



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](#)

2016년 2월

석사학위논문

화학기상증착법을 이용한 이황화 몰리브덴의 성장 및 특성 분석

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

김 두 형

화학기상증착법을 이용한 이황화 몰리브덴의 성장 및 특성 분석

Growth and characterization of molybdenum disulfide
by chemical vapor deposition

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

광기술평학과

김두형

화학기상증착법을 이용한 이황화 몰리브덴의 성장 및 특성 분석

지도교수 권 민 기

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 두 형

김두형의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박종락 인

위원 조선대학교 교수 권민기 인

위원 한국광기술원 선임연구원 김자연 인

2015년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이론적 고찰	6
제1절 반도체(Semiconductor)의 개요	6
제2절 반도체 소자	7
1. 다이오드(Diode)의 원리	7
2. 양극성 접합 트랜지스터(Bipolar junction Transistor)의 원리	8
3. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor의 작동 원리	9
제3절 Transition Metal Dichalcogenides(TMDs)	11
제4절 Molybdenum Disulfide(MoS ₂)	12
제3장 실험방법 및 결과	15
1. Sapphire 기판에 주기적인 패턴이 없는 Mo film을 이용하여 MoS ₂ 성장 시 광학적 구조적 특성	15
2. Sapphire 기판 위에 주기적인 Mo 패턴 구조에 의해 성장된 MoS ₂ 의 광학적 구조적 특성	19
3. 온도 변수에 따른 MoS ₂ 의 광학적 구조적 특성	22

4. 압력 변수에 따라 성장된 MoS ₂ 의 광학적 구조적 특성	26
5. Mo의 두께 변수에 따라 성장된 MoS ₂ 의 광학적 구조적 특성	29
6. FET 구현을 위한 MoS ₂ 박막의 SiO ₂ /Si 기판 이송 기술 (Transfer) 및 MoS ₂ 기반 FET의 전기적 특성	31
제4장 결론	35
[참고문헌]	36

그림 목차

그림 1.1. 기술의 발전 동향 (Display)	1
그림 1.2 TFT를 사용한 Display의 구조	2
그림 1.3 Display화면 속 화소	2
그림 1.4 LCD, OLED, Flexible Display의 구조	3
그림 1.5 Flexible Display를 위한 TFT 구조	3
그림 1.6 Flexible Display를 위한 TFT 소재들	4
그림 1.7 MoS ₂ 의 결정 구조 및 평면 원자 구조, 층 수에 따른 밴드 구조	5
그림 1.8 MoS ₂ 를 이용한 전자소자	5
그림 1.9 Mo film 패터닝 기판을 사용한 MoS ₂ 의 성장 방법	6
그림 2.1 (a) p-n 접합 모식도와 (b) p-n 접합 다이오드 회로 기호	7
그림 2.2 (a) 순방향 전압을 가한 경우와 (b) 역방향 전압을 가한 경우	8
그림 2.3 (a) pnp Transistor 구조 (b) npn Transistor 구조 (c) pnp Transistor 기호 (d) npn Transistor 기호	9
그림 2.4 (a) p-MOSFET 구조 (b) n-MOSFET 구조 (c) c-MOSFET 구조	10
그림 2.5 (a) p-MOSFET 채널 형성 (b) n-MOSFET 채널 형성의 모식도	11
그림 2.6 MOSFET의 I-V 특성 곡선	11
그림 2.7 TMDs 종류에 따른 원자 구조	12
그림 2.8 CVD를 이용한 기존의 MOS ₂ 성장 모식도	13
그림 2.9 MoS ₂ 의 형성 메커니즘	13
그림 2.10 CVD에 의해 성장된 Single-layer MoS ₂	14
그림 2.11 기판의 모서리 부분부터 성장이 되는 MoS ₂ 박막의 이미지	14
그림 3.1 MoS ₂ 원자 층의 성장 모식도	16
그림 3.2 여러 조건으로 Mo 패터닝 없이 성장된 MoS ₂ 의 FE-SEM 이미지, (a) 30 Torr, 750 °C, 1 분 (b) 30 Torr, 750 °C, 2분 (c) 30 Torr, 750 °C, 4분 30초, (d) 40 Torr, 750 °C, 5분 (e) 50 Torr, 750 °C, 5분	17
그림 3.3 (a) 성장된 MoS ₂ FE-SEM 및 측정 위치 (b) Raman 스펙트럼 (c) 기존에 보고된 Raman 스펙트럼	18
그림 3.4 각 위치별 PL 스펙트럼	18
그림 3.5 Mo film의 패터닝 방법	19
그림 3.6 Mo가 패터닝된 Sapphire기판에 성장된 MoS ₂ 박막의 FE-SEM 이미지	20
그림 3.7 Mo 패터닝 기판에 성장된 MoS ₂ 의 Raman 스펙트럼(왼쪽), PL 스펙트럼(오른쪽)	20
그림 3.8 패터닝된 Mo 박막을 이용하여 성장된 MoS ₂ AFM 이미지 및 Depth profile	21

그림 3.9 MoS₂의 결정방향을 확인하기 위한 TEM 이미지 22
 그림 3.10 온도 변수에 따라 성장된 Single-layer MoS₂의 FE-SEM 이미지, (a) 650 °C (b) 700 °C (c) 750 °C (d) 800°C (e) 850 °C 23
 그림 3.11 온도 변수에 따른 Raman mapping data, (a) 650 °C (b) 700 °C (c) 750 °C (d) 800 °C 24
 그림 3.12 패터닝의 위치(중앙, 가장자리)별 Raman 스펙트럼 25
 그림 3.13 온도 변수에 따라 성장된 MoS₂의 PL 분석 26
 그림 3.14 압력 변수에 따라 성장된 MoS₂의 FE-SEM 이미지, (a) 30 Torr (b) 40 Torr (c) 50 Torr (d) 100 Torr (e) 300 Torr 27
 그림 3.15 압력 변수에 따라 성장된 MoS₂의 Raman 스펙트럼 27
 그림 3.16 압력 변수에 따른 PL 스펙트럼 및 FWHM 28
 그림 3.17 패터닝 된 Mo의 두께에 따라 성장된 MoS₂의 FE-SEM 이미지, (a) 1 nm (b) 2 nm (c) 3 nm 29
 그림 3.18 패터닝 된 Mo의 증착 두께에 따라 성장된 MoS₂의 Raman 스펙트럼 30
 그림 3.19 패터닝 된 Mo의 증착 두께에 따라 성장된 MoS₂의 PL 스펙트럼 30
 그림 3.20 MoS₂ FET. Back gate 구조(왼쪽), Top gate 구조(오른쪽) 31
 그림 3.21 FET 제작 CAD 도면 32
 그림 3.22 MoS₂ 박막의 이송 기술 32
 그림 3.23 Single-layer MoS₂ film의 전사 전과 후의 FE-SEM 이미지 33
 그림 3.24 Single-layer MoS₂ film의 전사 전과 후의 Raman 분석(왼쪽), PL 분석(오른쪽) ... 33
 그림 3.25 MoS₂를 이용하여 구현한 FET(왼쪽), Gate Voltage에 따른 Drain, Source I-V 그래프(오른쪽) 34

ABSTRACT

Growth and characterization of molybdenum disulfide by chemical vapor deposition

By Doo-Hyung Kim

Advisor : Prof. Min Ki Kwon, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

Molybdenum Disulfide(MoS_2) has received significant attention recently for next generation electronics. Optoelectronics and sensor application due to large carrier-mobility, high current capacity, strong absorption in the visible frequency by band gap energy and mechanical robustness. In addition, the Intrinsic two dimensional nature of carriers in these chalcogenides semiconductors offers the advantages of superior vertical scaling for transistor topology. Therefore, the potential of these materials for low cost flexible and transparent electronics that could revolutionize technology is also very high.

Obtain the high quality MoS_2 flake or film remains a challenge. One promising technique is the growth of MoS_2 flake or film by chemical vapor deposition(CVD) of Mo film and sulfurization. However, this method typically result in growth of MoS_2 flakes in uncontrolled size and locations on the substrate.

Here, we reported the use of patterned Mo film as seed material and sulfurization for the growth of crystalline MoS_2 monolayers at perdefined

location and size without etching step. To Optimization of crystal quality the growth temperature and pressure is changed. The structural and optical quality is characterized by FE-SEM, Raman and Photoluminescence.

제1장 서론

Display는 시각적인 정보를 인간이 인지할 수 있도록 하는 제품이다. 이러한 Display 기술은 처음 브라운관이라 불리는 Cathode Ray Tube(CRT) TV에서부터 21세기로 넘어오면서 두께가 얇아지며 화질이 우수한 Liquid Crystal Display (LCD) Display로 변화해 왔다. 그 이후, 자발광 특성을 갖고 있으며 시야각이 넓고 얇게 제작이 가능한 Organic Light Emitting Diode(OLED) Display가

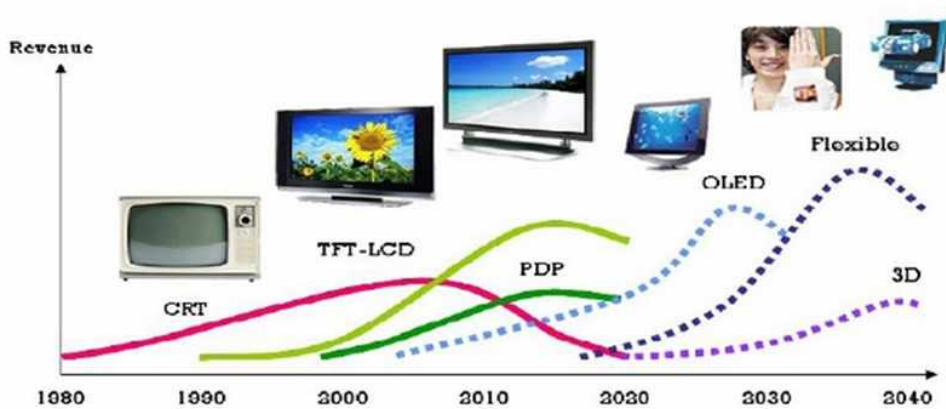


그림. 1.1. 기술의 발전 동향 (Display)

나왔으며, 최근 곡면 TV, 휴대용 기기 및 웨어러블 기기들의 발전과 함께 Flexible Display가 점차적으로 크게 성장될 전망이다. 향후 2024년에는 전체 Display 시장의 15%를 차지하고 매출은 230억 달러에 도달할 것으로 전망됐다.

일반적으로 Display는 점점 넓은 화면, 얇은 두께, 빠른 응답속도, 고해상도를 요구하기 때문에 이들의 조건을 충족시키기 위해 그림 1.2와 같이 Thin Film Transistor(TFT)를 제어기로 활용되는 방식으로 제작된다. TFT는 Display의 스위치 역할을 하며 각 화소마다 위치하여 독자적으로 제어하여 화면을 재생한다. TFT는 기판 위에 위치하여 On상태가 되고, 커패시터를 통해 아래에 있는 기판에 전압이 인가(데이터 전압)된다. 이 때, 상판 유리에도 전압을 걸어주면 두 유리 기판 사이에 전위차가 생겨 사이의 액정 층이 움직이게 된다. 액정 층이 움직이게 되면, 그 사이로 색 필터의 R, G, B 빛이 통과되고, 전달돼서 우리가 보는

Display 화면을 구성하게 된다.

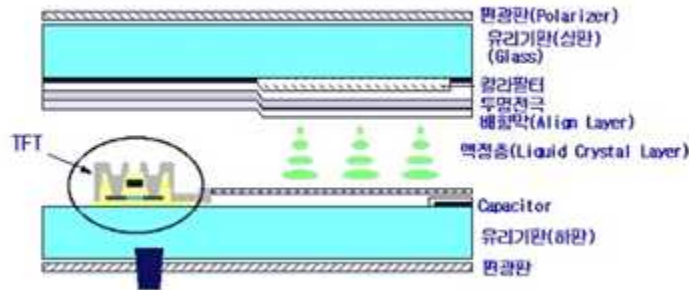


그림 1.2 TFT를 사용한 Display의 구조

그림 1.3는 TFT를 이용하여 Display를 구현한 그림이다. Display는 2개의 행 전극과 열 전극이 교차하여 이루어지며 전극이 교차하는 부분은 화소가 되고 매트릭스 배열 구조로 구성된 이 위치에 TFT 소자가 위치하여 각각의 소자들은 각 화소를 독자적으로 제어하게 된다. 또한 그림 1.3와 같이 우리가 보는 선명한 화질의 Display도 화소들로 구성되어 있는데, TFT 소자의 부피가 작아질수록 단위면적 당 위치할 수 있는 소자의 수가 많아지게 되므로 Display의 화질은 더 선명해 지며, 전자의 이동도, On/off 비가 빠를수록 Display의 반응속도도 빨라지게 된다.^{[1],[2]}



그림 1.3 Display화면 속 화소

그림 1.4는 LCD, OLED, Flexible Display의 구조 및 두께를 나타낸 그림이다. Display의 두께는 LCD는 약 2 mm에서 OLED, Flexible Display까지 0.5 mm 이하로 점점 얇아졌으며 이들의 구조 또한 기존의 기판은 유리 기판에서 Flexible Display는 연성을 가져야 하므로 Plastic 기판을 사용하여 여기에 연성을 가지는 TFT 소자를 위치시킨다. 그 위에 소자 보호를 위한 Flexible Encapsulation을 올리고 Glass 제거 및 필름을 부착하는 방식으로 구성되어 있다.^[3]

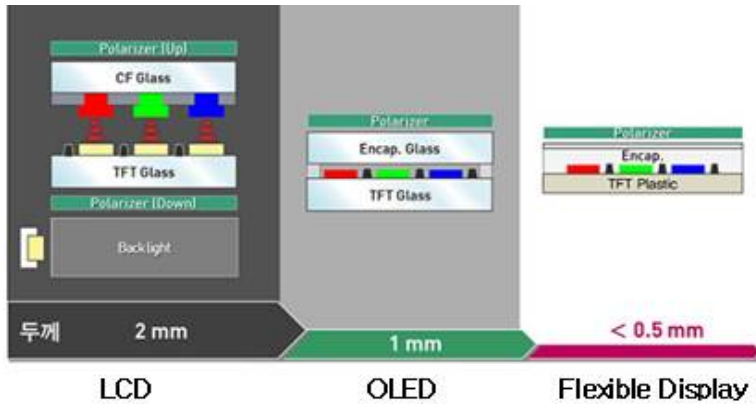


그림 1.4 LCD, OLED, Flexible Display의 구조

Flexible Display에 사용되는 TFT 구조는 전에 언급한 바와 같이 매트릭스 배열로 이루어지며, TFT 소자는 여기에 정렬되어 위치되어야 한다. Flexible Display를 위한 TFT의 특성은 곡면 형성, 굽혀도 원래 형상으로 돌아오는 연성을 가지야 하며 기존 Display 보다 얇고 가벼운 특성, 깨지지 않는 특성, 높은 On/off 비, 높은 전자 이동도를 가져야 한다. 그래서 이들의 대표적인 물질로는 산화물 반도체(Organic Thin Film Transistor(OTFT), Graphene, MoS₂)가 있다. 그림 1.5는 Flexible Display를 위한 TFT구조의 예시이다.

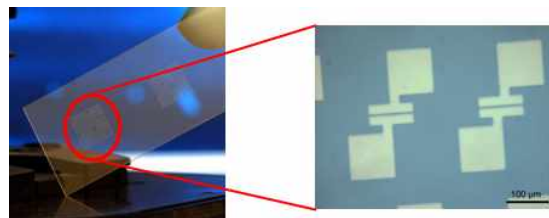


그림 1.5 Flexible Display를 위한 TFT 구조

다음의 그림 1.6은 Flexible Display에 적용할 수 있는 TFT 물질들의 특징을 보여준다. TFT에 적용할 수 있는 물질들의 주요 특징들은 이들의 구조, 시트 두께, 이동도, On/off 비, 연성을 들 수 있다. 산화물 반도체는 얇은 TFT를 만들 수 없는 3D 구조로 구성되어 두께가 두껍고 이동도 또한 매우 낮으며, 낮은 안정성을 보이며, 소자 자체의 연성은 뛰어나지 않다. 반면 Graphene은 2D 구조로 높은 이동도를 갖고 연성이 뛰어나지만 밴드갭 에너지를 갖고 있지 않고 금속의 특징을 띄고 있기 때문에 이를 TFT 소자에 적용시킬 수 없는 한계를 갖고 있

다. 때문에 Graphene만 독립적으로 Flexible Display에 적용시킬 수 없으며 커패시터 및 반도체 특성을 가질 수 있도록 Graphene을 산화시켜 Graphene Oxide 물질을 이용하여 소자를 제작하는 추세이다.^{[4],[5]} 하지만, 이동도가 200 cm²/Vs 정도로 높지 않으며 On/off 비도 낮은 편이다. 이들의 단점 및 한계를 보완하며 가장 좋은 특성을 갖는 물질로 밴드갭 에너지를 갖기 때문에 반도체 특성을 내는 Molybdenum disulfide(MoS₂)가 대안으로 제시되고 있다. 그림 1.6에서 보는 것처럼 MoS₂는 약 200~500 cm²/Vs의 높은 이동도와 10⁶~10⁸의 큰 On/off 비를 보인다. 이는 기존 LCD에 사용되는 Si 기반 TFT보다 더 좋은 성능을 나타낸다.^[6]

	산화물 반도체	Graphene Oxide	MoS ₂
구조	3D	2D	2D
시트 두께 (nm)	2	1.1	0.65~0.7
이동도 (cm ² /Vs)	1~80	~200	200~500
On/Off Ratio	~10 ⁴	~10	10 ⁶ ~10 ⁸
Flexibility	△	○	○

그림 1.6 Flexible Display를 위한 TFT 소재들

또한 MoS₂는 Transition Metal Dichalcogenides(TMDs)로 결정을 가지며 Graphene과 같이 Van der Waals 인력에 의해 서로 결합된 단일 층이 형성된다.^[7] TMDs (MoS₂, WS₂, MoSe₂, WSe₂, MoTe₂)물질들은 약 1.8~1.85 eV의 직접천이형 밴드갭 에너지(Direct Band gap Energy)를 가지고, 트랜지스터와 같은 전자 이미터(Emitter) 및 검출기와 같은 광학 장치에 사용될 수 있다.

그림 1.7은 MoS₂의 결정 구조 및 평면 원자구조, 층 수에 따른 밴드 구조를 나타낸 그림이다. 이는 하나의 Mo 원자와 2개의 Sulfur원자로 구성되어 있다. Flexible하고 90% 이상의 투과도를 가지며, 층간 약한 Van der Waals 결합에 의해 쉽게 단일 층으로 분리될 수 있는 특성을 가지고 있다.^{[8],[9]} 단일 층의 두께는 약 0.65~0.7 nm 정도이며, 200~500 cm²/Vs의 높은 전자 이동도를 갖고 있다. 밴드갭 에너지를 가지고 있으며 이들이 Bulk 형태 일 때는 1.2 eV에서 Single-layer일 때는 1.85 eV정도까지의 밴드갭 에너지를 가지며 이는 가장 이상적인 물질일 때 밴드갭 에너지 이다.^[10] 이러한 점을 이용하여 그림 1.8과 같은

TFT 뿐만 아니라 Photodiode, Phototransistor 등의 전자 소자에도 적용 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

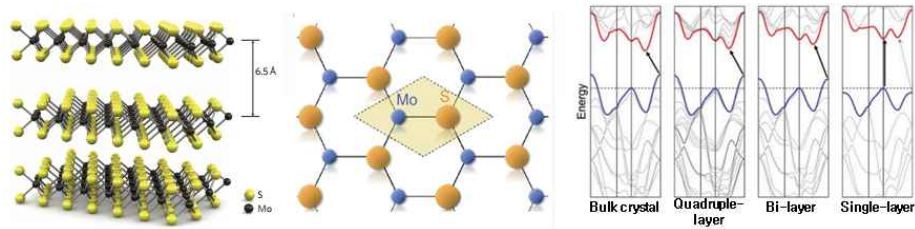


그림 1.7 MoS₂의 결정 구조 및 평면 원자 구조, 층수에 따른 밴드 구조^[11]

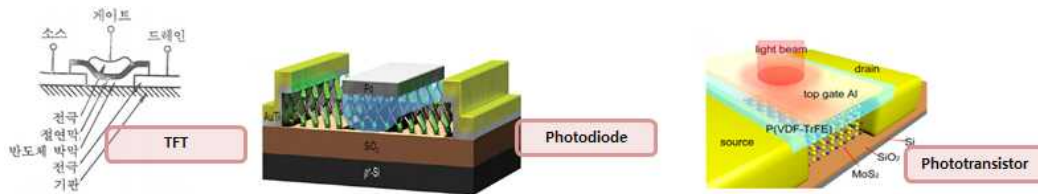


그림 1.8 MoS₂를 이용한 전자소자

하지만 매우 많은 장점을 갖는 물질임에도 MoS₂는 대면적의 Single-layer로 성장시키기 어려우며, 이들의 성장 위치를 제어할 수 없는 한계를 갖고 있다. MoS₂를 원하는 모양으로 성장 위치를 제어하여 성장 시킨다면 Display의 매트릭스 배열 구조에 적용 시킬 수 있으므로 한 번에 Display 등 TFT 소자들의 제작이 가능할 것으로 전망된다.

본 연구에서는 MoS₂를 고품질로 성장시킬 수 있고 크기 및 두께를 제어할 수 있는 화학기상증착법(Cheical Vapor Deposition)을 이용하여 성장하고 이를 TFT 소자로 적용하고자 연구를 시작하였다. MoS₂의 한계인 대면적으로 성장되지 못하며, Display에 응용을 위한 TFT 제작 시 크기, 위치를 제어할 수 없는 문제를 극복하고자 Mo를 미리 원하는 위치 및 크기로 제어하고 이를 선택적으로 황화시키는 방법을 제시 하였다. 그림 1.9는 실험에 활용된 MoS₂의 성장 방법의 개략도를 보여준다. 성장이 완료 후 SiO₂/Si 기판에 MoS₂구조를 이송한 후 TFT를 제작하고 그 특성을 평가 하였다. 이렇게 개발된 고품질 및 크기, 위치 제어 MoS₂ 성장 기술 및 이를 응용한 MoS₂ 기반 TFT 제작 기술은 Flexible Display를 위한 핵심 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 TFT 이외

에도 MoS₂ 밴드갭 에너지에 의해 Photodiode 및 Phototransistor 등 수광소자로도 응용가능 할 것이다.

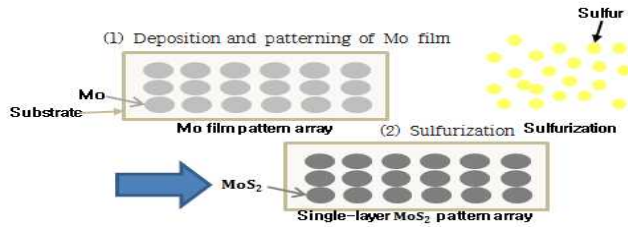


그림 1.9 Mo film 패터닝 기판을 사용한 MoS₂의 성장 방법

제2장 이론적 고찰

제1절 반도체(Semiconductor)의 개요

반도체, 도체, 부도체는 밴드갭 에너지에 의해 생기는 전기전도도에 따라 물질이 분류된다. 도체는 밴드갭 에너지가 없으며 반도체는 0.6~4 eV의 밴드갭 에너지를 가지고 있으며, 부도체는 약 9 eV 이상의 큰 밴드갭 에너지를 가지고 있다. 반도체는 순수한 상태에서 부도체의 성질을 가지고 있으며, 불순물의 첨가에 의해 전도대(Conduction band)의 전자와 가전자대(Valence band)의 정공이 만나 광자가 되어 빛 또는 열에너지로 변환하여 전기전도성을 갖는다. 반도체는 자유전자와 정공의 수가 같은 진성반도체(Intrinsic semiconductor)가 아닌 규소(Si)와 같은 4족 원소 반도체에 3족 원소인 갈륨(Ga) 또는, 5족 원소인 비소(As)와 같은 물질의 불순물을 주입하여 p형 또는 n형 반도체를 만들 수 있다. n형 반도체는 전압이 인가되면 전자의 이동에 의해 전하가 이동하는 반도체이며, p형 반도체는 전압이 인가되면 정공의 이동에 의해 전하가 이동하는 반도체이다. 이를 이용하여 두 p, n형 반도체를 적절하게 구조결합하면 다이오드나 트랜지스터와 같은 반도체소자를 구현할 수 있다.

제2절 반도체 소자

1. 다이오드 (Diode)의 원리

다이오드는 그림 2.1 (a)와 같이 억셉터(Acceptor)가 도핑(Doping)된 p형 반도체와 도너(Donor)가 도핑된 n형 반도체의 접합으로 만들어진다. p형 반도체 영역에서는 정공의 농도가 n형보다 훨씬 크고 n형 반도체에서는 전자의 농도가 p형보다 훨씬 크다. 다이오드는 두 가지 전극이 있으며, p형 반도체에 연결된 전극을 애노드(Anode), n형 반도체에 연결된 전극을 캐소드(Cathod)라고 하며, 애노드에서 캐소드로 전류가 흐른다. 회로도에서는 그림 2.1 (b)와 같이 회로 기호로 나타낼 수 있다. 접합부에서는 전자와 정공이 서로를 끌어당기며 서로 상대 영역으로 확산이 일어난다. 접합부에서는 확산과 재결합을 통하여 전자와 정공 모두 존재하지 않는 공간이 형성되는데 이를 공핍층(Depletion layer)이라 한다.

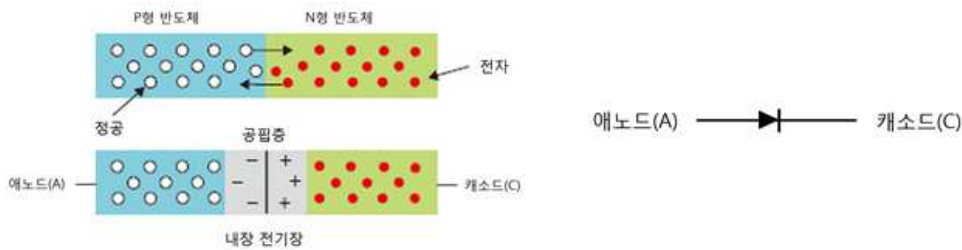


그림 2.1 (a) p-n 접합 모식도와 (b) p-n 접합 다이오드 회로 기호
 이러한 상태에서 그림 2.2 (a)와 같이 (+)전압을 p형에, (-)전압을 n형에 연결한 것을 순방향전압이라고 하는데 순방향 전압을 인가하면 전위장벽이 줄어들어 도체의 성질을 띠게 되고 반대로 그림 2.2 (b)와 같이 (+)전압을 n형에, (-)전압을 p형에 연결한 역방향 전압을 걸어주면, n형 반도체 내의 전자는 (-) 전원에 의해 반발 당하고 (+) 전원에서 끌어당겨 전자는 p형 반도체 쪽으로 이동하며, p형 반도체 내의 정공은 (+) 전원에 의해 반발 당하고 (-) 전원에서 끌어당겨 n형 반도체

체 쪽으로 이동한다. 이와 같이, 순방향 전압을 가해 내부에 형성된 전기장을 약하게 하여 전자나 정공이 이동하기 쉽게 되어 p형에서 n형으로 전류가 흐르게 된다. 반대로 역방향 전압을 걸어주면, 전자와 정공이 순방향 전압과는 반대로 움직여 공핍층에 운송자(전자, 정공)가 없어서 전류가 흐르지 않는다.

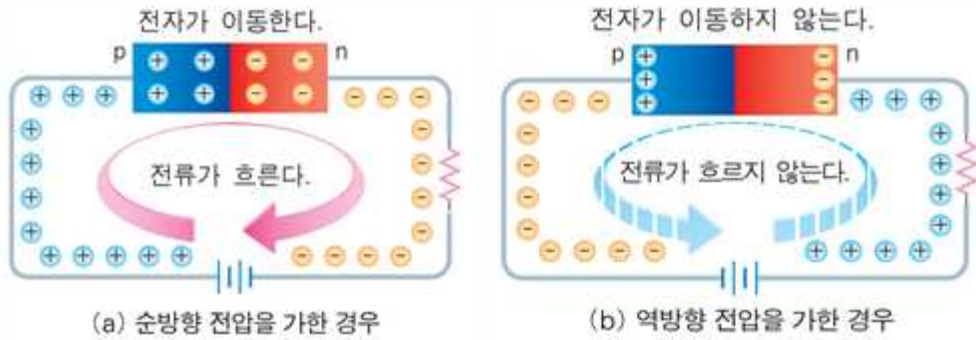


그림 2.2 (a) 순방향 전압을 가한 경우와 (b) 역방향 전압을 가한 경우

2. 양극성 접합 트랜지스터 (Bipolar junction Transistor)의 원리

트랜지스터는 흔히 스위치의 On/off 역할을 한다. 다시 말하면, 전류를 흐르게 하거나 흐르지 못하게 하거나를 조절하는 역할을 한다. 양극성 접합 트랜지스터는 pnp, npn 방식이 있으며, 하나의 예로 pnp 바이폴라트랜지스터는 그림 2.3 (a)와 같이 두 개의 p형 반도체 사이에 n형 반도체를 넣은 것이다. 가운데의 n형을 베이스(Base), 양쪽의 p형을 각각 이미터(Emitter), 콜렉터(Collector)라 한다. 그림 2.3 (c)와 같이 이미터와 베이스 사이에 순방향 전압 (p형은 (+)전압, n형은 (-)전압)을 인가하면 이미터에서 베이스로 정공이 이동하면서 전류가 흐르게 된다. 이때, 콜렉터와 베이스 사이에 높은 역방향 전압 (p형은 (-)전압, n형은 (+)전압)을 걸어주면 이미터에서 베이스로 흐르던 정공들이 대부분 콜렉터 쪽으로 흐르게 된다. 이에 따라 순방향 전압을 높여서 이미터에서 베이스로 흐르는 정공의 수를 늘려주면 이에 비례하여 콜렉터 쪽으로 흐르는 정공의 수도 많아지게 된다. 콜렉

터의 전류가 베이스의 전류보다 수 배 증가하여 흐르게 된다.

npn 바이폴라트랜지스터는 마찬가지로 그림 2.3 (b)처럼 두 n형 반도체 사이에 p형 반도체를 넣은 것이다. 이러한 경우 pnp와는 반대로 p형이 베이스, n형이 각각 이미터, 콜렉터이며 이미터에서 베이스로 흐르는 순방향 전압과 베이스에서 콜렉터로 흐르는 역방향 바이어스를 조절하여 전류가 흐르게 할 수 있다.

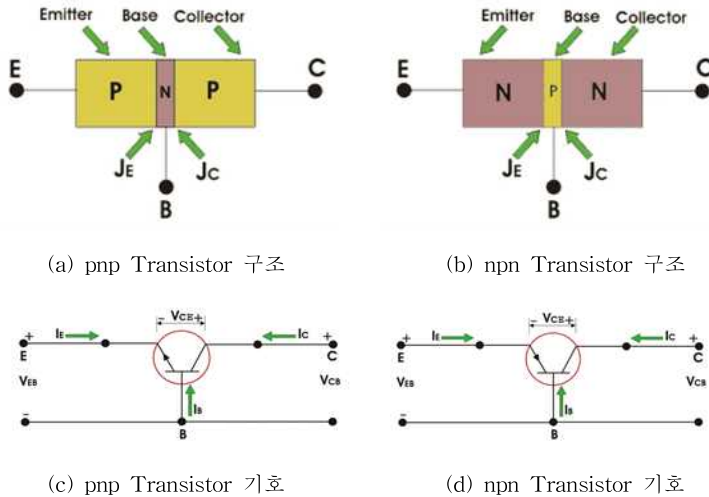


그림 2.3 (a) pnp Transistor 구조 (b) npn Transistor 구조
(c) pnp Transistor 기호 (d) npn Transistor 기호

3. Metal Oxide Semiconductor Field Effect

Transistor(MOSFET)의 작동 원리

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(MOSFET)은 금속 산화막 반도체 전계 효과 트랜지스터로 Metal Oxide는 도체인 금속과 부도체인 산화물이 층을 이루고 있는 구조이며 부도체인 산화물에선 전자가 이동할 수 없다. 전기적 신호를 스위칭 또는 증폭 하는데 쓰이는 전형적인 트랜지스터 이다. MOSFET은 그림 2.4와 같이 전자를 사용하는 n-MOSFET, 정공을 사용하는 p-MOSFET, 전자/정공 모두를 사용하는 c-MOSFET이 있다. MOSFET과 바이폴라트랜지스터의 차이점은 전압으로 전류를 제어하며, 소자가 단극

성이기 때문에 자유전자와 정공 중 하나만 전도 현상을 일으킨다. 또한 단자가 소스(Source)/게이트(Gate)/드레인(Drain)으로 이루어져 있으며 이것은 바이폴라트랜지스터의 이미터/베이스/컬렉터와 같은 역할을 한다.

MOSFET의 구조에서 게이트 쪽은 도체인 금속과 부도체인 산화물이 층을 이루고 있다. 금속은 게이트로써 내부에 (+)극과 (-)극이 위/아래로 나뉘어져 게이트의 전압 차를 조절하여 스위치의 역할을 할 수 있다. 산화물은 부도체로써 금속 내부의 전자가 기판으로 이동하지 못하게 하는 장벽 역할을 한다. 우선, n-MOSFET을 살펴보면 소스와 드레인은 n형으로 도핑된 기판이며 다량의 전자를 함유하고 있다. 그 밑에 p형으로 도핑된 기판이 소스와 드레인을 감싸며 다량의 정공을 함유하고 있다. 게이트와 소스에 전압(게이트(+), 소스(-))이 걸리게 되면 그림 2.5 (a)와 같이 p형 기판과 산화물 사이인 Gate 영역에 전자가 모여 n채널을 형성한다. 이러한 채널을 형성하여 소스에 있는 전자들이 드레인으로 이동하게 되어 드레인에서 소스 쪽으로 전류가 흐르게 된다. 전압이 0이거나 음의 전압을 가질 때 채널이 사라져 흐르지 않게 된다. p-MOSFET은 n-MOSFET과 반대로 역시 소스와 드레인은 p형 기판이며 밑은 n형 기판이다.

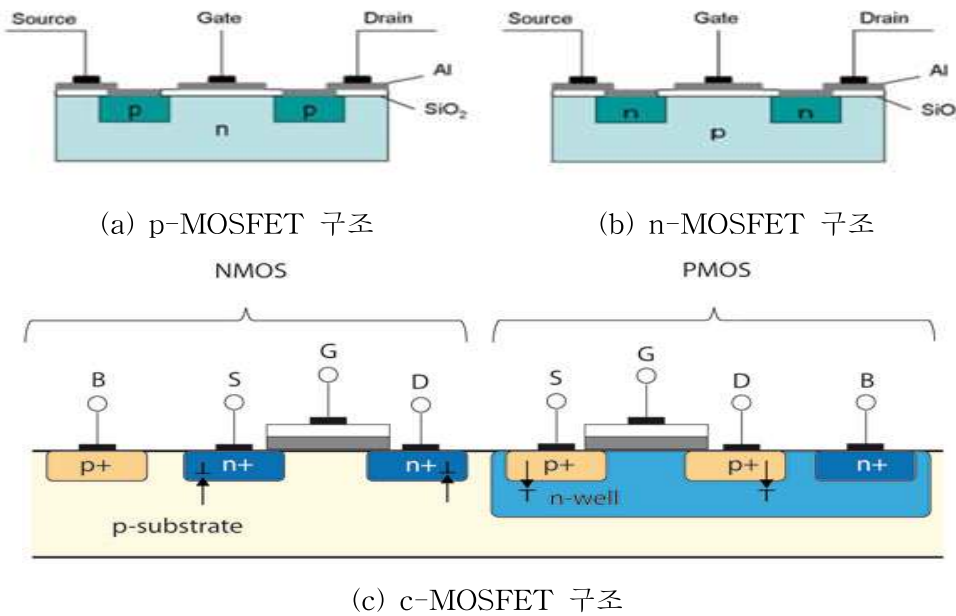
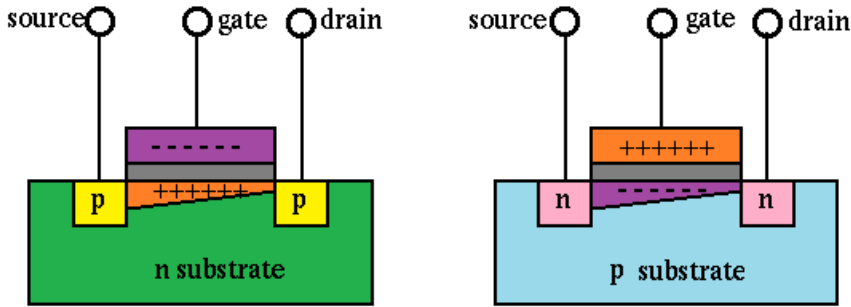


그림 2.4 (a) p-MOSFET 구조 (b) n-MOSFET 구조 (c) c-MOSFET 구조
게이트에 (-)전압, 소스에 (+)전압이 걸리면 그림 2.5 (b)와 같이 n기판과 산화

물 사이에 p채널을 형성하여 정공이 소스에서 게이트로 흘러 전류가 흐르게 된다. 이러한 원리를 이용하여 전압을 적절하게 걸어주어 전류를 증폭시켜줄 수 있다. 그림 2.6은 Transistor의 기본적인 전류, 전압 특성인 Gate 전압에 따른 Drain 전류의 변화를 보여준다.



(a) p-MOSFET 채널 형성 모식도 (b) n-MOSFET 채널 형성 모식도
그림 2.5 (a) p-MOSFET 채널 형성 (b) n-MOSFET 채널 형성의 모식도

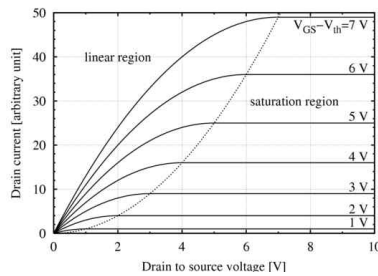


그림 2.6 MOSFET의 I-V 특성 곡선

제3절 Transition Metal Dichalcogenides(TMDs)

Transition Metal Dichalcogenides(TMDs)는 전이금속 원자 M(Mo, W 등)과 칼코겐 원자 X(S, Se 등)가 합쳐진 MX_2 의 형태(MoS_2 , WS_2 , $MoSe_2$, WSe_2 , $MoTe_2$)로 원자적으로 매우 얇은 반도체이다.^[12] TMDs 물질은 층상구조를 가지고 있어 Graphene과 유사하게 단일 층으로 분리될 수 있고, 원자 구조는 전이금속 원자 M 한 층이 칼코겐 원자 X 두 층 사이에 샌드위치(Sandwich)된 구조로

세 개의 원자 층을 가진 반도체 특성을 보인다. 대표적으로 MoS₂가 가장 활발히 연구가 진행되었으며, 한 층의 두께는 약 6.5 Å 정도이다. TMDs 물질 (MoS₂, WS₂, MoSe₂, WSe₂, MoTe₂)은 벌크 형태일 때 간접천이형 밴드갭 에너지를 가지고 단일 층일 때 직접천이형 밴드갭 에너지를 가져 벌크 형태일 때 보다 단일 층일 때 양자효율이 약 10⁴만큼 높다.

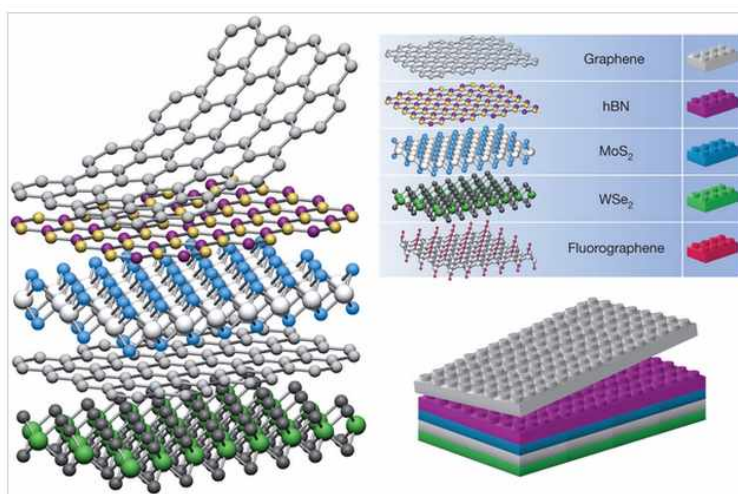


그림 2.7 TMDs 종류에 따른 원자 구조

단일 층의 밴드갭은 400~700 nm의 가시광 대역을 갖는다. 이러한 TMDs 물질은 물리적, 광학적, 전기적으로 뛰어난 특성을 가져 트랜지스터와 같은 전자 이미터(Emitter) 및 검출기와 같은 광학 장치에 사용될 수 있고, Van der Waals 구조 장치를 만들기 위해 2D 물질인 Graphene이나 질화붕소(BN)와 함께 쓰이기도 한다.

제4절 Molybdenum Disulfide(MoS₂)

Molybdenum Disulfide(MoS₂)는 TMDs 물질 중 하나이다. 칼코젠 원자 S와 금속원자 Molybdenum(Mo)이 만나 샌드위치 구조의 세 원자 층으로 이루어진다. 기존의 MoS₂의 성장 방법은 그림 2.8과 같이 기판을 반응실의 중앙에 위치시키고 CVD를 이용하여 기상상태의 Molybdenum trioxide(MoO₃)와 Sulfur를 반응시

켜 650 °C의 온도에서 반응시켜 증착하는 방법을 이용한다^{[13],[14],[15]}. 이렇게 성장된 MoS₂는 그림 2.9와 같이 육각형 원자 구조를 갖으며 성장되며 삼각형 모양으로 성장되며 성장된 변 부분은 Mo-zigzag 또는 S-zigzag의 구조로 성장되는데, Mo-zigzag로 성장 되었을 때, 더 선명하고 날카로운 삼각형 형태로 성장되며 이때 전자 빔 세기가 약 10% 정도 더 높다고 보고된 바 있다.^[16]

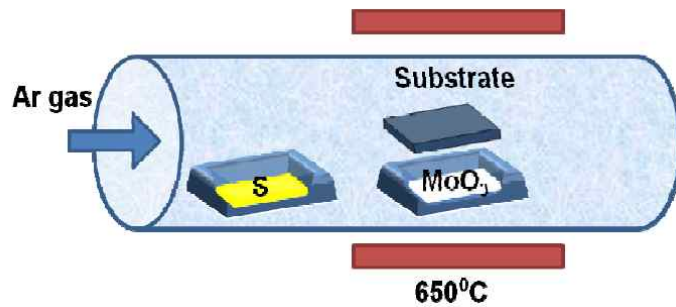


그림 2.8 CVD를 이용한 기존의 MoS₂ 성장 모식도

다음 그림 2.10은 CVD에 의해 성장된 단일 층의 MoS₂이다. 이들은 날카로운 삼각형으로 성장되거나 표창 모양으로 성장되기도 하는데, 표창 모양으로 성장되는 이유는 성장 시 Sulfur의 양이 부족할 때 MoS₂가 아닌 MoS_{2-x}가 성장 하게 되며 삼각형 모양의 모서리 부분이 안쪽으로 들어간 표창 모양의 MoS₂로 성장된다고 보고되었다.^[17]

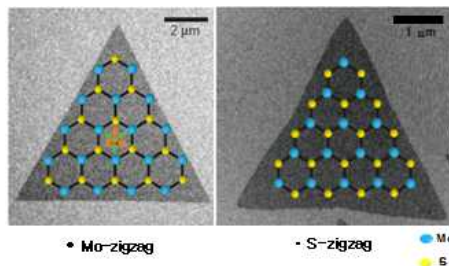


그림 2.9 MoS₂의 형성 메커니즘^[16]

이들은 성장 시 임의의 크기 및 형태뿐만 아니라 임의의 위치에 성장되어 이를 제어할 수 없는 한계를 가지고 있다.

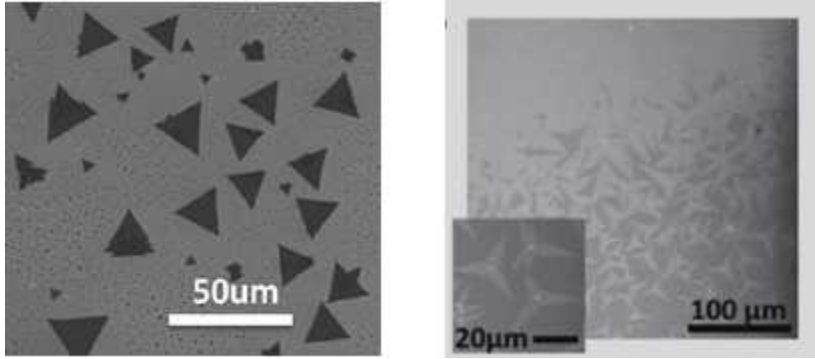


그림 2.10 CVD에 의해 성장된 Single-layer MoS₂^{[12],[18]}

MoS₂는 또한 성장 시 기판의 모서리 부분부터 주로 성장이 된다. 이는 기판 표면의 평평한 면보다 계단과 같은 구조의 모서리가 있는 곳에서 MoS₂의 핵 성장 에너지가 낮아 결정 성장이 촉진되기 때문에, 이를 중심으로 삼각형 구조의 Single-layer MoS₂가 성장된다.^[19] 따라서 기판의 모서리 또는 거칠기가 있는 부분에서 성장이 주로 일어나게 된다. 그림 2.11은 이러한 현상을 보여주는 대표적인 이미지이다.

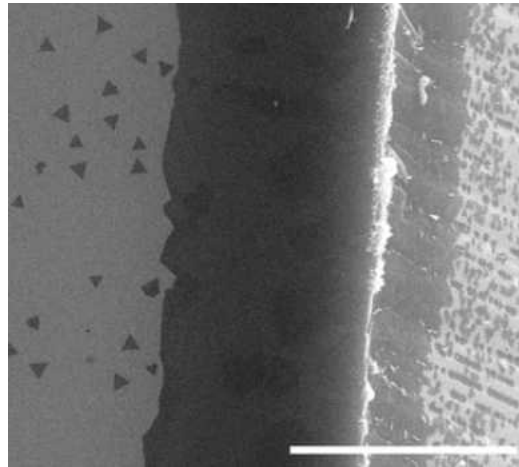


그림 2.11 기판의 모서리 부분부터 성장이 되는 MoS₂ 박막의 이미지^[19]

(Scale bar는 10 μm이다.)

이렇듯 MoS₂의 한계는 성장 위치가 제어되지 않으며, 크기를 조절할 수 없고 기판의 전면을 도포할 만큼 대면적의 단일 층 박막으로 성장되지 않으며, 원하는 형태로 성장되지 않는다. Flexible Display를 위한 TFT 구조로 응용되기 위해서

는 크기의 제어는 물론 성장 위치를 제어하며 주기적인 정렬 구조로 성장 할 수 있는 기술의 확보가 중요하다.

제3장 실험방법 및 결과

1. Sapphire 기판에 주기적인 패턴이 없는 Mo film을 이용하여 MoS₂성장 시 광학적 구조적 특성

MoS₂ 원자 층을 얻기 위해서 벌크 형태의 MoS₂에서 물리적 박리, 화학적 박리, 액상 박리, 수열 합성, 물리 증착 등 여러 방법으로 얻어낸다. 하지만 이러한 방법들은 Flexible Display에 응용할 만큼 대면적의 박막을 얻어 낼 수 없으며 주기적인 MoS₂ 배열 구조를 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에선 대면적 성장이 가능하며 크기제어가 가능하다고 잘 알려져 있는 화학기상증착법 이라는 방법으로 석영(Quartz)으로 이루어진 반응실에 Mo가 증착된 샘플을 위치시켜 진공 상태에서 고온으로 열을 가하여 기체상태의 불활성 가스를 주입하여 기판상의 Mo와 Sulfur를 반응시켜 2차원 구조 MoS₂ 원자 층을 얻는 방법을 사용 하였다. 이 방법은 고품질의 성장 Mo를 미리 패터닝 함으로 성장 위치 제어는 물론 Flexible Display에 응용 가능한 MoS₂ 배열구조를 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 매우 민감한 장비이므로 이를 제어하기 위해 장비에 대한 이해도와 정확한 성장 조건이 필요하다.

MoS₂ 원자 층을 성장시키기 위해, 먼저 Sapphire기판에 e-beam evaporation을 이용하여 Mo를 1 nm만큼 증착 시킨다. 그 후, 그림 3.1과 같이 세라믹 도가니에 Sulfur를 0.8 g만큼 넣고 Cold zone에 위치시킨다.

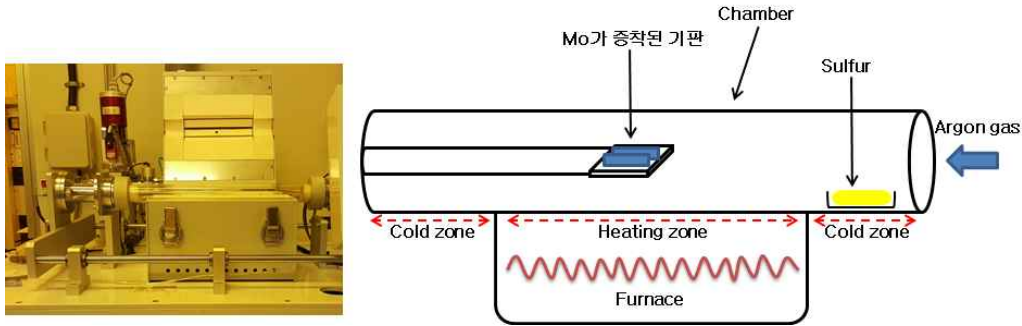


그림 3.1 MoS₂ 원자 층의 성장 모식도

다음 e-beam evaporation에 의해 Mo가 1 nm 만큼 증착된 기판을 반응실의 중앙에 위치시킨다. 반응실은 진공 상태에서 750 °C만큼 열을 가해주고, 불활성 가스인 Argon 100 sccm을 주입 시키며 원하는 압력을 설정하여 유지시켰다. MoS₂ 원자 층의 성장은 750 °C에서 일정시간동안 성장 시켰다. 그림 3.2는 Sapphire기판에 패터닝이 없는 성장 Mo film을 이용하여 MoS₂ 성장시킨 FE-SEM 이미지 이다. 이들은 모두 날카로운 삼각형 형태로 성장되어 Single-layer MoS₂로 성장 되었지만 기존의 보고와 같이 기판의 모서리나 거칠기에 의해 단차가 있는 부분에서 우선 성장되는 경향이 일치함을 보였다. 성장된 MoS₂ 구조는 Mo-zigzag와 S-zigzag가 혼합되어 있는 모습을 보였다. 또한 그림 (e)와 같이 일부 삼각형들이 서로 결합함으로써 대면적 MoS₂ 구조가 성장되는 모습을 보였다. 이를 통해 삼각형 구조가 핵이 있는 부근에서 서로 결합을 통해 대면적으로 자라남을 알 수 있었다. 하지만, 이렇게 성장된 시편들은 여러 변수 설정에도 불구하고 성장 위치를 제어할 수 없으며 원하는 모양으로 성장시킬 수 없는 한계를 보였다.

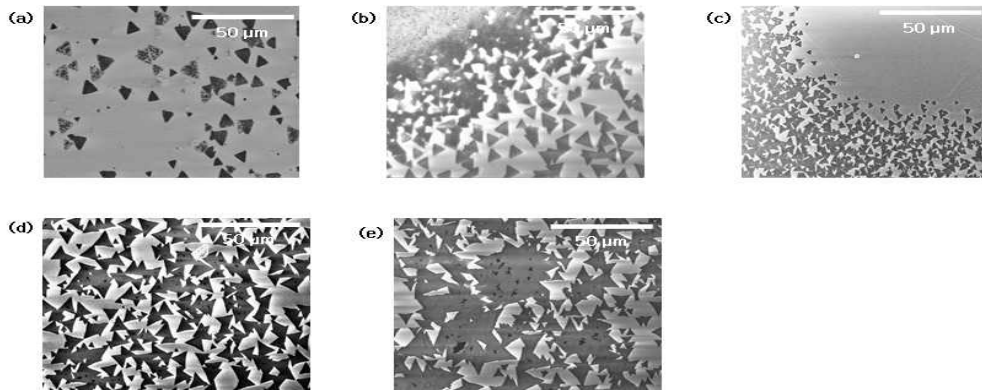


그림 3.2 여러 조건으로 Mo 패터닝 없이 성장된 MoS₂의 FE-SEM 이미지,
 (a) 30 Torr, 750 °C, 1분 (b) 30 Torr, 750 °C, 2분 (c) 30 Torr, 750 °C, 4분 30초,
 (d) 40 Torr, 750 °C, 5분 (e) 50 Torr, 750 °C, 5분

그림 3.3은 기판에 성장된 MoS₂의 위치별 구조적 특성을 분석한 이미지이다. 성장된 MoS₂는 위의 그림 3.2의 (e) 샘플을 이용하였다. 이들의 특성과 원자구조 및 성장된 두께를 분석하기 위해 일반적으로 사용하는 Raman spectroscopy로 활용하였다. Raman 스펙트럼에서 E_{2g}¹와 A_{1g}의 피크가 관찰되었는데 여기서 E_{2g}¹는 수평진동 모드로 MoS₂를 구성하는 Mo와 S의 수평 진동 피크이다. A_{1g}는 Sulfur의 수직 진동 피크이며 두 피크 차이의 값으로 두께를 예측한다. 즉 두 피크 차이의 값이 작을수록 두께가 얇아지게 된다. 일반적으로 단일 층의 E_{2g}¹와 A_{1g}의 차이는 대략 18 cm⁻¹ 정도 이고, 층의 개수가 증가할수록 두 피크의 차이는 커지는 경향성을 보인다.^[20] 분석 결과 1번 위치에서 가장 얇은 두께를 보였으며, 2번에서 3번으로 갈수록 두꺼워지는 경향성을 보였다. 이러한 결과를 통해 이들은 작은 범위 이지만 임의의 위치에 성장되므로 각 위치마다 다른 두께로 성장 되는 것을 보였다. 이들이 위치별로 각각 다른 두께 차이가 나는 이유는 성장 시 핵들이 서로 합쳐지면서 성장되거나 결정이 합쳐지며 Grain boundary를 형성하기도 하며, 또한 크리스탈 크기가 다르기 때문이다. 성장된 MoS₂는 두께가 두꺼워질수록 두 피크 차이가 점점 커지는 경향성을 보이는 것을 알 수 있으며 라만 피크의 분석 결과 성장된 MoS₂는 모두 단일 또는 이중층임을 알 수 있으며, 기존의 경향성과 일치함을 확인하였다.

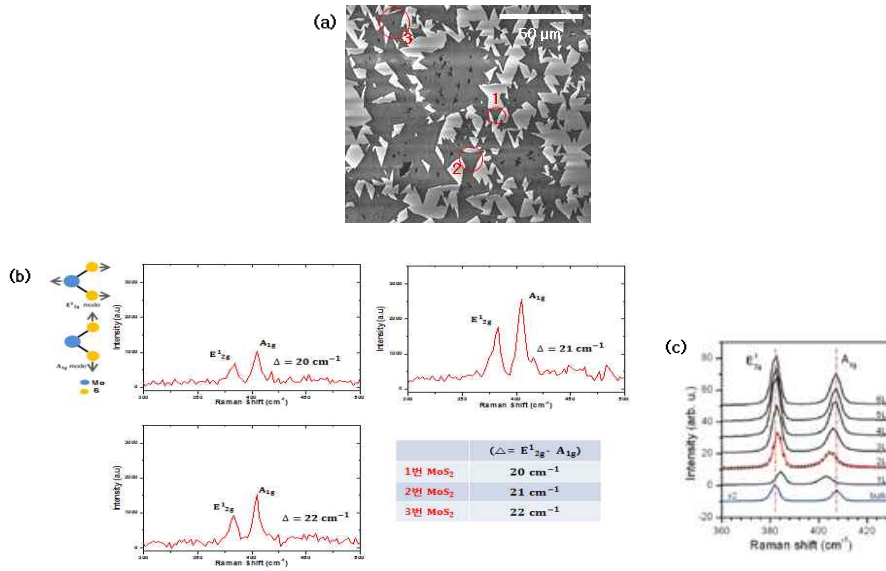


그림 3.3 (a) 성장된 MoS₂ FE-SEM 및 측정 위치, (b) Raman 스펙트럼, (c) 기존에 보고된 Raman 스펙트럼^[20]

다음으로 MoS₂가 반도체 특성인 밴드갭을 가지는지 확인하기 위해 Photoluminescence(PL) 분석을 하였다. 그림 3.4는 각 위치별 MoS₂ 박막의 PL 스펙트럼이다. 위치가 달라짐에 따라 모두 다른 파장을 나타냈다. 기존 보고에 따르면 Single-layer MoS₂의 PL 에너지는 약 1.8~1.85 eV이고, MoS₂의 층이 두꺼워짐에 따라 PL이 장파장으로 Shift된다고 알려져 있다.^[19] 위의 Raman 분석 결과에서 예측한 MoS₂의 층의 두께가 두꺼워 질수록 파장은 장파장 쪽으로 이동하게 되는데 이는 밴드갭이 작아짐을 의미한다. 아래 그래프를 통해 본 실험의 PL 결과도 기존의 보고와 일치함을 알 수 있다.

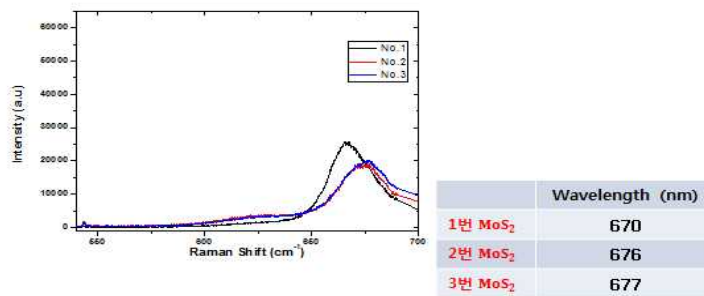


그림 3.4 각 위치별 PL 스펙트럼

위의 결과들을 통해 여전히 패턴이 없는 구조에 성장된 MoS₂는 두께가 위치에 따라 달라지며 임의의 위치에 성장된다. 이렇게 성장된 MoS₂ 박막은 TFT 소자로 응용이 어렵다. 이를 해결하기 위해 우리가 제안한 방법인 Sapphire 기판위에 Mo 패터닝하여 성장 위치, 모양, 크기를 제어하고자 한다.

2. Sapphire 기판 위에 주기적인 Mo 패턴 구조에 의해 성장된 MoS₂의 광학적 구조적 특성

앞선 실험들을 통해 MoS₂가 계단 구조 또는 모서리 등에서 핵 생성이 촉진됨으로 임의의 위치의 성장이 일어났음을 확인하고 이를 우리가 원하는 크기 및 위치 제어를 할 수 있도록 MoS₂의 성장메커니즘에 응용하고자 MoS₂ 성장 전 Mo를 패터닝함으로써 특정 위치에 계단 구조를 형성하고 측면에 핵 생성을 촉진시켜 크기 및 위치가 제어된 박막을 성장하고자하였다.

그림 3.5는 Mo를 기판에 패터닝하는 방법이다. 먼저 기판에 Mo를 패터닝하기 위해 감광막을 코팅한다. 그다음 감광막이 코팅된 기판을 Mask aligner 장비를 이용하여 원하는 패턴의 모양, 간격으로 감광막을 현상한 후 e-beam evaporation을 이용하여 Mo를 1nm 두께만큼 증착하였다. Mo가 증착된 후 감광막위에 올라가있는 Mo를 Lift-off과정을 통해 제거하여 마무리한다. 완성된 Mo가 패터닝되지 않은 기판과 Mo가 패터닝된 기판의 구조적 광학적 특성을 비교하였고, Mo가 패터닝된 기판에 성장 조건(온도, 압력, Mo의 증착 두께)을 변경 하여 MoS₂를 성장시켰다. 우선 성장 조건을 50 Torr, 750 °C에서 5분, Sulfur의 양은 0.8 g으로 하여 성장을 진행 하였다.

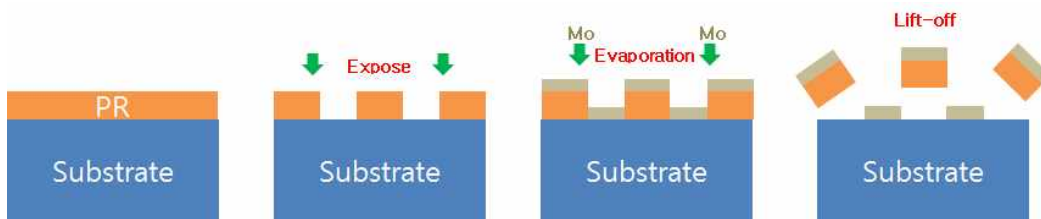


그림 3.5 Mo film의 패터닝 방법

그림 3.6은 Mo가 패터닝된 Sapphire기판을 사용하여 성장된 MoS₂의 FE-SEM 이미지이다. 패턴이 형성된 위치만 MoS₂가 주기적으로 형성된 것을 볼 수 있다. 또한 외

벽이 삼각형 구조의 모습이 있는 것으로 보아 외벽에 핵 생성이 일어나고 삼각형 구조로 성장이 촉진됨으로 서로 병합을 통해 패턴 크기의 면적을 갖는 MoS₂ 박막이 형성된 것을 알 수 있다.

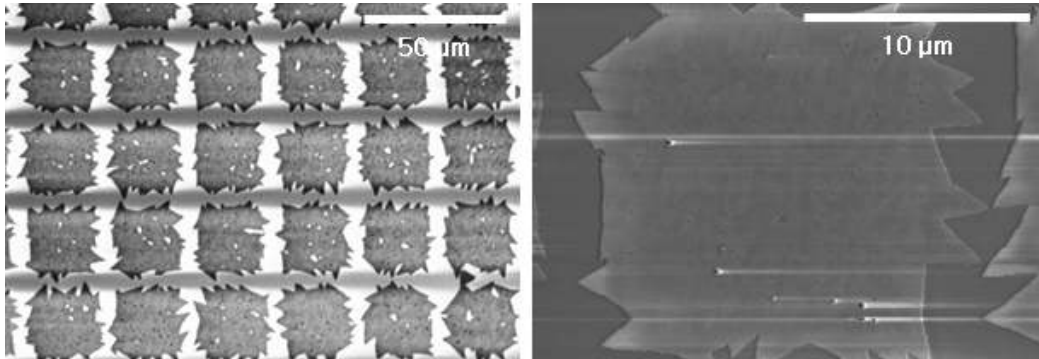


그림 3.6 Mo가 패터닝된 Sapphire기판에 성장된 MoS₂ 박막의 FE-SEM 이미지 이들이 갖는 구조적 특성을 분석하기 위해 먼저 Raman 분석을 하였다. 그림 3.7은 Mo가 패터닝된 기판위에 Single-layer로 성장된 MoS₂의 Raman 분석과 PL 분석 결과이다. E_{2g}¹진동 모드는 383 cm⁻¹, A_{1g} 진동 모드는 402 cm⁻¹로 이들은 패턴 내부가 균일할 뿐만 아니라 두께 또한 매우 얇은 19 cm⁻¹의 Single-layer MoS₂로 성장되었다.

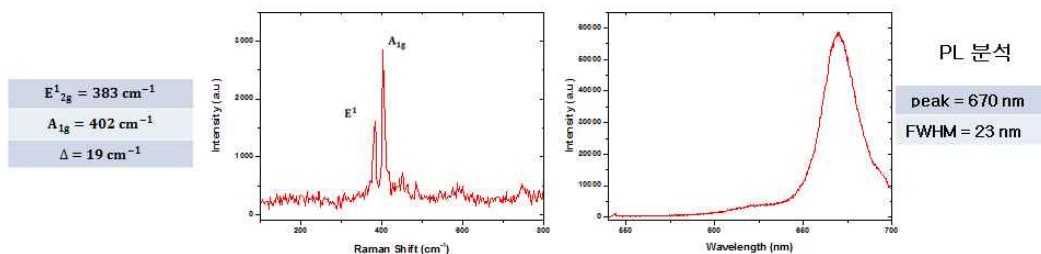


그림 3.7 Mo 패터닝 기판에 성장된 MoS₂의 Raman 스펙트럼(왼쪽), PL 스펙트럼(오른쪽)

또한 PL 분석 결과는 670 nm의 파장을 가지며 23 nm의 Full Width Half Maximum(FWHM)을 갖는 고품질의 성장 결과를 보였다. 이러한 결과는 기존 보고된 논문들과 비교했을 때 단일 층이 형성되었음을 보여주며 MoS₂ 박막이 고품질로 성장되었음을 보여준다.

Raman 및 PL로 예측한 두께가 맞는지 확인하기 위해 Atomic Force Microscopy(AFM)

방법을 통해 성장된 패턴의 MoS₂의 두께 및 패턴 외부에 확산되어 성장된 MoS₂의 두께를 측정하였다. 그림 3.8은 측정된 AFM 이미지 및 Depth profile이다.

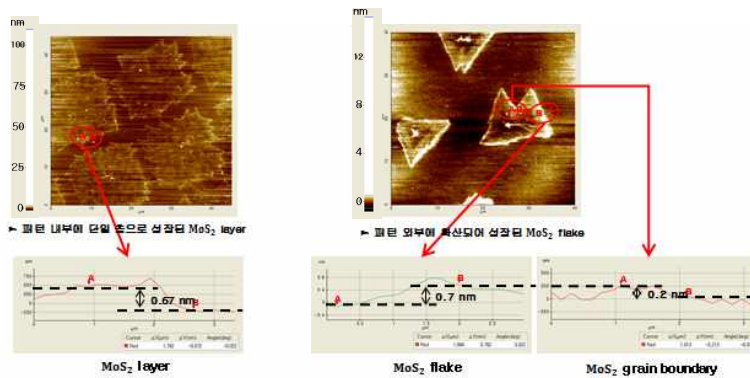


그림 3.8 패턴된 Mo 박막을 이용하여 성장된 MoS₂ AFM 이미지 및 Depth profile 패턴 내부에 성장된 Single-layer MoS₂는 약 0.7 nm로 일반적인 Single-layer MoS₂의 두께와 일치함을 확인할 수 있다. 이를 통해 Raman 및 PL을 통해 예측된 결과와 일치함을 알 수 있었다. 또한 패턴 외부에 확산되어 성장된 MoS₂는 단일 조각의 두께는 약 0.7 nm의 두께이며, 두 개의 삼각형 결정이 합쳐지면서 Boundary가 발생한 결과를 보여주는 데, Boundary 경계 부분의 두께를 측정한 결과 이는 MoS₂ 표면의 높이보다 약 0.2 nm 정도 높은 결과를 보였다. 이는 두 MoS₂ 결정이 합쳐질 때 Boundary 형성 과정에서 Layer가 두꺼워질 수 있음을 보여준다. 우리는 MoS₂의 결정방향을 확인하기 위해 Transmission electron microscope(TEM) 분석을 통하여 확인하였다. 그림 3.9는 TEM 분석 결과이다. 단일 조각으로 성장된 MoS₂는 육각형 원자 구조를 가지는 것을 알 수 있으며, 패턴 내부에 균일하게 Single-layer로 성장된 MoS₂의 분석 결과 이들은 하나의 육각형 원자 구조를 가지는 것으로 보아 균일한 Single-layer임을 확인하였다. 반면 MoS₂ grain boundary부분을 분석한 결과 이들은 두 개의 육각형 원자 구조가 존재하였으며, 이들의 결정 방향은 28° 정도 회전되어 있음을 확인하였다.

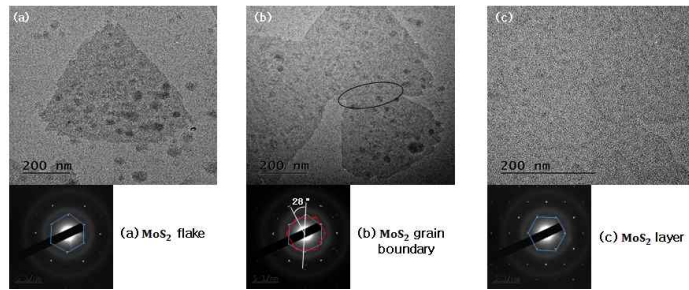


그림 3.9 MoS₂의 결정방향을 확인하기 위한 TEM 이미지

따라서 고품질의 MoS₂ 박막을 성장하기 위해서는 MoS₂구조의 수평성장을 촉진함으로 Grain boundary를 억제하는 것이 중요함을 확인하였다. 이를 제어하기 위해 온도 및 압력의 변수로 추가 실험을 진행하였다.

3. 온도변수에 따른 MoS₂의 광학적 구조적 특성

수평 성장을 촉진하여 Grain boundary 생성을 억제함으로 고품질의 박막 성장을 위해 성장 온도를 650 °C, 700 °C, 750 °C, 800 °C, 850 °C으로 변경함으로 MoS₂를 성장시킨 후 성장된 MoS₂의 광학적 구조적 특성을 분석하였다. 그림 3.10은 온도 변수에 따라 성장된 Single-layer MoS₂의 FE-SEM 이미지이다. 성장된 Single-layer MoS₂는 온도가 낮을 때부터 점차 패턴 전체를 거쳐 Layer를 형성해 가는 형태로 성장된다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 패턴 기판과 같이 패턴 가장자리의 계단 형태의 모서리 부분부터 성장되어 가는 메커니즘에 따라 온도가 낮을 때, MoS₂ 전구체들이 패턴의 모서리 부분부터 핵생성 후 수평 성장이 많고 활발히 발생하기 때문에 측면에만 삼각형 구조의 MoS₂ 박막이 형성됨을 알 수 있다. 700 °C일 때 패턴은 대부분 Single-layer MoS₂ 형태로 성장되지만 국소적으로 밀도가 낮은 Layer들이 성장되는 형태를 보이며 성장된 MoS₂들이 균일한 Layer로 성장되지 못하여 이들의 패턴 내부는 국소적으로 Grain boundary에 의해 두께가 두꺼운 부분 또한 있을 것으로 예측된다. 기준 조건인 750 °C 성장 온도는 MoS₂들을 패턴 전체에 모두 완벽한 Single-layer로 성장된 것을 확인할 수 있으며, 성장된 이들의 밀도 또한 거의 균일함을 확인할 수 있었다. 반면 성장 온도가 800 °C 이상으로 높아질수록 패턴 내부에

점점 Double-layer MoS₂를 형성해 가는 형태의 결과를 보여준다. 이는 비록 Mo의 녹는점이 2623 °C이지만 나노사이즈의 얇은 막이기 때문에 녹는점이 낮아짐으로 Agglomeration에 의해 패턴 가장자리부터 핵 성장 하면서 성장되며 두꺼운 막이 형성되는 경향성을 보였다.^[21] 800 °C의 성장 온도에서는 패턴에 성장된 MoS₂는 패턴 전체를 덮지 못하고 일부만 성장되거나 패턴의 절반 정도만 성장된 결과를 보인다. 이는 패턴에 있는 MoS₂ 전구체가 성장 시 패턴 가장자리 부분에서 높은 온도에 의해 많은 양의 MoS₂ 전구체들이 서로 합쳐지면서 Double-layer를 형성하면서 Agglomeration 된 것으로 보인다.

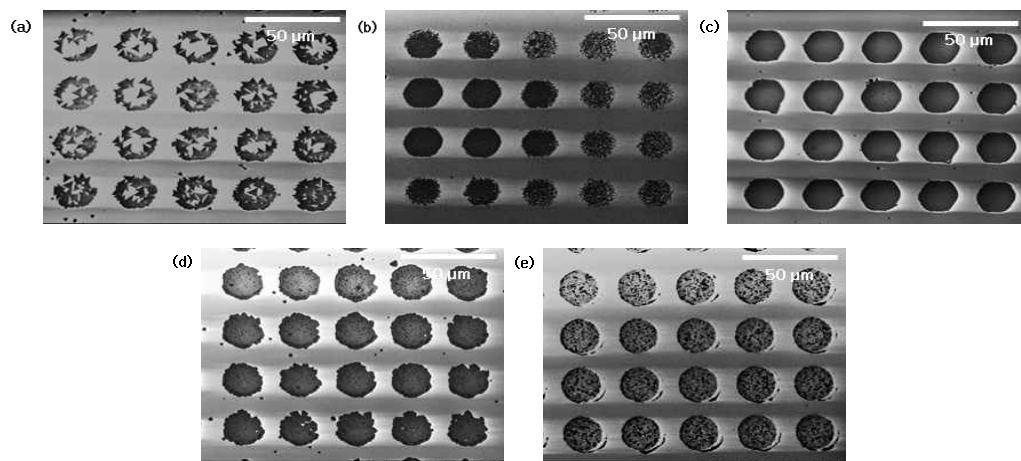


그림 3.10 온도 변수에 따라 성장된 Single-layer MoS₂의 FE-SEM 이미지, (a) 650 °C (b) 700 °C (c) 750 °C (d) 800 °C (e) 850 °C

가장 높은 온도인 850 °C일 땐 패턴 내부의 특정 부분으로 MoS₂가 합쳐지면서 Agglomeration이 많이 되어 낮은 온도에서 성장된 Single-layer MoS₂보다 매우 두꺼운 Layer를 형성하는 결과를 보인다. 이들 패턴 내부 두께의 균일한 정도를 확인하기 위해 그림 3.11과 같이 Raman mapping으로 분석하였다. 이미지의 명암은 MoS₂의 구성 물질이 많아져서 그 두께가 두꺼워져 높은 진동 피크가 발생하여 이미지의 명암이 밝게 보이고 반대로 구성 물질이 적어짐에 따라서 그 두께가 낮아지고 이에 따라 진동 피크의 세기가 약해져 명암이 어둡게 보인다. 또한 E_{2g} 모드 보다 A_{1g} 모드가 Single-layer MoS₂일 때 약 2 배 정도 높은 피크 세기를 나타내므로 Raman mapping 결과 또한 A_{1g} mapping 분석 결과가 더 밝다.

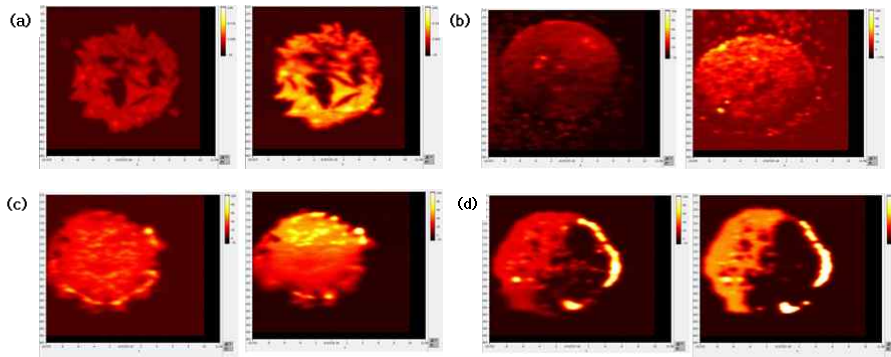


그림 3.11 온도 변수에 따른 Raman mapping data, (a) 650 °C (b) 700 °C
(c) 750 °C (d) 800 °C

650 °C 성장 온도에선 MoS₂ 결정들이 큰 크기로 성장되어가며 균일한 피크 세기를 나타내는 결과를 보이며 700 °C의 온도에서 성장된 Single-layer MoS₂는 패턴의 가장자리 부분이 매우 낮은 피크 세기로 완벽한 Layer 형태로 성장되지 못함을 확인할 수 있다. 또한 패턴의 윗부분이 밑 부분보다 더 밝기 때문에 이들의 두께 또한 균일하지 않음을 확인하였다. 750 °C 성장 온도의 Single-layer MoS₂는 패턴 내부가 균일한 피크 세기를 보였으며, 패턴의 가장자리 부분이 밝은 피크 세기를 나타내는 것으로 보아 측면 성장 후 수평 성장이 이루어지는 기존의 성장 메커니즘과 같다는 것을 알 수 있다. 800 °C의 성장 온도의 MoS₂는 FE-SEM의 결과와 같이 패턴의 오른쪽 절반 부분이 거의 성장되지 않은 것과 같이 피크 세기가 관찰되지 않으며 패턴의 왼쪽 부분과 가장자리 부분에서 밝은 피크 세기를 나타내는 것으로 확인된다. 이는 FE-SEM 데이터를 통해 예측한 결과와 매우 유사한 결과를 나타내며 패턴의 왼쪽부분에서 Double-layer를 형성한 것으로 보인다. Raman mapping 결과의 패턴 위치별 패턴의 두께를 확인하기 위해 분석을 더 진행 하였다. 그림 3.12는 패턴의 각 위치별 Raman 분석 결과이다. 650 °C에서 성장된 MoS₂는 박막의 결정들의 Grain 크기가 커져가며 성장되어가고 있기 때문에 패턴의 가운데와 가장자리 부분의 두께는 22 cm⁻¹로 일치하였으며, 700 °C에서 성장된 MoS₂는 패턴이 완벽한 Layer를 형성하지 못했으므로 두 부분의 두께 차이는 중앙 부분과 가장자리 부분은 22, 23 cm⁻¹으로 작은 차이를 보였다.

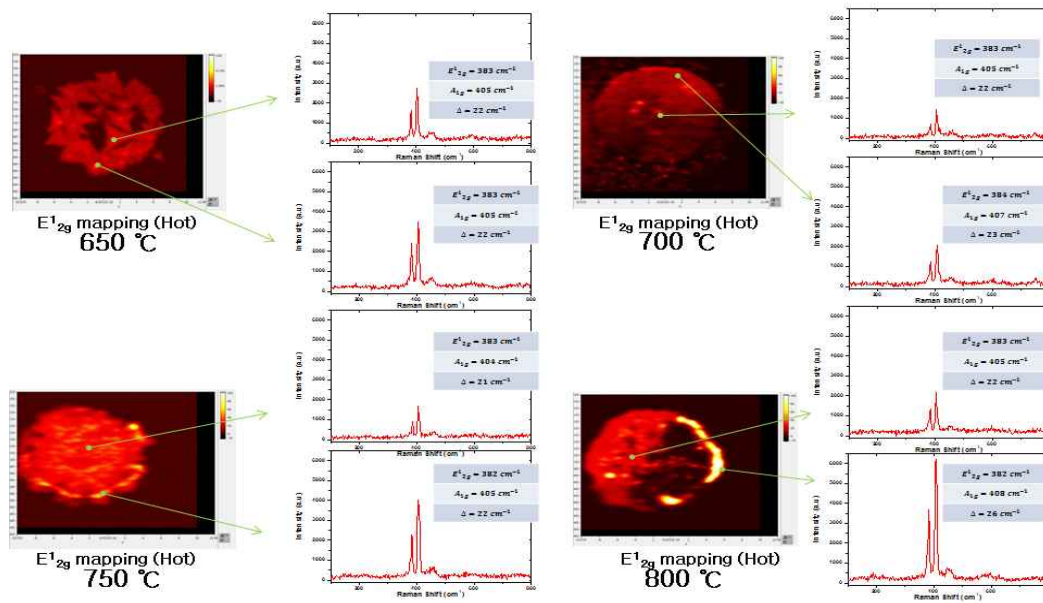


그림 3.12 패턴의 위치(중앙, 가장자리)별 Raman 스펙트럼

750 °C에서 성장된 MoS₂는 가운데 부분은 21 cm⁻¹이며 가장자리 부분이 이보다 약간 두꺼운 22 cm⁻¹로 성장 메커니즘을 가장 잘 보여주는 결과이다. 기준 조건보다 높은 온도인 800 °C일 때 패턴 내부의 두께는 22 cm⁻¹ 이지만 패턴 가장자리 부분은 26 cm⁻¹ Double-layer MoS₂가 성장되어가며 높은 구성 물질에 의해 피크 세기 또한 매우 높음을 확인할 수 있다. 다음으로 그림 3.13은 이들의 밴드갭 에너지 특성을 분석한 결과이다. 패턴에 균일한 두께의 Single-layer로 성장된 750 °C의 온도에서 가장 높은 피크 세기와 가장 낮은 피크 파장대역을 보이며, 기준 온도보다 낮은 온도일 때 파장의 이동은 적지만 높은 온도일 때 피크세기와 파장대역이 장파장 쪽으로 크게 이동하는 것을 확인할 수 있다. 낮은 온도일 땐 Single-layer를 구성하는 MoS₂이며, 이들은 패턴 전체를 덮어가는 형태로 성장되어 가며 국소적으로 Grain boundary를 형성하기 때문에 살짝 높은 피크 파장대역을 갖지만 Double-layer를 형성해 가는 높은 온도에서 성장된 MoS₂는 결정성이 좋지 않기 때문에 넓은 FWHM을 가지며 피크세기가 크게 감소하게 된다.

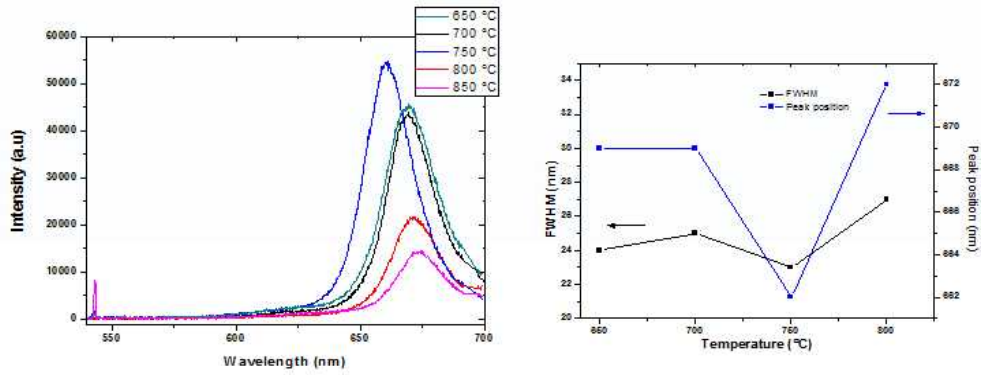


그림 3.13 온도 변수에 따라 성장된 MoS₂의 PL 분석

4. 압력 변수에 따라 성장된 MoS₂의 광학적 구조적 특성

압력 변수에 따라 Single-layer MoS₂의 특성 변화를 분석하기 위해 우리는 30 Torr, 40 Torr, 50 Torr, 100 Torr, 300 Torr 까지 변경하여 MoS₂를 성장시켰다. 그림 3.14은 압력 변수에 따라 성장된 Single-layer MoS₂의 FE-SEM 분석 이미지 이다. 이들은 모두 패턴 내부에 국한되어 Layer를 형성하였으며, 압력이 30 Torr일 때는 낮은 압력에 의해 Sulfur의 양은 부족해지게 되므로 Single-layer MoS₂가 낮은 밀도로 성장되며 비교적 균일하게 아주 얇은 Layer로 형성된 것처럼 보인다. 하지만 이들 패턴의 내부는 이를 구성하는 Mo의 국소적인 위치가 Desorption 됨으로 두께의 불균일이 발생된다. 40 Torr일 때 또한 30 Torr와 같이 패턴 내부는 Mo의 국소적 위치 Desorption에 의해 표면이 불균일한 형태의 MoS₂ 박막으로 성장된 것처럼 보인다. 이들은 낮은 압력에 의한 제한된 Sulfur의 양에 의해 매우 얇은 박막을 갖지만 불균일한 두께를 가지게 되므로 좋은 특성을 갖지 못한다. 50 Torr에선 단일 층을 구성한 만큼 충분한 Sulfur 양의 공급을 통해 전면이 균일한 두께의 MoS₂ 박막이 형성됨을 알 수 있다. 반면 큰 폭으로 압력을 높여 성장한 결과 100 Torr일 때 많은 Sulfur의 작용에 의해 MoS₂의 두께가 이중 층 이상으로 두꺼워 지는 것을 알 수 있다. 또한 300 Torr의 압력에서 성장시켰을 때, 이러한 현상은 심해지며 가장자리 부분이 좀 더 두꺼운 것처럼 보인다.

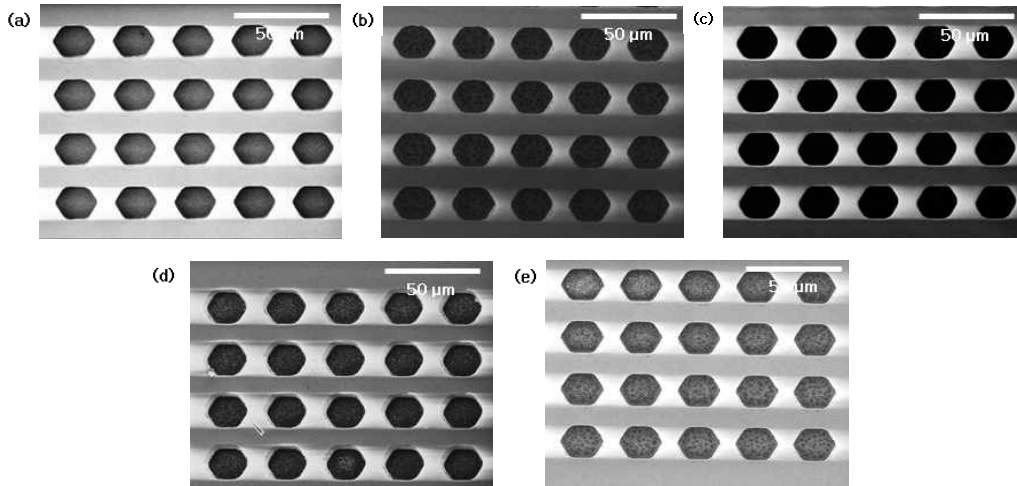


그림 3.14 압력 변수에 따라 성장된 MoS₂ FE-SEM 이미지,

(a) 30 Torr, (b) 40 Torr, (c) 50 Torr, (d) 100 Torr, (e) 300 Torr

이러한 경향성을 확인하기 위해 그림 3.15와 같이 Raman 분석을 수행하였다. Raman 피크의 분석 결과 압력이 낮은 30과 40 Torr일 때 낮은 압력에 의해 Sulfur의 부족으로 MoS₂는 낮은 밀도로 얇은 박막 형태로 성장되지만, 일부 Mo의 Desorption이 촉진됨으로 불균일한 두께를 갖는 MoS₂ 박막 형태로 성장되며 이에 따라 박막 품질이 좋지 않게 되었다. 50 Torr에선 가장 균일한 두께를 갖는 MoS₂가 성장되었으며, Single-layer를 형성한 것으로 보인다. 반면 큰 폭으로 압력을 높여 성장한 결과 이들은 Sulfur의 과잉에 의해 패턴 내부는 MoS₂ 박막 성장 후 두꺼운 Layer를 형성해 가는 경향성을 보인다.

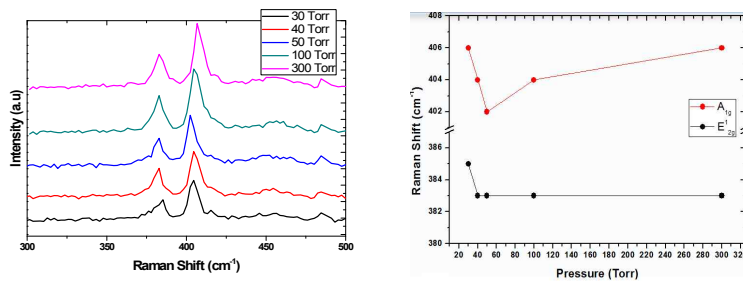


그림 3.15 압력 변수에 따라 성장된 MoS₂의 Raman 스펙트럼

그림 3.15의 분석 결과 50 Torr의 압력에서 가장 낮은 진동 모드 피크 차이인 19

cm⁻¹로 가장 얇은 Single-layer MoS₂로 성장되었으며, 압력이 낮을 때, 모두 21 cm⁻¹의 피크차이를 보였다. 50 Torr의 경우 매우 균일한 단일 층 박막이 형성됨을 확인할 수 있고 30-40 Torr의 경우 부분적으로 두꺼운 박막이 형성되어 두께가 불균일함을 알 수 있다. 압력이 증가할 경우 MoS₂의 경우 피크 차이가 커지는 것을 통해 좀더 두꺼운 박막이 형성됨을 알 수 있다. 그림 3.16은 이들의 밴드갭 에너지특성을 확인하기 위해 PL을 분석한 결과이다.

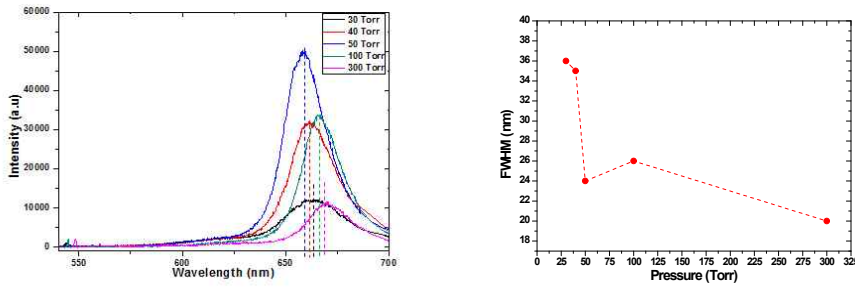


그림 3.16 압력 변수에 따른 PL 스펙트럼 및 FWHM

압력 변수에 따라 성장된 Single-layer MoS₂는 50 Torr일 때 659 nm의 낮은 파장 대역의 피크를 보이며 높은 피크 세기로 보아 고품질로 성장된 것을 확인할 수 있다. 반면 압력이 낮아질 때 40 Torr 일 때 파장 대역은 661 nm이다. Mo의 Desorption에 의한 표면 불균일성으로 품질 저하에 의해 약간 장파장 대역으로 이동하며 30 Torr 까지 약간의 차이로 장파장 대역으로 이동하지만 30 Torr 이하일 때 낮은 결정성에 의한 발광 효율 감소로 인해 매우 낮은 피크 세기를 보였다. 이것은 압력이 낮아질 경우 Sulfur의 부족에 의한 Mo의 Desorption에 의해 두께 불균일이 발생하여 특성이 크게 나빠짐을 알 수 있다. 반대로 압력이 100 Torr와 300 Torr로 높아지면서 파장이 50 Torr에 비해 장파장 대역으로 이동하며 피크 또한 감소한다. 따라서 Raman 결과와 같이 Sulfur 과잉으로 인해 두께가 두꺼워짐을 알 수 있었다. 이들의 결과로 보아 압력의 변화에 따라 Mo와 반응하는 Sulfur의 양이 변하게 되므로 성장 두께 및 결정성에 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.

5. Mo의 두께 변수에 따라 성장된 MoS₂의 광학적 구조적 특성

기판에 패터닝 된 Mo의 두께에 따라서 핵 생성의 변화에 따라 성장되는 MoS₂의 경향성 및 특성을 분석하기 위해 Mo의 증착 두께를 1 nm, 2 nm, 3 nm 만큼 증착하여 MoS₂를 성장시켰다. 그림 3.17은 Mo의 두께 변화에 따라 성장된 Single-layer MoS₂ FE-SEM 분석 결과를 보여준다.

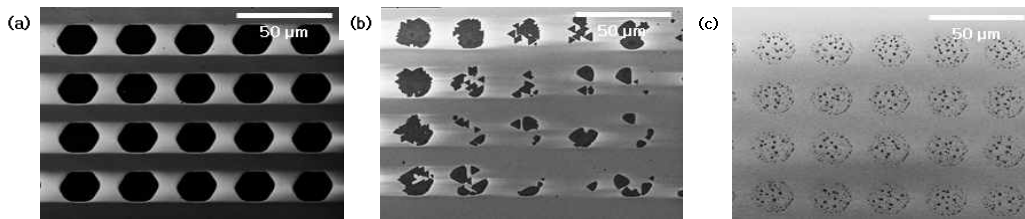


그림 3.17 패터닝 된 Mo의 두께에 따라 성장된 MoS₂의 FE-SEM 이미지,

(a) 1 nm (b) 2 nm (c) 3 nm

성장된 MoS₂는 Mo의 두께가 1 nm 일 때만 패턴 내부에 균일하게 Single-layer 형태로 성장되었으며, Mo의 두께가 증가할수록 잘 성장되지 않은 결과를 보였다. Mo의 두께가 2 nm일 땐 패턴의 가장자리 부분만 큰 MoS₂ 결정으로 성장되며 그보다 두꺼운 3 nm일 땐 매우 작은 크기의 MoS₂ 결정들이 패턴의 가장자리부터 성장되거나 국소적으로 패턴 내부에 임의의 위치로 성장되는 결과를 보였다. 2 nm의 Mo의 두께에선 Mo의 두께 증가로 인해 Sulfur의 부족 현상이 발생함으로 기존의 성장 메커니즘에 의해 패턴의 가장자리부터 두꺼운 Mo 층과 많은 양의 Sulfur가 반응하여 이중 층 이상의 MoS₂ 결정을 형성하며 수평 성장 시 이를 방해하는 것을 알 수 있다. 3nm의 Mo가 증착된 film의 경우 Sulfur의 부족 현상은 더 심해지기 때문에 수평 성장이 거의 일어나지 않았다. 따라서 Mo pattern에 의한 MoS₂ 성장 두께를 조절하기 위해선 Sulfur 양의 충분한 공급, 핵 생성을 촉진 할 수 있는 촉매를 활용하는 등의 방법이 필요하다. 성장된 Single-layer MoS₂의 두께를 확인하기 위해 Raman 분석을 실시하였다. 그림 3.18은 증착된 Mo의 두께에 따라 핵 생성이 억제되어 성장된 MoS₂들의 Raman 스펙트럼 분석 결과이다.

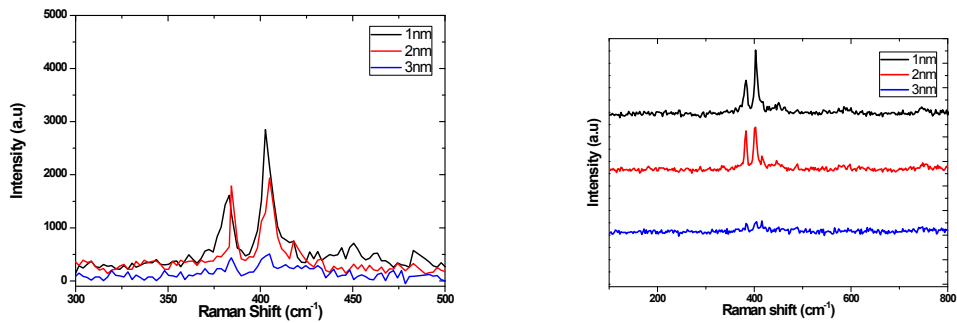


그림 3.18 패터닝된 Mo의 증착 두께에 따라 성장된 MoS₂의 Raman 스펙트럼
 Raman 스펙트럼 결과 증착 두께가 1 nm일 때 가장 얇고 균일한 19 cm⁻¹의 차이를 보였으며 2, 3 nm 두께의 Mo 증착 두께에선 20 cm⁻¹으로 이들도 또한 얇은 두께의 MoS₂로 성장되었다. 하지만 3 nm 두께에서는 거의 피크가 보이지 않았다. 다음으로 이들의 광특성 분석을 위해 PL 분석을 진행하였다.

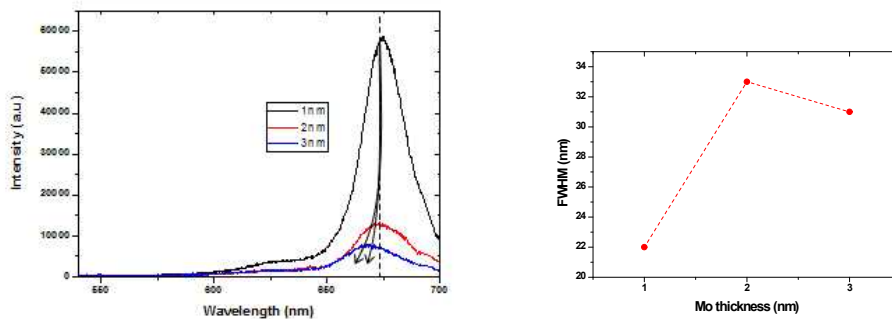


그림 3.19 패터닝된 Mo의 증착 두께에 따라 성장된 Single-layer MoS₂의 PL 스펙트럼

그림 3.19에 보듯이 PL 파장은 거의 비슷한 670 nm 였으며 FE-SEM 및 Raman 스펙트럼 결과와 마찬가지로 두께가 증가할수록 박막의 결정성 저하로 특성이 크게 저하되는 것을 알 수 있었다. 차후 Mo의 두께의 증가에 따라 압력을 변화시켜 Sulfur양을 충분히 공급하여 성장하는 실험을 진행한다면 Single layer 의 MoS₂ 를 성장할 수 있을 것으로 기대된다.

6. FET 구현을 위한 MoS₂ 박막의 SiO₂/Si 기판 이송 기술 (Transfer) 및 MoS₂ 기반 Field Effect Transistor(FET)의 전기적 특성

Single-layer로 성장된 MoS₂는 Field Effect Transistor(FET)소자로 제작하기 위해 Sapphire 기판 위에 Mo를 다양한 사이즈의 직사각형으로 증착한 후 CVD로 성장된 Single-layer MoS₂ 박막을 SiO₂/Si 기판에 전사한다. Sapphire 기판은 절연 물질이므로 제작된 소자의 Back ohmic contact을 위해 전도성 실리콘 기판위에 전사한다.. 그림 3.20은 MoS₂ FET의 제작 모식도이다.

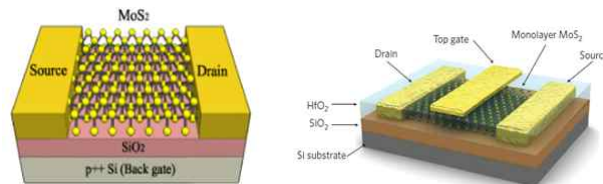


그림 3.20 MoS₂ FET. Back gate 구조(왼쪽), Top gate 구조(오른쪽)^[20]

MoS₂ FET는 매우 간단한 구조로 Back gate구조를 이용하여 소자를 제작 할 수 있다. 먼저 p타입 Si기판 위에 SiO₂가 증착되고 그 위에 MoS₂가 위치하게 되며 MoS₂의 양쪽은 각각 Source, Drain의 전극이 증착되며 MoS₂ 채널을 형성하게 되므로 전극의 간격에 따라 채널 길이가 달라지게된다. 또한 p타입 Si을 Back gate로 이용하기 때문에 따로 전극을 증착할 필요가 없는 매우 간단한 구조이다. 이는 차후에 Top gate구조로 제작할 수도 있는데 Top gate구조는 Back gate구조와 같으며 제작된 소자 위에 High-k dielectric 물질을 증착하고 그 위에 Top gate 전극을 증착하여 Contact하게 되는 구조이다. 본연구에서는 성장된 Single-layer MoS₂를 이용하여 Back gate 구조의 FET를 제작하였다. 그림 3.20은 우리의 FET 제작 시 전극 구조를 위한 CAD 도면 이다. 기판에 증착시키기 위한 Mo의 패터닝 크기는 (50x65), (150x195) μm의 대면적 패터닝으로 디자인 하였다. 채널 길이는 2 μm로 디자인 하였으며, 패턴에 증착될 전극 및 전극 패드의 크기는 56, (70x70) μm로 디자인 하였다.

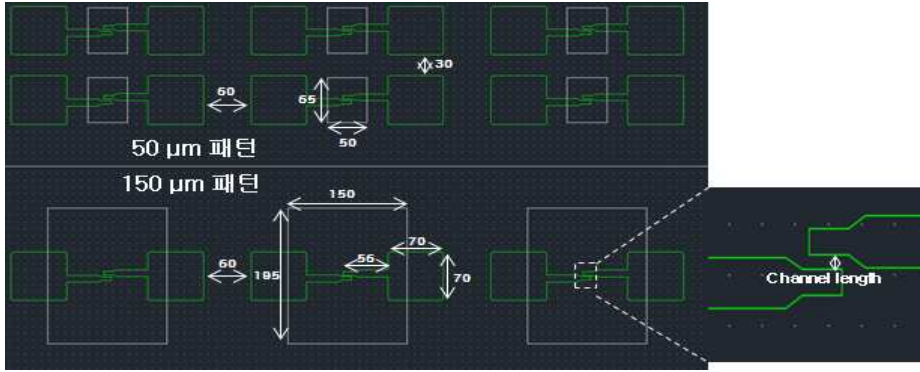


그림 3.21 FET 제작 CAD 도면

기판에 증착시키기 위한 Mo의 패터닝 크기는 (50x65), (150x195) μm 의 직사각형 모양으로 디자인 하였다. 채널 길이는 2 μm 이며 본딩 전극 패드의 크기는 70x70 μm^2 이다. 소자를 제작하기 위해 우리는 먼저 기존에 성장된 패턴을 이용하여 이를 200 nm 두께의 SiO_2 가 증착된 p타입 Si 기판에 이송하여 MoS_2 의 박막 특성 변화에 대하여 분석하였다. 그림 3.21은 Single-layer MoS_2 박막을 SiO_2/Si 기판에 전사하는 방법이다.

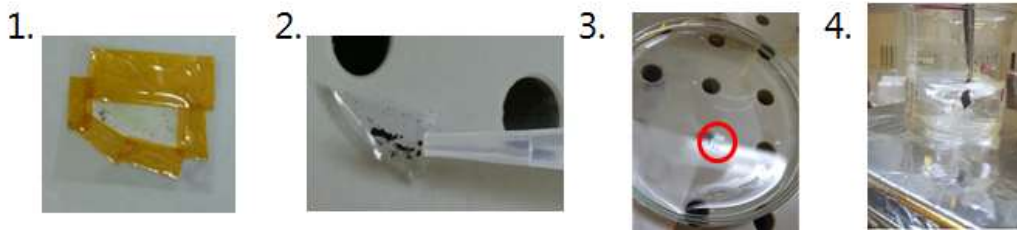


그림 3.22 MoS_2 박막의 이송 기술

먼저 PET film에 Thermal tape를 이용하여 성장된 MoS_2 기판을 붙인다. 다음 MoS_2 기판에 Spin coating 방법으로 1step : 5 s, 500 rpm, 2 step : 60 s, 3000 rpm에서 PMMA를 증착한다. PMMA 증착 후 비커에 DI water를 담고 기판을 띄우고 NaOH/NaF 용액을 Single-layer MoS_2 가장자리 부분에 뿌려준다. 그 후 시간이 지나 Single-layer MoS_2 film과 Sapphire기판이 분리되어 Sapphire기판이 가라앉으면 DI water가 담긴 비커 3개를 준비하여 각각 10분씩 띄워놓는다. 과정이 끝나면 준비한 SiO_2/Si 기판에 Single-layer MoS_2 를 올려놓은 후 1시간 동안 상온에서 건조시킨다. 모든 과정이 끝나면 증착된 PMMA를 세척하기 위해 아세톤 용액에서 80 $^{\circ}\text{C}$ 온도에서 600 rpm으로 5 분동안 stirring 후 IPA 용액에서 같은 조건으로 stirring한다. 그림

3.23은 Single-layer MoS₂ film의 전사 전과 후의 FE-SEM 이미지이다. 이들은 전사 후 모두 변화없이 깨끗하게 잘 전사된 결과를 보여주며 패턴 내부의 밀도 또한 변화없는 결과를 보여준다. 다음의 그림 3.24은 Single-layer MoS₂ film의 전사 전과 후의 Raman 분석 비교 및 PL 분석 비교이다. Raman 분석 결과 전사 전과 후의 피크 차이는 모두 20 cm⁻¹로 동일한 결과를 보여주며 피크세기 또한 일치하는 결과를 보여준다. 이는 소자 제작 시 전사에 의한 MoS₂의 두께 변화 및 구성 물질 변화가 없음을 보여주는 결과이다. 또한 PL 분석 결과는 전사 전과 후 모두 피크 파장 대역은 670 nm로 동일한 결과를 보이며 FWHM도 전사 전 30 nm, 전사 후 32 nm로 결정성의 큰 변화가 없으므로 소자 제작에 영향을 끼칠 것으로 보이지 않았다.

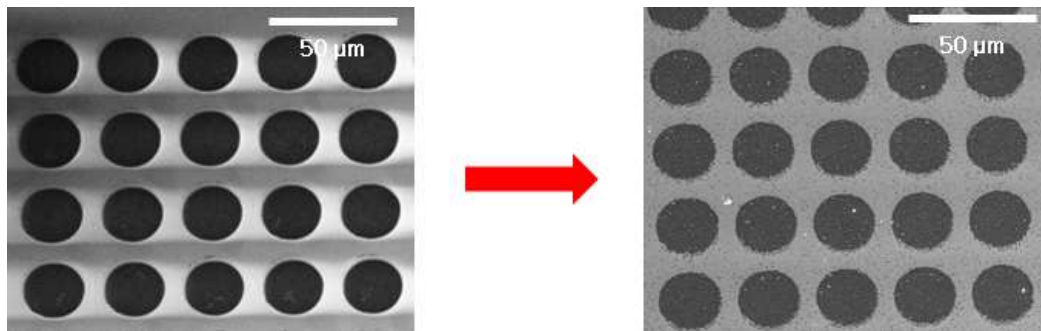


그림 3.23 Single-layer MoS₂ film의 전사 전(왼쪽) 과 후(오른쪽)의 FE-SEM 이미지

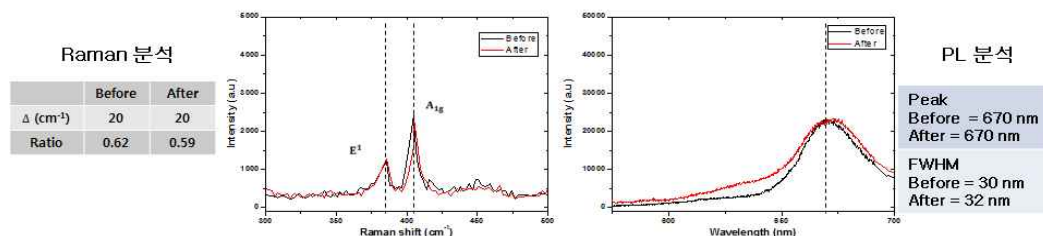


그림 3.24 Single-layer MoS₂ film의 전사 전과 후의 Raman 분석(왼쪽), PL 분석(오른쪽)

FET 구현을 위한 MoS₂를 전사 후 전기적 특성을 분석하였다. Gate Voltage에 따른 Source, Drain에 흐르는 전류 값을 측정함으로써 이들이 트랜지스터의 성능을 가지는지, 성장된 MoS₂ 박막이 n타입 인지 확인하였다. 그림 3.25는 성장 후 FET 소자로 제작된 이미지이다. 이들의 전기적 특성 결과 Gate Voltage는 각각 10와 30V를 가해주었고,

이때 Drain, Source의 전압 값 범위는 0~20 V로 설정 후 전류 값을 측정한 결과, 매우 낮은 값의 전류가 음의 전압에선 흐르지 않다가 양의 전압으로 갈수록 미세하게 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 때문에 성장된 FET소자는 n타입 MoS₂로 제작된 반도체임을 확인 하였다. 반면 굉장히 낮은 전류 값이 확인된 이유는 공정 중 MoS₂ 박막의 산화 또는 금속과 MoS₂ 간의 Ohmic 형성 문제 등으로 판단되며 Passivation 또는 열처리를 통해 이러한 문제를 해결하면 더 좋은 전기적 특성을 얻을 수 있을것으로 기대된다. 또한 Top gate 구조로 제작하여, 성장된 MoS₂에 High-k dielectric을 이용하면 FET 특성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

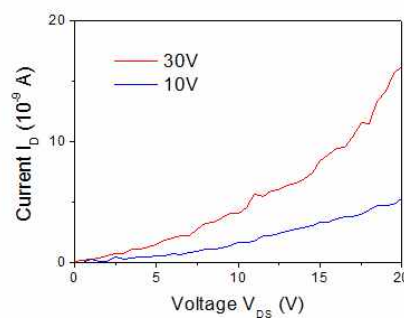
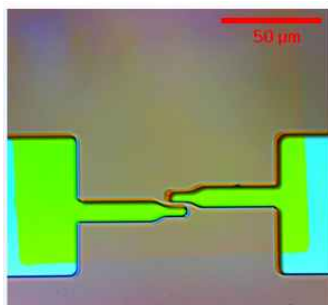


그림 3.25 MoS₂를 이용하여 구현한 FET(왼쪽), Gate Voltage에 따른 Drain, Source I-V 그래프(오른쪽)

제4장 결론

우리는 화학기상증착(CVD)법을 사용하여 이황화 몰리브덴 원자 층을 성장시키기 위한 연구를 진행하였다. 성장시킨 이황화 몰리브덴은 최근 Flexible Display를 구현하기 위한 연성을 갖는 신소재 물질로 낮은 이동도와 On/off 비를 갖는 Oxide TFT, Graphene TFT를 대체하여 적용될 수 있는 물질로 각광받고 있다. 또한 밴드갭 에너지를 가지고 있기 때문에 Photodiode나 Phototransistor로 응용이 가능하다. 이러한 장점을 가지는 MoS₂ 박막을 성장하기 위해 Sapphire기판에 성장시킨 MoS₂는 광학적 분석 결과 이황화 몰리브덴 조각 및 박막 형태들은 단일 층 형태로 성장된 결과를 보였지만 여러 변수 설정에도 불구하고 MoS₂는 성장 위치, 크기, 두께를 제어할 수 없는 한계를 보였다. TFT 등 소자에 응용하기 위해서는 일정한 크기의 주기적인 패턴을 가지는 MoS₂ 박막의 성장 또는 제조가 필수적이다. 본연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 Sapphire기판에 패턴닝된 Mo를 이용하여 성장 위치를 제어하는 방법을 제안하였으며, 이를 통해 주기적인 패턴을 가지는 Single-layer MoS₂를 성장시켰으며, 크기를 제어하였다. 또한 Mo가 패턴닝된 기판에 성장된 MoS₂는 패턴의 가장자리부터 점차 패턴 내부로 Single-layer를 형성해 가는 경향성을 보였다. 여러 변수(온도, 압력 등)의 조절을 통해 MoS₂가 50 Torr의 압력, 750 °C의 온도에서 고품질 단일 층의 박막으로 성장되는 것을 확인하였고 설정한 Mo 크기와 패턴을 유지하여 주기적으로 성장되는 것을 확인하였다. 본연구에서 제시한 성장 방법을 통해 Single-layer MoS₂를 성장시킨다면 주기적으로 잘 정렬된 형태의 높은 이동도와 On/off 비를 갖는 얇고 투명한 TFT를 제작할 수 있을 것이며, 향후 빠른 시일 내에 이를 이용한 Flexible Display를 상용화할 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 이는 Photodiode, Phototransistor 등 다양한 소자에 응용 될 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] T. Roy, et al. Field-Effect Transistors Built from All Two-Dimensional Material Components, *ACS Nano*, 8, 6259 (2014)
- [2] G. A. Salvators, et al. Fabrication and Transfer of Flexible Few-Layers MoS₂ Thin Film Transistors to Any Arbitrary Substrate, *ACS Nano*, 7, 8809 (2013)
- [3] H. Kwon, et al. Field-effect Transistor with a Chemically Synthesized MoS₂ Sensing Channel for Label-Free and Highly Sensitive Electrical Detection of DNA Hybridization, *Nano Research*, 7, 1137 (2014)
- [4] Tsuneya Ando. The electronic properties of graphene and carbon nanotubes, *NPG Asia Materials*, 1, 17, (2009)
- [5] Sylvain Latil, et al. Charge Carriers In Few-Layer Graphene Films, *Physical Review Letter*, 97, 036803 (2006)
- [6] Saptarshi Das, et al. High performance Multilayer MoS₂ Transistors with scandium contacts, *Nano Letters*, 13, 100 (2013)
- [7] J. A. Wilson, et al. The transition Metal Dichalcogenides Discussion and Interpretation of the Observed Optical, Electrical and Structural Properties, *Advanced in Physics*, 18, 193 (1969)
- [8] Q. H. Wang, et al. Electronic and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides, *Nature Nanotechnology*, 7, 699 (2012)
- [9] K. Dartigeas, et al. Systematic X-ray Photoelectron Spectroscopy and Theoretical Studies of Disulfides of Groups IVB, VB, and VIB Transition Metals, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 83, 45 (1997)
- [10] A. Kuc et al. Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide TS₂, *Phy. Rev. B*. 83. 245213 (2011)
- [11] Andrea Splendiani, et al. Emerging photoluminescence in Monolayer MoS₂, *Nano Letters*, 10, 1271 (2010)

- [12] Sanfeng Wu, et al. Vapor-Solid Growth of High Optical Quality MoS₂ Monolayers with Near-Unity Valley Polarization, ACS Nano, 7, 2768 (2013)
- [13] H. Wang, et al. IEEE, IEDM, 4.6.1 (2012)
- [14] Y. Shi, et al. Van der waals epitaxy of MoS₂ layers using graphene as growth templates, Nano Letters, 12, 2784 (2012)
- [15] X. Wang, et al. Controlled Synthesis of Highly Crystalline MoS₂ Flakes by Chemical Vapor Deposition, ACS, 135, 5304 (2013)
- [16] Arend M. van der Zande, et al. Grains and grain boundaries in highly crystalline monolayer molybdenum disulphide, Nature Materials, 12, 554 (2013)
- [17] In Soo Kim, et al. Influence of Stoichiometry on the Optical and Electrical Properties of Chemical Vapor Deposition Derived MoS₂, ACS Nano, 8, 10551 (2014)
- [18] Yi-Hsien Lee, et al. Synthesis of Large-Area MoS₂ Atomic Layers with Chemical vapor deposition, Advanced Materials, 24, 2320 (2012)
- [19] Sina Najmaei, et al. Vapor phase growth and grain boundary structure of molybdenum disulphide atomic layers, Nature Materials, 12, 754 (2013)
- [20] Changgu Lee, et al. Anomalous Lattice Vibrations of Single- and Few-Layer MoS₂, ACS Nano, 4, 2695 (2010)
- [21] 양성익. 금속 나노 입자의 생성 및 응용, 물리학과 첨단 기술의 세계, 31 (2006)

[감사의 글]

대학원에 진학 후 벌써 2년이란 시간이 지난 후 대학원 과정을 마무리하게 되었는데, 처음엔 ‘과연 내가 이 과정을 잘 버텨내고 할 수 있을까..’라는 생각에 막막하기만 했었습니다. 하지만 절대 포기하지 않겠다는 마음과 연구 활동을 통해 배운 지식과 경험 및 노하우는 무시할 수 없을 만큼 큰 힘이 되었고, 더 성장할 수 있었던 계기가 된 것 같습니다. 먼저 그동안 무사히 석사학위 과정을 마칠 수 있도록 아들을 대하듯 제일 가까이에서 언제나 도움을 주신 권민기 교수님과 김자연 박사님께 감사의 인사를 드리고 싶습니다. 처음 연구를 진행할 때부터 같이 연구해 주시고 고민해 주시고, 더 나은 환경과 더 향상된 결과를 얻을 수 있도록 끊임없이 지원하고 격려해 주신 덕분에 이렇게 연구를 마칠 수 있게 된 것 같습니다. 또한, 처음 대학에 입학 후 전공에 대해 아무것도 모르던 저를 석사라는 학위까지 생각하고 전공에 대한 흥미를 갖고 더 생각하고 이해할 수 있도록 도움을 주신 김진태 교수님, 김현수 교수님, 박종락 교수님, 안태정 교수님, 주기남 교수님께 감사드립니다. 항상 열정적하시고 존경하는 교수님들과 박사님을 본받아 앞으로 더 발전하여 사회에서 꼭 필요로 하는 연구자가 될 수 있도록 하겠습니다.

그리고 2년 동안 석사과정을 하며 너무 많은 도움을 준 승종이형, 선율이형, 잘따라 주었던 민우, 유현, 현선 이에게 고마움을 전하고 싶고, 힘들 때 서로 공감하고 챙겨주고 함께 웃어준 승연이형, 용범이형, 찬영, 경민, 병권, 재영, 한범, 희원, 승진, 준혁, 문성, 동원, 영호, 효미에게 고맙다고 전하고 싶습니다.

끝으로 저를 믿고 대학원 진학 후 끊임없는 지원과 항상 옆에서 응원해주신 부모님께 감사의 인사를 드립니다.

저 혼자선 할 수 없었던 과정을 이렇게 많은 분들의 도움이 있었기 때문에 무사히 마칠 수 있게 된 것 같습니다. 앞으로 더 많은 경험과 지식을 배워 멈추지 않고 끊임없이 발전하는 인재가 될 수 있도록 노력하겠습니다.

2015 年 12 月

金 豆 炯