





[UCI]1804:24011-200000267078

2019年 2月 碩士學位論文

# ReSe<sub>2</sub> 기반 전계 효과 트랜지스터의 광학 특성 연구

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

朴 蒼 奎



# ReSe<sub>2</sub> 기반 전계 효과 트랜지스터의 광학 특성 연구

A Study of optical properties of ReSe<sub>2</sub> based field-effect-transistor

2019年 2月 25日

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

# 朴 蒼 奎





# ReSe<sub>2</sub> 기반 전계 효과 트랜지스터의 광학 특성 연구

## 指導教授 高 必 周

## 이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2018年 10月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

# 朴 蒼 奎



# 朴蒼奎의 碩士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校	教授_	김 남 훈	_印
委員	朝鮮大學校	教授_	최 연 옥	_印

委員朝鮮大學校教授 \_\_\_\_ ヨ 子 印

## 2018年 11月

## 朝鮮大學校 産業技術融合大學院





# 목 차

### ABSTRACT

I. 서 론	
	1
Ⅱ. 이 론	4
A. 그래핀(Granphene)	4
B. TMDc (Transition metal dichalcogenide)	5
C. $ReSe_2$	
	7
Ⅲ. 실험방법	10
A. ReSe <sub>2</sub> FET의 제작	10
B. 급속열처리(RTA, rapid thermal annealing) 공정	11
C. ReSe <sub>2</sub> 물리적 특성 측정법	12
1. 라만 분광법(Raman spectroscopy)	12
2. 원자힘 현미경(AFM, atomic force microscopy)	14
3. 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope	15
4. 전기적 I-V 측정	
	16
Ⅳ. 실험결과 및 고찰	18
A. ReSe <sub>2</sub> FET의 제작 및 두께 측정	18
B. ReSe <sub>2</sub> 박막의 Raman	20
C. ReSe <sub>2</sub> FET의 전기적 특성	21
1. ReSe₂ FET의 열처리 전후 I-V 특성	22



2. ReSe <sub>2</sub> FET의 V <sub>ds</sub> - I <sub>ds</sub> 특성	23
3. ReSe <sub>2</sub> FET의 V <sub>g</sub> - I <sub>ds</sub> 특성	24
4. ReSe <sub>2</sub> FET의 광 특성	26
Ⅴ. 결론	29
Reference	31





# List of table

표 1 소스(Source)-드레인(Drain) 전압에 따른 전자이동도 및 문턱전압 25





# List of figures

그림 1 TMDc 물질의 종류 및 밴드갭 에너지	2
그림 2 그래핀의 기본 구조	4
그림 3 TMDc 물질의 원자 구조	5
그림 4 (a) 2D materials	7
(b) ReSe <sub>2</sub> 구조	
그림 5 (a) 단일 층 ReSe <sub>2</sub> 의 원자 구조에 대한 TOP view	8
(b) 단층 ReSe2의 DFT 계산 밴드 구조	
그림 6 ReSe <sub>2</sub> FET 제작과정	10
그림 7 급속열처리 장비	11
그림 8 라만산란의 종류	13
그림 9 원자힘 현미경	14
그림 10 주사전자현미경	15
그림 11 (a) Probe station	17
(b) HP-4155A	
그림 12 ReSe <sub>2</sub> FET의 제작 과정 이미지	18
그림 13 ReSe <sub>2</sub> FET의 SEM 이미지 및 두께	19
그림 14 ReSe <sub>2</sub> 의 Raman spectrum	20
그림 15 ReSe <sub>2</sub> FET의 열처리 전序 I - V 특성	22
그림 16 ReSe <sub>2</sub> FET의 V <sub>d</sub> - I <sub>ds</sub> 특성 그래프	23
그림 17 ReSe <sub>2</sub> FET의 V <sub>g</sub> -I <sub>ds</sub> 특성 그래프	24
그림 18 ReSe <sub>2</sub> FET의 V <sub>DS</sub> 및 레이저 출력에 대한 I <sub>D</sub> 의존성	26
그림 19 ReSe <sub>2</sub> FET의 레이저 출력에 따른 광응답성	27
그림 20 ReSe <sub>2</sub> FET의 레이저 출력에 따른 EQE	28

– iv –



## ABSTRACT

# A Study of optical properties of ReSe<sub>2</sub> based field-effect-transistor

PARK CHANG KYU

Advisor : Prof. Pil Ju Ko, Ph.D. Electrical Engineering Technology Convergence Industrial Technology Convergence Graduate School of Chosun University

The two-dimensional(2D) material exists in the form of laminated layers, with strong covalent bonds in each layer and weak van der Waals bonds between the layers. Therefore, it can be easily exfoliated with ultra thin film of single layer or several layers. 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 bandgap structure. While research on new materials to improve these problems has been accelerated, the researchers have focused on two-dimensional materials that exhibit varying bandgap energy as a function of thickness. For this reason, Rhenium diselenide(ReSe<sub>2</sub>), 2D TMD, which is similar structure to graphene and has banggap, has received great attention. ReSe<sub>2</sub> has high mobility and excellent optical properties. In addition, 2D TMDc material

- v -





has been studied in various way because of not dangling bond problem, structurally stable, and thickness-dependent optical bandgap ranging from 1.1eV(bulk, indirect) to 1.3eV(monolayer, direct).

In previous research, ReSe<sub>2</sub> thin films have been formed by various methods such as mechanical exfoliation, chemical vapor deposition(CVD), and physical vapor deposition(PVD). However, it is difficult to large-scale and mass production of ReSe<sub>2</sub> thin film, and there is such a limit that it is difficult to apply to a flexible substrate because of high process temperature, and long process time are required to form a thin film. The applicability of the synthesized ReSe<sub>2</sub> thin film to photodetector devices was investigated. ReSe<sub>2</sub> based photodetector was fabricated, and the laser in the visible light region was illuminated to the ReSe<sub>2</sub> channel layer to evaluate the optical properties. After a bias voltage of -15 to 15V was applied to the fabricated ReSe<sub>2</sub>-based photodetector, the laser in the visible light region was illuminated to the ReSe<sub>2</sub> channel layer and evaluated optical properties of ReSe<sub>2</sub> based photodetector.

As a result, when the laser with a wavelength of 532nm was irradiated, the maximum light response and the external quantum efficiency were measured at about  $10.10AW^{-1}$ , 2,355% at a laser output of  $0.0155\mu$ W and a voltage of 15V, respectively.





I. 서 론

트랜지스터가 발명된 후, 트랜지스터를 하나의 기판으로 한 집적회로가 개 발 되면서 반도체 산업은 크게 발전하였다. 특히 금속 산화막 반도체 전계효 과 트랜지스터가 개발되면서 현재까지 실리콘 기반의 반도체 산업은 비약적 인 발전을 하고 있다. 실리콘 기반의 소자가 나노미터 공정으로 제작되고 있 으며 두께와 크기가 줄어들면서 산화막도 얇아지게 되고 이전에 발생하지 않 던 누설전류가 증가하는 등의 문제들로 인해 실리콘 기반의 반도체 공정은 물리적인 한계에 도달하였으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 실리콘 을 대체 할 수 있는 탄소를 기반으로 한 물질이 발견되었다. 2004년 영국 맨 체스터대학의 Geim과 Novoselov 교수에 의해 흑연으로부터 그래핀 (Graphene)을 추출하는데 성공하였다.[1] 이를 통해 실험적으로 다양한 이론 적 현상을 설명하는데 성공하였으며, 추후 세계적으로 수많은 연구 그룹이 그래핀 연구를 시작하게 되었다. 연구를 통해 그래핀이 갖고 있는 다양한 화 학적, 물리적 특성들이 밝혀지게 되었으며, 전기전도도, 높은 이동도, 높은 분 자 장벽 특성 및 기계적 강도, 열전도율 등의 다양한 특성을 가지고 있다.[2] 또한, 그래핀은 높은 동작 대역폭을 가지며, 광전자 및 광 동작 응용에 사용 될 수 있다. 그러나, 상대적으로 빠른 엑시톤 재결합 속도 및 낮은 그래핀의 흡수 단면적은 실제 광전자 응용 분야에서 그래핀의 사용에 제한을 가져왔 다. 이를 극복하기 위해, 최근 고유한 광전자 특성을 갖는 또 다른 2차원 물 질인 전이금속 칼코겐 화합물(TMDc, transition metal dichalcogenide)은 에 너지 밴드갭(Band gap)이 존재하며, 광전자 소자에 응용하기 위한 적당한 특 성을 갖는 것으로 알려지면서 매우 큰 관심을 받고 있다.[3] 그림 1은 전이 금속 칼코겐 화합물의 종류 및 밴드갭 에너지를 보여주고 있다. 전이금속 칼 코겐 화합물은 가시광선 영역(Visible Radiation)의 밴드갭을 가지고 있으며 또한, 2차원 물질로 두께가 매우 얇기 때문에 유연하며, 전자-정공 쌍 결합에

- 1 -

н		_		MX <sub>2</sub>	2120 <b>4</b> 42												He
Li	Be			X = Cł	ansition nalcoge	n metal In						в	с	N	0	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	AI	Si	Ρ	s	CI	Ar
к	Ca	Sc	Ti	۷	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	1	Xe
Cs	Ba	La - Lu	Hf	Та	w	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	п	Pb	Ві	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac - Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	FI	Uup	Lv	Uus	Uuo

너지, 높은 광 흡수율을 가지고 있어 특별한 광학적 특성을 지니고 있다.

	$MoS_2$	$MoSe_2$	MoTe <sub>2</sub>	$WS_2$	$WSe_2$	
단일층	1.8~1.9eV	1.5eV	1.1eV	1.9eV	1.7eV	
벌크	1.2~1.3eV	1.1eV	1.0eV	1.4eV	1.2eV	

그림 1 TMDc 물질의 종류 및 밴드갭 에너지[4]

2차원 물질은 원자 층의 두께로 이루어져 있으며, 층 사이의 원자는 강한 공유결합을 이루고 있다. 층간에서는 약한 반데르발스 힘(Van der Waals)으 로 결합되어진 층상 구조로 기계적 박리(mechanical exfoliation) 방법으로 쉽 게 단층을 분리할 수 있으며, 이로 인해 다양한 기판에 전사가 가능하다. 두 께에 따라 Bulk 형태일 때 간접천이형 밴드갭을 단일 층(monolayer)의 경우 직접천이형 밴드갭 반도체로 변환된다. 또한, 전이금속 칼코겐 화합물은 그 래핀과 다르게 밴드갭이 존재하며, 전자소자의 채널 역할로 이용 될 수 있다. 이러한 전이금속 칼코겐 화합물은 1~2eV의 밴드갭과 높은 전하 이동도를 가지고 있으며, 대표적 물질로는 WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub> 등이 존재한

- 2 -





다.[5-7] 전이금속 칼코겐 화합물 물질 중 하나인 ReSe<sub>2</sub>는 다른 물질보다 연 구가 이루어지지 않았으며 현재 꾸준한 연구가 이루어지고 있다. 이 물질을 광전자소자에 응용하려면 전기적 특성 같은 기초적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 그래핀 및 기존의 다른 반도체 물질보다 뛰어난 특성을 가진 전 이금속 칼코겐 화합물 물질 중 ReSe<sub>2</sub>를 이용하여 ReSe<sub>2</sub> 기반의 전계효과트 랜지스터를 제작한 후, 가시광 영역의 파장을 가진 532nm 레이저를 소자에 조사하여 열처리 전후의 전기적 특성 및 광응답성(Photoresponsivity), 외부양 자효율(EQE, external quantum efficiency) 등의 특성을 분석 하였다.



Ⅱ. 이 론

#### A. 그래핀(Granphene)

그림 2는 그래핀(Graphene)의 기본 구조로 그래핀은 탄소원자들이 육각형 의 격자를 이루며 또한 2차원 평면을 가지는 구조로 가장 많이 알려지고 연 구 되었다. 그래핀은 우수한 전기전도도, 열전도성, 강도 등 뛰어난 특성을 가지는 것으로 알려져 있으며, 전기전도도의 경우 구리의 100배, 강철보다 200배 이상 높은 강도, 높은 열전도도를 가지는 것으로 확인되어 차세대 신 소재 물질로 각광받아 왔다.[8-9] 그러나 그래핀이 가지고 있는 독특한 특성 은 그래핀의 결정구조에 의해서 나타나는 것으로 알려져 있으며, 밴드갭이 존재하지 않으므로 반도체 물질로서 응용에 많은 제약이 따른다. 에너지 밴 드갭이 존재하지 않기 때문에 반도체 산업의 핵심소자인 트랜지스터로의 응 용에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 그래핀의 구조를 변경 하여 에너지 밴드갭을 형성하는 연구들이 진행되었으며, 연구를 통해 만들어 진 에너지 밴드갭의 제한적인 부분이 존재하고, 전자이동도의 급격한 감소 등의 복합적인 문제점을 가지고 있어 트랜지스터로의 응용에는 여전히 한계 가 있다.



그림 2 그래핀의 기본 구조

- 4 -



### B. TMDc (TMDc, transition metal dichalcogenide)

최근 연구에 따르면 기본 물성을 결정하는 데 중요한 역할을 하는 물질의 원자 구성, 배열 외에도 공간 특성인 것이 밝혀졌다. 그 중 육각형의 무한한 탄소로 이루어진 그래핀은 원자 단층으로 존재할 수 있으며, 이러한 구조적 특성 때문에 투명하고 전하 이동도 및 전기 전도도가 매우 높아 다양한 분야 에서 응용 될 수 있다. 그러나 그래핀은 밴드갭이 존재하지 않으므로 실리콘 을 대체하기에는 적합하지 않다. 이에 흑연(Graphite)와 유사한 Lamellar 구 조를 가지며 또한, 그래핀과 유사한 구조 및 특성을 가지고 있는 2차원 물질 인 전이금속 칼코겐 화합물이 주목을 받고 있다.[10-12] 전이금속 칼코겐 화 합물은 단일 층인 경우 넓은 밴드갭을 가지는 반도체 물질로 자연적으로 풍 부하기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다. 그림 3은 전이금속 칼코겐 화합 물의 원자구조로써 화학식은 MX<sub>2</sub>이며 4 ~ 10족의 전이금속 M은 Mo, W 해당되며 X는 S, Se, Te 에 해당하는 칼코겐 원소로 공유결합으로 이루어진 층상 구조로, 이들 물질은 샌드위치(Sandwich) 구조인 X-M-X 층으로 구성 된 결정 구조를 가지며 약하게 결합된 반데르발스 결합을 하고 있다.[13-15]



그림 3 TMDc 물질의 원자 구조

- 5 -





여기서 2개의 X층 내에 위치하고 있는 M 원자층은 육각형으로 둘러 쌓여 있으며 반도체성을 지니고 있어서 반도체 물질로서 활발이 연구되고 있다. 또한, 인접한 층들은 반데르발스 상호 작용에 의해 서로 약하게 결합되어 금 속 원자 배위 및 적층 순서에 따라 다양한 Bulk 결정을 형성한다. 특히 전이 금속 칼코겐 화합물은 캐리어 이동도가 매우 우수한 특성을 가지고 있으며, 층 수에 따라 밴드 구조와 밴드갭 변화를 보인다.[16-17] 여러층의 두께의 박 막 상태에서는 간접천이 특성을 보이는 반면 단층의 두께에서는 직접천이를 보인다. 따라서 전이금속 칼코겐 화합물 물질들이 미래의 전자 소자에 응용 되며, 실리콘 반도체를 대체할 것으로 전망을 하고 있다.





#### C. ReSe<sub>2</sub>

ReSe<sub>2</sub>는 Hexagonal 구조를 지닌 전이금속 칼코겐 화합물 계열 중 가장 잘 알려지지 않은 물질로써, 그림 4의 (a)와 같이 ReSe<sub>2</sub>는 7족의 전이금속인 레 늄(Rhenium)과 16족의 칼코겐화합물인 셀레늄(Selenium)이 결합한 물질로 Se-Re-Se로 이루어진 MX<sub>2</sub>의 화학식을 가지며 병렬로 배열된 다이아몬드형 사슬을 갖는 원자 적층형 구조를 가지며 다른 전이금속 칼코겐 화합물 및 그래 핀과 마찬가지로 층상구조로 이루어져 있다.[18-19]



그림 4 (a) 2D materials (b) ReSe<sub>2</sub> 구조 [20]

단층일 경우 약 1.3eV, 다층일 경우 1.1eV의 밴드갭을 가지고 있다. 층과 층 사이는 그림 4의 (b)와 같이 상대적으로 약한 반데르발스 힘에 의해 결합 된 상태에서 위와 아래의 칼코겐 원자 사이에 샌드위치 된 금속 원자를 포함 하는 평면으로 구성되어 있으며, 각각의 층 내에서는 서로 공유결합을 하고 있다. ReSe<sub>2</sub>는 한 층 내의 레늄 원자 간 결합거리는 약 2.6Å 정도이며 격자

- 7 -



상수는 in-plain 방향을 따라 6.6Å이다. 그림 5(a)와 같이 지그재그 모양의 레늄이 나타나며, 이 구조는 레늄(Rhenium) 원자의 추가적인 가전자로부터 전하의 디커플링으로 나타난다. 밴드갭은 약한 layer-dependency가 있고 layer가 증가할수록 밴드갭이 줄어든다. DFT 계산에 의해 monolayer의 밴드 갭은 1.42eV로 그림 5(b)와 같이 indirect gap의 특징이 나타난다. CBM은 Γ -point에서 나타나지만, VBM은 Γ-point 바로 옆에 위치한 Λ-point에서 약 50meV로 높게 나타난다. DFT 계산은 밴드갭을 작게 표현(underestimate)하 므로 실제 값보다 더 가까운 Spin orbit coupling을 고려하여 GW 모델을 사 용하면 밴드갭은 2.29eV로 나타난다. 또한 GW-PBE 모델을 이용하면 광학적 갭은 1.42eV, 엑시톤 결합 에너지는 0.87eV로 나타난다.[21]



그림 5 (a) 단일 층 ReSe<sub>2</sub>의 원자 구조에 대한 TOP view[21] (b) 단층 ReSe<sub>2</sub>의 DFT 계산 밴드 구조

ReSe<sub>2</sub>의 비대칭적인 원자 배열구조는 기본적인 물리적 성질로 인해 영향을 받으며, 특성은 다양한 측정을 통하여 확인 할 수 있다. 빛과 물질간의 상호 작용을 통하여 물질의 결정 구조에 대한 정보를 확인 할 수 있다. 라만 분광 법을 통해 측정된 ReSe<sub>2</sub>는 낮은 결정 대칭성으로 서로 다른 라만 모드들이

- 8 -



각 모드들끼리 혹은 다른 음향 포논(acoustic phonon) 들과 상호작용함으로 인해 많은 라만 피크(peak)들이 나타나며, 이로 인해 100~400cm<sup>-1</sup> 범위 내에 서 10개 이상의 피크들이 존재한다. 다른 2차원 물질들과 달리 피크들의 위 치와 세기 변화로 층수를 판별하기가 어려운 특징을 보인다. 또한 DC 방향 사이의 각도 및 빛의 편광 방향과 다른 측정결과가 나타난다. ReSe<sub>2</sub>는 광학 적 특성 외에 전기적 특성 또한 DC 방향의 의존성을 갖는다. ReSe<sub>2</sub>는 반도 체 물질이며 성장 시 가스 분위기의 조건에 따라 p-type 또는 n-type 특성을 가질 수 있다. I-V 측정을 통하여 ReSe<sub>2</sub>의 전하 수송 특성이 DC 방향과 평 행한 방향일수록 좋고, 수직 방향이 될수록 나빠진다는 것을 알 수 있다. 이 러한 여러가지의 비등방적 물성들은 비대칭적 특성을 이용할 수 있는 편광





## Ⅲ. 실험방법

#### A. ReSe<sub>2</sub> FET의 제작

실험에 사용된 ReSe<sub>2</sub>는 HQ graphene에서 구매한 ReSe<sub>2</sub> bulk crystal을 사 용 하였으며, 스카치테이프를 이용하여 흑연에서 그래핀을 분리해낸 방식으 로 ReSe<sub>2</sub>를 스카치테이프를 이용하여 기판에 전사할 경우 접착제 잔류물로 인한 소자의 오염을 방지하기 위하여 Polydimethylsiloxane(PDMS, Dow Corning, Toray Co., Ltd.)를 사용하였다. PDMS는 투명하고 유연한 특성을 가지고 있어 2D material을 박리하거나 전사 할 때 적합한 물질이다. 박리 된 ReSe<sub>2</sub>를 SiO<sub>2</sub>/Si에 Dry method로 전사하였다. Silicon oxide (SiO<sub>2</sub>, 300 nm)/Si (doped p+, resistivity: < 0.005Ωcm )는 저압화학증착법(LPCVD)에 의해 증착 되었으며, 전극으로 사용된 Ti(50nm)는 전자빔 증착장치 (Electron-beam evaporation)로 증착되었다. 그림 6은 ReSe<sub>2</sub> FET의 제작과 정을 보여 주고 있다.



그림 6 ReSe<sub>2</sub> FET 제작과정

- 10 -





### B. 급속열처리(RTA, rapid thermal annealing) 공정

그림 7과 같이 급속 열처리 장비는 다양한 목적을 위한 어닐링 공정에 사 용 될 수 있는 방식으로 물질의 배열구조를 변화시키기 위한 용도 및 도핑상 태, 소자의 전극과 계면의 접촉 상태를 개선하기 위해서 사용된다. 일반적인 열처리 방법보다 더 급격한 속도로 열을 증가시켰다가 다시 감소하는 것이 특징이며 이를 통해 원하는 효과를 빠른 속도로 얻을 수 있으며, 반도체 소 자의 경우 원하는 효과를 얻는 동시에 도펀트 이동 및 확산을 최소화 할 수 있는 장점 때문에 많이 사용되고 있다. 목적과 용도에 따라 가열시간, 온도, 열처리 시간, 열처리 대기 분위기 조성을 변화시켜 줄 수 있다. 본 실험에서 는 이차원 반도체 소자의 불순물을 제거하고 금속 전극과의 접촉상태를 향상 시키고 기능성 산화물의 결정성을 개선시키기 위해서 급속 열처리 공정을 수 행 하였다.



그림 7 급속열처리 장비



#### C. ReSe2 물리적 특성 측정법

#### 1. 라만 분광법(Raman spectroscopy)

라만 분광법(Raman spectroscopy)은 라만 산란 원리를 통해서 시료의 원 자 구조와 에너지 상태에 대한 정보를 얻을 수 있는 비파괴적인 측정법이 다.[22] 라만 분광법은 2차원 물질의 층간 상호 작용이 중요한 요인이기 때문 에 2차원 재료의 구조적 특성 분석에 널리 사용되고 있다. 이를 통해 물질 내의 결합 구조 및 결정성을 확인 할 수 있으며 또한, 포논에 대한 정보를 분석 및 측정 할 수 있다. 빛이 물질과 반응하여 원자, 분자들과 어떤 반응을 하는지에 따라 두 가지 종류의 산란으로 나눌 수 있다. 레일리 산란은 완전 탄성 충돌로 인하여 입사파와 같은 에너지를 가지며, 비탄성 충돌로 인하여 물질에 흡수되어 내부 원자들을 여기(excited)상태로 만들고 입사광과 다른 에너지로 재방출 되는 경우가 라만 산란이다. 라만 산란은 입사광 중에서 매 우 극소수의 광자에 의하여 발생하며, 여기 된 원자가 원래상태로 돌아가면 서 빛을 방출시킨다. 이때 산란된 빛은 원자의 상태에 의해 입사광보다 에너 지를 잃거나 얻게 된다. 라만 산란에서 바닥상태의 원자가 여기되는 경우, 일 부의 빛에너지가 회전 에너지로 또는 원자의 진동으로 변환되고 입사광보다 적은 에너지의 빛으로 산란되는 스토크스 산란을 일으킨다. 반대로 기존에 진동하는 상태의 원자가 여기 되는 경우 여기상태에서 바닥상태로 떨어지며 입사광보다 큰 에너지의 빛으로 산란되는 반 스토크스산란이 일어난다. 그림 8은 각 산란의 입사광과 산란광의 에너지를 나타낸 그림으로 탄성충돌에 의 해서 입사광과 같은 에너지로 산란되는 레일리 산란과 비교하여 스토크스와 반 스토크스 산란이 진동에너지만큼 잃고 얻어 산란되는 것을 확인 할 수 있 다. 이러한 원리를 통하여 라만 산란으로 원자 및 분자의 진동에너지 준위를 확인 할 수 있으며, 각각의 라만 산란은 레일리 산란의 양단으로 대칭적 분

- 12 -





포를 보이며 반 스토크스 산란은 조사 전 이미 여기된 원자에 대해 일어나므 로 스토크스 산란보다 적은 확률로 일어난다. 라만 분광법은 특정 파장의 빛 을 입사시켜 변화된 파장의 스펙트럼(spectrum)을 얻는 측정방식이다.[23] 본 연구에서는 ReSe<sub>2</sub>의 고유한 물리적인 특성 확인 및 분석하기 위한 용도로 사 용 하였다.



그림 8 라만산란의 종류





#### 2. 원자힘 현미경(AFM, atomic force microscopy)

원자힘 현미경(AFM, atomic force microscopy)는 시료의 표면과 검침 (cantilever) 사이의 힘을 측정하여 이를 피드백하여 시료 표면의 정보를 얻는 방식의 측정 장비이며, 탐침을 샘플의 표면 가까이 가져갈 때 발생하는 원자 간의 반데르발스(van der Waals) 힘을 측정하여 샘플 표면의 형상을 확인하 는 측정 장비이다. 나노미터 크기의 탐침 끝과 샘플 표면 원자 사이의 작용 하는 힘을 측정하며 원자힘 현미경은 샘플을 놓는 스테이지와 측정에 필요한 탐침과 레이저, 광다이오드로 구성되어 레이저를 감지하는 감지기로 이루어 져 있으며, 시료의 다양한 특성을 동시에 측정함으로써 특성간의 상호관계의 이해에 매우 적합한 분석 장비이다. 본 연구에서는 그림 9과 같이 PSIA XE-100 원자힘 현미경 장비를 사용하여 기계적 박리법을 통해 얻은 ReSe<sub>2</sub>의 두께를 확인 하였다.



그림 9 원자힘 현미경





#### 3. 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope)

주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope)은 샘플의 결정, 표면구 조, 형태, 구성하는 원소의 분포 등을 높은 배율로 입체적인 구조를 관찰하는 분석 장비이다. 주사전자현미경은 샘플의 표면에 전기를 통하게 하여 전자기 렌즈가 초점을 형성한 전자빔 spot을 형성한 다음 관찰하고자 하는 샘플 부 위를 주사하여 영상을 형성한다.[24] 이 과정 중에 여러 형태의 복사가 발생 하지만 주사현미경에서는 샘플의 표면에 가장 가까운 영역에서 발생하는 이 차전자를 이용하여 영상을 형성한다. 그림 10과 같이 주사전자현미경 장비를 사용하여 ReSe<sub>2</sub> 소자의 표면을 관찰 하였다.



그림 10 주사전자현미경



신내의

트랜지스터 종류 중 하나로 전계효과 트랜지스터는 전압 및 전류의 흐름을 조절하여 신호를 증폭시키거나 온/오프 스위치 기능을 제어하는 소자로 전력 소모가 적고 고집적이 가능하여 선형 증폭기 및 다양한 논리회로에 폭넓게 이용되고 있다. FET는 구조에 따라 metal-oxide-semiconductor field effect transistor(MOFET)와 junction field effect transistor(JFET)로 분류 될 수 있 다. 본 실험에서는 이차원 물질인 ReSez를 사용하여 MOSFET 구조를 만들 고 소자의 전기적 특성을 확인하였다. 300nm 두께의 실리콘 산화막 기판을 게이트 물질로 사용하였으며 소스-드레인 전극으로는 ReSe<sub>2</sub>와 Ohmic contact을 형성하는 금속인 타이타늄(Ti)을 사용하였다. ReSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜 지스터의 전기적 특성을 측정하기 위해서 그림 11과 같이 Probe station 및 HP-4155A 파라미터 분석기를 사용하여 측정 하였다. 측정은 상온, 암실에서 실시하였으며, 소스-드레인 사이의 전류 및 전압 특성을 확인하기 위해 게이 트 전압 - 40 ~ 40V, 드레인 전압을 - 15 ~ 15V 인가하여 전류 측정을 통 하여 ReSe<sub>2</sub> FET 소자의 전자 이동도(mobility) 및 문턱전압을 계산하였다. 전자 이동도는  $\mu_{eff} = [dI_d/dV_q] \times [L/(WC_iV_{ds})]$  식을 이용하여 계산 하였으 며, 여기서 L과 W는 채널의 길이와 폭을 나타내며 Ci는 SiO2 300nm의 전기 용량 1.15×10<sup>-4</sup>Fm<sup>-2</sup> 이다.[25]









그림 11 (a) Probe station (b) HP-4155A 파라미터 분석기





## Ⅳ. 실험결과 및 고찰

### A. ReSe<sub>2</sub> FET의 제작 및 두께 측정

기계적 박리법으로 얻은 ReSe<sub>2</sub> 박막을 채널로 사용하기 위해 Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 전사하였다. Silicon oxide(SiO<sub>2</sub>, 300nm)/Si(doped p+, resistivity: < 0.005Ωcm)는 저압화학증착법(LPCVD)에 의해 증착 되었으며, 전극으로 사 용된 Ti(50nm)는 전자빔 증착장치(Electron-beam evaporation)로 증착되었 다. 그림 12는 Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 전사된 ReSe<sub>2</sub> 박막의 FET 제작 과정을 보여주고 있다.



그림 12 ReSe<sub>2</sub> FET의 제작 과정 이미지

- 18 -



그림 13의 a는 PDMS를 사용해 Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 전사된 ReSe<sub>2</sub> FET 의 전자주사현미경 이미지이며, 소스(Source)-드레인(Drain)의 채널의 길이는 20µm 이고, 그림 13의 b는 원자힘 현미경을 통한 ReSe<sub>2</sub> FET의 표면 이미지 이며, 그림 13의 c는 ReSe<sub>2</sub>의 두께를 파악하기 위해 Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 형성된 ReSe<sub>2</sub>의 두께를 XE-100 (PSIA corp)으로 측정하였다. 그 결과 40nm 정도의 두께를 확인 하였다.



그림 13 ReSe<sub>2</sub> FET의 SEM 이미지 및 두께





#### B. ReSe<sub>2</sub> 박막의 Raman

ReSe<sub>2</sub> 소자의 라만 분광 측정에는 532nm 레이저를 사용하여 여기 (excitation) 시킨 후 산란되는 빛의 파장 변화와 강도(intensity)를 CCD 검출 기로 측정함으로써 분자의 진동에너지 구조를 스펙트럼으로 얻을 수 있다. 특정 파장의 레이저를 샘플에 조사하여 발생되는 라만산란을 이용하여 산란 된 빛 중에서 Rayleigh 산란에 비해 Stokes/Anti-Stokes 산란이 얼마만큼 Shift 되었는지를 통해 해당 물질의 구조와 특성, 분자 상호간의 결합상태 등 분자구조를 확인 할 수 있었다. 그림 14는 ReSe<sub>2</sub> 라만 분광 측정을 통해 얻 어진 그래프로 520cm<sup>-1</sup>에서 실리콘 피크를 사용하여 보정 하였으며, ReSe<sub>2</sub> 의 라만 피크는 100~300cm<sup>-1</sup> 범위에 라만 피크들이 나타나는 것을 확인하였 다. ReSe<sub>2</sub>는 124cm<sup>-1</sup>에서 E<sub>1g</sub> mode, 160cm<sup>-1</sup>와 172cm<sup>-1</sup>에서 A<sub>1g</sub> mode에 해 당하는 피크를 확인 할 수 있었다. 또한, 고주파 범위(284 및 294cm<sup>-1</sup>)에서 상대 적으로 낮은 세기의 피크를 나타내었다. 라만 분광 측정을 통해 ReSe<sub>2</sub>의 결 정구조를 가지는 물질이라는 것을 확인 할 수 있었다.



그림 14 ReSe<sub>2</sub>의 Raman spectrum

- 20 -





#### C. ReSe<sub>2</sub> FET의 전기적 특성

ReSe<sub>2</sub> 전계효과 트랜지스터의 전기적 특성을 측정하기 위해 Probe station 및 HP-4155A 파라미터 분석기를 사용 하였다. 측정은 상온, 암실에서 진행 하였으며 Ti 전극에 probe tip을 접촉한 후 전극에 전압 -15V ~ 15V을 인 가해 주면서 암전류를 측정한 다음 안정화가 진행된 것을 확인한 후 레이저 를 조사하여 광전류를 측정 하였다. 이후 ReSe<sub>2</sub> 채널 위에 532nm 가시광 영역의 레이저를 사용하여 측정을 진행하였으며 안정화가 진행된 상태가 되면, 광원, 즉 레이저를 소자에 조사하여 반응하는 광전류를 측정하였고, 광전류가 안정화 된 후 레이저를 다시 꺼주어 회복되는 광전류를 확인하는 방식으로 반복하여 측정을 진행 하였다.





#### 1. ReSe<sub>2</sub> FET의 열처리 전후 I-V 특성

ReSe<sub>2</sub> FET를 제작 후 열처리를 통하여 소자의 불순물 제거 및 금속과의 접촉상태를 개선시키기 위해 급속 열처리(Rapid Thermal Annealing) 장비를 사용하여 400℃에서 2시간 동안 열처리 공정을 진행하였다. 그림 15는 열처 리 전후의 전기적 특성으로 소스(Source)-드레인(Drain) 사이에 전압 - 15 V~15V를 인가하여 I-V를 측정 하였다. 열처리 전보다 I-V 특성이 개선되었 으며, 열처리 후 오믹 접합이 이루어지는 것을 확인 하였다.



그림 15 ReSe2 FET의 열처리 전序 I-V 특성





#### 2. ReSe<sub>2</sub> FET의 V<sub>ds</sub> - I<sub>ds</sub> 특성

ReSe<sub>2</sub> FET의 캐리어 종류와 반도체적 특징을 잘 나타내는지 확인하기 위 해 그림 16과 같이 V<sub>ds</sub> - I<sub>ds</sub> 특성을 분석한 결과이다. 소스(Source)-드레인 (Drain) 전압은 0V에서 15V까지 설정하였으며, 게이트 전압은 -40V에서 10V씩 증가시켜 40V 까지 측정을 진행 하였다. 게이트 전압이 증가할수록 드레인-소스의 전류량이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 층간에 내 재된 캐리어의 수가 증가하였기 때문에 캐리어의 수에 의해 전류가 증가한 것을 확인 할 수 있었으며, ReSe<sub>2</sub>는 n-type의 반도체 특성을 보여주고 있다.



그림 16 ReSe<sub>2</sub> FET의 V<sub>ds</sub>-I<sub>ds</sub> 특성 그래프

- 23 -





#### 3. ReSe<sub>2</sub> FET의 V<sub>g</sub> - I<sub>ds</sub> 특성

그림 17과 같이 ReSe<sub>2</sub> FET 소자를 제작하여 V<sub>g</sub>-I<sub>ds</sub> 특성을 확인 하였다. 게이트 전압은 -40V에서 40V로 인가하였으며 소스(Source)-드레인(Drain) 전압을 각각 1V, 5V, 10V, 15V로 일정하게 인가하면서 전류변화를 측정 하 였다. 그림 17과 같이 ReSe<sub>2</sub> FET들은 Positive 전압에서 Gate oxide와 ReSe<sub>2</sub> 의 계면에 축적되어지는 전형적인 n-type 특성을 나타내고 있다.



그림 17 ReSe<sub>2</sub> FET의 V<sub>g</sub>-I<sub>ds</sub> 특성 그래프

ReSe<sub>2</sub>는 n-type 반도체 특성을 나타내며, V<sub>g</sub> - I<sub>ds</sub> 그래프를 이용하여 기울 기를 구한 후 전자 이동도(Mobility)를 아래의 식으로 계산하였다.

- 24 -





Collection @ chosun

 $\mu_{eff} = \frac{L}{WC_{i}V_{ds}} \times \frac{dI_{d}}{dV_{a}}$ 

식에서 L은 채널의 길이를 나타내며, W는 채널의 폭을 나타낸다. C<sub>i</sub>는 ɛ₀ɛr/d 로 부터 계산 된 게이트 정전용량이며, ɛ₀와 ɛr은 각각 ReSe₂의 유전율을 나타내 며, d는 SiO₂의 두께(300nm)를 정전용량은 1.15×10<sup>-8</sup>F/c㎡ 이다. 제작한 FET 소 자의 채널 길이(L) 및 채널 폭(W)은 각각 20µm 및 7µm 이고 ɛ₀와 ɛr은 각각 8.854×10<sup>-12</sup> Fm<sup>-1</sup> 및 3.9 이다. 소스(Source)-드레인(Drain) 전압 1V, 5V, 10V, 15V의 그래프를 미분하여 기울기를 구한 후 전자 이동도를 계산하였다. ReSe₂ FET 소자의 전자이동도는 소스-드레인 전압 1V, 5V, 10V, 15V에서 각각 6.34cm²/Vs, 9.67cm²/Vs, 10.14cm²/Vs, 10.60cm²/Vs 이고 문턱전압은 각 각 12.5V, 17V, 21V, 22.5V 이다. 전압이 증가할수록 전자이동도가 증가하였 으며, 표 1에서는 전자이동도 및 문턱전압을 보여주고 있다.

	$V_{ds} = 1V$	$V_{ds} = 5V$	$V_{ds} = 10V$	$V_{ds} = 15V$
Mobility(cm²/Vs)	6.34	9.67	10.14	10.60
Threshold Voltage(V)	12.5	17	21	22.5

표 1 소스(Source)-드레인(Drain) 전압에 따른 전자이동도 및 문턱전압

#### 4. ReSe<sub>2</sub> FET의 광 특성

ReSe<sub>2</sub>는 밴드갭 에너지보다 더 큰 에너지를 받으면 광전자가 발생하여 광 전류를 형성한다. 이로 인하여 광 트랜지스터, 포토다이오드, 광센서 등으로 응용 할 수 있다. 그림 18에서는 소스(Source)-드레인(Drain) 전압과 레이저 출력(0.0155 μW, 0.155μW, 1.147μW, 4.96μW, 13.95μW)에 대한 소스-드레인 전류 의존성을 보여주고 있으며, 소자에 빛을 비추고 I-V을 측정했을 때 전 류가 증가하는 이유는 광전류(Iph)가 생성되기 때문이며, 광전류는 빛을 조사 한 상태에서 측정된 전류의 크기에서 어두운 상태의 측정된 전류의 크기의 차로 정의할 수 있다. 광전류는 다음의 방정식을 사용하여 계산되어 진다.

Iph = I(light) - I(dark)

레이저 출력을 증가 시키면 광 생성 캐리어가 선형적으로 증가하고, 전도대 의 전자와 가전자대의 정공을 포함하여 광전류를 증가시킨다.



그림 18 ReSe<sub>2</sub> FET의 V<sub>DS</sub> 및 레이저 출력에 대한 I<sub>D</sub> 의존성

- 26 -





광응답성(Photoresponsivity) 및 외부양자효율(EQE, external quantum efficiency)은 광검출기에 대한 중요한 매개 변수로써, 그림 19는 레이저 출력 과 소스-드레인 전압의 변화에 따른 광응답성을 보여주고 있다. 광응답성은 방정식 R<sub>λ</sub> = Iph / P를 사용하여 계산하였으며, 여기서 P는 레이저 출력을 의미한다. 소스-드레인 전압 1V, 5V, 10V, 15V에서 광응답성은 0.0155µW의 레이저 출력에서 약 0.38AW<sup>-1</sup>, 2.64AW<sup>-1</sup>, 6.07AW<sup>-1</sup>, 10.10AW<sup>-1</sup> 의 값을 얻었으며, 레이저 출력의 증가에 따라 광응답성은 감소 하였다. 또한, 트래핑 효과를 확인 하였으며, 소스 - 드레인 전압 15V에서 최대값을 보였다. 광응답 성은 증가하는 레이저 출력에 따라 감소하는데, 이는 2차원 물질인 MoSe<sub>2</sub>의 단일층에 대해 보고 된 것과 동일한 거동을 보이며, 게이트 산화물의 계면에 서의 트랩 상태에 기인한다고 설명되어진다.



그림 19 ReSe<sub>2</sub> FET의 레이저 출력에 따른 광응답성

- 27 -



그림 20은 레이저 출력과 소스-드레인 전압의 변화에 따른 외부양자효율을 보여주고 있다. 외부양자효율은 입사 광자당 검출되는 광유도 된 캐리어의 수이며 EQE = hcR\ / e\의 방정식을 사용하여 계산 하였다. 여기서 h는 플 랑크 상수, e는 기본 전자 전하, c는 광속, \는 여기 파장이다. 측정은 소스-드레인 전압 1V, 5V, 10V, 15V에서 외부양자효율은 각각 88%, 615%, 1,415%, 2,355% 에 대해 0.0155µW의 레이저 출력에서 가장 높은 값을 얻었 다. 최대 광응답성 및 외부양자효율은 전압 15V에서 각각 약 10.10AW<sup>-1</sup>, 2,355%로 측정 되었다.



그림 20 ReSe<sub>2</sub> FET의 레이저 출력에 따른 EQE

- 28 -





신내의

### V. 결론

본 논문에서는 전이금속 칼코겐 화합물(Transition Metal Dichalcogenide) 물질인 셀렌화 레늄(ReSe<sub>2</sub>)을 사용하여 전계 효과 트랜지스터(FET)를 제작 하였다. 실험에 사용된 ReSe<sub>2</sub> 박박은 PDMS(Polydimethylsiloxane)를 사용하 여 기계적 박리법으로 형성하였으며, 원자힘 현미경을 이용하여 40nm 정도의 두께를 확인 할 수 있었다. 또한, 라만 분광 측정을 통하여 물질의 구조와 특 성, 분자 상호간의 결합상태 등 분자구조를 확인 할 수 있었다. ReSe<sub>2</sub>는 124cm<sup>-1</sup>에서 E<sub>1g</sub> mode, 160cm<sup>-1</sup>와 172cm<sup>-1</sup>에서 A<sub>1g</sub> mode에 해당하는 피크를 확인 할 수 있었으며, ReSe<sub>2</sub>가 가지고 있는 라만 피크와 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 고주파 범위(284 및 294cm<sup>-1</sup>)에서 상대적으로 낮은 세기 의 피크를 나타내었으며, 라만 분광 측정을 통해 ReSe<sub>2</sub>의 결정구조를 가지는 물질이라는 것을 확인 할 수 있었다.

열처리 전후의 전기적 특성 및 가시광 영역의 파장을 가진 532nm 레이저를 소자에 조사하여 광응답성(Photoresponsivity), 외부양자효율(EQE, external quantum efficiency) 특성을 분석 하였다. 급속열처리 장비를 사용하여 400℃ 에서 2시간 동안 열처리 공정을 진행하였으며, 소스-드레인 사이에 전압 -15V~15V를 인가하여 열처리 전후의 전기적 특성을 측정하였다. 열처리 전 보다 I-V 특성이 개선 되었으며, 열처리 후 오믹 접합이 이루어지는 것을 확 인 할 수 있었다. 또한, Vg - Ids 그래프를 이용하여 기울기를 구한 후 전자이 동도(Mobility)를 계산 하였다. Vds = 1V, 5V, 10V, 15V 에서 전자이동도는 각각 6.34cm<sup>2</sup>/Vs, 9.67cm<sup>2</sup>/Vs, 10.14cm<sup>2</sup>/Vs, 10.60cm<sup>2</sup>/Vs 로 전압이 증가할수 록 전자이동도가 증가하는 경향을 확인 할 수 있었다. 이는 Vds 전압이 증가 함에 따라 포화전류의 증가는 축적된 캐리어의 증가로 인한 것으로, 전자이 동도의 증가는 전압이 증가함에 따라 ReSe<sub>2</sub> 박막과 전극간의 접촉 저항은 감 소하고 ReSe<sub>2</sub>층의 유전율이 증가하여 전자이동도는 증가하는 것으로 사료된

- 29 -





다. 광응답성 및 외부양자효율은 광검출기에 대한 중요한 매개 변수로써, ReSe<sub>2</sub> FET의 소자에 레이저를 조사하여 전압의 변화에 따른 최대 광응답성 및 외부양자효율은 0.0155µW의 레이저 출력 및 전압 15V에서 각각 약 10.10AW<sup>-1</sup>, 2,355%로 측정 되었다. 이러한 결과를 바탕으로 ReSe<sub>2</sub>를 몇 층 적층한 것은 미래의 나노 광전자 응용 분야에서 유망한 재료로 광전자 특성 을 향상시키는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.





## Reference

- J. A. Wilson, A. D. Yoffe, Transition metal dichalcogenides : discusstion and interpretation of observed optical, electrical and structural properties, Adv. Phys., 1969, 18, 193–335
- [2] A. D. Yoffe, Low-dimensional systems : quantum size effects and electronic properties of semiconductormicrocrystallites (zero-dimensional systems) and some quasi-two-dimensional systems, Adv. Phys., 1993, 42, 173-266
- [3] P. J. Ko, A. Abderrahmane, T. Takamura, N.-H. Kim, and A. Sandhu, "Thickness dependence on the optoelectronic properties of multilayered GaSe based photodetector," Nanotechnology 27(32), 325202 (2016).
- [4] S.J Yun, J.W Lim, D.-H. Cho, Y.-D. Chung, Research Trends of Two Dimensional Transition Metal Dichalcogenide Semiconductor Materials and Devices, Electronics and Telecommunications Trends, 29, 6, 43–52. 2014
- [5] Q. H. Wang, K. K. -Zadeh, A. Kis, J. N. Coleman, M. S. Strano, Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides, Nature NT, 2012, 7, 699
- [6] W. S. Yun, S. W. Han, S. C. Hong, I. G. Kim, J. D. Lee, Thickness and strain effects on electronic structures of transition metal dichalcogenides : 2H–MX2 semiconductors(M=Mo, W;X=S, Se, Te), Phys. Rev. B 85, 2012, 033305
- [7] Ko, Pil Ju, et al. "Thickness dependence on the optoelectronic properties of multilayered GaSe based photodetector." Nanotechnology 27(32), 325202 (2016).
- [8] Y. Wang, X. Chen, Y. Zhong, F. Zhu, K. P. Loh, Appl. Phys. Lett.95, 063302 (2009)

- 31 -





- [9] L. G. De Arco, Y. Zhang, C. W. Schlenker, K. Ryu, M. E. Thompson, C. Zhou, ACS Nano. 4, 2865 (2010)
- [10] J. Scott Bunch; Scott S. Verbridge; Jonathan S. Alden; Arend M. van der Zande; Jeevak M. Parpia; Harold G. Craighead; Paul L. McEuen. Nano Lett. 2008, 8, 2458 2462.
- [11] R. R. Nair; H. A. Wu; P. N. Jayaram; I. V. Grigorieva; A. K. Geim. Science 2012, 335, 442 444.
- [12] Van der Waals stacked 2D layered materials for optoelectronics,W. Zhang, Q. Wang, Y. Chen, Z. Wang, Wee, Andrew T S, 2DMater. 2016, 3, 022001
- [13] Mak, K. F.; Lee, C.; Hone, J.; Shan, J.; Heinz, T. F. Phys. Rev. Lett. 2010, 105, 136805.
- [14] Abderrahmane, A., et al. "High photosensitivity few-layered MoSe<sub>2</sub> back-gated field-effect phototransistors." Nanotechnology 25(36), 365202 (2014).
- [15] Splendiani, A; Sun, L; Zhang, Y; Li, T; Kim, J; Chim, C; Galli, G;Wang, F. Nano Lett. 2010, 10, 1271 1275.
- [16] Xia, F; Mueller, T; Lin, Y; Valdes-Garcia, A; Avouris, P. Nature nano 2009, 4, 839–843.
- [17] Sarma, S; Adam, S; Hwang, E. H; Rossi, E. Reviews of Modern Physics 2011, 83, 407–470.
- [18] Yang, Shengxue, et al., Nanoscale 6. 7226-7231 (2014).
- [19] Wolverson, Daniel, et al., Acs Nano 8. 11154-11164 (2014).
- [20] L. Xie, "Two-dimensional transition metal dichalcogenide alloys: preparation, characterization and applications," Nanoscale, vol. 7, no. 44, pp. 18392–18401, 2015.
- [21] Zhong, Hong-Xia, et al., Phys. Rev. B. 92, 115438 (2015).
- [22] 박종재, 오칠환, 정회일, 「라만 분광학의 이해」, 『대한소화기내시 경학회지』, 28, 2004





- [23] 백승현. "나노소재 합성에서 응용까지." Journal of the KSME, 55, No.12 (2015):32-52
- [24] 정석균, 전정범. "주사현미경의 기본원리와 응용." KIC News, 12, No.1 (2010):51-60
- [25] Field-effect transistors and intrinsic mobility in ultra-thin MoSe<sub>2</sub>layers APPLIED PHYSICS LETTERS 101, 223104 (2012)





## 감사의 글

1987년 학부를 졸업하고 어언 30년이 지난 후 대학원 석사과정을 등록하면 서 만감이 교차했습니다. 50 중반을 훌쩍 뛰어 넘는 나이에 무슨 대학원을 등록하냐고 주위의 부러움 반 걱정 반으로 격려를 주던 많은 이들에게 우선 이 영광을 드립니다. 어찌 보면 짧은 시간이지만 내 인생의 한 이정표를 설 정하는 중요한 시간이었습니다. 긴 터널을 지나는 중에 많은 분들의 도움과 지원 그리고 큰 가르침이 없었다면 오늘과 같은 결과는 만들어지지 않았을 것입니다.

먼저 미욱한 저에게 대학원 석사 과정을 인도해 주신 고필주 교수님께 진심 으로 감사의 말씀 올립니다. 또한 기꺼이 대학원 진학을 받아주시고 많은 지 식을 배풀어주신 조금배 교수님 진심으로 감사합니다.

가르침 덕분에 리더십에 대해서, 연구에 대해서, 교육에 대해서, 학습에 대해 서 의미 있는 성찰을 할 수 있었습니다. 학문을 함에 있어 소홀함이 없어야 한다고 말씀을 늘 해주셨는데 제자가 많이 부족하였습니다. 부족함을 하나 하나 채워나가는 모습으로 큰 가르침에 답하겠습니다. 더불어 논문을 심사하 는 과정에서 아낌없는 조언을 해주신 조금배 교수님, 김남훈 교수님, 고필주 교수님께 감사를 표합니다.

그동안 어려운 여건 속에서도 많은 배려와 관심을 보내주신 저의 형님이자 대표이사이신 박규철 대표님께 진심으로 감사의 말씀 전합니다. 또한 그동안 성실히 내조해준 나의 영원한 반려자 고명옥 여사님 감사합니다. 그리고 나 의 희망인 두 딸 박솔, 박진이 아빠가 너희들 덕분에 큰 힘이 되었다. 고맙 다. 사랑한다.



이 논문을 꼭 전달하고 싶지만 절대 전달할 수 없는 곳 계신 분들이 있습니 다. 아마도 그 누구보다 가장 좋아하시고 자랑스럽게 얘기하셨을 하늘에 있 는 세상에서 가장 존경하는 아버님, 그리고 언제나 따뜻한 마음으로 감싸주 시던 어머님께 이 뜻깊은 선물을 드리고 싶습니다.

> 2019년 2월 감사합니다.

