





2018년 2월 석사학위논문

고품질 이황화 몰리브덴 성장 및 이를 이용한 소자 응용 연구

조선대학교 대학원

광기술공학과

김 민 우



고품질 이황화 몰리브덴 성장 및 이를 이용한 소자 응용 연구

Study on growth and application of high quality molybdenum disulfide

2018년 02월 23일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 민 우





고품질 이황화 몰리브덴 성장 및 이를 이용한 소자 응용 연구

지도교수 권 민 기

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김민우





김민우의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 안태정 인

위 원 조선대학교 교수 권 민 기 인

위 원 한국광기술원 선임연구원 김 자 연 인

2017년 11월

조선대학교 대학원





목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이론적 고찰	8
제1절 반도체(Semiconductor)의 개요 ······	8
제2절 반도체 소자 원리	9
1. 포토다이오드 (Photo Diode)의 원리	9
2. 포토다이오드 (Photo Diode)의 종류 ······	11
3. MOSFET (Metal - Oxide - Semiconductor Field effective	ct
Transistor) 의 원리	14
4. TFT (Thin film transistor)	17
제3절 이차원 물질 (2D material)	18
1. 그래핀(Graphene)	18
2. Tranisition Metal Dechalcogenides (TMDs)	19
3. Molybdenum disulfide (MoS ₂)	20
제4절 표면 플라즈몬(Surface Plasmon)	25
제3장 실험방법 및 결과	26
1. Sapphire 기판에 화학기상증착법 (CVD)를 이용한 MoS2 성정	}
방법 및 구조적 특성 분석	26
2. MoS2 기반 TFT 소자의 제작 방법 및 전기적 특성	41



3. 전극 물질에 따라 제작된 TFT의 전기적 특성	44
4. CVD 성장 및 기계적 박리 TFT 소자의 전기적 특성…	48
5. MoS ₂ 기반 Photo diode 특성	50
6. Plasmon-Exciton coupling을 이용한 소자의 광반응 향상	
	51
7. MoS2 기반 TFT 소자의 가스에 대한 반응	56
제4장 결론	57
[참고문헌]	59
[감사의 글]	67



그림 목차

그림	1.1 센서 기술의 발전 동향	1
그림	1.2 CCD와 CMOS 이미지 센서 구조	2
그림	1.3 CMOS 이미지 센서의 수요 그래프	3
그림	1.4 TMDs 물질의 종류 및 밴드갭 에너지	6
그림	1.5 MoS ₂ 결정구조 및 Layer에 따른 밴드갭 에너지	7
그림	2.1 (a) 부도체, (b) 반도체, (c) 도체의 에너지 준위	8
그림	2.2 발광 다이오드의 구조와 원리	9
그림	2.3 pin PD의 단면 구조 및 동작 원리	11
그림	2.4 APD의 단면 구조 및 동작 원리	12
그림	2.5 (a) Ohmic, (b) Schottky 구조 및 (c) MSM PD의 단면	
	구조	13
그림	2.6 (a) p-MOSFET과 (b) n-MOSFET의 구조	14
그림	2.7 p-MOSFET의 전압 (a) On / (b) Off시 모식도	15
그림	2.8 MOSFET의 전류-전압 곡선	16
그림	2.9 TFT 구조 모식도	17
그림	2.10 그래핀의 기계적, 광학적 특성	18
그림	2.11 TMDs 물질의 원자 구조	19
그림	2.12 화학 기상 증착을 위한 실험 장치의 개략도	20
그림	2.13 삼각형 MoS ₂ 성장 메커니즘	21
그림	2.14 성장된 MoS ₂ 도메인 형태	22
그림	2.15 MoS ₂ 성장 특징	22
그림	2.16 MoS ₂ 전기적 특성	23

Collection @ chosun



24 그림 2.18 국부적 표면 플라즈몬 공명현상의 (a) 모식도, (b) FDTD 시뮬레이션 24그림 3.1 CVD를 통해 MoS₂ 박막을 성장하는 여러 가지 방법 ……… 26 그림 3.2 여러 가지 조건으로 성장 된 MoS₂ FE-SEM 이미지 ……… 27그림 3.3 (a) MoS₂ Raman Mode, (b) MoS₂ FE-SEM 이미지(Raman 측정위치), (c) Raman spectrum 28 그림 3.4 (a) MoS₂ FE-SEM 이미지(PL 측정 위치), (b) PL spectrum 29 그림 3.5 Molybdenum 패터닝 및 CVD 성장 과정 모식도 30 그림 3.6 Molybdenum 패터닝 후 성장된 MoS₂ FE-SEM 이미지 …… 31 그림 3.7 Molybdenum 패터닝 후 성장된 MoS₂ 의 패턴 중앙 및 가장 31 그림 3.8 온도 변수에 따른 MoS2의 FE-SEM 이미지 ……………… 33 그림 3.9 온도 변수에 따른 MoS₂ (a) Raman, (b) PL 분석 …………… 34 그림 3.10 MoS₂의 (a), (b) FE-TEM 이미지 및 (c), (d) 육각회절패턴 35 그림 3.11 (a) MoS₂의 단일 도메인 및 (b) 박막형태의 AFM 이미지 및 Line profile 36 그림 3.12 MoS₂의 XPS 분석 결과 (a) Mo 3d 궤도, (b) S 2p 궤도 … 37 그림 3.13 패터닝 후 성장된 의 (a) 광학 이미지 및 (b) Raman, (c) PL 분석 37 그림 3.14 패턴 크기별 MoS₂의 FE-SEM 이미지 ………………………… 38 그림 3.15 기판에 따라 성장 된 MoS₂ 광학 이미지 (a) Sapphire (b) SiO₂ /Si (c) GaN on Sapphire 39 그림 3.16 기판에 따라 성장된 MoS₂ (a) Raman, (b) PL 분석 ……… 39 그림 3.17 사파이어에 성장시킨 MoS2 박막의 전사 기술 …………… 41 그림 3.18 MoS₂ 박막의 전사 (a) 전 / (b) 후 FE-SEM 이미지 ……… 42





그림 3.19 MoS₂ 박막의 전사 전/후 (a) Raman 및 (b) PL 분석 ……… 43 그림 3.20 (a) MoS₂ 소자의 모식도 및 (b) TFT 제작 CAD 도면 …… 43 그림 3.21 전극 물질에 따라 제작된 MoS₂-TFT 소자의 (a) V_G-I_{DS} (b) V_{DS} 44 그림 3.22 MoS₂와 금속의 밴드 다이어그램 (일함수) ………………… 45 그림 3.23 전극 물질에 따라 제작된 MoS₂-TFT 소자의 V_G-I_{DS} 특성 (a) Ti / Au, (b) Mo / Au ······ 46 그림 3.24 전극 물질에 따라 제작된 MoS₂-TFT 소자의 (a) V_G-I_{DS}, (b) V_{DS} 47 그림 3.25 (a) CVD 성장 및 (b) 기계적 박리 MoS₂의 광학 이미지 및 (c) Raman 특성 ······ 48 그림 3.26 CVD 성장 및 기계적 박리에 따른 TFT 소자의 전기적 특성 (a) V_{DS}-I_{DS}, (b) V_G-I_{DS} 49 그림 3.27 (a) CVD 성장 MoS₂, (b) 기계적 박리 MoS₂의 Ligt On-Off 시 V_G-I_{DS.} (c) 시간에 따른 광 응답 ……………………… 50 그림 3.28 MoS₂ (w/o AgNP, AuNP)의 (a), (b) Raman, (c), (d) 투과도 (e), (f) PL 분석 52 그림 3.29 (a) MoS₂, MoS₂/AgNP, MoS₂/AuNP 소자의 V_{DS}-I_{DS} 특성 (b) MoS_2 , (c) $MoS_2/AgNP$, (d) $MoS_2/AuNP$ 53 그림 3.30 (a) AgNP on MoS₂, (b) AuNP on MoS₂의 FE-SEM 이미지 53 그림 3.31 MoS₂, MoS₂/AgNP, MoS₂/AuNP 소자의 광 반응 특성 (a) Time-resolved Photo response, (b), (c) Light On-Off λ V_G-I_{DS} ······ 54

그림 3.32 가스 유량에 따른 전기적 특성(V_G-I_{DS}) 분석 ……………… 56

Collection @ chosun



표 목차

표 1 Photo Diode 대표 물질의 구조적, 전기적 특성 4	4
--------------------------------------	---





ABSTRACT

Study on growth and application of high quality molybdenum disulfide

By Min-Woo Kim Advisor : Prof. Min Ki Kwon, Ph.D. Department of Photonic Engineering Graduate School of Chosun University

Atomically thin two-dimensional (2D) layered semiconducting transition metal dichalcogenides, such as molybdenum disulfide (MoS_2), have recently emerged as a family of 2D materials because single and few-layered MoS_2 exhibits novel properties that are distinctly different from those of graphene. Whereas graphene is a gapless materials, MoS_2 shows the thickness dependent bandgap tunability property ranging from bulk form indirect bandgap of 1.2 eV to direct bandgap of 1.8 eV in single layered MoS_2 . Within the layers, atoms are held together by covalent bonds, while neighbouring layers are weakly bound together by van der Waals interactions. Preparing MoS_2 atomic thin layers have been proposed to several method, including scotch tape assisted mechanical exfoliation, physical vapor deposition, solution exfoliation, thermolysis of a precursor containing Mo and S atoms, sulfurization of molybdenum oxide. Recently, MoS_2 atomic thin film layers





have been fabricated to field effect transistors which exhibit excellent on/off current ratio $10^7 - 10^8$ and a high photoresponsivity. These properties allow for their applications in nanoelectronic and optoelectronic devices on both conventional and flexible substrate. This is possible for most basic application where light converted into a current. In the case of photodetectors, the photoresponsivity are very important. However, it is very difficult to obtain the desired uniformity and repeatability of the film thickness and the geometry from the chemical vapor deposition (CVD).Also. the photoresponsivity of previously reported MoS_2 thin film transistors is still substantially low. In this work, we describe a method of synthesize large-area and uniform CVD grown MoS_2 film, with control over the size and number at predetermined locations. With controlling growth temperature with increase growth temperature, surface coverage with MoS_2 triangular island is significantly improved due to an increase in density of nuclei. And fully continuous film is growth with the growth temperature reached to 800 °C. To evaluate the electrical performance of MoS_2 layer, back gated transistor were fabricated using transferred MoS₂. It is comparable to that of CVD grown MoS_2 base transistor. To improve photoresponsivity, surface plasmon(SP) is suggested with SP. Photo responsivity was improved by three times. The proposed growth of continuous film and fabrication strategy can be extended to any kind of 2D materials and enable the realization of electronic circuit and optical devices easily transferable to any other support.





제1장서 론

최근 많은 전자기기들이 소형화 되었고, 플렉시블(Flexible)이 가능한 기기들 로 발전을 이루어왔다. 예를 들면 심박수, 혈당, 혈압 등의 고가의 의료용 기 구가 있어야 측정할 수 있는 것들이 시계 또는 패치와 같은 플렉시블하고 웨 어러블(wearable)한 장치를 만들어 지고 있다. 또한 그림 1.1과 같이 단순한 액세서리형에서 발전하여, 옷에 부착할 수 있는 섬유/의료형 기기에서 피부 부착이 가능한 형태로 발전해 가고 있다. 이러한 기기에 응용하기 위해서는 센서들 역시 투명하고 플렉시블이 가능하며 생체에 반응하지 않는 형태가 요 구되고 있다.



그림 1.1 센서 기술의 발전 동향

그 중 이미지 센서는 간단한 카메라부터 시작하여, Smart phone 뿐 아니라 X-ray, 자동차 등 많은 분야에서 이용되고 있다. 또한 향후에는 시각의 보조 장비인 인공 눈 등의 웨어러블 기기에 이용될 수 있다. 이미지 센서(Image sensor)란 그림 1.2와 같이 외부로부터 렌즈를 통해 들어온 영상 신호를 다이





오드와 트랜지스터를 통해 받아들인 후 전기적 디지털 영상신호로 변환해주 는 장치이다. 이러한 이미지 센서는 크게 CCD(Charge Coupled Device) 이미 지 센서와 CMOS(Complementary Metal - Oxide - Semiconductor) 이미지 센서로 분류할 수 있다. 두 이미지 센서는 이미지를 생성해 내는 소자들과, 제작 과정, 응용 방식에 따라 나누어진다. 그림 1.2는 CCD와 CMOS 이미지 센서의 구조이다.



그림 1.2 CCD(왼쪽)와 CMOS(오른쪽) 이미지 센서 구조

CCD 이미지 센서는, 외부의 빛 에너지를 포토다이오드에서 전하를 발생시 키고 전송로를 통해 축적한 후에 순차적으로 전송하여 앰프에서 전하가 전기 신호로 증폭되어 전환되는 원리이다. CMOS 이미지 센서의 원리는 빛 에너 지를 포토다이오드에서 전하를 발생시키고 발생된 전하를 CCD 이미지 센서 와 다르게 각 픽셀에서 앰프와 TFT(Thin film transistor)를 거쳐 전기신호 로 증폭되어 전환되는 원리이다. CCD 이미지 센서는 CMOS에 비해 화질이 우수하여, 고화소 및 고품질 디지털 입력기기에 주로 사용되지만, 비싼 가격 에 주변 회로가 복잡하며, 주변 IC와 칩의 단일화가 불가능하여 전력 소모량 이 큰 단점이 있다. CMOS 이미지 센서는 저렴한 가격에, 회로의 직접도가 높고 각각의 픽셀을 독자적으로 제어할 수 있고, 소비전력이 낮다. 하지만 노





Collection @ chosun

이즈(Noise)가 많이 발생하고, 감도가 낮으며, 동적 범위가 좁은 특징이 있다. 현재 CCD 이미지 센서와 비슷한만큼 성능이 크게 개선되었다. 또한 CCD 이 미지 센서에 비해 훨씬 저렴하여, 그림 1.3과 같이 매년 CMOS 이미지 센서 시장의 수요가 증가되고 있으며 CMOS 이미지 센서가 대부분의 이미지 센서 로 주도할 것으로 예상된다. 이러한 CMOS 이미지 센서들을 플렉시블 또는 웨어러블 기기에 응용하기 위해서는 초소형으로 부피가 작고 어레이(Array) 가 가능하며, 낮은 전력을 소비하며 빠른 응답속도, 고성능의 특성을 가진 플 렉시블 가능한 소재를 기반으로 한 디바이스가 필요하다.



그림 1.3 CMOS 이미지 센서의 수요 그래프

일반적인 CMOS 이미지 센서의 구조에서 포토다이오드와 TFT는 중요한 역할을 한다. 이에 응용할 수 있는 대표하는 물질들은 Si(P-N), Si(PIN), InGaAs (PIN), InGaAs (APD), Germanium 등이 사용된다. 표 1은 포토다이 오드에 쓰이는 대표적인 물질들의 구조적, 광학적, 전기적 특성이다.



	Si(P-N)	Si(PIN)	InGaAs(PIN)	InGaAs(APD)	Germanium	MoS_2	
구조	3D	3D	3D	3D	3D	2D	
과장 (nm)) 550~850 850~950		1310~1550	1310~1550 1310~1550		660~1030	
밴드갭 에너지 (eV)	Ⅰ에너지 (eV) 1.5~2.2 1.3~1.5		0.8~0.95	0.8~0.95	0.8~1.2	1.2~1.9	
광 반응성(A/W)	W) 0.41~0.7 0.6~0.8		0.85 0.80		0.70	100~	
암전류 (nA)	1~5 10		0.5~1.0	30	1000	0.003~0.025	
Flexibility	Х	Х	Х	Х	Х	О	

표 1. Photo Diode 대표 물질의 구조적, 전기적 특성^[1]

Si(P-N)은 Si에서의 P-N 접합을 통하여 외부의 밴드갭 에너지 이상의 빛을 받아 전기 신호로 변환하는데 p, n 영역의 국부적인 공간에 광흡수로 인해 낮은 광 반응성을 보인다. 이를 보완하기 위해 Si(PIN) 구조를 이용하는데 일 반 P-N 접합 다이오드에서 외부로 전류를 생성하기 전에 전자-정공 쌍이 재 결합 되어 공핍층을 넓게 하여 광자의 흡수효율을 상승시키게 된다. InGaAs 구조는 Si 구조 보다 더 높은 광 반응성을 가지고 있지만 밴드갭 에너지가 낮다. 따라서 가시광 센서로 부적합한 단점이 있으며, 가시광 빛에 대한 반응 성이 매우 낮고 결정질의 소재 되어있어 향후 플렉시블 센서에 적용하기 힘 든 구조이다.

트랜지스터는 마찬가지로 플렉시블 센서에 적용하기 위해서는 전자이동도 및 On/Off 비와 같은 전기적 특성이 높아야 하며, 얇은 박막이 특징인 TFT 의 형태로 증폭 및 제어기 역할을 해야 한다.^[2-3] TFT는 소재에 따라 소스 (Source)에서 드레인(Drain)으로 가는 전자의 이동도가 결정된다. 여기서 이 동도란 전계가 가해졌을 때 전하의 평균 속도를 의미한다. 전자의 이동도가 빠를수록 센서의 반응속도가 빨라지기 때문에 센서에서는 더 많은 정보를 요 구하여 TFT 물질은 상당히 중요하다. 이에 대표하는 물질은 비정질 실리콘 (a-Si) TFT, 저온폴리실리콘(LTPS) TFT, 산화물 TFT 로 세 가지가 상용 화되어있다. 표 2는 TFT 물질의 구조적, 전기적 특성을 보여준다. a-Si을 이 루어진 TFT는 내부 원자 혹은 분자가 규칙적인 배열로 되어있지 않아 내부 에서 전자가 쉽게 이동하지 못하여, 전자의 이동도가 상대적으로 낮다.



LTPS-TFT는 전자의 이동도가 a-Si TFT에 비해 100배 이상 높고, 고화질 을 낼 수 있다. 하지만, 공정 과정 중 비정질 실리콘을 다결정으로 만들어주 는 특수한 레이저 공정이 포함되어 단가가 높아지게 된다. 산화물 TFT는 산 화물 반도체인 In-Ga-Zn-Oxygen (IGZO)를 이용하여 만든 트랜지스터이다. 고해상도를 선명하게 구현할 수 있는 장점이 있으며, a-Si과 공정과정이 비 슷하여 가격 또한 저렴하다. 그렇지만 전자의 이동속도가 느려 반응속도가 느리다는 단점이 있다. 이들 모두 결정질로 되어있어, 구부림 등의 충격에 의 해 쉽게 부서지기 때문에 플렉시블, 웨어러블 센서에 적용하기에는 힘든 특 성을 가지고 있다.

	LTPS	a-Si	Oxide TFT	Graphene oxide	MoS_2
구조	3D	3D	3D	2D	2D
시트 두께(nm)		~1	5~	1.1	0.65~0.7
이동도(cm²/Vs)	50~150	< 1	1~80	~200	200~500
On/Off Ratio	~10 ⁶	10 ^{6~} 10 ⁸	$\sim 10^{4}$	~10	10 ^{6~} 10 ⁸
Flexibility	Х	0	Δ	0	0

표 2. TFT 대표 물질의 구조적, 전기적 특성

최근, '꿈의 신소재' 라 불리는 이차원 물질의 그래핀(Graphene)이 많은 관 심을 받고 있다. 그래핀은 열적, 기계적, 광학적으로 우수한 특성을 가지고 있다. 200 cm²/Vs 이상의 높은 전자 이동도를 가져 전기적 특성 또한 뛰어난 다.^[4-5] 하지만 순수한 그래핀은 에너지 밴드갭(Band-gap)을 가지고 있지 않 고 금속의 성질을 띄고 있어 전계소자(Field effect Transistor)에 적용하기에 한계를 지니고 있다. 최근 그래핀을 산화시켜 그래핀 옥사이드 물질을 이용 하여 소자를 제작하는 추세이다. 하지만 그래핀 옥사이드의 경우 낮은 On/Off ratio로 인해 한계가 있다.^[6-8] 이로 인해 최근 다른 이차원 물질의 주 목이 확산되어 Molybdenum disulfide(MoS₂), Tungsten diselenide(WSe₂) 등 과 같은 Transition Metal Dichalcogenides(TMDs) 물질들이 관심을 받고 있 다. 그림 1.4는 TMDs 물질의 종류 및 밴드갭 에너지이다. TMDs 물질들은 가시광선영역의 밴드갭을 가지고 있으며, 이차원 물질로써 두께가 매우 얇기



때문에 연성이 있어 유연하며, 두께에 비해 높은 광 흡수율을 가지고 있고, 전자-정공 쌍 (엑시톤, exciton) 결합에너지를 가지고 있어 특별한 광학적 성 질을 지니고 있다. 2차원 물질은 원자 층의 두께를 가지고 있으며, 층 내에서 원자는 강한 공유결합을 하고 층간에는 약한 반데르발스 인력(Van der Waals)으로 결합된 층상 구조를 가져 기계적 박리(mechanical exfoliation) 방 법으로 쉽게 단층을 분리할 수 있다. 이로 인해 다양한 기판에 전사가 가능 하다. 두께에 따라서도 많은 변화를 나타내는데, Bulk 형태일 때 간접 천이형 밴드갭(Indirect-gap)을 가지고 있지만 단일 층(monolayer)의 경우 직접 천이 형 밴드갭(Direct-gap) 반도체로 변환된다.

н		-		MX ₂ M = Tr	ansitio	n - mota	d.										He
u	Bo			X = Cł	halcoge	n						в	с	N	0	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	AI	SI	Р	s	СІ	Ar
к	Ca	Sc	п	v	Cr	Mn	Fe	Co	NI	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Мо	Тс	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Тө	Т.	Xe
Cs	Ba	La - Lu	Hf	та	w	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	ті	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac - Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	FI	Uup	Lv	Uus	Uuo
	MoS ₂		2	MoSe ₂			MoTe ₂ 1.1 eV		WS ₂ 1.9 eV			WSe ₂ 1.7 eV					
단일 층		5	1.8~1.9 eV														
벌크 층 1.2~1.3 e		eV	1.1 eV			1.0 eV			1.4 eV			1.2 eV					

그림 1.4 TMDs 물질의 종류 및 밴드갭 에너지

그림 1.5는 MoS₂의 결정구조 및 층에 따른 밴드 구조를 보여준다. MoS₂의 경우, Bulk 형태의 1.2 eV에서 단일 층일 때 1.9 eV의 밴드갭을 갖는다.^[9] 단 일 층(두께 약 0.65 ~ 0.7 nm)의 경우 높은 발광 효율을 나타내며, 또한 표 2 에서 보듯이 MoS₂는 10^{6~}10⁸ 의 뛰어난 On/Off 비, 200 ~ 500 cm²/Vs 의 높 은 전자 이동도를 갖고 있어 TFT 와 포토다이오드와 같은 광전자 소자로서 응용이 가능하다는 장점을 지니고 있다.^[10-11] 하지만 기계적 박리에 의한 MoS₂ 박막은 너무 작아 소자 적용이 불가능하고 또한 CVD를 이용하여 대면





적 성장이 어려워 소자 응용에 한계가 있다.

본 연구에서는 화학기상증착법을 이용하여 대면적 MoS₂를 성장시키기 위해 kinetic factor(온도, 압력 등)를 제어하여 Mo와 S의 반응을 분석하여 핵생성 및 측면 성장을 이루어내서 대면적 고품질의 MoS₂를 성장시키고, 크기, 위치 및 두께를 제어하여 TFT 및 포토다이오드를 제작하고 소자 특성을 분석하고 자 한다. 결함 등에 의해 낮은 광 반응성을 억제하기 위해 표면 플라즈몬 구 조를 적용하여 광 응답 특성을 개선하고자 한다.



MoS₂ 결정구조

Layer에 따른 MoS₂ Bandgap energy

그림 1.5 MoS₂ 결정구조 및 Laver 수에 따른 밴드갭 에너지^[12]





제2장 이론적 고찰

제1절 반도체(Semiconductor)의 개요

도체란 그림 2.1 (c)와 같이 내부에 밴드갭을 가지고 있지 않아 전기가 잘 통하는 물질이다. 밴드갭은 같은 원자가 인접할 때 파울리 배타의 원리에 따라 전자의 에너 지 준위가 분리되며, 이 때 원가간의 거리가 일정 거리 이내로 가까워지면 전자가 존재할 수 없는 에너지 간격이 생성되며 이를 밴드갭 이라고 한다. 파울리 배타의 원리는 같은 양자 상태에 두 개의 동일한 페르미온이 존재하지 못한다는 것이다. 그 림 2.1 (a)와 같이 부도체는 밴드갭이 약 9 eV의 큰 에너지를 간격을 가지고 있어 전기가 잘 통하지 않는다. 그림 2.1 (b) 반도체는 도체와 부도체의 중간적인 성질을 가지는 물질이며, 밴드갭 에너지가 약 0.6~4 eV의 밴드갭 에너지를 가지고 있다. 순 수한 상태에서는 부도체와 비슷한 특성을 지니지만, 불순물(전자나 홀) 첨가, 밴드갭 에너지 이상의 빛 에너지 등에 의해 가전자대(Valence band)의 전자가 전도대 (Conduction band)로 여기(excite) 되고 다시 천이(transition) 되어 가전자대의 정공 (hole)과 만나면서 광자를 생성하며 빛 또는 열에너지로 변환하여 전도성을 갖는다.



그림 2.1 (a) 부도체, (b) 반도체, (c) 도체의 에너지 준위





제2절 반도체 소자 원리

1. 포토다이오드(Photo diode)의 발광 원리

발광(포토)다이오드란, 다이오드 중 전류가 흐를 때 빛이 발생하는 다이오드를 '발 광 다이오드'라고 한다. 반도체의 종류 중에서 불순물이 없는 것을 진성 반도체 (Intrinsic Semiconductor)라 하며 진성 반도체에 불순물을 첨가하여 만드는 반도체 를 외인성 반도체(Extrinsic Semiconductor)라 한다. 외인성 반도체에는 P형 반도체 와 N형 반도체가 있으며, 불순물 첨가(도핑 ;doping)하는 원소가 억셉터(Accepter) 인 경우를 P형 반도체라 하며 반대로 도핑하는 원소가 도너(Donor)인 경우 N형 반 도체라 한다. P형 반도체는 전자가 차지할 수 있는 최대 에너지 상태인 페르미 준 위(Fermi level)가 가전자대에 더 가까워 정공의 농도가 자유전자보다 더 높고, N형 반도체는 전도대에 더 가깝게 형성되어 전자의 농도가 매우 크다. 발광 다이오드는



그림 2.2 발광 다이오드의 구조와 원리





P형 반도체와 N형 반도체의 이중 이종접합 구조로 이루어져 있으며, 전압이 인가 되지 않는 상태를 열적 평형상태라 한다. 이 때, P-N 접합 영역의 캐리어(정공, 전 자)들이 농도 차에 의한 확산이 일어나 P 영역의 홀은 N 영역으로, N 영역의 전자 는 P 영역으로 확산된다. 이러한 작용에 의해 접합면 근처의 P 영역에는 음이온이, N 영역에는 양이온이 존재하는 영역이 생기는데 이를 공핍 영역(Depletion width) 이라 한다. 공핍 영역에는 확산에 의한 캐리어의 이동을 막는 전위장벽으로서 확산 과 반대 방향으로, 양이온에서 음이온 방향으로 전계가 생성되어, 확산과 전계의 크 기가 같아질 때 캐리어가 이동하지 못하고 열적 평형상태가 된다. 이 상태에서, P형 반도체 쪽에 (+) 전압, N형 반도체 쪽에 (-) 전압을 가하는 순방향 전압을 가하면 캐리어들이 서로 이동하여 결합하게 되며, 밴드갭 에너지만큼 광자 에너지를 생성하 여 빛으로 방출하게 된다.





2. 포토다이오드(Photo diode)의 종류

포토다이오드에서 일반적으로 많이 사용되는 구조는 PIN(positive intrinsic negative) PD와 APD(Avalanche photodiode), 그리고 MSM (metal - semoiconductor - metal) PD 등의 구조를 사용한다. 그림 2.3에서는 PIN PD의 단 면 구조 및 동작 원리를 나타내었다.



그림 2.3 pin PD의 단면 구조 및 동작 원리

PIN PD는 일반적인 p-n 접합과 마찬가지로 이종 접합(heterostructure) 구조로 되어있는데, 접합 층 사이에 도핑되지 않은 진성 반도체 영역을 삽입하는 구조이다. PIN의 intrinsic 영역에서 입사된 광자의 광에너지에 의해 가전자대의 전자가 전도 대로 여기 되어, 전자와 정공이 생성된다. 이 때, 그림 2.3과 같이 p형 반도체에는 (-) 전압, n형 반도체에는 (+) 전압을 걸어주는 역바이어스 전압을 걸어주어 내부에 전기장을 걸어주면 전자는 양의 전압이 걸린 음극으로 흘러나오고 정공은 음의 전 압이 걸린 양극으로 흘러나오게 된다. 따라서 양극에서 전류가 흘러나와 음극으로 들어가게 되는데 이 전류를 광전류(Photo current)라고 한다. 결론적으로 PD에 빛이 입사되지 않으면 전류가 흐르지 않으므로, 양단의 전압은 0 이 되며, 빛이 입사되면 PD에는 빛의 입사량에 비례하는 광전류가 흐르게 된다.







그림 2.4 APD의 단면 구조 및 동작 원리

그림 2.4에서 보는바와 같이 APD 구조는 진성 반도체와 n 영역 사이에 p 영역이 있는 구조이다. APD의 원리는 역방향 전압을 크게 걸어주어 광자에 의한 에너지 외에 과전압에 의해 많아진 전자들의 충돌로 인해 작은 에너지의 광자로도 큰 에너 지로 느끼게 되며 즉 하나의 입사 광자에 대해 수십 수백개의 전자-정공 쌍을 생성 할 수 있고, 감도가 높아져 작은 빛의 세기를 측정할 수 있다. APD는 수신감도가 PIN PD보다 약 10배 이상 크며, 미약한 광 신호를 검출할 경우에 유용한 소자이다. 하지만 동작 특성이 크며 잡음치가 높고 가격이 비싸다는 단점이 있다.







그림 2.5 (a) Ohmic, (b) Schottky 구조 및 (c) MSM PD의 단면 구조

그림 2.5에서 보는 바와 같이 MSM PD 구조는 금속 - 반도체 - 금속으로 이루어 져 있으며 양 쪽의 두 금속을 이용해 광 전류를 검출할 수 있는 소자이다. 금속과 반도체, 반도체와 금속 접합은 오믹 접촉(Ohmic contact) 대신 쇼키 장벽(Schottky barrier)으로서 제작된다. MSM PD는 한 쌍의 쇼키 다이오드를 연속적으로 연결한 것이라 할 수 있다. 반도체 표면에 반도체의 밴드갭 에너지보다 큰 빛이 입사하면 전자-정공 쌍이 생성되며, 정공은 음극으로 전자는 양극으로 각각 이동한다. 전자의 에너지가 충분하게 클 때, 반도체와 금속 사이의 에너지 장벽을 넘어 광 전류를 검 출할 수 있다. 그러므로 소자의 검출 속도는 전극 사이의 간격이 작을수록 빠르며, 반도체 물질에 따라 다양한 전기적 특성을 나타낸다.







3. MOSFET (Metal - Oxide - Semiconductor Field Effect Transistor)의 원리

전계효과 트랜지스터(FET)는 한 종류의 캐리어(전자 또는 정공)에 의해서 전류가 형성되는 다수 캐리어 소자이므로 단극성(unipolar) 트랜지스터로 동작한다. 선형 증 폭기뿐만 아니라 디지털 논리회로에도 폭넓게 활용된다. 전계 효과 (Field Effect)란 트랜지스터에 게이트 전압을 인가하여 채널이 형성되고, 전계의 세기에 의해 채널의 폭이 변화함에 따라 전류를 조절할 수 있는 것을 의미한다. 전계 효과 트랜지스터는 이의 원리를 이용하여 인가하는 전압에 의해 두 단자 사이의 전류를 조절할 수 있 는 소자이다. 전계 효과 트랜지스터의 종류에는 접합 FET(Junction FET), 금속-산 화물-반도체 FET (Metal - Oxide - Semiconductor - FET)가 있다. 접합 FET(JFET)는 P-N 접합에 의해 단자를 제어할 수 있다. 약하게 도핑 된 N형 반도 체의 양 쪽에 P형 불순물을 강하게 도핑 시켜 P-N 접합을 형성하고, N형 반도체의 양 끝에 전극이 저항성 접촉에 의해 만들어져 있어. 이들 사이에 전압을 인가하여 채널 사이에 전류를 형성하는 원리에 의해 만들어진 소자이다. 금속-산화물-반도체 FET(MOSFET)는 전류가 흐르는 금속(도체)과 전류가 흐르지 않는 산화물(부도체) 의 층으로 형성되어 있어 반도체 물질을 이용하여 채널(Channel)을 형성하여 산화 물에 전류가 흐를 수 있게 만든 소자이다. MOSFET는 크게 캐리어 중 전자를 이용 하는 n-MOSFET와 정공을 이용하는 p-MOSFET으로 두 가지 종류가 있으며, 전 자, 정공 둘 다 이용하는 c-MOSFET가 있다.



그림 2.6 (a) p-MOSFET과 (b) n-MOSFET의 구조





MOSFET의 구조에서 각각의 단자는 소스(Source), 드레인(Drain), 게이트(Gate)로 구성되어 있다. 게이트 부분은 금속과 반도체와 산화물로 층이 이루어져 있으며, 내 부의 (+)극과 (-)극의 전압차를 조절하여 반도체(채널)의 캐리어를 이용하여 전류를 흘려줄 수 있는 스위치 및 증폭기 역할을 한다. 그림 2.6은 n-MOSFET과 p-MOSFET의 구조이다. n-MOSFET의 구조를 살펴보면, 다량의 정공을 함유하고 있는 p형 기판위에 고농도로 n-도핑을 하여 n+영역을 형성한다. 소스와 드레인 사 이에 전기적으로 절연 특성이 좋은 산화막을 형성하고 그 위에 금속 단자 게이트를 형성한다. 그림 2.7과 같이 게이트에 전압이 없을 때는 산화막이 드레인에서 소스로 전류가 흐르는 것을 막으며, 게이트에 전압이 인가되었을 때는 게이트의 아래에 전 하가 유도된다.



그림 2.7 p-MOSFET의 전압 (a) On / (b) Off시 모식도

전하가 증가하면 전계를 형성하여 기판의 정공이 전자로 채워지며 p형 기판은 n형 으로 도핑되어 전류가 흐르게 된다. 게이트에 일정 전압을 걸어주었을 때 전류가 흐 르게 되는데 이때의 전압을 문턱전압(Threshold Voltage)이라고 한다. p-MOSFET 은 구조는 n-MOSFET과 반대로 n형 기판에 정공을 다량 도핑하여 소스와 드레인 을 p+ 영역으로 형성한다. 이 상태에서 게이트에 (-) 전압을 걸어주면 산화막 아래 에 캐리어(정공)가 쌓여 p 채널을 형성하며 소스와 드레인 사이에 전류를 흘러줄 수 있게 된다.









그림 2.8 MOSFET의 전류-전압 곡선





4. TFT (Thin film Transistor)

박막 트랜지스터(TFT)는 전계효과 트랜지스터의 한 종류로 얇은 MOSFET의 구 조와 비슷하지만 유리 기판에 형성된다. 그림 2.9는 TFT 구조 모식도이다. 그림 2.9 와 같이 활성층으로 반도체를 다루고 있어, 평상시에는 전류가 흐르지 않고 게이트 에 순방향전압 즉, 전류(+)가 흐르면 유전체를 중심으로 축전기와 같은 효과가 발생 하여 유전체를 중심으로 반도체들은 유전분극이 일어난다. 따라서 게이트의 반대쪽 에는 전자에 의해 (-) 극이 형성되고, 드레인(drain)쪽에서 전압이 발생하면 소스 (source)에서부터 전자가 드레인으로 이동할 수 있게 된다. 즉, 역방향전압으로 전류 가 흐르게 된다. TFT가 일반적인 FET와 다른 점은 반전 층을 형성하지 않고 역방 향으로 전류가 흐르는 특징을 가져 문턱전압이라는 의미가 없고 반전 층이 아닌 축 전 층을 형성하여 전류를 조절할 수 있다. TFT는 대면적으로 제작할 수 있어 디스 플레이, 레이저프린터, 휴대폰 카메라 등의 이미지센서로 개발되는데 사용되고 있다.



그림 2.9 TFT 구조 모식도





제3절 이차원 물질 (2D matrerial)

1. 그래핀 (Graphene)

그래핀은 탄소원자들이 모여 2차원 평면을 이루고 있는 구조이다. 탄소원자들은 육 각형의 벌집모양 격자(honeycomb lattice)를 형성하고 있으며, 원자 1개의 두께로 이 루어져 두께는 약 2 Å으로 물리적·화학적 안정성이 매우 높다. 탄소로 이루어진 물 체는 탄소나노튜브(CNT), 다이아몬드, 흑연 등이 있는데 2차원 구조로서 확연히 다 른 특성을 지니고 있다. 파장 550 nm 의 가시광 대역에서 97.7 % 의 투과율, 5000 W/mK 의 높은 열전도도, 200,000 cm²/Vs 의 높은 전자이동도를 가지는 등의 뛰어 난 특성을 가지고 있어 투명전극 재료로 쓰이며, 이차원 구조로서 플렉시블 소자에 응용할 수 있어 매우 잠재력이 높은 소재로 주목받고 있다. 하지만 그래핀은 밴드갭 에너지를 가지고 있지 않아 TFT 소자에 적용시키기에 한계를 가지고 있다.^[13-15] 이 에 그래핀을 독립으로 소자에 적용하기가 어려워 그래핀 옥사이드(Graphene Oxide) 형태로 변환시켜 소자에 적용할 수 있지만 전자이동도가 200 cm²/Vs 정도로 낮아지 고 밴드갭 또한 0.2 eV 수준으로 매우 낮아지는 한계를 갖는다.^[16]



그림 2.10 그래핀의 기계적, 광학적 특성





2. Transition Metal Dichalcogenides (TMDs)

전이 금속 디칼코게나이드 (TMDs) 물질은 전이금속 원자 (Mo, W)와 칼코겐 원자 (S, Se, Te) 가 합쳐진 MX₂ 의 형태로 M 원자 한 층이 X 원자 두 층 사이에 끼어 있는 형태이다. TMDs는 원자적으로 매우 얇은 층(약 6.5 Å)으로 되어있는 반도체 물질이며 400 ~ 700 nm 사이의 가시광선 영역의 밴드갭 에너지를 가지고 있다. 그 래핀과 마찬가지로 이차원 물질로 유연한 특성을 가지며, 층 내에 원자들이 강한 공 유결합을 이루고 있으며 층간에는 약한 반데르발스 인력 (Van der Waals)을 가져 기계적 박리 방법 등으로 단일 층으로 분리할 수 있다.^[17-18] TMDs 물질은 두께에 따라 밴드갭 형태가 달라지며 벌크형태의 간접천이 형태에서 단일 층일 때 직접천 이형태로 단일 층일 때 양자효율이 약 10⁴ 정도 더 높아진다. TMDs 물질은 플랙시 블하고 투명한 성질을 지니고 있고, 높은 전자이동도 및 On/Off 비를 가지고 있어 포토다이오드, 트랜지스터, 태양전지, 투명 전자소자, 플랙시블 소자 등 다양한 분야 에 적용이 가능한 신소재로 각광 받고 있다.



그림 2.11 TMDs 물질의 원자 구조





3. Molybdenum disulfide (MoS₂)

이황화 몰리브덴(MoS₂)은 TMDs 물질 중 하나인 전이금속 원자 Molybdenum(Mo) 와 칼코겐 원자 Sulfur(S)가 합쳐진 물질이다. MoS₂는 층이 두꺼워질수록 밴드갭 에너지가 작아지며, 벌크 형태일 때 약 1.2 eV의 간접천이형 밴드갭을 가지며, 단일 층일 때 약 1.85 eV의 직접천이형 밴드갭을 갖는다.^[10] MoS₂ 원자의 얇은 층을 제작하는 방법은 반데르발스 힘을 이용한 스카치 테이프를 이용하는 기계적 박리, intercalation assisted 박리, hydrothermal 합성, 전기 화학적 합성, 물리 적 기상 증착, 용액 박리 등이 있다. 이러한 방법들은 기판 상에 균일하게 MoS₂ 박막을 제작하지 못하고, 대면적으로 만들기 힘들어 소자에 적용하기에 는 한계점을 가지고 있다. 이 점을 보완하기 위해 최근 화학기상증착법 (Chemical Vapor Deposition ;CVD)을 이용하여 기판을 챔버(Chamber) 중앙 에 두고 Molybdenum trioxide(MoO₃)와 Sulfur(S)의 합성을 통해 MoS₂의 얇 은 박막을 얻어낼 수 있는 방법이 보고되었다.^[19-21]



그림 2.12 화학 기상 증착을 위한 실험 장치의 개략도

CVD에 의해 성장된 MoS₂ 는 육각형 형태의 2H 원자구조를 갖으며, 삼각형 형태로 성장이 되며 성장된 부분에 따라서 Mo-zigzag, S-zigzag 두 형태로 성장이 된다. 단일 층의 MoS₂ 격자는 Mo와 S의 sublattice로 나뉘어져, 육각





대칭에서 두 개의 삼각 대칭으로 각각 줄여서 볼 수 있다. [ī100]의 6개 회절 스팟은 K_a와 K_a(=-K_b)로 나뉘어져, Mo-zigzag 형태로 향하는 K_a 스팟이 S-zigzag로 향하는 K_b 스팟보다 전자빔 세기의 효율이 약 10 % 정도 더 높 다고 보고되었다.^[18]



그림 2.13 삼각형 MoS₂ 성장 메커니즘^[18]

CVD에 의해 성장 된 MoS₂는 삼각형으로 성장이 된다고 보고가 되었지만, 압력 및 S의 양에 의해 그 성장 모습이 사각형, 육각형 모양의 형태 또는 뾰 족한 모양으로 성장이 되기도 한다. 이는 S의 양이 부족해 사각형의 산화황 (Oxi-Sulfide) 도메인의 핵이 생성되고 성장하거나, MoS_{2-x}가 성장하게 되며 삼각형 모양이 되기 전인 육각형이나 뾰족한 모양으로 성장된다고 보고되었 다.^[22]







그림 2.14 성장된 MoS₂ 도메인 형태^{[15],[23]}

또한 MoS₂의 삼각형 도메인과 필름은 성장 시에 거친 표면 부근이나 먼지 입자 또는 기판의 가장자리부터 성장이 된다고 보고되었으며 핵 생성부근부 터 시작하여 삼각형 도메인이 성장 된다. 이는 이러한 부분들이 기판 표면보 다 핵 성장 에너지가 낮아 핵 생성이 촉진되기 때문이다.^[19]



그림 2.15 MoS₂ 성장 특징^[19]



Collection @ chosun

이렇듯 CMOS와 같은 센서에 MoS₂를 응용하기 위해서는 대면적의 박막을 성장이 필수적이다. 하지만, 기존 방법은 물론 CVD에 의해서도 랜덤한 크기 를 가지며 위치 또한 제어할 수 없는 단점이 있어 고효율의 얇은 박막을 얻 어내어 대면적 성장을 이루기에 힘든 점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고, 대면적 성장을 위해서 CVD 성장 시, 성장 기판에 O₂ 플라즈마 처리를 해주 거나, 성장 시에 O₂ 가스를 넣어주어 크기를 키워 소량의 산소가 비정상 핵을 부식시키고 나노 입자 또는 나노 튜브의 성장을 억제하여 도메인 크기를 키우는 방 법들이 보고된 바 있다.^[24-25] 하지만 역시 크기가 수백 마이크로 이하로 mm 사이즈 이상의 CMOS 센서 응용에는 미흡하다.



그림 2.16 MoS₂ 전기적 특성^[26]

하지만 이러한 한계에도 불구하고 MoS₂는 TFT나 PD 적용을 위한 큰 장점 을 가지고 있다. 우선 MoS₂는 200 cm²/Vs 이상의 전자이동도를 가지고 있다고 알려져 있으며, CVD로 성장 한 MoS₂의 Back-gated TFT 소자를 제작하였을 때, 약 0.5 ~ 3 cm²/Vs 정도의 전자 이동도를 가지고 있으며, Top-gated TFT 소자는 High-k dielectric 물질인 HfO₂ 또는 Al₂O₃를 이용하여 이동도를 높여 200 cm²/Vs 이상의 전자이동도를 가질 수 있다.^[6] 이는 Si 기반의 CMOS 장치의 대체할 수 있 는 특성을 지니고 있다.




그림 2.17 MoS₂의 광 반응 특성^[24]

또한 MoS₂는 광전 소자(optoelectronic device)에 적용할 수 있는데, 이는 밴드갭을 가지고 있는 반도체 물질이며 층에 따라 밴드갭 에너지가 달라지는 특성이 있으며, 높은 흡수계수를 가져 충분한 전자-홀 쌍을 발생시킬 수 있기 때문이다. 최근 MoS₂ 소자를 제작하였을 때 100 A/W 이상의 광 반응성(Photo responsivity)을 나타내며 0.003 nA 이하의 암전류를 가지고 있어, Si 기반의 광전 소자에 대체할 수 있는 유 망한 물질이다.





제4절 표면 플라즈몬 (Surface Plasmon)

표면 플라즈몬(Surface plasmon ;SP)이란, 금속 박막 표면 또는 금속 나노 입자 (metal nano particle)와 빛 사이의 상호작용을 통한 방법으로, 입사하는 빛을 이용 해 질량 대비 표면에 풍부한 전자를 가지고 있는 금속 입자의 자유전자가 집단적으 로 진동하는 현상을 말한다. 여기 상태에서 입사하는 전자기파보다 표면 플라즈몬에 의해 금속입자 주변의 자기장과 전기장을 증폭시키게 된다. 수직 방향의 진동이 크 게 일어날수록 감소하여 소멸파의 성질을 갖는데, 이러한 상호작용을 표면 플라즈몬 공명(Surface plasmon resonance ;SPR)라고 한다.



그림 2.18 국부적 표면 플라즈몬 공명현상의 (a) 모식도, (b) FDTD 시뮬레이션

금속 나노 입자를 이용하여 모든 전자기파와 공진 특성을 유도하여 표면 플라즈몬 에 의해 여기가 가능하여 간단하게 적용할 수 있으며, 금속 나노 입자 주위에 전기 장이 크게 향상시킬 수 있으며, 이러한 작용을 국부적 표면 플라즈몬 공명(Localized Surface plasmon resonance ;LSPR)이라 한다. 작은 금속 입자의 표면에는 자유 전 자가 특정한 주파수로 진동을 하며, 금속 나노입자가 상호작용을 일으켜 빛을 강하 게 산란되거나 또는 흡수시킨다. 이는 기존 반도체에 의해 흡수되는 속도보다 1000 배 이상 빠르며 또한 공명을 통해 흡수율을 크게 높일 수 있어, 에너지 전송을 통해 포토다이오드의 광응답 특성을 크게 증가시킬 수 있다.^[28-29]





제3장 실험방법 및 결과

1. Sapphire 기판에 화학기상증착법(CVD)를 이용한 MoS₂ 성장 방법 및 구조적 특성분석

MoS₂ 박막은 여러 가지 방법 중에 화학기상증착법(CVD)를 이용하여 성장하였 을 때, 균일하며 크기 제어가 가능하여 대면적으로 성장할 수 있어 플렉시블 디 스플레이에 응용이 가능한 TFT 소자로서의 MoS₂ 박막을 성장시킬 수 있다. 화 학기상증착법을 이용하여 MoS₂를 성장하는 방법은 석영(quartz)으로 이루어진 챔 버(Chamber)에서 고온을 이용하여 MoS₂ 박막을 얻어낼 수 있는 몇 가지 방법이 있다. 그림 3.1은 MoS₂ 필름을 성장할 수 있는 여러 가지 방법의 모식도이다. Molybdenum trioxide(MoO₃)와 Sulfur를 합성하는 방법이 있으며, 이는 기판을 MoO₃와 Sulfur와 같이 나란히 둘 수도 있고(그림 3.1 (a)), 위치에 따라 down-stream(그림 3.1 (b)), up-stream(그림 3.1 (c)) 방식으로 나뉜다. 또한, 그림 3.1 (d)와 같이 원하는 기판에 먼저 e-beam evaporation를 이용하여 먼저 Mo 필 름을 증착하고, Sulfur 파우더와 합성시켜 Mo를 황화(sulfurization) 시키는 방법 이 있다.



그림 3.1 CVD를 통해 MoS2 박막을 성장하는 여러 가지 방법



본 연구에서는, 사파이어 기판에 Mo 필름을 황화 시키는 방법으로 MoS₂ 박막을 성장시키는 방법을 선택 하였다. 이러한 방법은 Mo film을 미리 패터닝 (patterning)을 함으로써 TFT 소자에 응용하기에 성장위치 및 배열구조를 제어할 수 있으며, 앞서 그림 2.10과 같이 MoS2 성장 특징에 맞추어 리소그래피-패터닝 방식을 이용하여 기판에 step-energy를 형성하여 핵 성장 에너지를 낮추어 핵 생 성을 제어할 수 있는 장점이 있다. MoS₂ 박막을 얻어내기 위해, Sapphire 기판에 e-beam evaporation을 이용하여 Mo 필름을 0.1 nm 증착시킨 후 기판을 챔버 중 앙에 두고, 세라믹 도가니에 S 파우더를 0.8 g 넣고 챔버 끝에 위치한 Cold-Zone 에 놓는다. 챔버 내의 진공 상태를 만든 후, 불활성 가스 아르곤(Argon ;Ar)을 100 sccm 의 세기로 주입시키면서 압력을 설정한 후에 750 ℃ 까지 온도를 올려 주어 일정시간 동안 열을 가해주어 MoS2 박막을 성장 시킨다. 그림 3.2는 CVD를 이용하여 여러 가지 조건에 의해 성장된 MoS2 의 전계방출형 주사전자현미경 (Field Effect - Scanning Electron Microscope; FE-SEM) 이미지이다. 모두 삼각 형 도메인을 나타내면서 성장이 되었으며, 이들은 보고된 바와 같이 기판의 모서 리 부분부터 성장함과 동시에 내부로 확산되어가는 모습을 보였다. 성장된 삼각 형 MoS₂ 도메인은 혼합되어 층을 형성하는 모습을 보였으며, 조건에 따라 MoS₂ 도메인의 혼합을 통해 대면적 MoS2를 성장시킬 수 있는 가능성을 보였다. 하지 만, 이들은 원하는 크기, 위치 및 모양을 제어할 수 없어 대면적 MoS₂를 성장시 키기에는 한계를 보였다.



그림 3.2 여러 가지 조건으로 성장 된 MoS₂ FE-SEM 이미지



성장 된 MoS₂의 원자구조와 두께에 대해 분석하기 위해 일반적으로 사용하는 라만 분광기(Raman spectroscopy)를 이용하였다. 라만 분석법은 빛을 조사시켜 산란된 빛의 세기를 주파수에 따른 반복적인 피크를 나타내는 스펙트럼을 이용하 여, 분자의 진동 스펙트럼을 측정하는 방법이며 분자의 진동구조를 연구하거나 물질의 정량 분석에 이용된다. MoS_2 의 라만 진동 모드는 대표적으로 E^{1}_{2g} 와 A_{1g} 모드가 있다. 그림 3.3 (a)과 같이 E^{1}_{2g} 모드는 Molybdenum과 Sulfur의 수평 진동 피크이며, Alg 모드는 Sulfur의 수직 진동 피크이다. 두께가 증가함에 따라, 층간 에 존재하는 반데르발스 힘에 의해 E^{1}_{2g} 피크는 결합력과 진동하는 방향이 서로 수직으로 이루어져 있어 진동 피크가 낮은 쪽으로 이동하며, Alg 피크는 방향이 서로 일치하여 높은 진동 피크 쪽으로 이동한다.^[20] 이 두 진동 피크의 간격을 통 해서 MoS₂의 두께를 예측할 수 있으며, 간격이 좁을수록 두께가 더 얇아지는 것 을 알 수 있으며, 두 진동 피크의 세기를 통해 MoS₂의 정량을 예측할 수 있다. 단일 층의 MoS₂는 대략 18 cm⁻¹의 피크 간격을 타나내며 간격이 커질수록 이중 층에서 벌크 형태까지 알 수 있다. 그림 3.3은 성장 된 MoS2를 위치에 따라 라만 분석법을 통해 구조적 특성을 분석한 이미지이다. CVD에 의해 MoS2를 성장시키 고 그림 3.3(b) FE-SEM의 위치에 따른 라만 분석 결과 각각 spot 1, 2, 3의 위치 에서 각각 20, 21, 22 cm⁻¹ 의 피크 간격을 나타내고 있으며, 위치 별로 각각 다 른 두께를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.



그림 3.3 (a) MoS₂ Raman Mode, (b) MoS₂ FE-SEM 이미지 (Raman 측정 위치), (c) Raman spectrum





이는 MoS₂가 핵 성장 후 도메인의 크기가 증가할 때 grain boundary가 생기거 나, 도메인이 겹치게 되어 두께가 변하기 때문이다. 라만 분석 결과 이들은 모두 단일 층과 이중 층 사이의 두께를 나타내는 것을 알 수 있으며, 기존의 CVD에 의해 성장 된 MoS₂ 라만 분석 경향성과 일치하는 것을 확인하였다. 또한 반도체 로서 가장 큰 특징인 밴드갭 에너지를 측정하기 위해, 일반적으로 MoS₂ PL 측정 에 사용되는 532 nm 파장의 레이저를 이용하여 PL(Photo luminescence) 분석을 진행하였다. MoS₂는 두께에 두꺼워짐에 따라 파장이 커져 밴드갭이 낮아지는 큰 특징을 지니고 있어, PL 분석을 통해서도 두께를 예측할 수 있는 장점이 있다. 그림 3.4는 성장 된 MoS₂의 위치에 따라 PL 분석법을 통해 구조적 특성을 분석 한 이미지이다. PL 측정 결과 spot 1에서는 665 nm, spot 2에서는 670 nm, spot 3 674 nm로 라만측정 결과와 같이 MoS₂의 두께가 두꺼워짐(spot 1 → spot 3 → spot 2)에 따라 장파장 쪽으로 이동하는 것을 확인하였으며, 간접 천이형 밴드갭 형태로 변함에 의해 PL 세기도 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.



그림 3.4 (a) MoS₂ FE-SEM 이미지 (PL 측정 위치), (b) PL spectrum,

이처럼 Mo를 기판 전체 면적에 증착을 한 후, 성장을 시켰을 때 두께가 위치에 따라 다르게 성장이 되며, 임의의 위치에 성장이 되어 도메인 크기, 모양 및 위치 를 제어할 수 없다. 이러한 특성에 의해 TFT 소자에 적응하기에는 어려움이 있 으며, 이를 해결하기 위해, 성장위치와 크기, 모양을 제어하기 위해 리소그래피 방





식을 이용하여 사파이어 기판에 Molybdenum을 패터닝 한 후 성장을 진행하였다. 이는 step-edge를 형성함으로써 핵생성 에너지를 낮춰주어 핵생성을 촉진할 수 있는 장점이 있다. 그림 3.5 는 Molybdenum 패터닝 및 CVD 성장 과정 모식도 이다. 패터닝 과정은 공정이 간단한 Negative PR 방식을 활용하였다. 우선 성장 기판인 사파이어 기판에 Spin Coater 장비로 Negative PR을 증착하고, Mask aligner 장비를 이용하여 UV에 노광을 시킨 후 MoS₂를 성장시킬 영역을 제외한 곳은 Developer 용액을 통해 PR을 제거한다. 그 후 E-beam evaporation 장비를 이용하여 Molybdenum을 원하는 두께만큼 증착하고, Acetone 용액을 이용하여 Photo resist를 제거한다.



그림 3.5 Molybdenum 패터닝 및 CVD 성장 과정 모식도

완성된 Sapphire-Molybdenum 기판을 이용하여 MoS₂ 성장을 진행하였으며, CVD 조건은 Molybdenum : 1nm, 압력 : 50Torr, 온도 : 750 ℃, Ar 가스 : 100 sccm, Sulfur 양 : 0.8 g 의 조건으로 성장하였다. 그림 3.6은 Molybdenum 패터 닝 후 성장 시킨 FE-SEM 이미지이다.







그림 3.6 Molybdenum 패터닝 후 성장된 MoS₂ FE-SEM 이미지

Molybdenum을 패터닝 한 후 성장시킨 MoS₂는 패턴 위치에 국한하여 성장된 것을 볼 수 있다. 패턴 측면에 삼각형으로 성장되어 있으며, 이는 패턴의 가장자 리에서 핵생성이 촉진되어 삼각형의 MoS₂ 도메인 구조로 성장이 되는 것을 확인 하였다. 또한 삼각형의 도메인들이 병합되어 하나의 층을 만들어 면적을 이루는 박막 형태로 성장이 되는 것을 확인하였다. 이는 디스플레이에 적용하기 위해 원 하는 모양과 크기를 제어할 수 있는 가능성을 제시하였다. 하지만, 패턴의 가장자 리만 성장 되거나 패턴 내부의 중앙 부분과 가장자리의 두께가 균일하지 않음을 보였다. 성장시킨 MoS₂를 구조적으로 분석하기 위해 앞서 나온 Raman, PL 분석 을 진행하였다.



그림 3.7 Molybdenum 패터닝 후 성장된 패턴 중앙 및 가장자리 MoS₂ (a) Raman, (b) PL 분석





그림 3.7은 Molybdenum 패터닝 후 성장된 MoS₂의 Raman, PL 분석한 이미지이 다. Raman 분석 결과(그림 3.7 (a)), 패턴의 중앙 부분은 383 cm⁻¹의 E¹_{2g} 모 드와 402 cm⁻¹ 의 A_{lg}모드로 19 cm⁻¹ 피크 간격을 나타내고 가장자리 부분은 383 cm⁻¹의 E¹_{2g} 모드와 404 cm⁻¹ 의 A_{1g}모드로 21 cm⁻¹ 피크 간격을 나타내 어 중앙 부분과 가장자리의 두께가 일치하지 않음을 확인하였다. PL 분석 결 과(그림 3.7 (b)), 패턴의 중앙 부분은 670 nm의 높은 세기의 PL peak를 나 타내었으며, 23 nm의 반치폭(Full Width Half Maximum; FWHM)을 갖으며 이는 1.85 eV의 밴드갭을 가지는 것을 확인하였다. 하지만 가장자리 부분은 두께가 두꺼워져 PL intensity 및 밴드갭 에너지가 감소하는 것을 확인하였 다. 이러한 결과 그림 3.6과 같이 패터닝을 통해 10 um 이하의 MoS₂ 2D 구 조를 array 하는데 성공하였지만, 균일한 박막을 얻기 힘들었으며, 그림 3.12 (b, c)와 같이 패턴의 중앙부분과 가장자리의 두께 차이로 인해 광학적 특성 이 변하여, 소자에 응용하기가 힘들어, 소자에 응용하기 위해서는 패턴 내부 의 두께가 일정한 박막 제조기술이 필요해 우리는 150 um 이상의 대면적 패 터닝을 통해 성장실험을 진행하였다.^[30] 대면적으로 MoS₂ 박막을 성장시키기 위해서는 핵생성 밀도 및 위치에 대한 제어가 필요하며 측면성장이 촉진되어 야 한다. 이러한 요소들을 제어하기 위해 온도 변수에 따라 MoS₂를 성장을 진행해보았다. 변수는 MoS₂의 성장을 촉진하기 위하여 650 ℃, 700 ℃, 750 ℃, 800 ℃ 로 온도변수를 줌으로써 MoS2를 성장시켰다. 그림 3.8은 온도변수 로 성장시킨 MoS₂의 FE-SEM 이미지이다.







그림 3.8 온도변수에 따른 MoS₂의 FE-SEM 이미지 (a) 650 ℃, (b) 700 ℃, (c) 750 ℃, (d) 800 ℃,

FE-SEM 이미지 확인 결과, 650 ℃부터 750℃까지 삼각형의 MoS₂가 성 장된 것을 확인하였으며 (그림 3.8 (a-c)), MoS₂의 핵이 생성되는 위치가 점 차 많아진 것으로 확인된다. 온도가 올라가면서 MoS₂ 도메인들이 병합되면서 연속적인 박막의 모양을 갖추어가는 것을 확인할 수 있다. 800 ℃에서는 최 종적으로 MoS₂ 들이 병합되어 완전한 MoS₂ 박막이 형성되었다. 그림 3.8 (c-d)에서 온도가 높아질수록 도메인들의 밀도가 높아지는 것으로 보아, 온도 가 증가할수록 MoS₂의 핵이 생성되는 곳들을 많이 만들어주는 것으로 확인 되며, 이러한 이유는 높은 온도에서 핵이 생성될 수 있는 충분한 에너지를 공급해주어 핵 성장 에너지를 낮추어줌으로 핵생성이 촉진되기 때문이다. 온 도변수로 성장킨 MoS₂를 구조적으로 분석하기 위해 Raman 및 PL 분석을 진행 하였다. 그림 3.14는 온도변수에 따른 MoS₂의 Raman 및 PL 분석을 진행 하였다. 그림 3.14는 온도변수에 따른 MoS₂의 Raman 및 PL 분석 이미지이다. 그 림 3.9 (a) Raman 측정 결과, 삼각형 MoS₂ 도메인으로 이루어진 650 ℃ ~ 750 ℃ 결과에서는 E¹_{2g} mode가 384 cm⁻¹ A_{1g} mode가 402 cm⁻¹을 나타내면서 두 모 드 간격이 18 cm⁻¹로 단일 층의 도메인임을 증명하였다. 박막 형태를 이루는 800 ℃에서 성장한 결과에서는 모드 간격이 21 cm⁻¹로 나타났다.







그림 3.9 온도변수에 따른 MoS₂ (a) Raman 및 (b) PL 분석

이것은 앞서 증명했던 것과 같이, MoS₂가 병합되면서 두께가 두꺼워짐에 따라 피크 간격이 커진 것을 확인하였다. 하지만 삼각형 도메인과 박막형태의 Raman 그래프의 반치폭을 확인한 결과, 삼각형 도메인에서는 7.1 cm⁻¹, 박막형태는 7.2 cm⁻¹로 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 도메인이 병합되어 박막형태를 이루어도 도메인 내부에서 품질의 변화가 거의 없는 것으로 확인되었다. 그림 3.14 (b), PL 분석 결과에서는 650 ℃에서 662 nm에서 PL 피크가 나타났으며, 이 는 1.84 eV 의 밴드갭에너지로 MoS₂의 브릴루앙 영역(Brillouin zone) 의 K-point 에서의 밴드갭 영역과 일치하는 것으로 나타났다. 750 ℃까지 온도가 올라갈수록 박막형태를 이루어가면서 밴드갭에너지가 상승하였으며, 단일 층으로써 PL 세기 또한 향상되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 높은 온도에서 성장에 필요한 충 분한 에너지를 공유함으로써 neutral 액시톤 (A1) 피크가 크게 증가하였기 때문이 다. 800 ℃ 에서는 다시 PL 세기가 상당히 낮아지고 밴드갭에너지가 작아졌다. Raman 분석 결과와 마찬가지로 MoS₂ 도메인이 병합되면서 두께가 증가됨에 따 라 직접천이에서 간접천이로 이동했기 때문이다.







그림 3.10 MoS₂의 FE-TEM 이미지(a), (b) 및 육각회절패턴(c), (d)

MoS₂의 결정성을 확인하기 위해 전계방출형 투과전자현미경(Field Effect -Transmittance Electron Microscope ;FE-TEM) 장비를 이용하여 분석하였 다. 그림 3.10은 FE-TEM 이미지 및 회절패턴 이미지이다. 그림 3.10 (a)의 패턴내부에 형성 된 삼각형 MoS₂ 단일 도메인은, 그림 3.10 (c)의 육각회절패 턴에 의해 MoS₂의 존재 및 단결정의 MoS₂가 성장이 된 것을 확인할 수 있 었다. 하지만 그림 3.10 (b)의 삼각형 MoS₂ 도메인들이 병합된 곳의 회절패 턴 이미지(그림 3.10(d))는 두 개의 육각 회절패턴이 보이며, 약 28 ° 정도 회 전되었다. 이는 Raman 및 PL의 결과와 유사하며, 이러한 결과는 병합된 곳 이 Overlap 되었거나 Grain boundary에 의한 현상임을 알 수 있다. MoS₂의 정확한 두께를 알기 위해 AFM(Atomic Force Microscope) 장치를 이용하여 단차를 측정하였다. 그림 3.11은 MoS₂의 AFM 측정결과 이미지이다. 그림 3.11 (a)의 확산된 MoS₂의 삼각형 도메인은 0.7 nm로 측정되었으며, 이는 기 존에 보고된 바와 같이 단일 층의 MoS₂ 두께를 나타낸다. 두 삼각형의 도메





인이 겹쳐진 곳에 0.2 nm의 얇은 두께가 발생하게 되는데, 이는 두 삼각형이 병합되면서 각각의 격자 구조의 방향이 달라 Grain Boundary를 형성하거나 도메인이 겹쳐져 생긴 것으로 확인된다. 그림 3.11 (b)는 패터닝되어 박막을 형성한 MoS₂의 가장자리의 단차를 측정한 결과이며 0.67 nm로 확인되었다.



그림 3.11 (a) MoS₂ 단일 도메인 및 (b) 박막형태의 AFM 이미지 및 Line profile

그림 3.12는 MoS₂의 화학적 조성비를 분석하기 위하여 X-선 광전자 분광법 (X-ray photoelectron Spectroscopy; XPS)을 이용하여 측정한 XPS 분석 결 과이다. MoS₂의 결합에너지(Binding energy)는 공기 중 산소에 의한 Mo를 포함하는 MoO₃의 형태 등이 생성될 수 있으며, 결합에너지가 변하게 된다. XPS 분석 결과, Molybdenum의 Mo 3d 궤도, Sulfur의 S 2s 와 S 2p 궤도를 각각 확인할 수 있었다.





그림 3.12 MoS₂의 XPS 분석 결과 (a) Mo 3d 궤도, (b) S 2p 궤도

Mo 3d 궤도에서 Mo 3d_{5/2}와 Mo 3d_{3/2} 는 각각 229.58 eV, 232.68 eV를 나타 냈으며(그림 3.12 (a)), S 2p 궤도에서는 2p_{3/2}와 2p_{1/2}가 각각 162.33 eV, 163.58 eV를 나타내었다. (그림 3.12 (b)) 이는 보고된 단일 층의 MoS₂의 결 합에너지와 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, Mo와 S의 조성비는 1:2로서 고품질의 MoS₂ 박막이 성장이 되었다는 것을 확인할 수 있었다.



그림 3.13 패터닝 후 성장된 MoS₂의 (a) 광학 이미지 및 (b) Raman, (c) PL 분석





이러한 성장 기술을 바탕으로 MoS₂를 150 um의 패턴크기로 성장할 수 있었으며, 패턴 내부에 중앙 부분과 가장자리를 균일하게 성장 시킬 수 있었다. 그림 3.13에 서는 150 um 패턴 크기로 성장된 MoS₂의 패턴 내부 균일성을 확인하기 위한 광 학이미지, Raman, PL spectrum이다. 그림 3.13 (a)의 광학 이미지를 통해 MoS₂ 가 균일하게 성장된 것을 확인하였으며, 그림 3.13 (b)의 Raman 분석에서도 동일 하게 387 cm⁻¹ 의 E¹_{2g} 피크와, 406 cm⁻¹의 A_{1g} 피크 간격인 19 cm⁻¹으로 패턴 내 부 모두 동일한 두께를 얻은 것을 확인하였으며, 그림 3.13 (c)의 PL 분석을 통해 서도 패턴 내부 모두 균일한 두께로 성장되었으며, 광학적 특성이 같은 것을 확 인하였다. 또한 그림 3.14와 같이 15×15 um 패턴 크기부터 약 1 mm 패턴 크기 까지 균일한 MoS₂ 박막을 성장시켰다.



그림 3.14 패턴 크기별 MoS2의 FE-SEM 이미지







그림 3.15 기판에 따라 성장 된 MoS₂ 광학 이미지 (a) Sapphire, (b) SiO₂/Si (c) GaN on Sapphire

MoS₂를 성장시킬 때, 기판에 따라 어떠한 영향이 있는지 확인하기 위해 기판에 따라 MoS₂를 성장시키고 분석을 진행하였다. 그림 3.15는 CVD를 통해 기판 종류 에 따라 성장시킨 MoS₂의 광학 이미지이다. 패턴 크기는 150 um, 압력 50 Torr, 온도 750 ℃, 성장 시간 5 min 의 조건으로 성장시켰다. 전체적으로 패턴의 크기 에 맞게 MoS₂ 박막이 잘 성장된 것을 확인하였다. 이를 구조적으로 확인하기 위 하여 라만 및 PL 분석을 진행하였다. 그림 3.16은 기판에 따라 성장시킨 MoS₂의 Raman 및 PL 분석 결과이다.



그림 3.16 기판에 따라 성장된 MoS2 Raman 및 PL 분석





그림 3.16 (a), Raman 분석 결과, 사파이어 기판에서는 높은 세기를 가진 라만 피크 결과를 나타내었으며, 피크 간격이 21 cm⁻¹로 나타났다. SiO₂/Si 기판에서는 사파이어 기판과 마찬가지로 21 cm⁻¹의 간격을 나타내었지만 더 약한 세기를 갖 는 피크를 나타내었다. 이는 광학이미지와 비슷한 결과로 사파이어 기판에서 가 장 잘 성장 되었으며, GaN on sapphire 기판에서 거의 성장이 되지 않는 모습을 보인다. 그림 3.16 (b), PL 분석 결과에서는, 사파이어 기판에서는 기존과 같이 662 nm에서 높은 세기를 가진 PL 피크가 나타났으며, SiO2/Si 기판에서는 약한 PL 세기를 나타내었으며, GaN on Sapphire에서는 PL 피크가 나타나지 않았으며, 이는 Raman 결과와 마찬가지로 Sapphire 기판에서 가장 높은 품질의 MoS₂가 성 장 된 것을 확인하였다. SiO₂와 GaN on Sapphire 기판의 각각의 격자 구조는 비 정질, Wurzite 구조이며 MoS₂의 2H 구조와 매칭이 되지 않기 때문이다. 사파이 어 기판에서 성장시킨 MoS₂는 패턴의 모양을 잘 유지하여 성장하였으며, 고품질 로 성장된 것을 확인할 수 있었다. 이는 2H 구조를 가진 MoS₂ 격자와 사파이어 기판의 Hexagonal 구조와 epitaxy 매칭이 잘 되어 핵생성을 촉진하여 가장 고품 질의 MoS₂가 성장 된 것으로 보인다.





2. MoS2 기반 TFT 소자의 제작 방법 및 전기적 특성

MoS₂는 소자로 간단하게 제작할 수 있으며, Back gated 소자와, Top gated 소 자로 제작할 수 있다. 우선 채널 역할을 하는 MoS₂는 n-type 반도체로서 p-type Si에 SiO₂가 증착된 기관 위에 위치시킨다. MoS₂의 양쪽에는 소스(Source), 드레 인(Drain)으로서 금속(Metal)을 증착하여 TFT 소자를 제작한다. 이 때 전극의 간 격과 두께에 따라, 채널의 크기가 달라진다. Back gated 소자는 p-Si을 Back gate로 이용하여 간단하게 제작이 가능하다. Top gate 구조는 Back gate 구조에 서 채널 역할을 하는 MoS₂ 위에 High-k dielectric 물질을 증착한 후, 그 위에 Top gate로서 금속을 증착하여 제작한다. CVD 장비를 이용하여 사파이어 기관 위에 패터닝 되어 성장된 단일 층의 MoS₂ 박막을 센서에 응용할 수 있는 TFT로 제작하기에는 한계가 있다. TFT 소자의 Ohmic contact을 형성하기 위해 Back gate의 형성이 필요하다. 사파이어 기관은 물질 자체 절연성을 가지고 있어 다른 전도성이 있는 기관에 비해 쉽게 형성할 수 없으며, 저항 자체도 커지게 되므로 소자 제작 시 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해, 사파이어 기관에 성장된 단일 층의 MoS₂를 SiO₂/Si 기관에 전사시킬 수 있는 기술이 필요하다. 그림 3.17는 사 파이어에 성장시킨 MoS₂ 박막을 전사하는 기술이다.



3.17 사파이어에 성장시킨 MoS2 박막의 전사 기술





먼저, MoS₂가 성장 된 사파이어 기판을 PET 필름에 Tape를 이용하여 붙인다. 그 후 Spin coater 장비를 이용하여 3000 rpm에서 60 초 동안 PMMA A4 용액을 증착시키고, PET 필름에서 시편을 떼어낸 후 DI water에 띄워놓는다. PMMA/MoS₂와 사파이어 기판을 떼어낼 수 있는 용액이 필요하며, NaOH와 NaF 의 합성 용액을 스포이드를 이용해 시편 가장자리에 뿌려준다. 적당한 시간이 지 나면 PMMA/MoS₂와 기판사이로 용액이 침투하며 기판은 가라앉게 되고, DI water 수면에 PMMA/MoS₂만 남는다. 합성용액에 의한 영향이 있을 수 있으므 로, PET 필름을 이용하여 DI water에 10 분씩 3 번 띄어놓아 세척한다. 이후, PMMA/MoS₂를 Si 위에 300 nm의 SiO₂ 증착된 기판에 옮겨 MoS₂와 기판이 접 착이 되기 위해 상온에서 1 시간동안 건조시킨다. PMMA를 제거하는 과정은 Hotplate/Stirrer 장비를 이용하여 아세톤 5 분 동안 80 ℃, 600 rpm으로 PMMA 를 제거해주고, IPA 용액에서 똑같이 5 분 동안 80 ℃, 600 rpm Stirring 해주어 전사과정을 마친다.

(a)



Before transfer (Sapphire substrate)

(b)



After transfer (SiO₂/Si substrate)

3.18 MoS₂ 박막의 전사 (a) 전 / (b) 후 FE-SEM 이미지

전사과정동안, MoS₂ 박막이 용액에 의한 오염 등에 의한 영향이 있을 수 있어, 구조적 및 광학적 분석이 필요하다. 그림 3.18은 전사과정 전과 후의 FE-SEM 이 미지이다. 전사 전과 후를 비교하였을 때, MoS₂ 도메인의 밀도나 크기가 변함이 없으며, 패턴 전체의 크기나 모양의 변화가 없이 똑같이 전사가 된 것으로 확인 하였다. 그림 3.19는 전사 전과 후의 Raman과 PL 분석 결과이다. 그림 3.19 (a), Raman 분석 결과, E^{1}_{2g} 모드는 385 cm⁻¹ 이며 A_{1g} 모드는 405 cm⁻¹이다. 두





모드의 간격은 20 cm⁻¹로 같은 결과를 나타냈으며, 각 모드의 세기도 거의 변함없는 것으로 나타났다. 그림 3.19 (b) PL 분석 결과, 전사 전의 PL 피크 의 파장대역은 670 nm이며 전사 후에도 변함없이 670 nm의 피크를 나타내 는 것을 확인하였다. 또한 피크의 세기도 거의 변함없이 동일하였으며, FWHM도 전사 전에는 30 nm, 전사 후에는 32 nm로 거의 비슷함을 보였다. 이러한 결과 전사과정에 의한 화학적 조성 변화, 박막의 두께, 구성 물질 등 의 변화는 없는 것을 확인하였다.



3.19 MoS₂ 박막의 전사 전/후 (a) Raman 및 (b) PL 분석

박막 전사 후 MSM 포토다이오드 구조로 Back gated 소자 제작을 위해, 전 극 증착을 위해 패터닝을 진행하였다. 소스와 드레인의 간격인 채널 길이는 2, 3, 5 um로 설정하였으며, 채널의 폭은 10 um로 설정하였다. 전기적 특성 분석을 위한 전극 패드는 70 um × 70 um 크기로 제작하였다.



3.20 (a) MoS₂ 소자의 모식도 및 (b) TFT 제작 CAD 도면



Collection @ chosun



Collection @ chosun

3. 전극 물질에 따라 제작된 TFT의 전기적 특성

TFT 소자는 소스, 드레인, 게이트 전극의 종류에 따라서 전기적 특성이 달 라진다. 반도체 위에 금속을 증착하였을 때, 금속과 반도체 층 사이의 일함수 차이가 생기게 된다. 일함수의 차이가 너무 커지게 되면 오믹 접촉(Ohmic contact) 이 이루어지지 않을 수도 있으며, 전류가 금속에서 반도체로 전달이 제대로 공급되지 않아 전기적 특성이 현저히 감소할 수 있다. 그림 3.21은 금 속 종류에 따른 기적 특성 그래프를 나타내었다.



그림 3.21 전극 물질에 따라 제작된 MoS₂-TFT 소자의 (a) V_G-I_{DS}, (b)V_{DS}-I_{DS} 특성

MoS₂와 금속의 오믹에 의한 영향을 알아보기 위하여 Ni/Au, Ti/Au 두 금 속을 이용하여 TFT 소자를 제작한 후 전기적 특성을 비교해보았다. 전극의 두께는 5/50 nm로 같은 두께로 E-beam evaporation 장비를 이용하여 전극을 증착하였다. 분석 결과, 5.0 eV의 큰 일함수를 가지고 있는 Ni/Au 의 소자가 4.3 eV의 비교적 작은 일함수를 가진 Ti/Au 소자에 비해 낮은 전기적 특성 을 보였으며, 이로 인해 전극 물질에 따라 소자의 전기적 특성 차이가 나타 난다는 것을 확인하였다.





그림 3.22 MoS₂와 금속의 밴드 다이어그램 (일함수)

그림 3.22는 MoS₂와 금속의 일함수 및 밴드 다이어그램의 모식도이다. MoS₂ 와 일함수(Work function) 차이가 적은 Ti (4.3 eV)와 Mo (4.5 eV)를 이용하 여 Ti / Au 와 Mo / Au 소자를 제작하고 전기적 특성을 비교해 보았다. 전 극의 두께는 마찬가지로 Ti / Au (5 nm / 50 nm) 와 Mo / Au (5 nm / 50 nm) 로 증착하고 10 시간동안 100 ℃에서 열처리를 진행하였다. 제작한 TFT 소자의 전하 이동 특성을 알기 위해, Vaccum Chamber Probe Station 장비와 Keithley 4200 장비를 이용하여 전기적 특성을 분석하였다. 그림 3.23 는 전극 물질에 따른 전기적 특성(V_{DS}-I_{DS})을 비교 분석한 결과이다.

Collection @ chosun





그림 3.23 전극 물질에 따라 제작된 MoS₂-TFT 소자의 V_{DS}-I_{DS} 특성 (a) Ti / Au, (b) Mo / Au

드레인-소스의 측정 전압 구간은 -2 V에서 2 V로 설정하였으며, 게이트 전 압은 0 V에서 5 V 씩 증가시켜 10 V까지 측정을 진행하였다. 측정된 드레인 -소스의 전류-전압 곡선(I-V curve)은 게이트의 전압을 증가시켜줄수록 점점 증가하는 것을 확인되었다. 양의 전압 값에서 전류가 흘러 Turn-On 되는 현 상을 보이고 있으며, n-channel이 형성됨을 보여준다. 직접적으로 그림 3.24 에 Ti / Au 와 Mo / Au를 비교하기 위하여 V_{DS}-I_{DS} 그래프와 V_G-I_{DS} 그래 프를 한 곳에 나타내어 비교 분석해보았다.



그림 3.24 전극 물질에 따라 제작된 MoS₂-TFT 소자의 (a) V_{DS}-I_{DS}, (b) V_G-I_{DS} 특성





MoS₂의 전자 친화도(electron affinity)는 4 eV 이며, Ti의 일함수는 4.3 eV 로서 Ti와 MoS₂ 사이에서 0.3 eV의 쇼키 장벽(Schottky barrier)을 가지며, Mo의 일함수는 4.95 eV는 0.95 eV의 쇼키 장벽을 가지게 된다. 이에 따라, Ti / Au의 소자에서 약 3 배 정도의 높은 전기적 특성을 나타난 것이 확인 되었다. 측정된 V_G-I_{DS} 그래프를 이용하여 전자 이동도를 측정하였다. 전자 이동도는 그림 3.24 (b)의 V_G-I_{DS} 그래프의 곡선을 미분하여 기울기 (dI_{DS}/dV_G)를 구한 후 아래의 계산식에 적용하였다.

이동도 : Mobility(
$$\mu$$
) = $\frac{L}{W^* \frac{(\epsilon_0^* \epsilon_r)}{d} * V_{DS}} * \frac{dI_{DS}}{dV_G}$ (1)

식에서 L 은 채널 길이를 나타내며, W 는 채널 폭을 나타낸다. ϵ_0 와 ϵ_r 은 각각 MoS₂의 유전율을 나타내며, d는 SiO₂의 두께를 나타내고 V_{DS}는 드레인 -소스에 걸어주는 전압 값이다. 제작한 TFT 소자에서 채널 길이(L)는 2 um 이며, 채널 폭(W)은 15 um, ϵ_0 와 ϵ_r 은 각각 8.854×10⁻¹² Fm⁻¹, 3.9 이고 입력 전압 값은 1 V 이다. Ti / Au의 경우 그래프를 미분하여 기울기를 구했을 때, 기울기는 1.781×10⁻⁷ 이며, 전자 이동도는 2.06 cm²/Vs 이고, Mo / Au 경 우 기울기는 0.6477×10⁻⁷ 으로 전자 이동도는 0.75 cm²/Vs 로 각각 계산되었 다. 전자 이동도 또한 앞서 분석한 전기적 특성과 일치하는 것으로, MoS₂는 전자에 의한 전하 이동에 의해 주로 특성을 나타내는 n-type 반도체이며, 금 속과 MoS₂의 쇼키 장벽에 의한 영향을 다시 나타내었다. 2.06 cm²/Vs의 결 과는 선행 CVD 성장된 MoS₂ 기반 TFT의 전기적 특성 결과와 비슷한 수준 이다.^[31]

4. CVD 성장 및 기계적 박리 TFT 소자의 전기적 특성

CVD를 통해 성장시킨 MoS₂의 구조적, 광학적 특성을 확인하기 위해 Scotch-tape를 이용한 기계적 방법으로 박리한 MoS₂와 비교해보았다. 그림 3.25는 CVD를 통해 성장시킨 MoS₂(그림 3.25 (a))와 기계적 방법으로 박리한 MoS₂(그림 3.25 (b))의 광학 이미지 및 라만 분석 결과이다. CVD를 이용하 여 성장 시킨 MoS₂는 완벽한 층으로 이루어진 것을 확인하였다. 그림 3.25 (c), 라만 분석 결과, 라만 피크 차이는 같지만 CVD를 이용하여 성장시킨 MoS₂의 A_{1g} 피크의 FWHM 은 9 cm⁻¹이고 기계적 방법으로 박리시킨 MoS₂ 는 7 cm⁻¹ 로 확인 되었으며 이는 앞서 나온 TEM 이미지를 통해 CVD를 이 용하여 성장시켰을 때 도메인 사이즈가 작아 병합하면서 내부에 Grain boundary를 형성하기 때문이다. 따라서 grain boundary에 의한 전기적 특성 저하를 확인하고자 하였다.



그림 3.25 (a) CVD 성장 및 (b) 기계적 박리 MoS₂의 광학 이미지 및 (c) Raman 특성

이를 직접적으로 전기적 특성을 분석하기 위해 각각의 소자를 제작하였으며 전극은 Ti / Au (5 / 50 nm) 로 증착하였다. 그림 3.26은 CVD를 통해 성장 시킨 MoS₂와 기계적 방법으로 박리한 MoS₂ 소자의 전기적 특성 비교 분석 한 결과이다. 그림 3.26 (a), 드레인-소스의 전류-전압 곡선 분석결과 기계적 박리의 MoS₂ 소자가 CVD를 통해 성장시킨 MoS₂보다 훨씬 높은 특성을 나 타내었다.







그림 3.26 CVD 성장 및 기계적 박리에 따른 TFT 소자의 전기적 특성 (a) V_{DS}-I_{DS}, (b) V_G-I_{DS}

그림 3.26 (b), 게이트-드레인의 전류-전압곡선에서도 마찬가지로 기계적 박 리 MoS₂ 특성이 보다 더 높은 것을 확인하였으며, 이동도를 계산한 결과 19.13 cm²/Vs로 단일 층에 비해 약 10배정도 증가한 것을 확인할 수 있었으 며 Raman 분석 경향성과 일치하는 것을 확인하였다. 따라서, 고품질의 MoS₂ 박막을 성장하기 위해서는 도메인 크기를 증가시키기 위한 연구가 병행되어 야 한다.





Collection @ chosun

5. MoS₂ 기반 소자의 Photodiode 특성

MoS₂는 반도체로서 밴드갭 에너지보다 더 큰 빛 에너지를 받으면 광전자 (Photoelectrons)가 발생하여 광전류(Photo current)를 형성하여, 광 트랜지스 터(Photo transistor), 포토다이오드(Photo diode) 등으로 제작할 수 있으며, 광센서로서 응용 할 수 있다. CVD로 제작 된 단일 층의 MoS₂ 소자의 광에 대한 반응성 분석할 필요가 있다.



그림 3.27 (a) CVD 성장 MoS₂, (b) 기계적 박리 MoS₂의 Light On-Off 시 V_G-I_{DS} (c) 시간에 따른 광 응답

그림 3.27는 CVD로 성장된 MoS₂ 기반 TFT와 기계적 박리로 형성된 MoS₂ 기반 TFT의 시간에 따른 광반응을 나타낸 그래프와 게이트 전압에 따른 광 반응성 그래프이다. 제논 램프(Xenon lamp)를 이용하여 10 V의 게이트 전압 과 10 V의 드레인 전압 하에서 시간에 대해 짧은 펄스(40 초)를 주기로 광 반응성을 측정하였다. 램프 파워는 2 W로 측정하였으며, 10 V의 전압에 대 한 광전류는 각각 램프 광의 턴온(Turn-On) 상태에서 상승(Rise)하며 및 턴 오프(Turn-Off) 상태에서 감쇠(Decay)한다. CVD 기반 TFT의 경우 비록 빛 에 대한 반응성은 확인하였지만, grain boundary 에 의해 전기적 특성 감소 에 의해 광전자나 광정공이 캡쳐되거나 재흡수 되기 때문에 응답 특성이 좋 지 않은 것을 확인하였다. 하지만 기계적 박리의 경우 높은 품질로 인해 특 성이 크게 향상된 것을 알 수 있다.



Collection @ chosun

6. Plasmon-Exciton coupling을 이용한 소자의 광반응 향상

MoS₂ 포토다이오드 소자는 MoS₂의 낮은 광 흡수율 때문에 광반응성이 낮 다. 이를 개선하기 위하여 금속 나노 입자를 이용해 플라즈몬 구조를 도입하 였다. 표면 플라즈몬은 일반적으로 음의 유전함수를 갖는 금속과 양의 유전 함수를 갖는 유전체 사이의 게면을 따라 전파하는 전자들의 집단적인 진동현 상을 생성시키는 전자기적 현상을 말한다. 표면 플라즈몬이 적용되면 기존 흡수 채널 이외에 추가적인 채널이 형성되어 에너지 transfer를 통해 광전류 생성을 크게 증가시킨다. Plasmon decay 속도가 ps 이상으로 빨라지게 된다. 소자의 광반응 향상을 위해 MoS₂와 은 나노 입자(Silver nanoparticle ;AgNP)와 금 나노 입자(Gold nanoparticle ;AuNP)를 결합하여 표면플라즈몬 현상을 이용해 소자를 제작하고 전기적 특성 및 광 반응을 분석하였다. 그림 3.28는 MoS₂와 AgNP, AuNP를 결합한 Raman, 투과도, PL 분석 결과이다. 그림 3.28 (a, b), Raman 분석 결과, AgNP, AuNP의 결합에 상관없이 Raman peak가 그대로 유지 되었으며, 이는 nanoparticle에 의해 MoS₂의 성 분과 품질이 변함이 없으며, 저하되지 않는 것으로 확인되었다. 그림 3.28 (c, d)의 투과도 분석 결과 기존의 MoS₂ 흡수피크는 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. 하지만 AgNP와 AgNP를 도입하여 플라즈몬 효과에 의해 MoS₂의 흡 수피크에서 흡수율이 상당히 증가한 것을 알 수 있다. 이에 따라, 그림 3.28 (e, f)의 PL 분석 결과, AgNP, AuNP를 MoS₂와 결합하였을 때 모두 기존의 MoS₂ 보다 향상된 것으로 나타났으며, 이는 Plasmon에서 빠른 속도로 decay 될 때, hot electron이 발생하게 되며 MoS₂로 전이 된다. MoS₂로 전이된 전 자는 exciton의 홀과 결합하여 열에너지를 표면으로 전달하며, 표면을 (-)의 형태로 만들어, n-type 반도체인 MoS2 의 특성이 향상된다. PL 향상 결과를 바탕으로, MoS₂와 AgNP, AuNP를 이용하여 소자를 제작하고 전기적 특성을 분석해 보았다.





그림 3.28 MoS₂ (w/o AgNP, AuNP)의 (a), (b) Raman, (c), (d) 투과도, (e), (f) PL분석







그림 3.29 (a) MoS₂, MoS₂/AgNP, MoS₂/AuNP 소자의 V_{DS}-I_{DS} 특성 (b) MoS₂, (c) MoS₂/AgNP, (d) MoS₂/AuNP



그림 3.30 (a) AgNP on MoS₂, (b) AuNP on MoS₂의 FE-SEM 이미지



그림 3.29는 MoS₂와 AgNP, AuNP를 결합하여 소자 제작 후 전기적 특성을 분석한 결과이다. 나노 입자가 포함된 MoS₂ 소자는 기존의 광전류(photo current)보다 약 20 배 더 높은 광전류를 갖는 것을 확인하였으며, AgNP를 결합하였을 때 가장 전류 레벨이 높은 것을 확인하였다. 이는 그림 3.30의 FE-SEM 이미지를 통해 AgNP (그림 3.30 (a))가 AuNP (그림 3.30 (b))에 비해 크기가 작으며, 밀도가 훨씬 높은 것을 확인하였고, 이로 인해 흡수율이 가장 높아 전기적 특성이 AuNP에 비해 AgNP의 경우가 더 많이 증가하였 다. 소자를 제작한 후, 포토다이오드 (Photo diode)의 적용을 위해 광에 대한 반응성을 분석하였다. 그림 3.31은 MoS₂와 AgNP, AuNP를 결합하여 소자 제작 후 빛에 대한 반응을 분석한 결과이다. 단일 MoS₂의 경우 On-Off 상태 의 차이가 확연히 나타났다. 시간에 따른 광반응을 분석 하였으며, 게이트 전 압 10 V, 드레인 전압 10 V 하에서 측정하였다. 시간 주기는 40 초로 하였으 며, MoS₂, MoS₂/AgNP, MoS₂/AuNP 소자 모두 소스 광의 Turn-off 상태에 서 전류가 거의 흐르지 않으며 Turn-on 상태에서 포토 커런트가 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 측정결과, MoS2만 이용한 소자보다 나노 입자를 이 용하였을 때 더욱 많이 상승하였다. 이는 나노 입자가 MoS₂ 소자에서 빛 흡 수를 향상시키기 위해, 서브스케터링(Subscattering) 소스와 나노 안테나 (Nano antenna) 역할을 하여, 자유공간의 광을 서브과장(Subwavelength) 안 테나 갭으로 집중시켜 MoS₂와 빛의 상호작용은 향상되기 때문이다. 또한, 광 반응에 의한 전하 이동은 나노 구조가 MoS2 층과 직접적으로 접촉되어 있어, 광전류를 향상시킬 수 있다.







그림 3.31 MoS₂, MoS₂/AgNP, MoS₂/AuNP 소자의 광 반응 특성 (a) Time-resolved Photo response (b), (c) Light On-Off 시 V_G-I_{DS}





7. MoS₂ 기판 TFT 소자의 가스 조건에 따른 반응

N₂O 가스에 대한 전기적 반응을 분석하였다. 그림 3.32는 N₂O 가스 유량에 따른 전기적 특성(V_G-I_{DS})을 분석 그래프이다. - 20 V에서 20 V의 게이트 전 압 구간을 설정하였으며, 드레인-소스 전압은 1 V 하에 진행되었다. N₂O 가 스 유량이 높아질수록 드레인-소스 전류 레벨이 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 N₂O 가스가 MoS₂의 표면에 흡착되어 charge transfer 현상이 일어나 전자의 전이가 감소하여 저항이 커져 전기적 특성이 저하되는 것으로 확인하 였다.



그림 3.32 가스 유량에 따른 전기적 특성(V_G-I_{DS}) 분석





제4장 결 론

이미지 센서를 구현하기 위해, 상용화 되어 있는 트랜지스터, 포토다이오드 물질의 한계를 극복하고 높은 이동도와 On/Off 비, 높은 광 반응성을 갖는 이차원의 신소재 물질로서 Molybdenum disulfide(MoS₂)가 각광받고 있다. MoS₂는 두께에 따라 밴드갭 에너지가 달라져, 이를 제어하기 위해 사파이어 기판에 화학기상증착법을 이용하여 성장시켰다. 성장 시킨 MoS₂의 광학적 분 석 결과 단일 층의 MoS₂의 박막이 성장된 것을 확인하였다. 하지만 이미지센 서에 적용하기에는 크기, 위치 등을 조절하기에 한계가 있다. 이를 제어하기 위해 Molybdenum을 패터닝하여 MoS₂의 박막을 성장시켜 일정한 주기로 정 렬하여 성장시켰다. 완전한 MoS₂ 박막을 성장시키기 위하여, MoS₂ 핵 생성 을 조절할 수 있는 방법으로 온도 변수를 통해 MoS2를 성장시켰다. 높은 온 도는, 충분한 에너지를 공급해주어 핵이 생성될 수 있는 핵 성장 에너지를 낮게 해주어 MoS₂ 도메인의 밀도를 증가시켜주어 MoS₂ 박막을 형성해준다. 기판에 따라 MoS₂ 박막의 성장 영향을 분석하기 위해 기판별로 성장시켜보 았으며, Hexagonal 구조에 격자 상수가 낮은 사파이어 기판에 가장 잘 성장 되었음을 확인하였다. Back-gated TFT 소자로 제작하기 위해 NaOH/NaF 용액을 이용해서 SiO₂/Si 기판에 전사를 하였으며, E-beam evaporation을 통 해 전극을 증착하였다. 전극은 Ti/Au, Mo/Au를 증착하여 비교하였으며, 전 기적 특성 분석 결과 일함수가 작아 Schottky barrier가 낮은 Ti/Au가 Mo/Au에 비해 전자이동도가 더 빨라 상대적으로 높은 전기적 특성을 나타 냈다. CVD 성장의 내부결함을 확인하기 위해 기계적으로 박리한 MoS₂ 소자 와 비교해 보았으며, CVD 성장시 내부 Grain boundary에 의해 소자 특성이 낮음을 확인하였다. 광전류 효과를 가진 MoS2 소자의 빛에 대한 반응을 보기 위하여, 시간에 대한 램프 광의 턴온/오프(Turn-On/Off) 그래프를 통해, 광 응답 특성을 분석하였으며, 광에 대한 전류 레벨이 달라진 것을 확인하였다. 광에 대한 반응성을 더 높이기 위해 AgNP와 AuNP를 이용하여 표면플라즈 몬 효과로 인해 MoS₂에 전자를 전이시켜 광 반응성을 상승 시켰다. 가스에 대한 반응을 분석하기 위해, N₂O 가스 유량에 따라 전기적 특성을 분석하였





으며 가스 유량이 높아질수록 전류 레벨이 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 N₂O 가스에 의해 전자가 줄어들어 Trion(A+) 의 세기가 향상하게 되어 전기 적 특성이 저하되는 것으로 확인하였다. 이러한 방법을 통해 CVD를 통해 패 터닝되어 단일 층으로 성장시킨 MoS₂는 높은 전기적 특성을 갖는 TFT, 포 토다이오드, 포토트랜지스터 및 가스센서 등의 소자에 다양하게 적용이 가능 함을 보인다.





[참고문헌]

[1] W.-C. Wang, "Optical Detectors," http://depts.washington.edu/mictech/ sensors/detector.pdf

[2] T. Roy, et. al., Field-Effect Transistors Built from All Two-Dimensional Material Components. ACS Nano, 8, 6259 (2014)

[3] G. A. Salvators, et. al., Fabrication and Transfer of Flexible Few-Layers MoS_2 Thin Film Transistors to Any Arbitrary Substrate. ACS Nano, 7, 8809 (2013)

[4] Novoselov, K. S., et. al., Electric field effect in atomically thin carbon films. Science 306, 666 (2004)

[5] Berger, C., et. al., Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics. J. Phys. Chem. B 108, 19912 (2004)

[6]. Novoselov, K. S., et. al., Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. Nature 438, 197 (2005)

[7]. Du, X., et. al., Fractional quantum Hall effect and insulating phase of Dirac electrons in graphene. Nature 462, 192 (2009)

[8] Bolotin, K. I., et. al., Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. Solid State Commun. 146, 351 (2008)

[9] The International Technology Roadmap for Semiconductors. http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2009.htm (2009).

[10] A. Kuc, et. al., Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide TS_2 . Phy. Rev. B. 83, 245213 (2011)

[11] Liu. H, et. al., Channel length scaling of MoS₂ MOSFETs. ACS Nano 6, 8563 (2012).

[12] A. Splendiani, et. al., Emerging photoluminescence in monolayer




MoS₂., Nano Lett, 10, 1271 (2010)

[13] Sylvain Latil, et. al., Charge Carriers In Few-Layer Graphene Films.Phys Rev Lett, 97, 036803 (2006)

[14] Jiao. L, et. al., graphene nanoribbons from carbon nanotubes. Nature 458, 877 (2009)

[15] Tsuneya Ando, et. al., The electronic properties of graphene and carbon nanotubes, NPG Asia Materials, 1, 17, (2009)

[16] Bertolazzi, S., et. al., Nonvolatile memory cells based on MoS₂/graphene heterostructures. ACS Nano 7, 3246 (2013).

[17] J. A. Wilson, et. al., The trasition Metal Dichalcogenides Discussion and Interpretaion of the Observed Optical, Electrical and Structural Properties, Advanced in Physics, 18, 193 (1969)

[18] Q. H. Wang, et al. Electronic and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides, Nature Nanothechnology, 7, 699 (2012)

[19] X. Ling, et. al., Role of the Seeding Promoter in MoS_2 Growth by Chemical Vapor Deposition, Nano Lett, 14, 464 (2014)

[20] Y. Shi, et. al., Van der waals epitaxy of MoS_2 layers using graphene as growth templates, Nano Letters, 12, 2784 (2012)

[21] X. Wang, et. al., Controlled Synthesis of Highly Crystalline MoS₂
Flakes by Chemical Vapor Deposition, J. Am. Chem. Soc, 135, 5304 (2013)
[22] 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)

[23] Yi-Hsien Lee, et. al., Synthesis of Large-Area MoS₂ Atomic Layers with Chemical vapor deposition, Advanced Materials, 24, 2320 (2012)

[24] Y. Feng, et. al., Synthesis of Large-Area Highly Crystalline Monolayer Molybdenum Disulfide with Tunable Grain Size in a H_2 Atmosphere, ACS Appl. Mater. Interfaces, 7, 40, 22587 (2015)

[25] W. Chen, et. al., Oxygen-Assisted Chemical Vapor Deposition Growth





of Large Single-Crystal and High-Quality Monolayer MoS₂. J. Am. Chem. Soc, 137, 50, 15632 (2015)

[26] W. Yang, et. al., The Integration of Sub-10nm Gate Oxide on MoS_2 with Ultra Low Leakage and Enhanced Mobility, Scientific Reports, 5, 11921 (2015)

[27] Lopez - Sanchez, O, et. al., Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂. Nature Nanotech. 8, 497 (2013)

[28] M. Rycenga, et. al., Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic Applications. Chem. Rev, 111, 3669 (2011)

[29] J. N. Anker, et. al., Biosensing with plasmonic nanosensors. Nat. Mater, 7, 442 (2008)

[30] Ja-Yeon Kim et al., Jpn. J. Appl. Phys. 56 110302 (2017)

[31] J. Kang, et. al., High-performance MoS_2 transistors with low-resistance molybdenum contacts , 104, 093106 (2014)





CURRICULUM VITAE

Personal data

Name : Min-Woo Kim

Education

MS. Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju, Republic of Korea (2010. 3 ~ 2016. 2)
Thesis title: "Study on growth and application of high quality molybdenum disulfide"
Thesis Advisor: Prof. Min-Ki Kwon

BA. Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju, Republic of Korea (2010. 3 ~ 2016. 2)





Experimental skills and experience

- (1) Growth Tools
 - Thermal chemical vapor deposition (Thermal-CVD), E-beam evaporation
- (2) Processing Tools
 - Vacuum chamber probe station, Rapid thermal annealing (RTA) system, Spin coater, Mask Aligner
- (3) Characterizing tools
 - SEM, TEM, AFM, XPS, PL, Raman, Parameter analyzer (HP4155B),
 Parameter analyzer (Keithley 4200)
- (4) Simulation tools
 - Solid works

Publication

(1) Domestic and International Papers

- 1 Ja-Yeon Kim, Yoo-Hyun Cho, Hyun-Sun Park, Doo-Hyung Kim, Min-Woo Kim, Jong-Rak Park and Min-Ki Kwon, "질화갈륨 기반 다 각형 발광다이오드의 광추출 효율 향상", J. of Advanced Engineering and Technology, 9, 2, 131, (2016)
- 2 Min-Woo Kim, Ja-Yeon Kim, Yoo-Hyun Cho, Hyun-Sun Park, and Min-Ki Kwon, "Role of the growth temperature in MoS₂ growth by chemical vapor deposition", J. of Nanosci. and Nanotech, 18, 3, 2018





- 3 Ja-Yeon Kim, Seung Jong Oh, Hyun-Sun Park, Min-Woo Kim, Yoo-Hyun Cho, and Min-Ki Kwon, "Surface-plasmon-enhanced emissions of phosphors with Au nanoparticles embedded in ITO", J Korean Phys Soc, 70, 5, 517, 2017
- 4 Hyun-Sun Park, Ja-Yeon Kim, Min-Woo Kim, Yoo-Hyun Cho, and Min-Ki Kwon, "Localized surface plasmon-enhanced emission from red phosphor with Au-SiO₂ nanoparticles", Mater Lett, 205, 145, 2017

(2) Domestic and International conference

- Min-Woo Kim, Ja-Yeon Kim, Yoo-Hyun Cho, Hyun-Sun Park, Seungho Bang, Mun Seok Jeong and Min-Ki Kwon, "Large area vapor phase growth and characterization of molybdenum disulfide atomic layer", 2016 KPS Fall Meeting, P1-se.013* (2016)
- 2. Min-Woo Kim, Doo-hyung Kim, Ja-Yeon Kim, Yoo-Hyun Cho, Hyun-Sun Park, Seungho Bang, Mun Seok Jeong and Min-Ki Kwon, "Photoresponse properties of large-area high quality MoS₂ thin film grown by chemical vapor deposition", J. of Nanosci. and Nanotech, ISPSA 2016, 2016000222 (2016)
- 3. Min-Woo Kim, Ja-Yeon Kim, Yoo-Hyun Cho, Hyun-Sun Park and Min-Ki Kwon, "Role of the growth temperature in MoS₂ growth by chemical vapor deposition", 2017 KPS Fall Meeting, C3.02* (2017)





- 4. Hyun-Sun Park, Min-Woo Kim, Yoo-Hyun Cho, Ja-Yeon Kim and Min-Ki Kwon, "Localized surface plasmon-enhanced emission from red phosphor with Au-SiO₂ nanoparticles", 2017 KPS Fall Meeting, H7.03* (2017)
- 5. Yoo-Hyun Cho, Hyun-Sun Park, Min-Woo Kim, Ja-Yeon Kim and Min-Ki Kwon, "고연색 백색 LED를 위한 표면 플라즈몬을 이용한 형광 체 효율 향상", 2016 KPS Fall Meeting, P2-se.005* (2016)
- 6. Hyun-Sun Park, Yoo-Hyun Cho, Min-Woo Kim, Ja-Yeon Kim and Min-Ki Kwon, "플라즈몬 공명을 통한 나노와이어 투명 전극 연구", 2016 KPS Fall Meeting, P2-se.006* (2016)
- Yoo-Hyun Cho, Ja-Yeon Kim, Min-Woo Kim, Hyun-Sun Park and Min-Ki Kwon, "Surface plasmon enhanced transparent electrode for high efficient light emitting diode", 2017 KPS Fall Meeting, C9.06* (2017)

(3) Patent

1. "질화물계 발광다이오드"

Ja-Yeon Kim, Yoo-Hyun Cho, Hyun-Sun Park, Min-Woo Kim and Min-Ki Kwon, Korea patent No.10-2017-0150633

