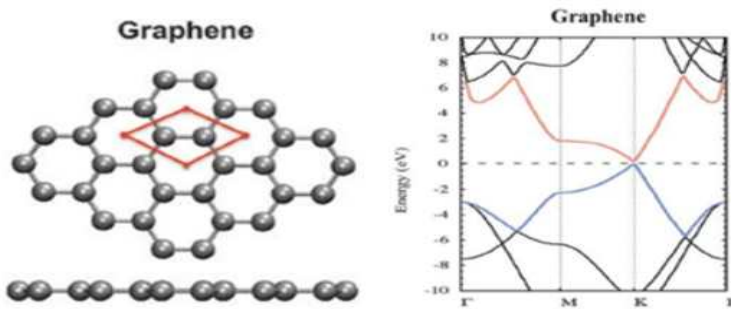


그림 1. 그래핀의 결정구조와 밴드 구조[12]

한편 그래핀의 밴드갭이 존재하지 않는 구조를 해결하기 위한 연구가 진행되면서 그래핀과 유사한 특성을 지닌 다른 2차원 물질들이 주목받기 시작했다. 그 중에서 층상 구조의 전이금속칼코겐화합물(TMDCs)에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, TMDCs는 일반적으로 화학식  $MX_2$  로 나타내며, 여기서 M은 전이금속 원소, X는 칼코게나이드 원소이다. 층상 구조를 갖는 TMDCs는 단층(monolayer)일 때와 벌크(bulk)일 때 각각 직접천이형 밴드갭(direct band gap) 특성과 간접천이형 밴드갭(indirect band gap) 특성을 갖는다. 두께에 비해 높은 광 흡수율, 높은 엑시톤(exciton, 전자-정공 쌍) 결합에너지 등 흥미로운 광학적 성질을 가지고 있어 광전자소자 응용 연구가 활발하게 이루어지고 있다[14-17]. 또한, 다양한 밴드갭을 갖는 TMDCs의 고유한 특성으로 인하여 디지털 회로, 수광소자 및 발광소자등 다양한 응용 가능하며 2차원 나노규격 물질이라는 새로운 연구 분야를 개척하고 있다. 대표적인 2차원 물질들을 표 1에서 보여주고 있다[13]. 대다수의 2차원 물질들은 약한 반데르발스 힘(Van der Waals forces)으로 결합된 층상구조로 인하여 단층으로 분리할 수 있는 장점을 가지고 있다.

표 1. 대표적인 2차원 물질 목록

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



2차원 물질들은 6족의 전이금속 Mo 원소와 Se 칼코겐 원소가 강한 공유결합 (covalent bond)으로 결합되어 있으며 MoSe<sub>2</sub> 층간결합은 약한 반데르발스(Van der Waals) 힘으로 결합되어 있는 층상 구조이다. 이러한 결합 특성으로 인해 층간의 분리가 가능하며 그림 2와 같이 원자 수준의 얇은 물질의 결정학적 및 물리적으로 서로 상이한 물질들을 이종 구조(heterostructure)로 제작 할 수 있다.

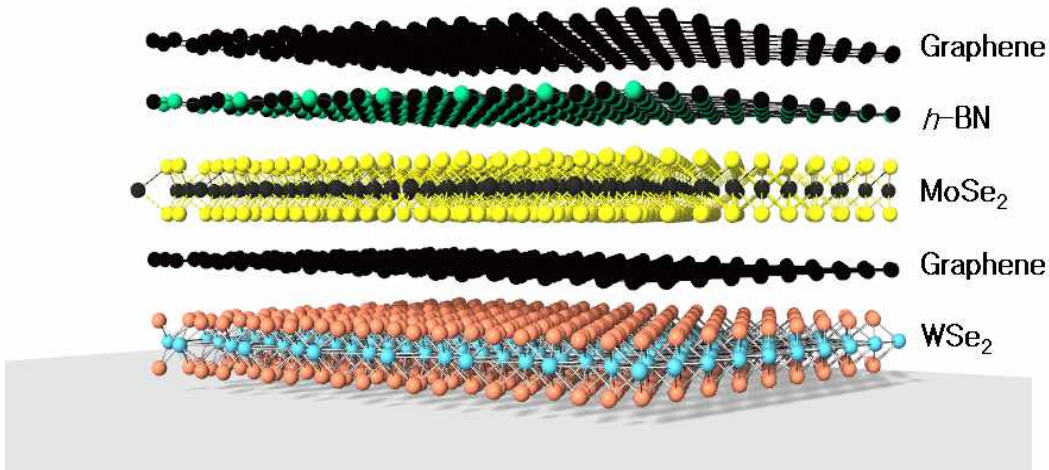


그림 2. 반데르발스 이종 구조

전이금속칼코겐화합물(TMDCs)을 대표하는 물질인 이셀렌화몰리브덴(MoSe<sub>2</sub>), 이황화몰리브덴(MoS<sub>2</sub>), 텅스텐이셀레나이드(WSe<sub>2</sub>), 이황화텅스텐(WS<sub>2</sub>) 등의 경우 1~2eV의 비교적 낮고 다양한 에너지 밴드갭을 가지고 있다. 또한, 두께가 증가함에 따라 밴드갭이 감소하는 특성을 이용하여 광루미네선스(photoluminescence)에 응용 연구가 활발히 진행 중이며[18-19], TMDCs (MoSe<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>)는 화학적 안정성, 완전한 결합(absence of dangling bonds), 및 1100℃ 까지 열적 안정성 등의 특성이 있다. 또한, TMDCs 재료들은 높은 강성(stiffness) 및 파괴 강도(breaking strength)를 가지고 있다. TMDCs는 높은 on/off 전류 비, 높은 전하 이동도, 높은 양자 효율(QE, quantum efficiency)을 가지는 것으로 보고되고 있으며 특히, MoSe<sub>2</sub>로 제작된 트랜지스터의 경우 10<sup>6</sup>이 넘는 on/off 비율과 높은 이동도(50-200cm<sup>2</sup>/Vs)와 같이 우수한 소자 특성을 갖는 것으로 보고되고 있다.

그림 3과 같이  $\text{MoSe}_2$ 는 6족의 전이금속 Mo 원소와 Se 칼코겐 원소가 공유결합으로 이루어진 구조이며 층간결합은 약한 반데르발스(Van der Waals) 결합으로 인해 비교적 간단하게 박리가 가능하며 원자 힘 현미경(AFM, atomic force microscopy) 장비를 사용하여 박리된 두께를 측정 할 수 있다. 최근에는 반데르발스 이종 구조(Van der Waals heterostructure)의 트랜지스터는 전자-홀 쌍(EHP, electron-hole pair)의 효과적인 분리로 인해 보다 높은 성능을 나타내는 연구가 보고되었다 [20-27].

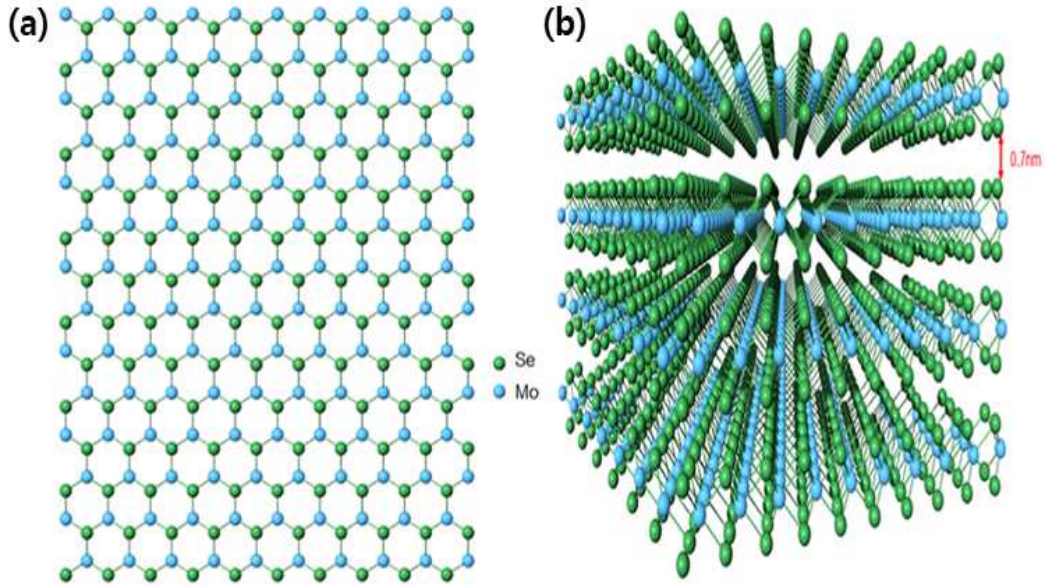


그림 3. (a)  $\text{MoSe}_2$ 의 원자 결합 구조 (b)  $\text{MoSe}_2$ 의 층간 결합구조 및 간격

## B. High- $k$ 유전체

실리콘 기반의 반도체 공정의 대중화와 함께  $\text{SiO}_2$ 는 여러 장점들을 가지고 있지만, 최근 들어 금속 산화물 반도체 전계효과 트랜지스터의 미세화가 진행되면서 터널링 효과(tunneling effect)가 크게 발생하면서  $\text{SiO}_2$ 의 물리적 한계에 도달하였다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 보다 우수한 유전체(dielectric)의 선택은 매우 중요하며 다음의 조건을 만족 시켜야 한다.

- 향후 지속적인 미세화를 진행할 수 있을 정도의 충분한 유전율(dielectric constant) 값을 가져야 한다.
- 소자의 게이트 스택(gate stack)구조에서 절연막이 실리콘과 직접 접촉하는 재료이기 때문에 열적으로 충분히 안정된 재료여야 한다.
- 실제 소자 동작에서 전하의 주입을 최소화하기 위해 실리콘과의 밴드갭 offset 이 1eV 이상인 절연체여야 한다.
- 게이트와 양호한 전기적 계면 특성을 보여야 한다.
- 절연막 내부에 전기적으로 계면 결함 밀도가 가능한 낮아야한다..

$\text{HfO}_2$ 는  $\text{ZrO}_2$ 와 유사한 특성 및 구조를 가지고 있으며, 결정의 경우에는 유전율이 25~30 정도로  $\text{SiO}_2$ 보다 상대적으로 큰 값을 보이기 때문에 누설전류를 많이 감소시킬 수 있다. 깁스 자유 에너지(Gibbs free energy)의 절대값이  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  등의 물질에 비해 비교적 작으므로 열역학적으로 안정한 물질로 보고되고 있다[28]. Si 웨이퍼 위에  $\text{HfO}_2$ 를 증착(deposition)할 경우에는 자연산화막(native oxide)을 감소시킬 수 있기 때문에, Low- $k$  유전체 형성에 의한 유전율의 감소를 방지할 수 있다.  $\text{HfO}_2$ 의 밴드갭은 5.68 eV로 상대적으로 크기 때문에 누설전류 또한 작을 것으로 예상할 수 있다[29-32]. 하지만  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ 의 경우 산소 이온 전도체(oxygen ionic conductor)로 보고된 대표적인 물질로 산소(oxygen), 이온(ionic)은 박막을 통해 확산(diffusion) 되면서 뒤에 빈공간(vacancy)을 남길 수 있기 때문에 트랩이나 신뢰성(reliability) 문제를 야기시킬 수 있다. 또한 결정화 과정이 저온열처리로 인해 결정립계(grain boundary)로 인해 높은 누설전류 경로(high leakage current path)로 작용할 수 있으며 유전율과 박막 두께의 불균일한 문제가 생길 수 있기 때문에  $\text{SiO}_2$ 보다 높은 유전율을 가진 물질인  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  등의 장벽(barrier)으로 사용하여 개선할 수 있을 것으로 예상된다[33-34].

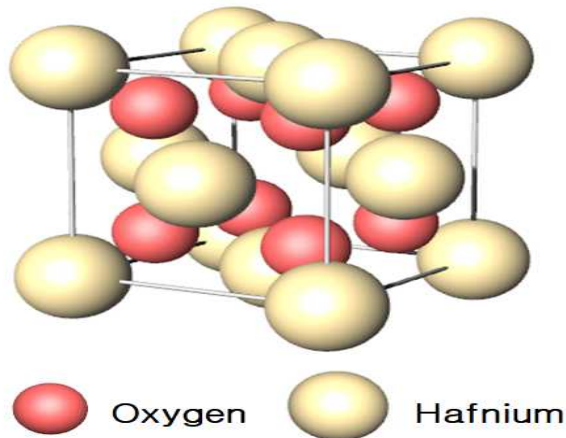


그림 4.  $\text{HfO}_2$ 의 원자 구조

은백색을 띄고 있는 알루미늄(Aluminum)은 지구상에서 산소와 실리콘 다음으로 풍부한 원소이다. 또한 산소와의 높은 화학적 반응성으로 인해 산소 분위기에서 알루미늄 표면은 산소와 급격하게 반응하여 얇은 산화물을 형성하게 된다. 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )은 알칼리 이온과 광자(photon)에 대한 낮은 침투성 및 높은 기계적 저항력 특성을 보이는 내화성 세라믹 산화물(ceramic oxide)이며, 높은 녹는점 및 고온에서의 낮은 전기 전도도 특성으로 인해 여러 산업분야 및 연구분야에서 다양하게 활용되고 있다[35].  $Al_2O_3$ 는 Si 웨이퍼 혹은 다결정실리콘과 접촉시 안정하고, 8.8eV의 높은 밴드갭, 그리고 Si와 2eV 이상의 높은 밴드갭 오프셋을 가지고 있어 매우 높은 누설전류 밀도를 나타낸다. 또한 산소 확산 속도가 매우 느리고, 900°C 이상의 온도에서도 비정질이 유지되는 열안정성의 특징을 가지고 있다. 이러한 장점들로 인해  $Al_2O_3$ 는  $SiO_2$ 의 게이트 절연막의 대안으로 연구가 되고 있으나, 다른 고유전율(high- $\epsilon$ )물질들에 비해 상대적으로 낮은 약 8정도의 유전율로 인해  $SiO_2$ 의 문제점에 대한 해결방법으로 연구가 진행 되고 있다[36-37].

육방정계 질화붕소는 그림 5에서 보여지듯이 그래핀과 유사한 결정 형태를 갖고 있으며 육안으로 하얗게 보이기 때문에 “white graphene”으로 불리는  $h$ -BN은 탄소 원자들이 벌집 모양(honeycomb)으로 연결된 그래핀에서 탄소 대신 붕소(boron)와 질소(nitride)를 채워 넣은 것으로 벌집 모양으로 서로 교차로 구성되어 있다.  $h$ -BN은 900°C 까지 산화되지 않으며 열을 견디는 내산화성, 차폐성, 계면(interface) 안정성 등 탄소 소재에서는 나타나지 않는 특성을 가지며, 열역학적으로 가장 안정한 형태의 2차원적 구조로 인해 많은 관심을 받고 있다[38-41].

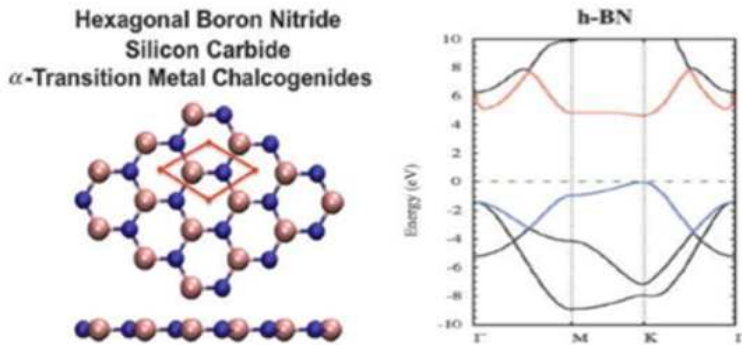


그림 5.  $h$ -BN의 결정구조와 밴드 구조[12]

평면 내에서는 강한 공유결합 이지만, 평면 간에는 약한 반데르발스 결합을 하고 있어 그래핀과는 매우 다른 전자 특성을 보인다. 그림 5와 같이  $h$ -BN 밴드 구조는 가전자대와 전도대의 에너지가 약 4.69eV의 큰 밴드갭을 갖는 절연체이다. 그래핀에 비해  $h$ -BN은 전기 음성도(electronegativity)가 크기 때문에, 밴드가 좁아짐에 따라 전도성을 잃고 금속성이 아닌 절연체 특성을 나타낸다[42].  $Al_2O_3$ ,  $HfO_2$  등 유전물질들과는 다르게  $h$ -BN은 추가적인 공정이 필요하지 않아 천연상태에서는 고품질의 균일한 두께의 수 nm층을 박리할 수 있을 뿐만 아니라 반데르발스 결합 특성으로 인해 이종 접합이 용이하여  $SiO_2$  게이트 절연막의 대안으로 연구되고 있다.

### C. MoSe<sub>2</sub> 박막 형성 방법

기계적 박리법(mechanical exfoliation method)은 과거 반데르발스 힘으로 결합된 층간구조 물질을 스카치테이프를 이용하여 물질을 박리하는 방법과 유사하지만, 스카치테이프를 이용한 박리법은 박리과정 중 스카치테이프 접착제의 잔여물로 인해 계면의 오염을 초래 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 벌크의 MoSe<sub>2</sub>를 박리용 PDMS(polydimethylsiloxane)를 이용하여 수차례 박리한 다음 전사용 PDMS를 이용하여 준비된 SiO<sub>2</sub>/Ti 전극에 MoSe<sub>2</sub>를 전사하여 채널을 형성 하였다. PDMS를 이용하여 박리된 고품질의 MoSe<sub>2</sub> 플레이크를 전극 위에 전사할 수 있으며, 기본적인 소자의 특성 파악이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 물리적인 힘을 이용해 벌크 MoSe<sub>2</sub>에서 수 층(layer)을 박리하는 방법으로 물질의 두께 및 플레이크의 일정한 크기를 얻지 못하는 단점이 있다[43-44].

화학적 박리법은 대량생산의 가능성과 다른 물질과의 혼합이 가능하다는 장점으로 인해 산화흑연을 기반으로 그래핀의 대량생산이 가능하며 현재 연구가 진행되고 있다[57-59]. 화학적 박리기술은 흑연의 효과적 산화에 의한 층간거리의 조절과 그래핀 표면에 손상을 최소화하여 화학반응을 통하여 벌크 결정 박막을 분리해내는 방법이다. MoSe<sub>2</sub>의 경우 촉매가 첨가된 용액에 MoSe<sub>2</sub> 벌크 결정을 넣은 후 초음파(sonication)처리를 하면 수 층의 MoSe<sub>2</sub> 플레이크들이 박리되며, 이후 박리된 수 층의 MoSe<sub>2</sub>가 섞인 용액을 기판에 도포하면 수 층의 MoSe<sub>2</sub>를 확보할 수 있다. 이때 화학적 박리법에 사용되는 촉매로는 리튬이온이 적합한 것으로 보고되고 있으며, 일반적으로 n<sup>-</sup> 부틸리튬이 포함된 용액을 주로 사용한다. 용액속의 리튬이온이 벌크 MoSe<sub>2</sub> 층 사이에 골고루 확산되기까지 약 하루의 시간이 소요되며, 수소가스를 주입하면 좀 더 효과적인 화학적 반응을 유도할 수 있다[45-47].

화학적 박리법으로 그래핀을 수 층 박리 시 촉매로 사용된 용액으로 인해 그래핀 자체에 손상을 가할 수 있어 화학적 박리법에 의해 박리된 물질은 기본적인 특성 저하의 문제 등을 초래할 수 있는 단점이 있다. 이러한 문제점을 개선하고자 진행되던 연구가 새로운 박리법인 전기화학적 박리법이다. 최근에 진행된 연구에서는 전기화학적 박리법을 통해 벌크 MoS<sub>2</sub>를 수 층으로 박리에 성공하였다[48]. 전기분해를 통해 용액으로부터 라디칼 이온(radical ion)이 생성될 때 TMDCs 물질의 약한 반데르발스 힘의 결합된 층간결합을 박리하는 방법이다. 전해액(electrolyte)인 황산나트륨(sodium sulfate)용액을 0.5M의 농도로 제작한 후 양극에는 MoS<sub>2</sub> 벌크 결정을 연결하고 음극에는 백금(Platinum) 전선을 연결한다. 전압을 인가하게 되면 용액에서 OH<sup>-</sup> 라디칼과 O<sub>2</sub> 라디칼, 그리고 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 이온 등이 전기분해로 인해 발생되고, MoS<sub>2</sub> 주변에 흡착하여 가스 방울들을 형성하게 된다. 이때 반데르발스 결합으로 된 층간결합이 거품들에 의해 박리 되고 벌크 MoS<sub>2</sub>는 수 층으로 나뉘게 된다. 전기분해로 박리된 MoS<sub>2</sub>가 섞인 용액을 기판으로 도포 후 열처리 공정을 통해 기판위에 수 층의 MoS<sub>2</sub>를 형성할 수 있다[48-51].

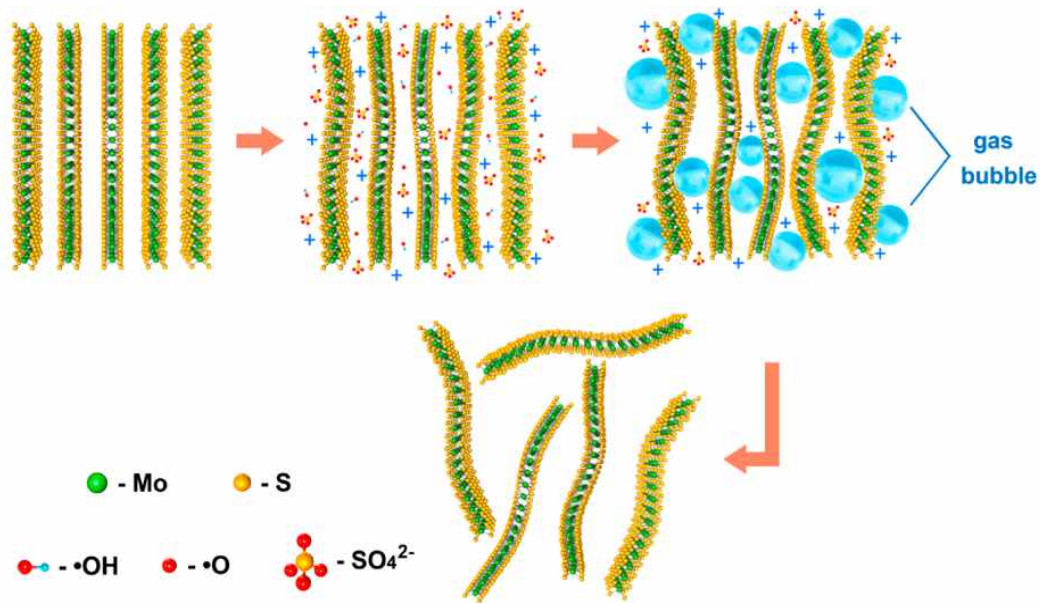


그림 6. MoS<sub>2</sub> 전기화학적 박리법 공정 개략도 [48]



웨이퍼 규모의 MoSe<sub>2</sub> 플레이크 형성을 위한 다양한 바텀업(bottom-up) 방법이 있지만, 고품질의 균일한 대면적 MoSe<sub>2</sub> 플레이크를 형성하기 위한 공정으로 화학 기상증착(CVD, chemical vapor deposition) 방법을 주로 사용한다. CVD 공정은 반응의 원료 시료들을 열적으로 혹은 플라즈마(plasma)에 의한 전기적 분해를 통해 새로운 화학결합을 유도해 원하는 반응물(reaction product)를 얻는 합성 방법이다. MoSe<sub>2</sub> 플레이크를 CVD 합성법을 통해 형성하기 위해서 2개의 가열대(heating zone)를 가진 장비를 이용해 각각의 가열대에 소스(source)로 Se 분말(powder)과 MoO<sub>3</sub> 분말을 위치시켜 놓아야 한다. 전기로(furnace)의 앞쪽과 뒤쪽에 각각 Se 분말과, MoO<sub>3</sub> 분말을 놓고 운반 가스 역할을 해줄 Ar 가스를 주입하면서 약 30분간 높은 온도를 유지하면서 합성을 진행시키게 된다. CVD 공정의 장점은 기판의 규격에 따라 MoSe<sub>2</sub> 플레이크의 규격이 결정되기 때문에 원하는 규격의 MoSe<sub>2</sub> 플레이크의 합성이 가능하며, 두 가지 소스의 질량, 주입하는 가스의 유량 및 합성시간에 따라 합성한 MoSe<sub>2</sub> 플레이크의 두께를 제어할 수 있다. 최근에는 CVD 합성법으로 단일층의 MoSe<sub>2</sub>를 SiO<sub>2</sub>/Si 기판에 형성하여 트랜지스터를 제작한 연구도 보고되고 있다[51]. CVD합성법으로 제작된 소자의 전기적 특성의 경우 기존의 MoSe<sub>2</sub> 트랜지스터와 마찬가지로 50cm<sup>2</sup>/V·s를 뛰어넘는 전하 이동도 및 10<sup>7</sup>의 on/off 전류비 특성이 보고 되었다[52-54].

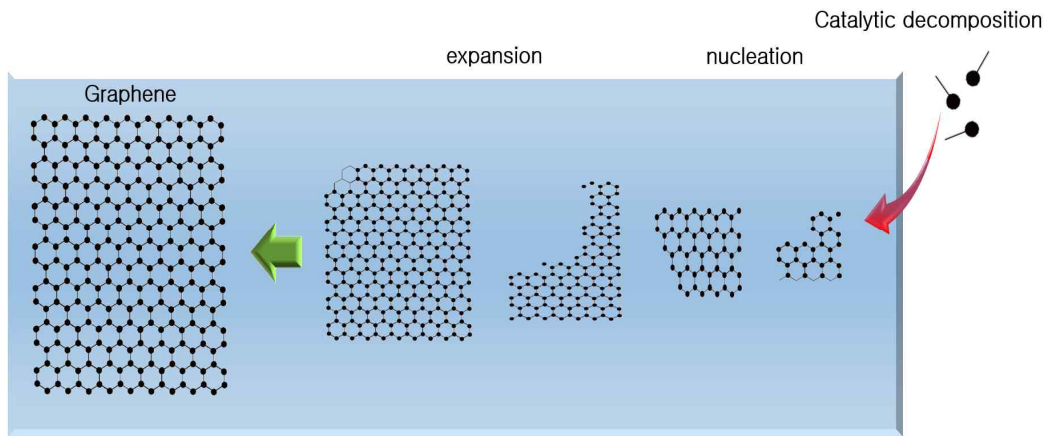


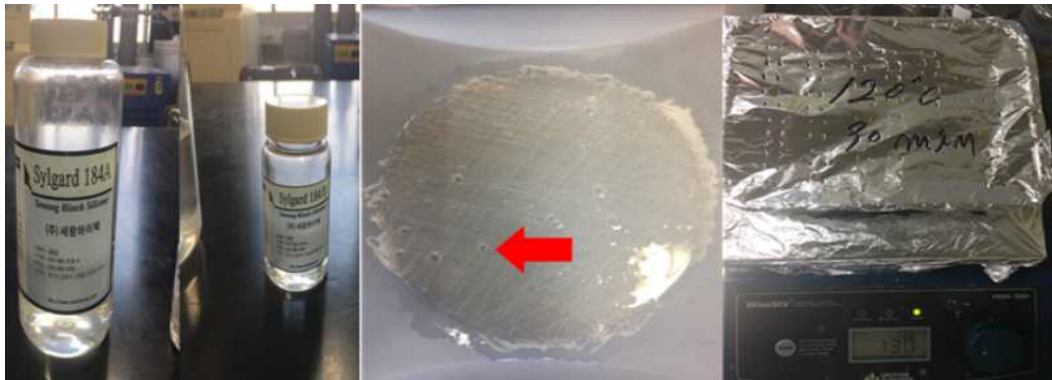
그림 7. CVD 합성법을 이용한 그래핀 성장 개략도

### III. 실험방법 및 측정장비

#### A. 실험방법

##### 1. PDMS(Polydimethylsiloxane) 제작

2차원 물질을 전극에 전사하기 위한 매개체로 PDMS(polydimethylsiloxane)를 제작하기 위해 그림 8(a)에서 주재료인 Sylgard-184A(Dow Corning, Toray Co., Ltd.)와 경화제인 Sylgard-184B(Dow Corning, Toray Co., Ltd.)를 사용 하였다. PDMS는 Sylgard-184A와 Sylgard-184B의 혼합제로서 Sylgard-184A의 함량이 증가 할수록 제작된 PDMS는 유연하면서 접착력이 증가하고, 경화제인 Sylgard-184B의 함량이 증가하면 반대로 단단해지며 접착력은 감소하는 특성이 있다. 실험에서는 2차원 물질 박리용 PDMS와 전극 전사용 PDMS를 제작하여 실험을 진행 하였다. 그림 8(b)와 같이 Sylgard-184A 와 Sylgard-184B의 혼합과정에서 기포가 발생하게 된다. 발생된 기포는 탈포과정을 통해 기포를 제거해주고, 그림 8(c)와 같이 경화시간을 단축하기 위해 핫플레이트에서 대기상에서 열처리 과정을 진행하였다.



(a) 주재료와 경화제      (b) 혼합과정 중 발생 기포      (c) 열처리

그림 8. 박리 및 전사용 PDMS 제작과정

## 2. 웨이퍼 세정 공정

본 실험에서 소자 제작에 사용된 전극은 열산화막( $\text{SiO}_2$ , 300nm)  $\text{p}^{++}$  실리콘(Si) 웨이퍼 위에 포토리소그래피(Photo lithography), 전자빔 증착(electron-beam evaporation) 공정을 통해 두께 70nm의 Ti전극을  $10\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m}$  간격으로 패터닝(patterning)된 4단자 전극이다. 포토리소그래피 공정을 위해 사용된 감광액(PR, Photoresist)을 제거하기 위해 초음파세척기를 사용하여 15분 동안 아세톤(acetone) 용액에 담가 유기물 입자(organic particle) 성분의 감광막을 제거한 다음 1차 세정 과정을 통해 완벽하게 제거되지 못한 오염물이 아세톤의 높은 휘발성으로 인해 굳어버릴 수 있기 때문에 이소프로필알코올(IPA, isopropyl alcohol) 용액을 사용하여 잔여 유기물 입자 및 표면의 수분 제거 목적으로 초음파세척기에서 15분간 세정 과정 후 탈이온수(DIW, deionized water)에서 다시 15분간 세척을 진행 하였다. 제작된 전극은 감광막, 다이싱(dicing) 과정 중 발생 할 수 있는 문제점 및 잘못된 세정공정을 통한 2차적 오염물 등은 제작된 소자의 특성에 심각한 오류를 초래 할 수 있다. 이러한 예기치 못한 변수를 제거하기 위해 웨이퍼세정 공정은 매우 중요 하며, 그림 9는 소자 제작을 위한 실리콘 전극의 세정 과정을 보여주고 있다.

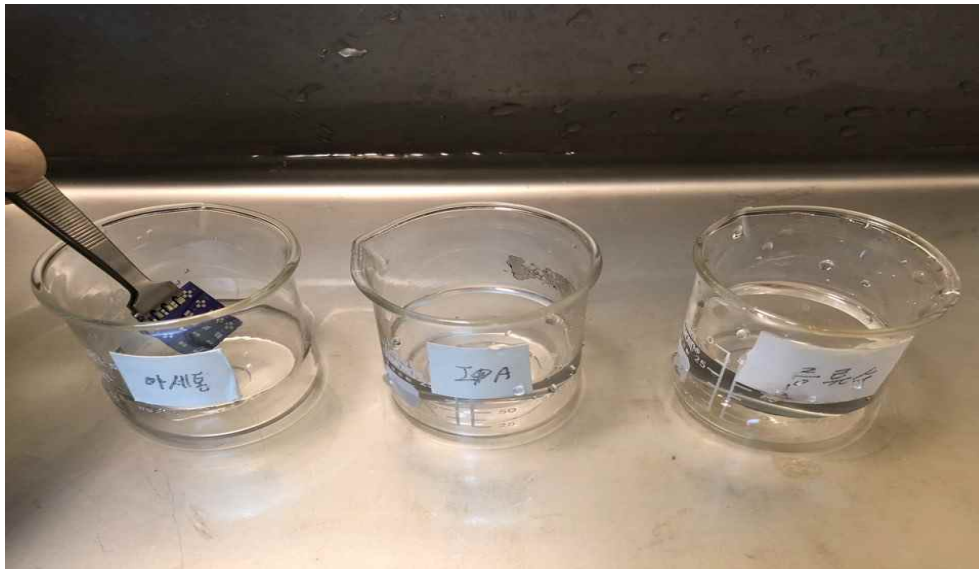


그림 9. 초음파세척기를 통한 아세톤, IPA, DIW 내 3단계 세정 과정

### 3. MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터의 제작 방법

2차원 층상구조의 MoSe<sub>2</sub>는 소자에서 채널역할을 하며 높은 on/off비율과 전자 이동도 등의 우수한 전기적 특성이 보고되었다[24]. 2차원 층상구조를 가지는 물질들은 두께에 따른 밴드갭 구조를 조절할 수 있기 때문에 발광소자 및 수광소자등에 적용이 가능한 장점이 있다. 소자 제작에 사용된 전극은 300nm의 SiO<sub>2</sub>로 도포된 실리콘 기판위에 전자빔 증착(electron-beam evaporation)공정에 의해 증착 된 70nm 타이타늄(Ti) 전극을 사용하여 4단자 소자를 제작하였다. 그림 10에서는 PDMS를 사용한 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터의 제작 과정을 보여주고 있으며, 천연상태의 MoSe<sub>2</sub>(HQgraphene, Netherlands)를 박리용 PDMS를 사용하여 수 층의 MoSe<sub>2</sub> 플레이크를 박리 한다. 박리된 MoSe<sub>2</sub>를 전사용 PDMS를 사용하여 x, y, z 스테이션을 통해 Ti 전극과 MoSe<sub>2</sub>물질을 CCD카메라와 연결된 모니터를 통해서 Ti 전극위에 전사하여 다양한 두께의 소자를 제작 하였다. 스카치테이프를 이용해 2차원 물질을 전극에 전사 할 경우 스카치테이프 접착제의 잔여물로 인한 소자의 오염을 방지하기 위해 박리 및 전사 매개체로 PDMS를 제작하여 사용 하였다.

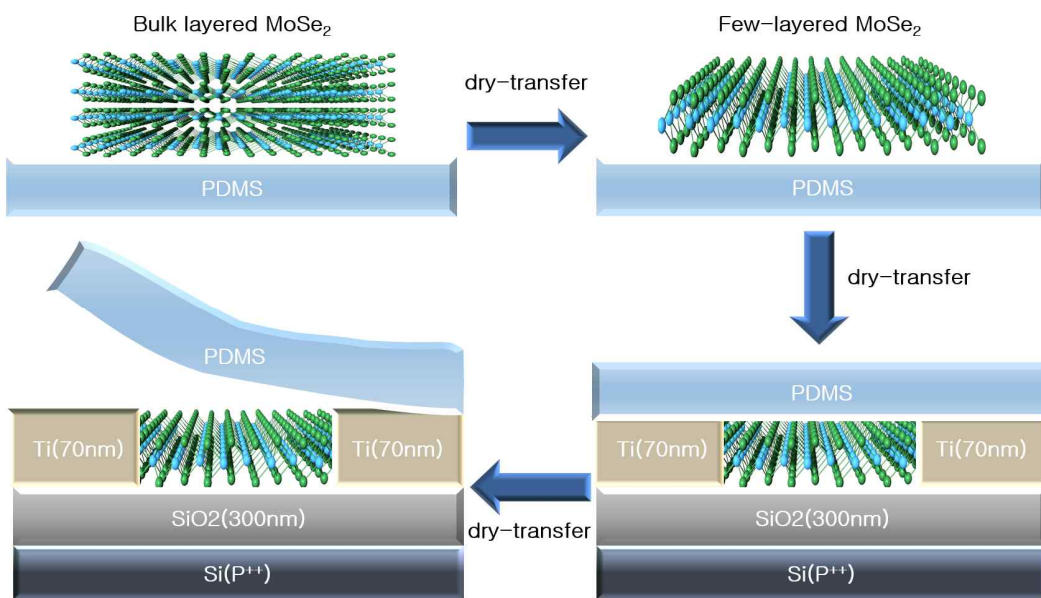


그림 10. PDMS를 사용한 MoSe<sub>2</sub> 기반의 전계효과 트랜지스터 제작 개략도

## B. 급속 열처리(RTA, rapid thermal annealing)공정

급속 열처리(RTA, rapid thermal annealing)는 신속한 열처리 및 전기로에 비해 상대적으로 균일한 열처리를 위한 공정으로 할로겐 램프를 사용하여 시료의 표면 온도를 빠르게 증가시키며, 높은 반사율을 위해 금(Au)으로 코팅되어 있다. 질량유량 제어기(MFC, mass flow controller)로 불활성 가스 흐름을 제공함으로써 가스량 조절이 가능하다. RTA는 일반적으로 반도체 재료의 결정화를 위한 전극 재료 코팅 후 어닐링에 사용된다. RTA의 장점은 온도를 빠르게 가열하거나 냉각하여 열 처리량을 크게 줄일 수 있다. 하지만 RTA는 웨이퍼 전체 표면의 온도 균일성 및 웨이퍼 온도 유지시간 특성, 그리고 웨이퍼 교체시마다 정확한 온도 측정 및 제어의 문제가 제기 되었으나, 이러한 기술적 문제점들이 해결되면서 다양한 열처리 공정 중 RTA로 대체 될 것으로 기대된다. 특히, RTA는 단일 웨이퍼 처리 장치 및 작업 환경에서 변수의 수를 제어하기 수월하기 때문에 그림 11과 같이 RTA 장비를 사용하여 2차원 물질과 전극 간의 접촉저항 및 전기적 특성을 개선하기 위해 열처리 공정을 수행하였다. RTA를 이용한 열처리 공정 조건은 표 2에 도시하였다.



그림 11. 급속 열처리 장비 (GD Tech)

표 2. 금속 열처리 공정표

RTA	annealing temperature	25[°C]→400[°C]
	annealing time	120[min]
	Ar gas	30[sccm]
	Vacuum Pressure	288[mTorr]

## C. MoSe<sub>2</sub> 물성 측정법

### 1. 주사 전자 현미경(SEM, scanning electron microscope)

주사 전자 현미경(SEM, scanning electron microscope)은 고체 시료의 미세 조직과 형상을 관찰할 때 광범위하게 사용되는 현미경이다. 초점심도(depth of focus)가 깊고 3차원 영상의 관찰이 용이해서 결정 외형 및 복잡한 표면구조 등을 입체적이면서 높은 배율로 관찰할 수 있는 분석 장비이다. 활용도 또한 매우 다양해서 광물과 화석, 금속 파편, 반도체 소자 및 회로망의 품질 검사, 생체 시료, 고분자 및 유기물 등 전 산업 영역에 걸쳐 있다. 주사 전자 현미경은 전자빔(electron beam)을 가속 및 발생시키는 전자총(electron gun)과 전자빔을 가늘게 집속(focusing)하는 집속렌즈(condenser lens)와 대물렌즈(objective lens), 필라멘트를 떠난 전자가 시료에 닿을 때까지 전자빔의 경로를 제어하는 주사코일(deflection coil)로 구성되어 있다. 진공상태에서 가느다란 전자빔을 시료 표면에 주사시키면 그림 12와 같이 2차 전자(SE, secondary electron), 반사전자, 투과전자(transmitted beam), 후방산란전자(BSE, back scattered electron), X선 등 다양한 전하입자가 발생하는데 3차원의 표면형상과 구조를 알기위해서는 방출되는 2차 전자의 강도의 스캔을 통해 입체감 있는 시료의 표면상을 확인 할 수 있다.

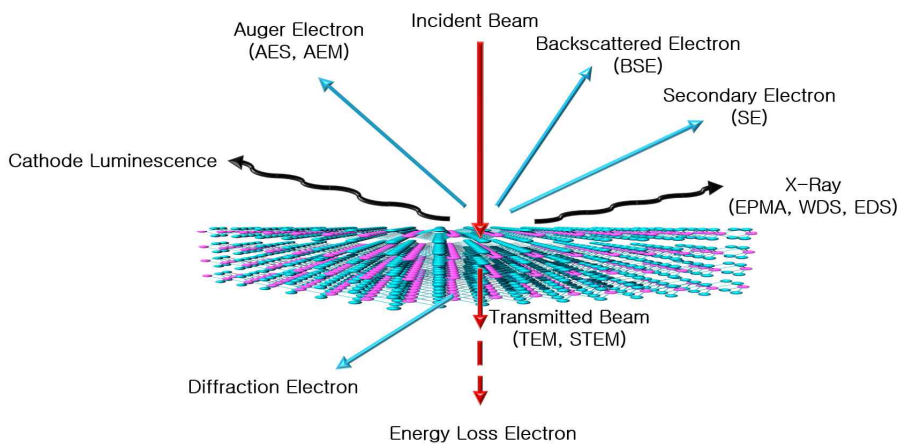


그림 12. 시료에 전자가 입사할 경우 발생하는 여러 종류의 전하입자

## 2. 원자 힘 현미경(AFM, atomic force microscopy)

원자 힘 현미경(AFM, atomic force microscopy)은 탐침(probe)을 통해 탐침과 시료사이의 간격이나 상호작용에 의해 달라지는 반데르발스 힘(Van der Waals force)에 의해 탐침이 움직이게 되는 원리이다. 측정 시료의 표면에 원자 단위까지 근접시키면 양자의 원자 간에 힘이 작용하게 되고 이때 발생하는 인력과 척력에 의해 표면의 원자의 형태 및 구조를 측정하는 현미경이다. STM(scanning tunneling microscope)이나 SEM과는 다르게 전자의 이동과는 무관하여 시료 표면의 금속증착 및 별도의 진공 장치가 필요가 없다. AFM은 텅스텐 바늘 대신에 미세 가공(micromachining)으로 제작된 캔틸레버(cantilever)라는 작은 막대를 사용한. 접촉식 AFM에서는 반발력을 사용하는데 이 힘은 1~10nN 정도로 미세하지만 캔틸레버 또한 굉장히 민감하기 때문에 측정이 가능하다. 접촉모드 측정 시 시료 표면을 긁으면서 측정하기 때문에 시료 표면의 손상이 될 수 있는 단점이 있지만 정확한 표면을 측정할 수 있는 장점이 있다. AFM 장비를 사용하여 제작된 소자의 두께 측정을 진행 하였다.

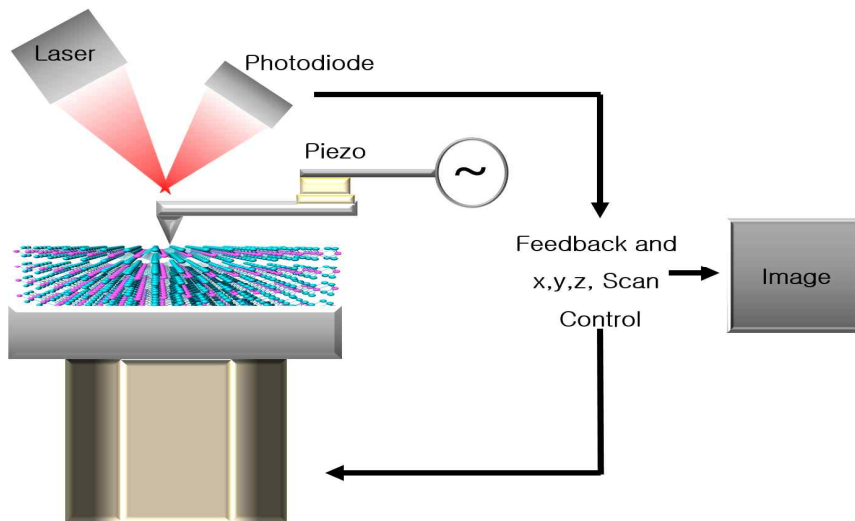


그림 13. 원자 힘 현미경의 기본 원리



### 3. 라만 분광법(Raman spectroscopy)

라만 분광법(Raman spectroscopy)은 2차원 물질의 층간 상호 작용이 중요한 물성이기 때문에 2차원 재료의 구조적 특성 분석에 널리 사용되고 있다. 빛이 어떠한 매질을 통과할 때 빛의 파장(wavelength)을 변화시켜 빛의 일부는 진행하는 방향에서 다른 방향으로 이탈해 진행하는 현상을 산란(scattering)이라 한다. 빛의 파장을 변화시키는 산란 현상을 라만 효과(Raman effect)라고 한다. 이때 산란된 빛은 기존의 에너지를 그대로 가지고 있기도 하지만 기존 에너지보다 적거나 많은 에너지를 가지는 경우도 있다. 산란된 빛 중 기존의 에너지를 그대로 유지하면서 산란되는 과정을 레일리산란(Rayleigh scattering) 또는 탄성산란(elastic scattering)이라 하고, 에너지를 잃거나 얻으면서 산란되는 과정을 라만산란(Raman scattering) 또는 비탄성 산란(inelastic scattering)이라고 한다[55-56]. 라만 산란을 측정하는 분광계의 비약적인 발달로 산란된 빛의 세기를 주파수에 따른 띠(band) 혹은 스펙트럼을 이용한 라만 분광법(Raman spectroscopy)은 분자의 진동 스펙트럼을 측정하여 분자의 진동 구조 연구 및 물질의 정성 및 정량 분석에 이용된다. 라만 분광법은 빛이 레일리 산란과 비교하여 에너지가 감소 또는 증가했는지 측정함으로써 그 차이를 라만변이(Raman Shift)에 표시하는데 이때 라만변이가 분자의 진동 주파수를 의미한다. 일반적으로 상온에서 바닥상태에 있는 분자수가 진동 여기상태에 있는 분자 수 보다 많기 때문에 Stokes 효과가 Anti-Stokes 효과보다 크게 나타나며 스펙트럼에서 또한 더 큰 강도를 보이기 때문에 Stokes 산란을 측정하는 것이 일반적이다.

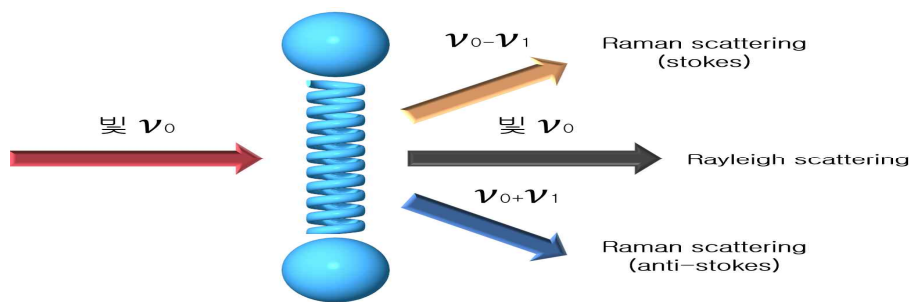


그림 14. 라만 산란의 종류

#### 4. 전기적 분석

HP4155-A는 반도체의 특성을 측정하고 분석하는 측정 장비이다. 전기적 특성을 분석하기 위해 그림 15~16에서 보여지는 반도체 특성 분석기(Semiconductor Parameter Analyzer) HP4155-A(Hewlett Packard) 및 4 프로브 스테이션(4 probe station)을 사용하여 상온 및 암실에서 측정하였으며, 소스(source)-드레인(drain)과 게이트(gate) 전극에 전압 인가하여 전류를 측정 하였다.



그림 15. 반도체 특성 분석기 HP4155-A(Hewlett Packard)

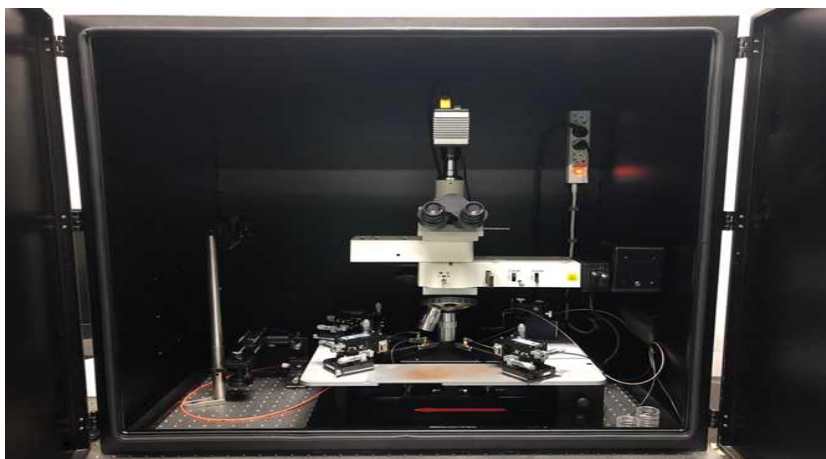


그림 16. 4 프로브 스테이션

## IV. 실험결과 및 고찰

### A. MoSe<sub>2</sub> 박막의 형성 및 두께 측정

그림 17~20의 (a)는 PDMS를 통해 Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 전사된 서로 다른 두께의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터의 SEM 이미지이며, 소스-드레인의 길이 및 폭은 각각 10 $\mu$ m, 7 $\mu$ m 이다. 그림 17~20의 (b)는 MoSe<sub>2</sub>의 AFM 샘플 표면 이미지이다. 한편, 반도체 특성분석기 HP4155-A를 이용하여 MoSe<sub>2</sub> 기반 소자의 I-V 측정을 통하여 두께를 예측 할 수 있다. 그러나 정확한 MoSe<sub>2</sub>의 두께 측정을 위해 AFM 두께 측정을 진행 하였다. 그림 17~20의 (c)는 MoSe<sub>2</sub>의 두께별 특성을 파악하기 위해 Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 형성된 MoSe<sub>2</sub>의 두께를 XE-200 AFM(PSIA corp)으로 측정하였고, 그 결과 각각 6nm, 30nm, 45nm, 90nm의 두께를 확인 하였다.

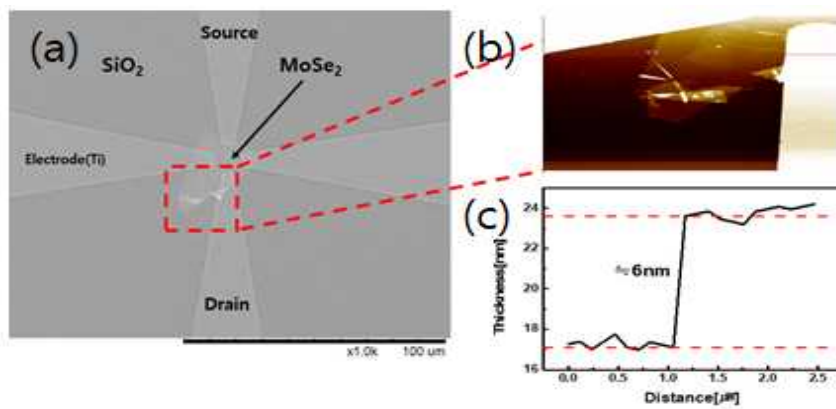


그림 17. 6nm 두께의 MoSe<sub>2</sub> SEM 이미지 및 AFM 측정값

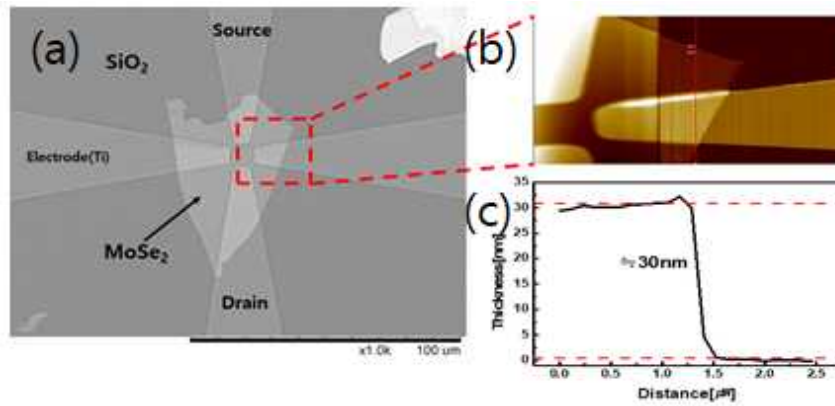


그림 18. 30nm 두께의 MoSe<sub>2</sub> SEM 이미지 및 AFM 측정값

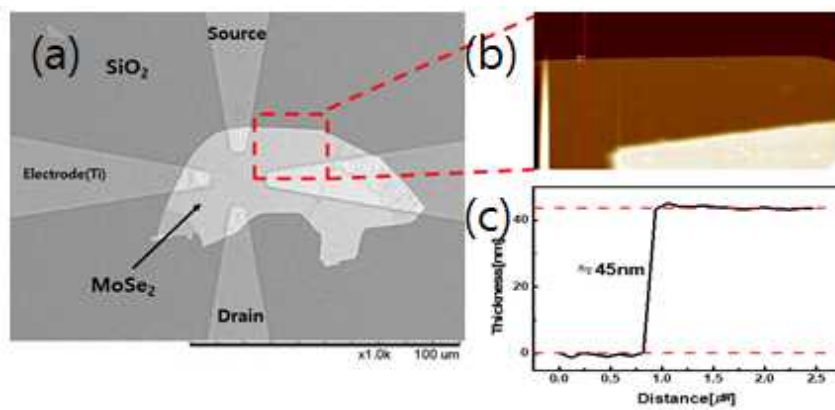


그림 19. 45nm 두께의 MoSe<sub>2</sub> SEM 이미지 및 AFM 측정값

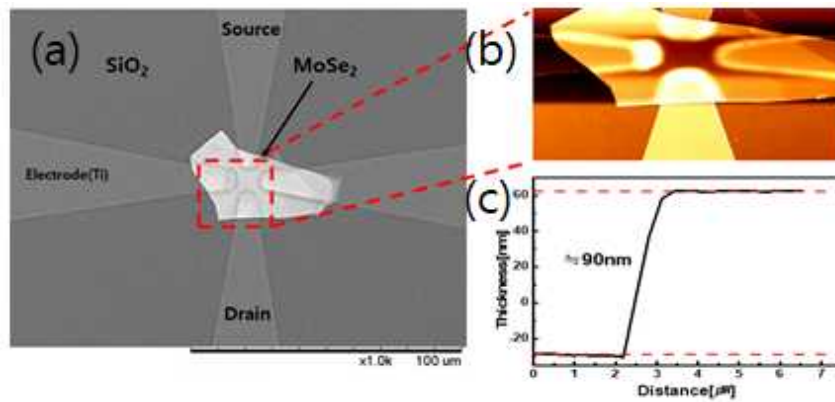


그림 20. 90nm 두께의 MoSe<sub>2</sub> SEM 이미지 및 AFM 측정값

## B. MoSe<sub>2</sub> 박막의 라만분광분석

MoSe<sub>2</sub> 시료의 라만 분광 측정에는 532nm 레이저를 사용하여 여기(excitation)시킨 후 산란되는 빛의 파장 변화와 강도(intensity)를 CCD 검출기로 측정함으로써 분자의 진동에너지 구조를 스펙트럼으로 얻을 수 있다. 특정 파장의 레이저를 샘플에 조사하여 발생하는 라만 산란을 이용하여 산란된 빛 중에서 레일리 산란에 비해 Stokes/Anti-Stokes 산란이 얼마만큼 변이 되었는지를 통해 해당 물질의 구조와 특성, 분자 상호간의 결합상태 등 분자구조를 확인 할 수 있다. 그림 21은 MoSe<sub>2</sub> 라만 분광 측정을 통해 얻어진 그래프로 520cm<sup>-1</sup>에서 실리콘 피크를 사용하여 보정 하였으며, MoSe<sub>2</sub>의 라만 피크는 두께에 따라 100~300cm<sup>-1</sup> 범위에 라만 피크들이 나타나는 것을 확인하였다. MoSe<sub>2</sub>는 244cm<sup>-1</sup>에서 A<sub>1g</sub> 모드에 해당하는 피크를 확인 할 수 있었으며, MoSe<sub>2</sub>의 고유한 라만 피크와 일치하는 것을 확인할 수 있었다[53-54].

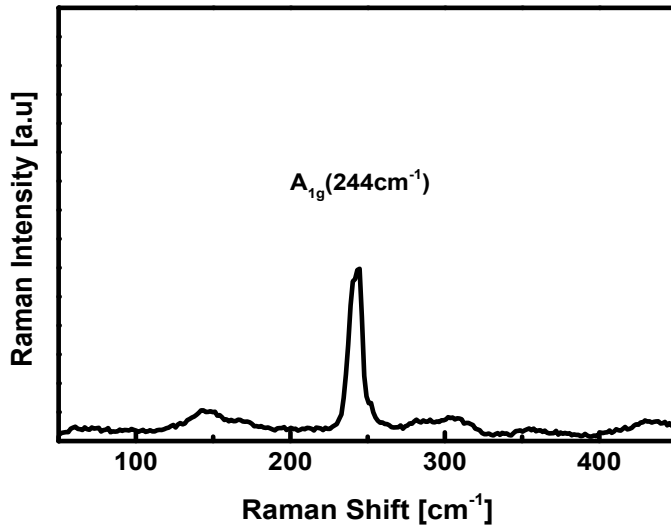


그림 21. 라만 스펙트럼

### C. 두께 변화에 따른 MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 전기적 특성

MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 전기적 특성을 측정하기 위해 반도체 특성분석기 HP4155-A (Hewlett Packard) 및 4 프로브 스테이션과 532nm 레이저를 사용하여 측정을 진행하였다. 레이저 출력에 따른 광학적 특성을 측정하기 위해 제작된 소자에 백 게이트(back gate) 전압을 인가하기 위해 전도성 접착제(silver paste)를 소자의 바닥면에 도포 후 백 게이트로는 구리(Cu) 테이프를 사용하였다. 그림 22는 MoSe<sub>2</sub> 기반소자 제작 개략도이다.

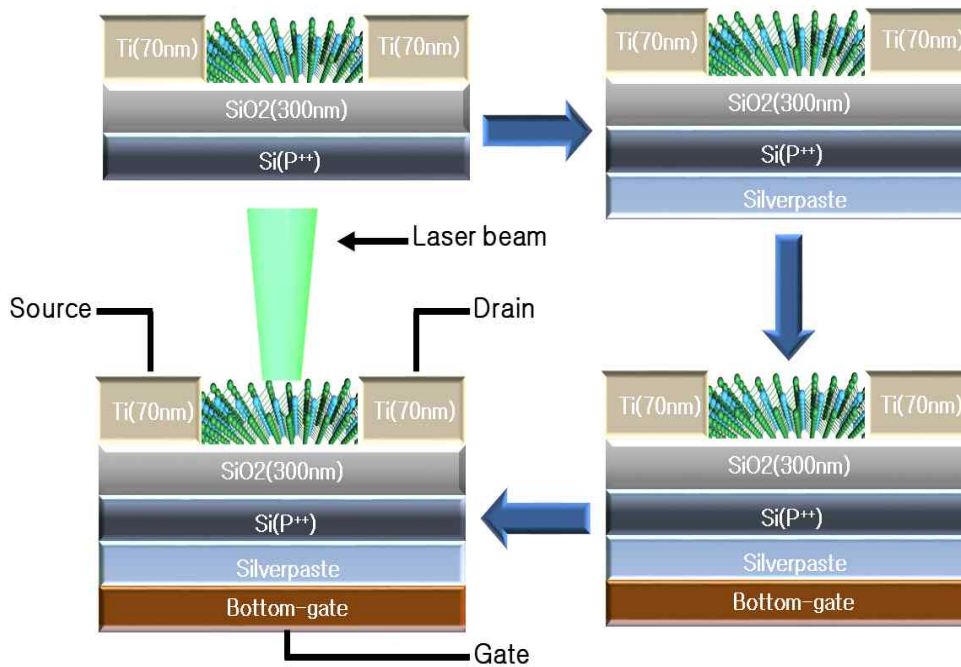


그림 22. MoSe<sub>2</sub> 기반소자 제작 개략도

## 1. MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 V<sub>DS</sub>-I<sub>D</sub> 특성

소스-드레인 사이에 전압을 -15V~15V로 변환하며 인가하여 다양한 두께의 (6nm, 30nm, 45nm, 90nm) 2차원 MoSe<sub>2</sub> 채널 두께를 가지는 소자에서 I<sub>D</sub>-V<sub>DS</sub>를 측정하였다. 그림 23과 같이 모든 소자는 오믹 접촉 거동을 보여 주며, 소자 1~4의 저항은 15V의 소스-드레인 전압에서 각각 78.73Ω, 0.60Ω, 0.30Ω, 0.07Ω의 저항을 확인 하였다. 또한, MoSe<sub>2</sub>의 두께 증가에 대한 저항률의 감소는 캐리어 농도의 증가로 인한 것으로 판단된다[20, 22].

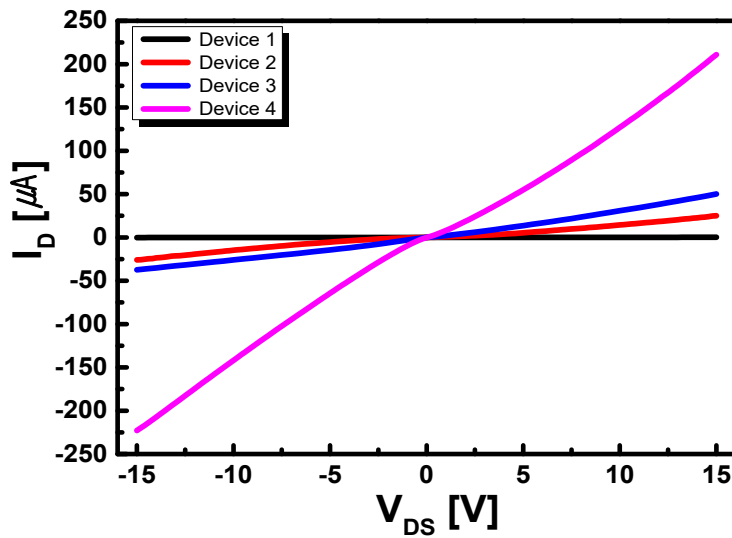
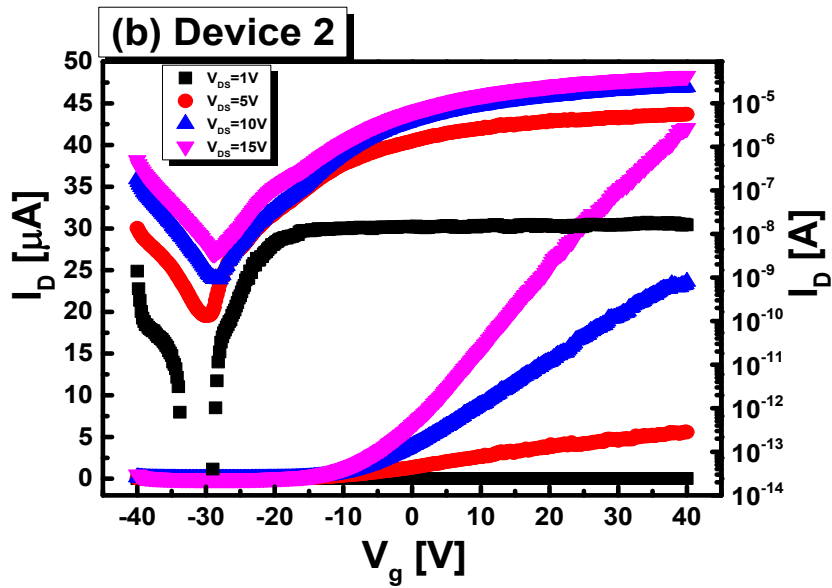
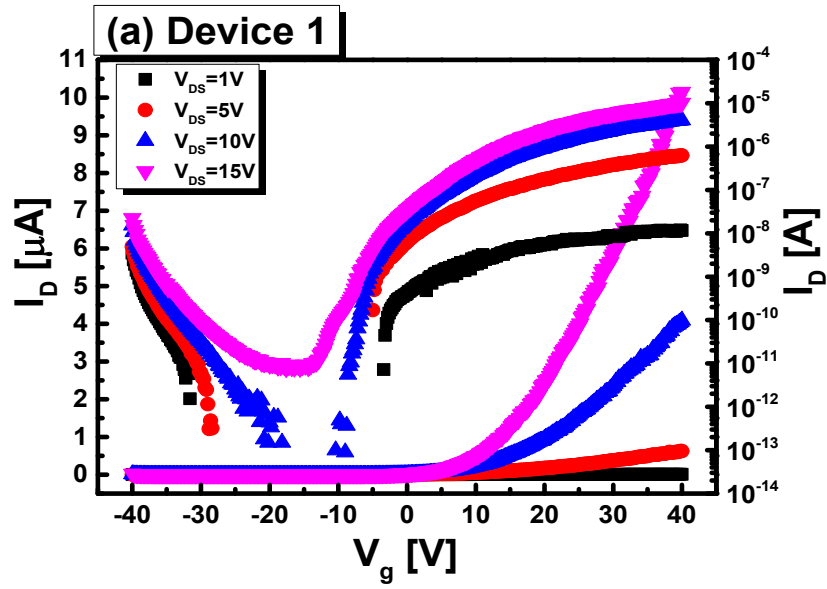


그림 23. 두께의 변화에 따른 I<sub>D</sub>-V<sub>DS</sub> 특성

## 2. MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 V<sub>g</sub>-I<sub>D</sub> 특성

그림 24의 (a), (b), (c) (d)는 각각 6nm, 30nm, 45nm, 90nm의 두께 변화에 대한 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 게이트 전압에 따른 드레인 전류 특성을 나타내고 있다. 게이트 전압은 -40V에서 40V로 인가하였으며 소스-드레인 전압을 각각 1V, 5V, 10V, 15V로 일정하게 인가하면서 전류변화를 측정하였다. 그림 24의 (a), (b), (c) (d)의 서로 다른 두께의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터소자 들은 양(+) 전압에서 게이트 산화막과 MoSe<sub>2</sub>의 계면에 축적되어지는 전형적인 n-type 특성을 나타내고 있다[20, 49]. MoSe<sub>2</sub>의 소자들의 on/off 비율은 그림 24의 (a), (b), (c) (d)의 로그 스케일 (log scale) 값으로 계산되었다. V<sub>g</sub>-I<sub>D</sub>특성 곡선을 보면 일반적으로 두께가 두꺼워질수록 소자가 작동 되는 전압이 음(-) 전압 방향으로 이동함을 확인 할 수 있다. 또한, MoSe<sub>2</sub>는 n-type 반도체 특성을 나타낸다.





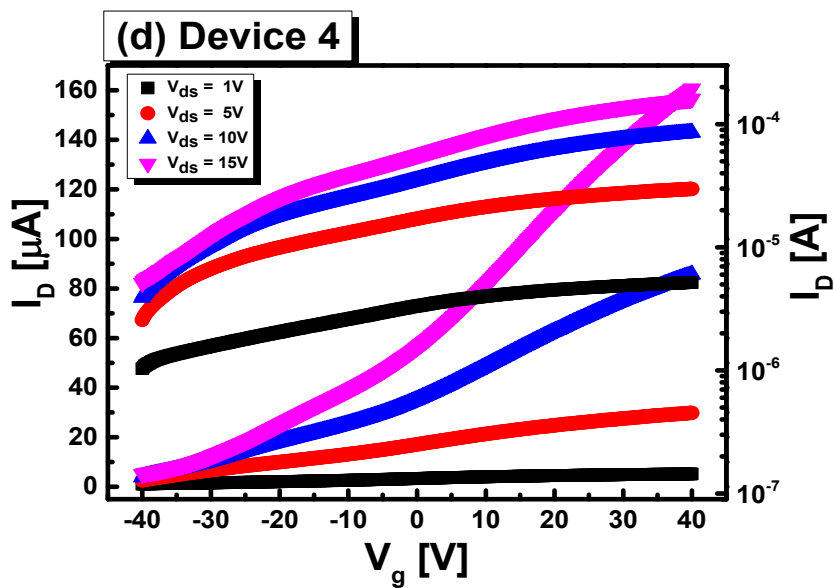
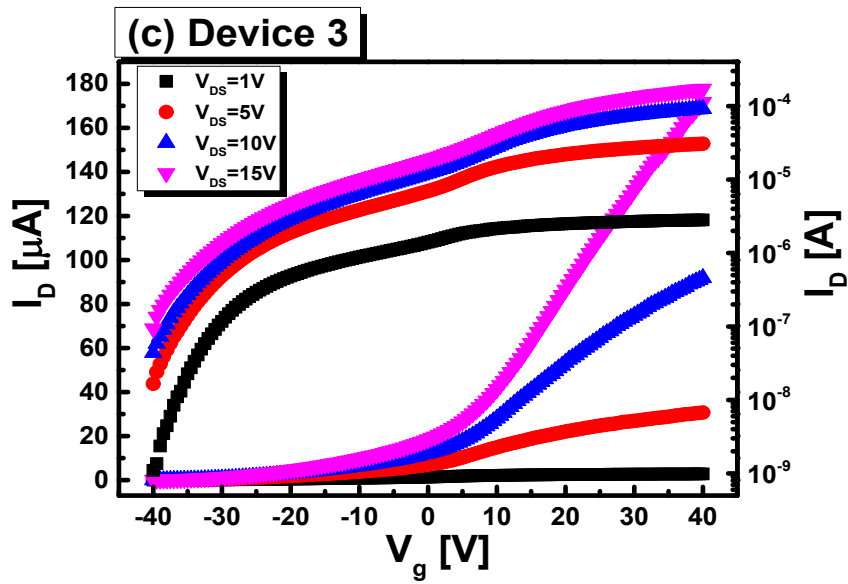


그림 24. (a) 6nm, (b) 30nm, (c) 45nm, (d) 90nm 두께의 MoSe<sub>2</sub>에서 V<sub>g</sub>-I<sub>D</sub> 특성

$V_g$ - $I_D$  그래프를 이용하여 기울기를 구한 후 전자 이동도(Mobility)를 아래의 식으로 계산하였다.

$$\mu_{eff} = \frac{L}{WC_i V_{ds}} \times \frac{dI_d}{dV_g}$$

식에서  $L$ 은 채널의 길이를 나타내며,  $W$ 는 채널의 폭을 나타낸다.  $C_i$ 는  $\epsilon_0 \epsilon_r / d$ 로 부터 계산된 게이트 정전용량이며 정전용량은  $1.15 \times 10^{-8} \text{F/cm}^2$ 이다.  $\epsilon_0$ 와  $\epsilon_r$ 은 각각 MoSe<sub>2</sub>의 유전율 및 유전상수를 나타내며,  $d$ 는 SiO<sub>2</sub>의 두께(300nm)를 의미한다. 이때  $dI_d/dV_g$ 는 각 소자별 전자 이동도의 변수이며 소스-드레인 전압 1V, 5V, 10V, 15V의 그래프를 미분한 기울기를 의미한다. 제작한 전계효과 트랜지스터 소자의 채널 길이( $L$ ) 및 채널 폭( $W$ )은 각각  $10\mu\text{m}$  및  $7\mu\text{m}$  이고  $\epsilon_0$ 와  $\epsilon_r$ 은 각각  $8.854 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$  및 3.9이다. 동일한 소스-드레인 전압 그래프를 미분하여 기울기를 구한 후 전자 이동도를 계산하였다. 그림 25는 소스-드레인 전압에 따른 다양한 두께(6nm, 30nm, 45nm, 90nm)의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 두께 변화에 따른 전자 이동도를 보여주고 있다.

6nm의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 전자 이동도는 소스-드레인 전압 1V, 5V, 10V, 15V에서 각각  $0.04 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $0.51 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $1.91 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $3.04 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 이다. 30nm의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 전자 이동도는 동일한 소스-드레인 전압에서 각각  $0.18 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $3.25 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $6.59 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $8.17 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 이다. 45nm의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 전자 이동도는 동일한 소스-드레인 전압에서 각각  $20.87 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $44.13 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $62.52 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $78.29 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 이다. 90nm의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 전자 이동도는 동일한 소스-드레인 전압에서 각각  $9.18 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $10.43 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $17.64 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $24.43 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 이다. 소자의 채널 두께가 증가할수록 전자 이동도가 증가하였으며, 특정 두께가 되면 전자 이동도가 감소하였다. H. Nussbaumer 등에 따르면, 공간이 채워지게 되면 그 이후의 두께에서는 전자 이동도가 증가하는 효과는 미미한 대신 박막이 두꺼워지면서 캐리어가 효율적으로 이동하지 못하기 때문이다[63]. 또한, 얇은 층에서는 층이 증가할수록 층간의 스캐터링(scattering) 현상으로 인해 전자 이동도 값이 낮은 현상을 보이지만, 층이 증가할수록 MoSe<sub>2</sub>와 전극의 컨택 저항이 낮아지게 되므로 전하

스크리닝이나 표면 쿨롱 불순물에 의한 스캐터링이 감소하여 전자 이동도가 증가하게 된다[20, 61]. 이러한 특성은 MoSe<sub>2</sub> 박막트랜지스터에서도 흔히 보고되는 결과이고, 또한 기존의 산화물 박막트랜지스터나 유기물 박막트랜지스터(organic thin film transistor)의 결과에서 잘 나타나고 있다.[60-63]

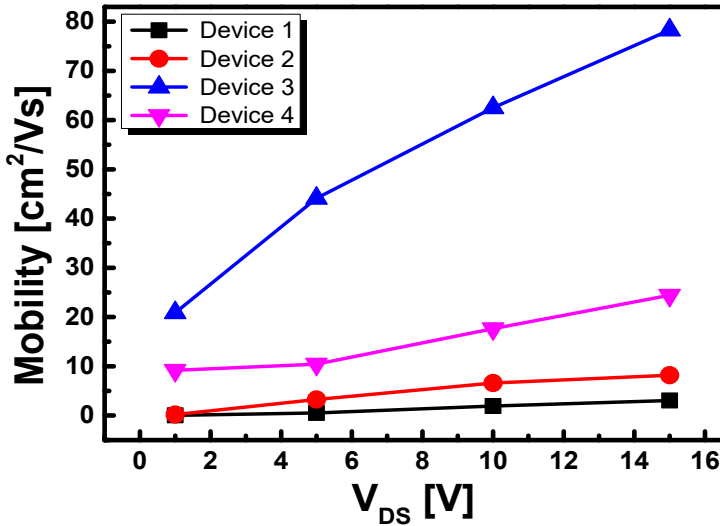


그림 25. V<sub>DS</sub> 전압에 따른 MoSe<sub>2</sub> 소자의 전자 이동도

표 3은 소스-드레인 전압이 15V 일 때 MoSe<sub>2</sub>의 두께에 따른 전자 이동도 및 문턱전압 그리고 on/off 전류비를 보여주고 있다. 6nm MoSe<sub>2</sub>의 전자 이동도, 문턱전압, on/off 비율은 각각 3.04cm<sup>2</sup>/Vs, 4V, 4.57×10<sup>2</sup>이다. 30nm MoSe<sub>2</sub>의 전자 이동도, 문턱전압, on/off 비율은 각각 8.17cm<sup>2</sup>/Vs, -15V, 8.60×10<sup>1</sup>이다. 45nm MoSe<sub>2</sub>의 전자 이동도, 문턱전압, on/off 비율은 각각 78.29cm<sup>2</sup>/Vs, -27.5V, 1.83×10<sup>3</sup>이다. 90m MoSe<sub>2</sub>의 전자 이동도, 문턱전압, on/off 비율은 각각 24.43cm<sup>2</sup>/Vs, -45V, 3.14×10<sup>1</sup>이다. 전자 이동도의 최대값은 MoSe<sub>2</sub>의 두께가 45nm 일 때 78.29cm<sup>2</sup>/Vs으로 측정 되었으며, MoSe<sub>2</sub>의 두께가 증가 할수록 소자의 문턱전압은 음(-)의 방향으로 이동하는 경향을 확인 할 수 있었다. 이는 두께가 증가할수록 내재된 캐리어가 증가하기 때문에 문턱전압 밖에서 전류가 흐르기 시작하는 것으로 판단된다[43]. 또한, 높은 문턱전압은 저전력 소비 응용에 적합하지

않으며, 게이트 산화물로서 SiO<sub>2</sub> 대신 High-*k* 유전체 재료를 사용하면 문턱 전압이 감소되고 전류 on/off 비율이 향상 될 것이다.[62]

표 3. V<sub>DS</sub> = 15V 일 때 MoSe<sub>2</sub>의 두께에 따른 전기적 특성

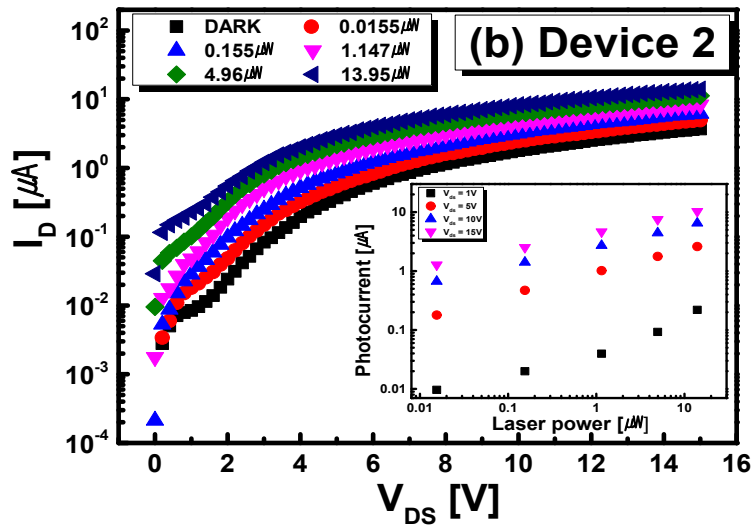
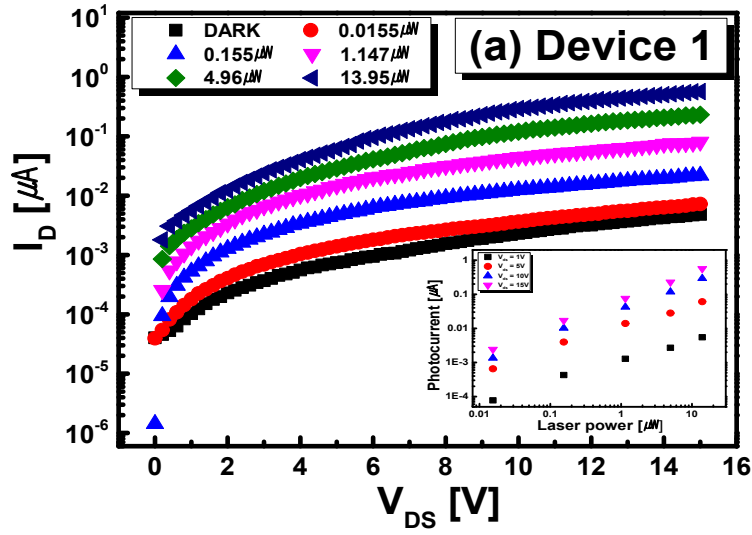
Thickness	6 nm	30 nm	45 nm	90 nm
Mobility(cm <sup>2</sup> /Vs)	3.04	8.17	78.29	24.43
Threshold Voltage(V <sub>th</sub> )	4	-15	-27.5	-45
on/off ratio	4.57×10 <sup>2</sup>	8.60×10	1.83×10 <sup>3</sup>	3.14×10

### 3. MoSe<sub>2</sub> 기반소자의 광학적 특성

그림 26의 (a), (b), (c), (d)에서는 각각 6nm, 30nm, 45nm, 90nm의 서로 다른 두께의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 소스-드레인 전압과 레이저 출력 (0.0155 $\mu$ W, 0.155 $\mu$ W, 1.147 $\mu$ W, 4.96 $\mu$ W, 13.95 $\mu$ W)에 대한 소스-드레인 전류 의존성을 보여주고 있다. 소자에 빛을 비추고 I-V를 측정했을 때 전류가 증가하는 이유는 광전류( $I_{ph}$ )가 생성되기 때문이며, 광전류는 빛을 조사한 상태에서 측정된 전류의 크기에서 어두운 상태의 측정된 전류의 크기의 차로 정의할 수 있다. 광전류는 다음의 식을 사용하여 계산되어 진다.

$$I_{ph} = I(light) - I(dark)$$

그림 26의 (a), (b), (c), (d)에 삽입된 각각의 그림은 소스-드레인(1V, 5V, 10V, 15V) 전압의 변화와 레이저 출력 (0.0155 $\mu$ W, 0.155 $\mu$ W, 1.147 $\mu$ W, 4.96 $\mu$ W, 13.95 $\mu$ W) 변화에 따른 광전류 특성을 나타내고 있다. 각 소자들에 조사된 레이저 출력이 증가함에 따라 광전류는 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 레이저 출력의 증가로 인해 전자-정공 쌍의 생성을 증가시켜 각각의 소자들의 광전류를 선형적으로 증가시킨다.



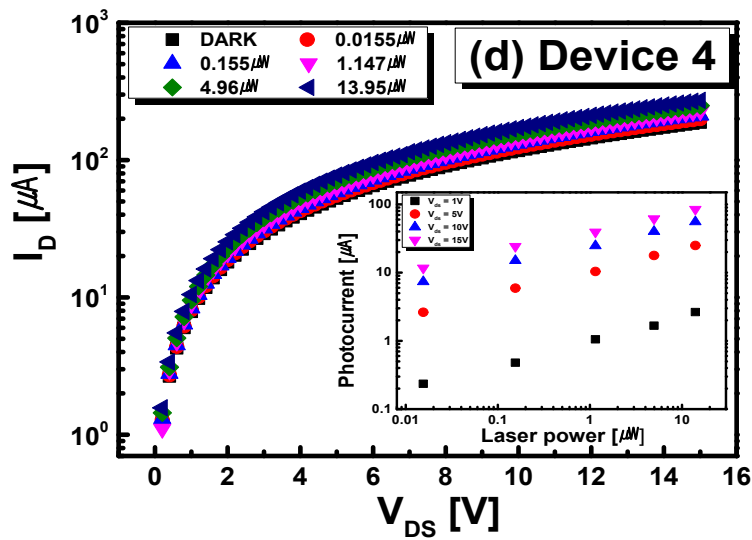
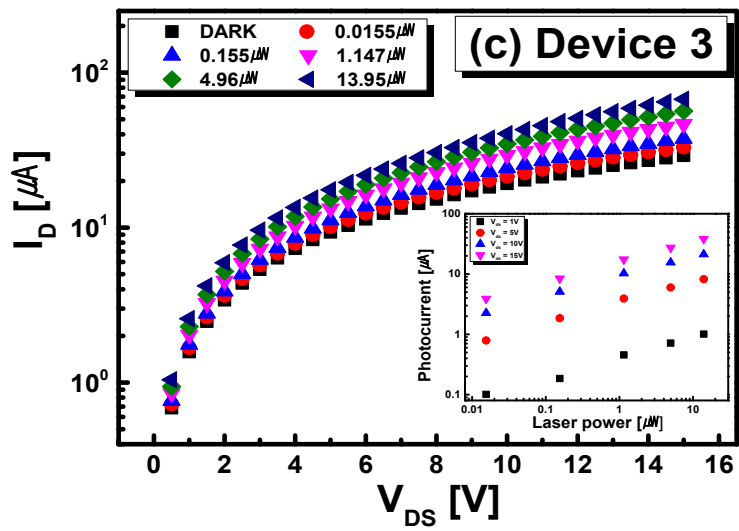
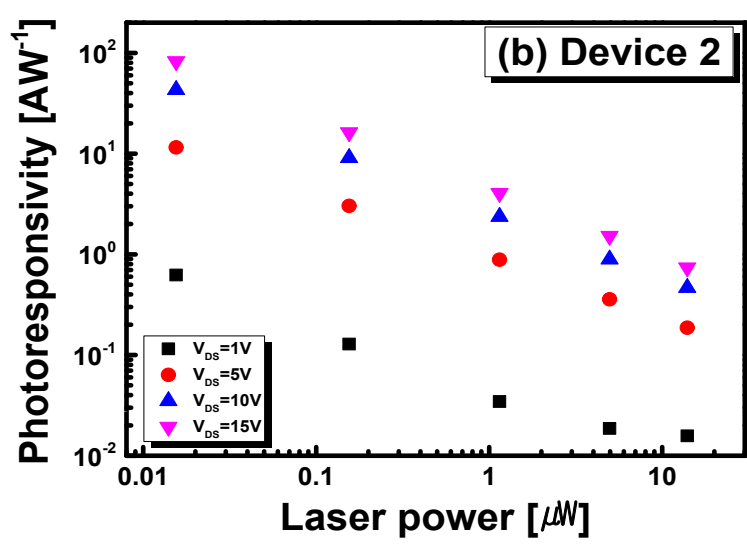
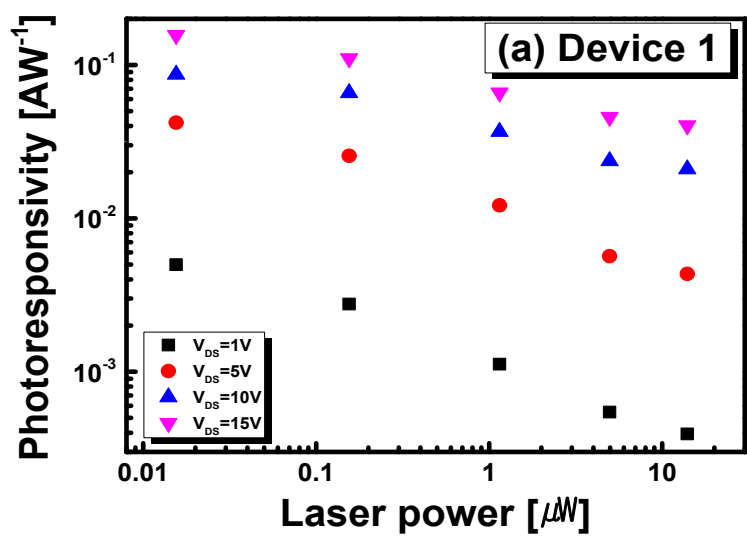


그림 26. (a) 6nm, (b) 30nm, (c) 45nm, (d) 90nm 소자의  $V_{DS}$  및 레이저 출력에 대한  $I_D$  의존성



광 응답성(photoresponsivity) 및 외부양자효율(external quantum efficiency)은 광 검출기에 대한 중요한 매개 변수이다. 그림 27의 (a), (b), (c), (d)에서는 각각 6nm, 30nm, 45nm, 90nm 등 다양한 두께의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 레이저 출력과 소스-드레인 전압의 변화에 따른 광 응답성을 보여주고 있다.

광 응답성은 식  $R_{\lambda} = I_{ph}/P$ 를 사용하여 계산하였으며, 여기서  $P$ 는 레이저 출력을 의미한다. 측정은 레이저 출력의 동일한 값과 소스-드레인 전압 1V, 5V, 10V, 15V에서 진행 되었다. 소자 1(6nm), 소자 2(30nm), 소자 3(45nm), 소자 4(90nm)의 광 응답성은 15V의 소스-드레인 전압 및 0.0155 $\mu$ W의 레이저 출력에서 각각 0.15AW<sup>-1</sup>, 82.43AW<sup>-1</sup>, 251.08AW<sup>-1</sup>, 753.87AW<sup>-1</sup>의 값을 얻었으며, 레이저 출력의 증가에 따라 광 응답성은 감소 하였다. 또한, 트래핑 효과(trapping effect)를 확인 하였을 때, 소스-드레인 전압 15V에서 최대값을 보였다. 광 응답성은 레이저 출력에 따라 감소하는데, 이는 MoSe<sub>2</sub>의 단일층에 대해 보고 된 것과 동일한 거동을 보이며[22-23], MoSe<sub>2</sub>와 게이트 산화물의 계면에서의 트랩 상태에 기인한다[41, 61]. Chamlagain 등에 따르면, MoSe<sub>2</sub>와 SiO<sub>2</sub>의 계면에서의 트랩 상태의 밀도는 7.6 $\times 10^{12}$ cm<sup>-2</sup>이며, 이 값은 MoS<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 계면에서 보고 된 값보다 크다. 그러므로 높은 트랩 상태밀도는 높은 레이저 출력에서 관찰된 광 응답성 저하를 설명 할 수 있으며, 광 특성에서 Si 기판이 미치는 영향은 비교적 적다고 할 수 있다.



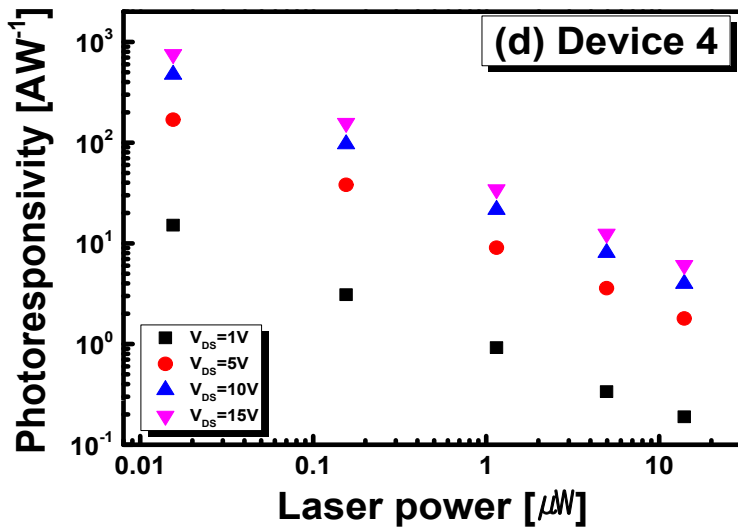
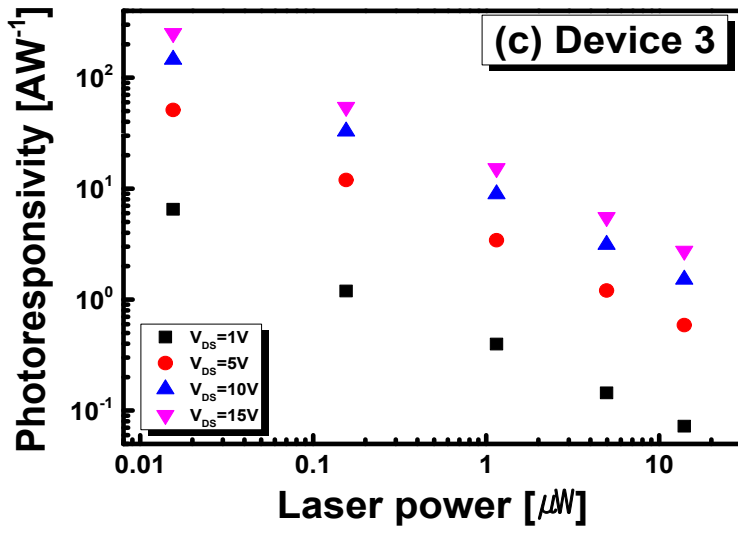
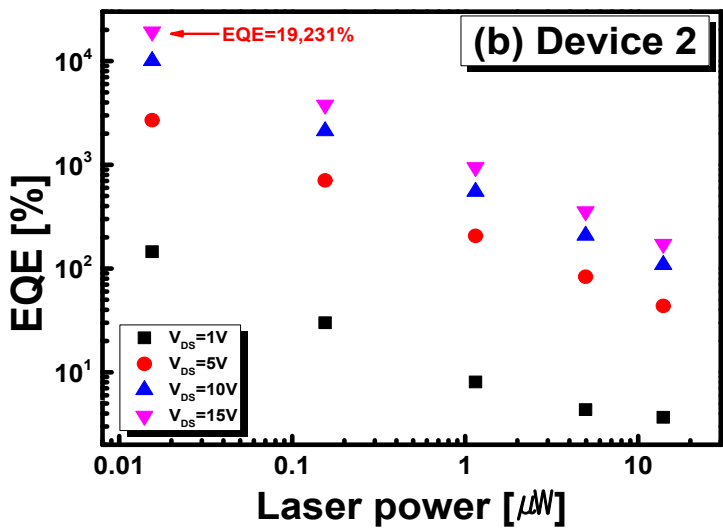
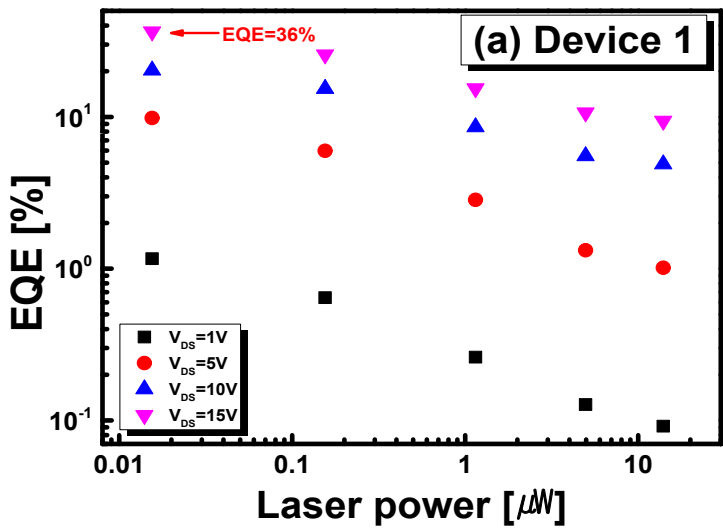


그림 27. (a) 6nm, (b) 30nm, (c) 45nm, (d) 90nm 소자의 레이저 출력의 변화에 의한 광 응답성

그림 28의 (a), (b), (c), (d)에서는 각각 6nm, 30nm, 45nm, 90nm의 서로 다른 두께의 MoSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터 소자의 레이저 출력과 소스-드레인 전압의 변화에 따른 외부양자효율(EQE)을 보여주고 있다. 외부양자효율은 입사 광자당 검출되는 광유도 캐리어의 수이며  $EQE = hcR_{\lambda} / e\lambda$ 의 방정식을 사용하여 계산 하였다. 여기서  $R_{\lambda}$ 는 광 응답성,  $h$ 는 플랑크 상수,  $e$ 는 기본 전자 전하,  $c$ 는 광속,  $\lambda$ 는 여기 파장이다. 측정은 레이저 출력의 동일한 값과 소스-드레인 전압 1V, 5V, 10V, 15V에서 진행 되었다. 소자 1(6nm), 소자 2(30nm), 소자 3(45nm), 소자 4(90nm)의 외부양자효율은 15V의 소스-드레인 전압, 0.0155 $\mu$ W의 레이저 출력에서 각각 36%, 19,231%, 58,580%, 175,891% 로 가장 높은 값을 얻었으며, 소자의 두께가 증가할수록 전자 구조는 변하지 않았지만, 광 흡수 효율의 증가를 의미한다.



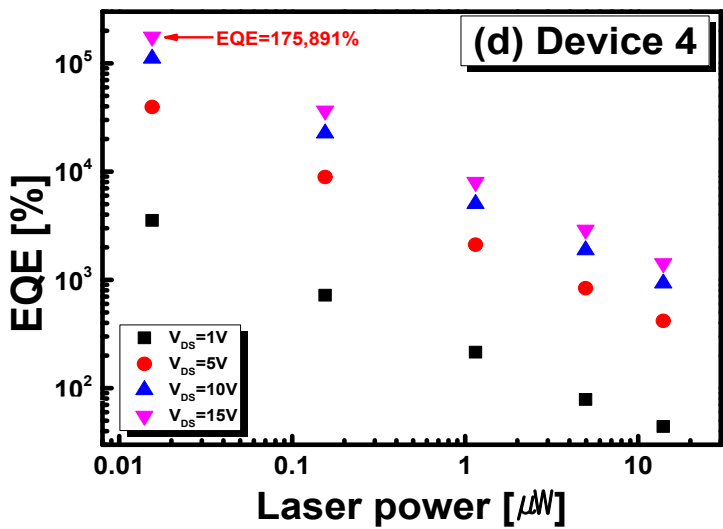
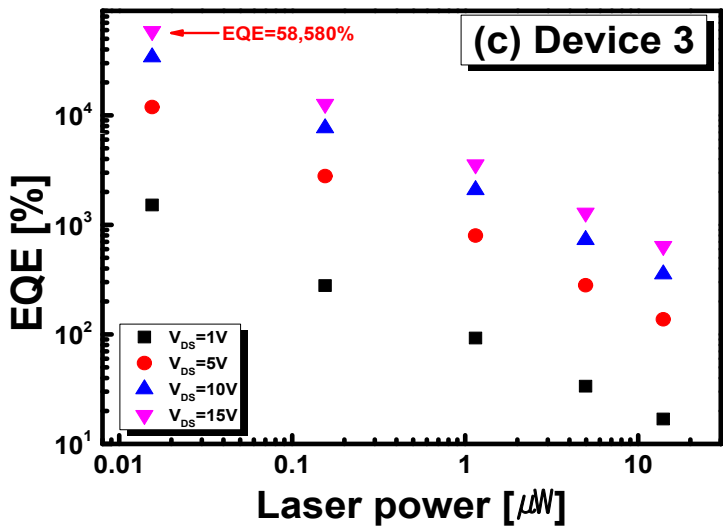


그림 28. (a) 6nm, (b) 30nm, (c) 45nm, (d) 90nm 소자의 레이저 출력의 변화에 의한 외부양자효율

그림 29는 2차원 물질인 MoSe<sub>2</sub> 층의 두께 변화에 따른 소자의 광 응답성 및 외부양자효율의 변화를 보여주고 있다. 소자의 광전자 성능은 두께를 증가시킬 때 향상 되었으며, 이는 MoSe<sub>2</sub>의 두께증가에 의해 광 흡수층이 증가함에 따라 유발될 수 있다. 또한 이러한 현상은 다른 2차원 물질 기반의 광 검출기에서도 보고되었다 [22-23, 27].

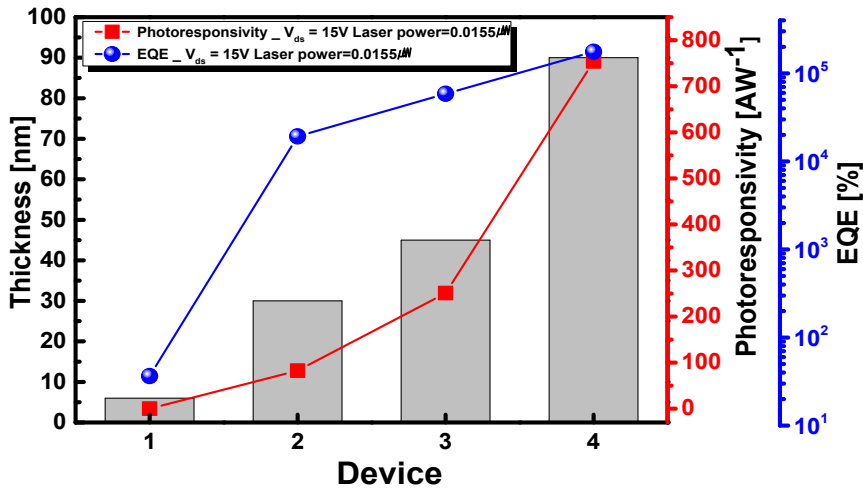


그림 29. MoSe<sub>2</sub> 두께 변화에 따른 소자의 광 응답성 및 외부양자효율

## V. 결 론

본 논문에서는 전이금속 칼코겐 화합물(transition metal dichalcogenide) 물질인  $\text{MoSe}_2$ 를 전사 매개체인 PDMS를 제작하여  $\text{SiO}_2/\text{Ti}$  전극 위에 기계적 박리법을 통해 다양한 두께의 전계효과 트랜지스터를 제작하였다. 물성분석으로는 원자 힘 현미경, 라만분광 측정을 진행하고 반도체 특성 분석기와 4 프로브 스테이션 및 532nm 레이저를 사용하여 전기적 특성 및 광학적 특성을 비교 하였다. 제작된 소자의 2차원 물질과 전극 간의 접촉저항 및 전기적 특성을 개선하기 위해 급속 열처리 장비를 통해서 400°C에서 120분간 Ar 가스 분위기에서 열처리를 진행하였다.

제작된 소자의 채널 역할을 하는  $\text{MoSe}_2$  두께는 AFM분석을 이용하여 측정 하였으며, 측정된 소자의 두께는 각각 6nm, 30nm, 45nm, 90nm로 측정 되었다. 라만 분광 측정을 통하여  $244\text{cm}^{-1}$ 에서  $A_{1g}$  모드에 해당하는  $\text{MoSe}_2$ 의 라만 피크를 확인할 수 있었으며,  $\text{MoSe}_2$  고유의 라만 피크와 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.  $V_{DS}-I_D$ 를 측정을 통해 오믹 접촉을 확인 할 수 있었다. 6nm, 30nm, 45nm, 90nm 서로 다른 두께를 가지는 2차원  $\text{MoSe}_2$ 의 저항은 각각  $78.73\Omega$ ,  $0.60\Omega$ ,  $0.30\Omega$ ,  $0.07\Omega$ 으로 측정 되었다. 이는  $\text{MoSe}_2$ 의 두께 증가에 따른 캐리어 농도의 증가로 인해 저항의 감소로 판단된다.  $V_g-I_D$  특성을 통해 15V의 소스-드레인 전압에서 계산된 전자 이동도는 각각  $3.04\text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $8.17\text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $78.29\text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $24.43\text{cm}^2/\text{Vs}$ 으로 계산 되었다. 2차원  $\text{MoSe}_2$ 의 두께가 증가함에 따라 전자 이동도는 증가 되었고, 특정 두께에 이르러서는 감소하는 특성을 확인 하였다. 이는  $\text{MoSe}_2$  플레이크의 두께 증가로 인해 축적된 캐리어의 증가로 판단된다. 광학적 특성 분석을 위해 광 응답성, 외부양자효율(EQE)을 계산 하였고 광원으로 532nm 레이저를 사용 하였다. 15V의 소스-드레인 전압에서 광 응답성은  $\text{MoSe}_2$  두께에 따라 각각  $0.15\text{AW}^{-1}$ ,  $82.43\text{AW}^{-1}$ ,  $251.08\text{AW}^{-1}$ ,  $753.87\text{AW}^{-1}$  값을 얻었으며, 외부양자효율 또한 36%, 19,231%, 58,580%, 175,891%로 두께가 증가할수록 증가하는 특성을 보여준다. 90nm 두께의 소자에서 매우 높은 광 응답성 및 외부양자효율을 얻을 수 있었으며 우수한 광학적 특성으로 인해 광 검출기 및 수광소자, 태양전지 등 다양한 분야에서 응용 가능하다 판단된다. 발광소자 및 LED, 유연성소자 등에 응용하기 위해서는 매우 얇은 두께의 2차원 층상구조의 물질에 대한 연구가 필요하다 판단된다.



## 참 고 문 헌

- [1] WANG, Qing Hua, et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature nanotechnology*, 2012, 7.11: 699.
- [2] NOVOSELOV, K. S. KS Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, TJ Booth, W Khotkevich, SV Morozov, and AK Geim, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102, 10451 2005. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2005, 102: 10451.
- [3] RADISAVLJEVIC, Branimir. B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, and A. Kis, *Nat. Nanotechnol.* 6, 147 2011. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, 6: 147.
- [4] NOVOSELOV, Kostya S., et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *science*, 2004, 306.5696: 666-669.
- [5] SCHWIERZ, F. F. Schwierz, *Nat. Nanotechnol.* 5, 487 2010. *Nat. Nanotechnol.*, 2010, 5: 487.
- [6] CHEN, Jian-Hao, et al. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO<sub>2</sub>. *Nature nanotechnology*, 2008, 3.4: 206.
- [7] SCHWANK, James R., et al. Radiation effects in MOS oxides. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 55.4: 1833-1853.
- [8] GEIM, Andre K.; GRIGORIEVA, Irina V. Van der Waals heterostructures. *Nature*, 2013, 499.7459: 419.
- [9] NOVOSELOV, Kostya S., et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *nature*, 2005, 438.7065: 197.
- [10] NOVOSELOV, K. S. KS Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, TJ Booth, W Khotkevich, SV Morozov, and AK Geim, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102, 10451 2005. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2005, 102: 10451.
- [11] LEE, Gwan-Hyoung, et al. Heterostructures based on inorganic and organic van der Waals systems. *Apl Materials*, 2014, 2.9: 092511.
- [12] MIRÓ, Pere; AUDIFFRED, Martha; HEINE, Thomas. An atlas of two-dimensional materials. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43.18: 6537-6554.
- [13] QIAO, Jingsi, et al. High-mobility transport anisotropy and linear dichroism in few-layer black phosphorus. *Nature communications*, 2014, 5: 4475.

- [14] MAK, K. F.; LEE, Ch. KF Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, and TF Heinz, Phys. Rev. Lett. 105, 136805 2010. Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 136805.
- [15] RAMASUBRAMANIAM, A. A. Ramasubramaniam, Phys. Rev. B 86, 115409 2012. Phys. Rev. B, 2012, 86: 115409.
- [16] BRITNELL, L. L. Britnell, RM Ribeiro, A. Eckmann, R. Jalil, BD Belle, A. Mishchenko, Y.-J. Kim, RV Gorbachev, T. Georgiou, SV Morozov, AN Grigorenko, AK Geim, C. Casiraghi, AHC Neto, and KS Novoselov, Science 340, 1311 2013. Science, 2013, 340: 1311.
- [17] GANATRA, R.; ZHANG, Q. ACS Nano 8, 4074 2014. CrossRef Google Scholar, 2013.
- [18] RADISAVLJEVIC, Branimir. B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, and A. Kis, Nat. Nanotechnol. 6, 147 2011. Nat. Nanotechnol., 2011, 6: 147.
- [19] MAK, K. F.; LEE, Ch. KF Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, and TF Heinz, Phys. Rev. Lett. 105, 136805 2010. Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 136805.
- [20] LARENTIS, Stefano; FALLAHAZAD, Babak; TUTUC, Emanuel. Field-effect transistors and intrinsic mobility in ultra-thin MoSe<sub>2</sub> layers. Applied Physics Letters, 2012, 101.22: 223104.
- [21] PRADHAN, Nihar R., et al. Ambipolar molybdenum diselenide field-effect transistors: field-effect and hall mobilities. ACS nano, 2014, 8.8: 7923-7929.
- [22] YANG, Shengxue, et al. Self-driven photodetector and ambipolar transistor in atomically thin GaTe-MoS<sub>2</sub> p-n vdW heterostructure. ACS applied materials & interfaces, 2016, 8.4: 2533-2539.
- [23] WANG, Xudong, et al. Ultrasensitive and broadband MoS<sub>2</sub> photodetector driven by ferroelectrics. Advanced Materials, 2015, 27.42: 6575-6581.
- [24] LIU, Han; NEAL, Adam T.; YE, Peide D. Channel length scaling of MoS<sub>2</sub> MOSFETs. ACS nano, 2012, 6.10: 8563-8569.
- [25] BERTOLAZZI, Simone; KRASNOZHON, Daria; KIS, Andras. Nonvolatile memory cells based on MoS<sub>2</sub>/graphene heterostructures. ACS nano, 2013, 7.4: 3246-3252.

- [26] QIU, Hao, et al. Electrical characterization of back-gated bi-layer MoS<sub>2</sub> field-effect transistors and the effect of ambient on their performances. Applied Physics Letters, 2012, 100.12: 123104.
- [27] MIAO, Jinshui, et al. Surface plasmon-enhanced photodetection in few layer MoS<sub>2</sub> phototransistors with Au nanostructure arrays. Small, 2015, 11.20: 2392–2398.
- [28] BARIN, Ihsan. Thermochemical data of pure substances. VCH, 1989.
- [29] BALDO, MAa, et al. Very high-efficiency green organic light-emitting devices based on electrophosphorescence. Applied Physics Letters, 1999, 75.1: 4–6.
- [30] LEE, J. H., et al. Characteristics of the inter-poly Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dielectrics on NH<sub>3</sub>-nitrided bottom poly-Si for next-generation flash memories. Tech. Dig.-Int. Electron Devices Meet, 2000, 645.
- [31] LEE, B. H.; KANG, L. G. W, J. Qi, R. Nieh, Y. Jeon, K. Onishi, and JC Lee, “Ultra-thin Hafnium Oxide with Low Leakage and Excellent Reliability for Alternative Gate Dielectric Application”. Tech. Dig. IEDM, 1999, 133.
- [32] KANG, Laegu, et al. Electrical characteristics of highly reliable ultrathin hafnium oxide gate dielectric. IEEE Electron Device Letters, 2000, 21.4: 181–183.
- [33] MANCHANDA, L., et al. Gate quality doped high-*k* films for CMOS beyond 100 nm: 3–10 nm Al/sub 2/O/sub 3/with low leakage and low interface states. In: Electron Devices Meeting, 1998. IEDM'98. Technical Digest., International. IEEE, 1998. p. 605–608.
- [34] WILK, Glen D.; WALLACE, Robert M.; ANTHONY, Jám. High-*κ* gate dielectrics: Current status and materials properties considerations. Journal of applied physics, 2001, 89.10: 5243.
- [35] SZE, Simon M.; NG, Kwok K. Physics of semiconductor devices. John wiley & sons, 2006.
- [36] NICOLLIAN, Edward H.; BREWS, John R.; NICOLLIAN, Edward H. MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology. New York et al.: Wiley, 1982.

- [37] ROBERTSON, J.; CHEN, C. W. Schottky barrier heights of tantalum oxide, barium strontium titanate, lead titanate, and strontium bismuth tantalate. *Applied Physics Letters*, 1999, 74.8: 1168–1170.
- [38] BUTLER, Sheneve Z., et al. Progress, challenges, and opportunities in two-dimensional materials beyond graphene. *ACS nano*, 2013, 7.4: 2898–2926.
- [39] MA, Renzhi; SASAKI, Takayoshi. Two-dimensional oxide and hydroxide nanosheets: controllable high-quality exfoliation, molecular assembly, and exploration of functionality. *Accounts of chemical research*, 2014, 48.1: 136–143.
- [40] ZHAO, Jijun, et al. Rise of silicene: A competitive 2D material. *Progress in Materials Science*, 2016, 83: 24–151.
- [41] LIU, Han, et al. Phosphorene: an unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility. *ACS nano*, 2014, 8.4: 4033–4041..
- [42] WATANABE, Kenji; TANIGUCHI, Takashi; KANDA, Hisao. Direct-bandgap properties and evidence for ultraviolet lasing of hexagonal boron nitride single crystal. *Nature materials*, 2004, 3.6: 404.
- [43] RAO, Rajeev, et al. Statistical analysis of subthreshold leakage current for VLSI circuits. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2004, 12.2: 131–139.
- [44] WANG, Qingfen; OSBURN, Carlton M.; CANOVAI, Christopher A. Ultra-shallow junction formation using silicide as a diffusion source and low thermal budget. *IEEE transactions on electron devices*, 1992, 39.11: 2486–2496.
- [45] NOVOSELOV, K. S.; NETO, AH Castro. Two-dimensional crystals-based heterostructures: materials with tailored properties. *Physica Scripta*, 2012, 2012.T146: 014006.
- [46] ZENG, Zhiyuan, et al. Single-layer Semiconducting Nanosheets: High yield preparation and device fabrication. *Angewandte Chemie*, 2011, 123.47: 11289–11293.
- [47] NICOLOSI, Valeria, et al. Liquid exfoliation of layered materials. *Science*, 2013, 340.6139: 1226419.

- [48] LIU, Na, et al. Large-area atomically thin MoS<sub>2</sub> nanosheets prepared using electrochemical exfoliation. *Acs Nano*, 2014, 8.7: 6902–6910.
- [49] WANG, Xingli, et al. Chemical vapor deposition growth of crystalline monolayer MoSe<sub>2</sub>. *ACS nano*, 2014, 8.5: 5125–5131.
- [50] LEE, Changgu, et al. Anomalous lattice vibrations of single-and few-layer MoS<sub>2</sub>. *ACS nano*, 2010, 4.5: 2695–2700.
- [51] FERRARI, Andrea C.; BASKO, Denis M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. *Nature nanotechnology*, 2013, 8.4: 235.
- [52] NGUYEN, The An, et al. Excitation energy dependent Raman signatures of ABA-and ABC-stacked few-layer graphene. *Scientific reports*, 2014, 4: 4630.
- [53] LEE, Jae-Ung, et al. Anomalous excitonic resonance Raman effects in few-layered MoS<sub>2</sub>. *Nanoscale*, 2015, 7.7: 3229–3236.
- [54] CARVALHO, Bruno R., et al. Symmetry-dependent exciton-phonon coupling in 2D and bulk MoS<sub>2</sub> observed by resonance Raman scattering. *Physical review letters*, 2015, 114.13: 136403.
- [55] DACOSTA, Ralph S.; WILSON, Brian C.; MARCON, Norman E. New optical technologies for earlier endoscopic diagnosis of premalignant gastrointestinal lesions. *Journal of gastroenterology and hepatology*, 2002, 17: S85–S104.
- [56] TSUDA, H.; ARENDS, J. Raman spectroscopy in dental research: a short review of recent studies. *Advances in Dental Research*, 1997, 11.4: 539–547.
- [57] STANKOVICH, Sasha, et al. Stable aqueous dispersions of graphitic nanoplatelets via the reduction of exfoliated graphite oxide in the presence of poly (sodium4-styrenesulfonate). *Journal of Materials Chemistry*, 2006, 16.2: 155–158.
- [58] STANKOVICH, Sasha, et al. Graphene-based composite materials. *nature*, 2006, 442.7100: 282.

- [59] STANKOVICH, Sasha, et al. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *carbon*, 2007, 45.7: 1558-1565.
- [60] LEE, Myung-Won; SONG, Chung-Kun. Thickness dependence of performance parameters in organic thin film transistors with thin pentacene films fabricated with top contact structures. *Journal of the Korean Physical Society*, 2005, 47.1: 111-115.
- [61] XU, Mingsheng; NAKAMURA, Masakazu; KUDO, Kazuhiro. Thickness dependence of mobility of pentacene planar bottom-contact organic thin-film transistors. *Thin solid films*, 2008, 516.9: 2776-2778.
- [62] BOUCART, Kathy; IONESCU, Adrian Mihai. Double-Gate Tunnel FET With High-kappa Gate Dielectric. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, 54.7: 1725-1733.
- [63] NUSSBAUMER, H., et al. Hall mobility minimum of temperature dependence