



2차원 채널 소자 기술

I. 서론

최근 실리콘을 이용한 채널 소자의 채널 선 폭이 10nm 미만으로 얇아짐에 따라 물리적 한계를 극복할 대체 물질로 2차원 물질을 채널로 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 2차원 물질의 새로운 지평을 연 그래핀이 가진 밴드갭이 없는 한계를 극복하기 위해, 밴드갭을 가지고 있는 Transition Metal Dichalcogenide (TMD)와 Black Phosphorus (BP) 가 각광받는 가운데, 해당 물질을 소자의 채널로 사용하는 연구가 활발히 진행 중이다. 본 지에서는 먼저 반도체 채널 물질로 이용되는 2차원 물질에 대한 소개와 물질을 얻기 위한 방법, 2차원 물질을 채널로 이용한 소자의 특성, 향후 연구 방향에 대해 살펴보도록 한다.

그래핀은 밴드갭이 없는 한계를 갖고 있으며, 밴드갭을 갖는 TMD 물질이 차세대 2차원 물질로 주목받고 있다.

II. 2차원 채널 물질

1. Transition Metal Dichalcogenides

2차원 물질은 단일 층 내에서 강한 공유결합을 이루고 있고 층과 층 사이에서는 상대적으로 작은 Van der Waals 힘으로 결합된 구조로, 화학적으로 안정하다. 2차원 물질 중 Transition Metal Dichalcogenides (TMD) 물질은 위, 아래의 칼코젠족 원소 층 사이에 전이금속의 구성에 따라 다양한 성질 (초전도체, 반도체, 금속) 을 가진다. 이중 bandgap 을 가지는 TMD 물질은 차세대 반도체 물질로 각광받고 있다.

TMD 물질구조는 MX_2 [M: Transition Metal, X: Chalcogenide]



최승혁
성균관대학교
성균나노과학기술원

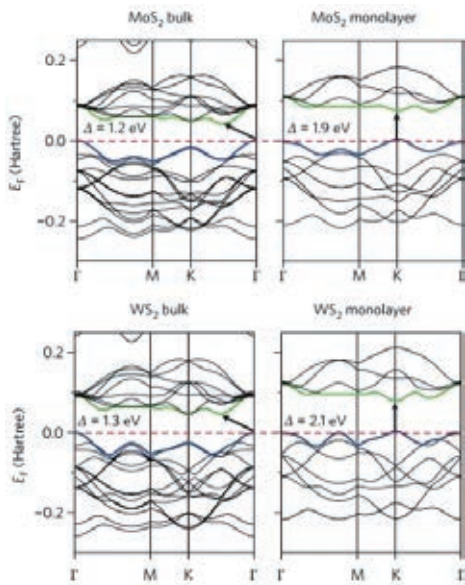


전재호
성균관대학교
성균나노과학기술원



이성주
성균관대학교
성균나노과학기술원

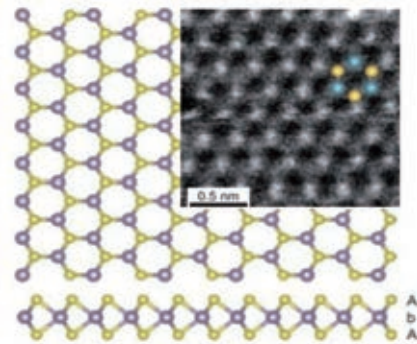
〈그림 1〉 TMD 구성 물질^[1]



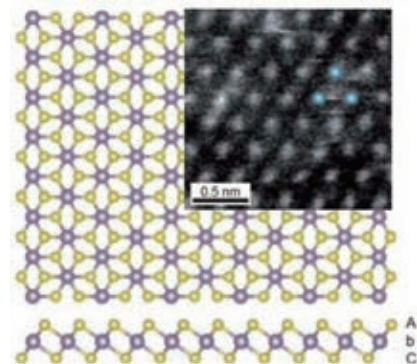
〈그림 2〉 DFT (Density functional theory)를 이용한 TMD 밴드갭 변화 계산^[2]

로, 동일 평면 내에서 4족~10족의 전이금속과 두 개의 칼코겐 원소가 공유결합하고 있는 물질이다.〈그림 1〉^[1] 채널 소자로 쓰이는 반도체 성질을 가지는 물질은 주로 6, 7족의 Mo, W와 칼코겐 원소(S, Se, Te)로 구성된 물질들이다. (예: MoS₂, WS₂, MoSe₂, WSe₂) 대표적인 예로서 MoS₂는 여러 가지 특이한 성질을 가지고 있는데, 원자 층수에 따라 밴드갭이 변하며 (Bulk: 1.2~1.3 eV, 단일 층: 1.8~1.9 eV), 에너지갭의 특징이 간접 천이에서 직접 천이 특성 (E_g: 1.9eV때)으로 변한다.〈그림 2〉 이를 채널 소자로 사용하여 파장 신호를 인지하고 전기적 신호로 바꿔주는 광 측정기기 또는 응용기기로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

TMD의 다른 특징은 단일격자의 구조에 따른 안정도와 구조에 따른 특성 차이가 확연하다는 점이다. MoS₂의 경우 단일 격자의 모양이 Trigonal Prismatic (2H) 일



〈그림 3〉 단일 격자 내 구조 : 2H구조^[2]

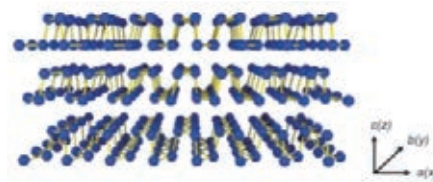


〈그림 4〉 단일 격자 내 구조 1T구조^[2]

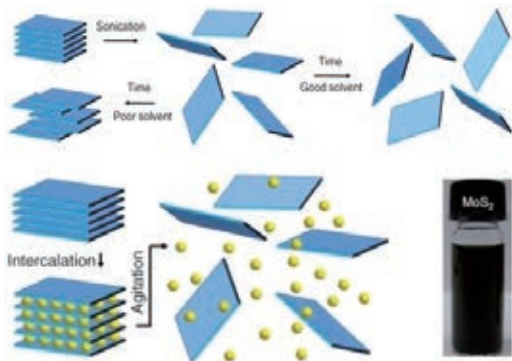
때 안정한 구조를 가지며 반도체 특성을 보인다. 그러나 Octahedral (1T)에서 구조적으로 불안정하고 금속 특성을 보인다.〈그림 3, 4〉 다른 TMD 물질의 경우 안정한 구조는 물질에 따라 다르다. (Ex: MoS₂, WSe₂는 2H 구조에서 안정)

2. Black Phosphorus

흔히 존재하는 금속 중 하나인 인을 2차원 구조로 분리해 낸 물질을 Black Phosphorus (BP) 라고 하며, BP는 TMD 물질과는 다른 성질을 가진다. 구조가 이동방성을 가지며 이는 물질 구조의 방향에 따라 전자 수송도에 영향을 미친다는 특징이 있다.〈그림 5〉



〈그림 5〉 BP의 이동방성 물질 구조^[3]



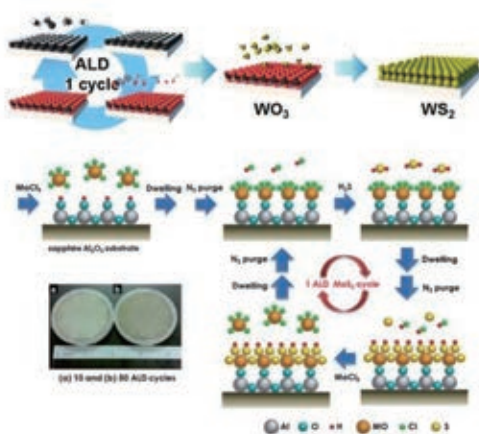
〈그림 9〉 전기화학적 박리 방법 (위 : 유기용매와 초음파, 아래 : 이온화 이온 주입 방법)^[5]

2. 전기 화학적 박리 방법

전기 화학적 박리 방법이란 벌크 물질을 특정 유기 용매에 넣어 초음파를 이용해 층과 층을 박리하는 방법 또는 층과 층 사이에 특정 이온화 되는 물질을 주입하고 전기적인 힘을 가해준 후 증류수에 넣어 층과 층을 분해 하는 방법이 있다. 전기 화학적 박리는 기계적 박리 대비 넓은 면적을 박리 할 수 있다는 장점이 있다.〈그림 9〉

3. 원자 층 증착 방법 (ALD)

2차원 반도체 채널 물질은 원자 층수에 따라 성질이 다르다. 따라서, 두께별 증착 조절이 가능하고 기계적 박리 방법 대비 넓은 면적을 증착할 수 있는 Atomic Layer Deposition (ALD)을 이용한 방법은 2차원 물질 합성에 있어서 중요한 방법 중 하나이다. 원자 결정성을 유지하



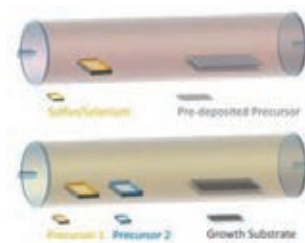
〈그림 10〉 ALD를 이용한 2차원 물질 증착 (위 가스 전구물질을 이용한 직접 증착, 아래 산화물 증착 후 CVD를 이용한 증착)^[6-7]

며 증착 하는 방식을 이용하여 직접 전구물질을 이용해 원자 층 수 별로 쌓아 올리는 방법 또는 산화물을 원하는 층수로 쌓아 올린 후 화학 기상 증착 방법을 이용하여 2차원 채널 물질을 만든다.〈그림 10〉

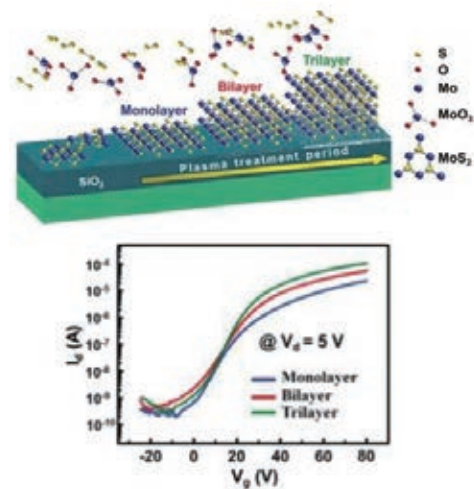
4. 화학 기상 증착 방법 (CVD)

소재 상용화를 위한 방법 중 대표적으로 화학 기상 증착 방법이 연구 되고 있다. 화학 기상 증착 방법이란 표면 처리 또는 금속 증착이 먼저 된 기판에 수송 가스 (Ar, N₂) 를 통해 운반된 하나 또는 둘의 전구체가 열에너지 또는 화학 반응에 의해 생성된 2차원 물질을 기판에 증착 하는 방식을 말한다.〈그림 11〉

2차원 물질을 대면적으로(4 inch 이상) 성장 가능하다는 점과 전구체를 선택해 물질 합성이 용이하다는 점, 기판위에 균일하게 증착된다는 점, 기존의 절연막 (SiO₂)위에서 증착 가능하다는 점 등의 장점으로 많은 연구가 진



〈그림 11〉 CVD안 전구 물질을 이용한 2차원 물질 증착^[8]



〈그림 12〉 플라즈마 표면 처리를 통한 이차원 채널소자 두께 조절 모식도(위) 및 두께별 소자 특성(아래)^[9]

행 중이다

하지만 CVD 경우에서 또한, 증착된 물질의 균일성, 원자 층수에 따라 성질이 달라져 소자특성에 영향을 미치는 만큼 물질 성장에 있어서, 조건 별로 원자 층 두께를 조절하는 방법이 중요하게 고려된다. 이러한 점에서 기존 절연막인 SiO₂에 플라즈마 표면 처리 후 같은 CVD 성장 조건에서 표면 처리 시간에 따라 증착 두께를 조절하고, 두께 별 소자 특성이 달라진 것을 보여준 연구를 진행하였다. 이를 이용하면 공정 과정을 늘리지 않더라도 기존 기판위에서 대면적 반도체 2차원 물질을 층수 별로 성장할 수 있다는 점을 보여주었다. <그림 12>

CVD를 이용하여 물질 합성 후, 공정 방법으로 (1) 임의의 기판 위에 기른 후 2차원 물질을 원하는 곳 다른 기판으로 이동시킨 후 공정 (포토리소그래피 패턴, 금속전극 증착)을 통해 소자를 만드는 방법과 (2) 소자를 만들 기판 위에 바로 물질을 증착 후, 후 공정을 통한 소자를 만드는 방법으로 2가지 방법이 있다.

N형 2차원 물질로는 MoSi₂, P형 2차원 물질로는 Black Phosphorus가 주목받고 있다.

IV. 2차원 채널 소자

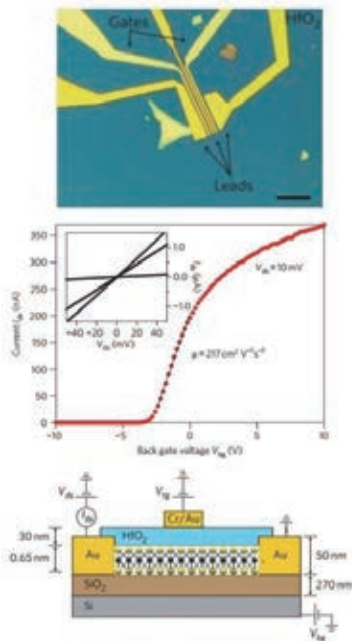
(1) N형 2차원 반도체 소자

TMD 물질 중 대표적인 n-type 물질인 MoS₂ 는 2H 구조에서 안정하고 황을 매개로 하여 다른 물질 대비 쉽게 얻을 수 있다는 점에서 많은 연구가 진행 되었다.

2차원 MoS₂ FET 초창기 연구는 벌크에서 기계적 박리 방법으로 박리 하여 SiO₂기판에 옮겨 만든 소자는 전하이동도가 0.5~3 cm²V⁻¹s⁻¹으로 낮은 전하 이동도를 보였다. 그러나 2011년 A. Kis 연구진이 연구한, 기계적 박리방법을 통해 만든 단일 원자층 MoS₂ 위에 고 유전막 (high-κ) 물질을 사용해서 만든 Top gate MOS구조의 FET소자 측정 결과 n-type의 200 cm²V⁻¹s⁻¹이상의 높은 전하 이동도와 높은 On/Off 전류 비율: 1 × 10⁸, 좁은 Subthreshold slope: 74 mV/sec⁻¹, 단일 원자 층이면서 반도체 소자로 사용할 수 있는 밴드갭 (1.9 eV)을 가지어 내부터널소자, 저전력 소자로 사용 될 수 있는 가능성을 보여주었다. 이러한 고무적인 TMD 채널소자의 동작 특성이 차세대 반도체 채널 물질로 사용 될 수 있는 가능성을 보였다. <그림 13>

초창기의 FET와 동작 특성이 크게 차이가 나는 이유는 2차원 물질과 절연막의 상호작용에 있다. 두께가 매우 얇은 (1 nm 미만)의 단일 원자 층 또는 수 원자 층 (<10 nm)의 매우 얇은 채널층에서는 인접한 절연막 또는 다른 전극 층과의 상호작용이 매우 중요하게 작용한다. 먼저 SiO₂와 MoS₂의 계면간의 상호작용에서 SiO₂ 표면에서 전하가 잡히는 현상이 크게 나타나기 때문에 낮은 전하이동도가 나타난다. 그러나 높은 절연도 물질에서는 전하가 이동할 때의 물질 구조 내에서의 쿨롱 산란을 줄여줘 높은 전하이동도가 나타나는 특징이 나타난다.

단일 원자 층을 이용한 FET 이외에도 수십층의 두께의 원자 층 채널을 이용한 FET 또한 ALD를 이용해 증착한 Al₂O₃절연막을 이용하여 측정된 전하 수송도 또한 100 cm²V⁻¹s⁻¹의 높은 전하이동도를 보였다.



<그림 13> 고유전막을 이용한 MoS₂ 단일막 Field-Effect-Transistor 구조와 동작 특성^[10]

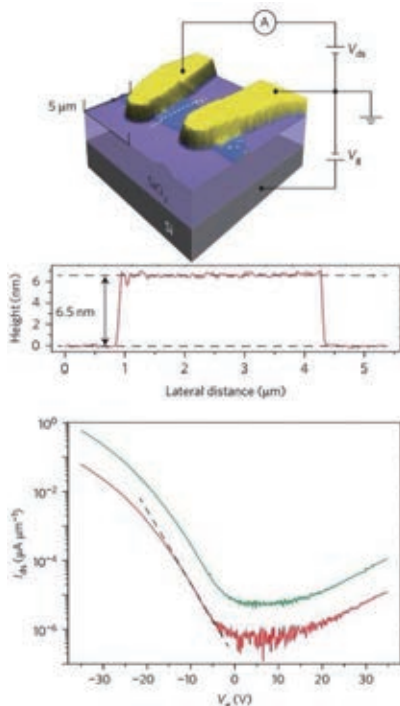
(2) P형 2차원 반도체 소자

새로운 물질로 각광받고 있는 BP는 MoS₂와는 다르게 p-type 특성을 가진다. BP의 홀 이동도는 300 cm²V⁻¹s⁻¹에 이르는데 이는 MoS₂ 경우 보다 3~5배 크며 실리콘 대비해서는 3배정도 큰 이동도를 가진다.

Yuanbo Zhang 연구진의 결과에 따르면 6.5nm 두께의 BP에 SiO₂ 절연막을 사용하고 Ti/Au 금속을 전극으로 사용해서 만든 back gate FET의 소자 측정 결과 p-type의 1000 cm²V⁻¹s⁻¹에 해당하는 높은 전자 이동도와 높은 On/Off 전류 비율: 1 × 10⁶, 다소 넓은 Subthreshold slope: 5 V/sec-1 결과를 얻었다. <그림 14>

(3) 반도체 도핑 농도 제어 기술

도핑은 반도체에 불순물을 넣어 정공 또는 전자의 농도 제어를 통해 소자 특성 제어를 하기 위한 방법이다. 2차



<그림 14> BP소자의 모식도(위)와 동작 특성 (아래; 빨강 V_{ds}: 10 mV, 초록 V_{ds}: 100 mV)^[11]

원 채널 소자 또한 도핑이 중요하나, 기존 반도체 공정에서 사용하는 물리적인 방법으로 이온을 주입하는 공정은 1 nm 이하 두께로 결정성의 영향을 많이 받는 2차원 물질 특성상 적용하는데 한계가 있다.

최근 이온 주입 방법 이외의 간접적으로 절연층(인-규 산염-유리)을 이용해 열과, 빛의 에너지만으로 MoS₂ 채널의 1 cm² 면적당 10¹⁰ 와 10¹³ 사이에서 도핑 농도를 조절하고 기존 대비 100배 넓은 도핑 농도를 조절하는 연구를 진행하였다. 물질에 직접적으로 영향을

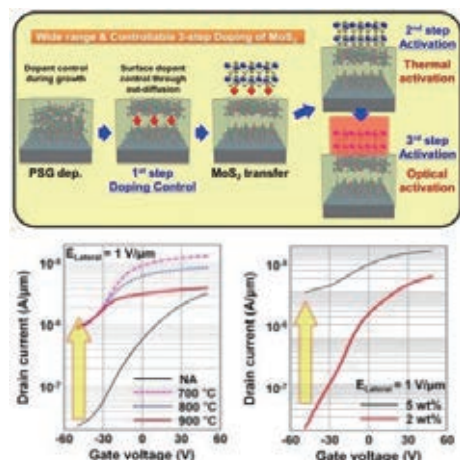
주지 않으며 넓은 도핑 영역으로 반도체 영역부터 도체까지 변형시킬 수 있다는 점에서 2차원 채널 물질 이용 범위를 늘렸다는데 의의가 있다. <그림 15>

2차원 물질에 대한 도핑 방법으로는 이온 주입 방법 외에 절연층을 이용하여 열과 빛의 에너지만으로 도핑하는 방법이 있다.

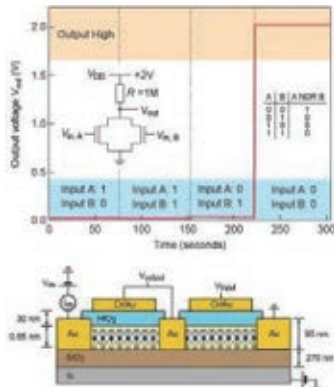
(4) 논리 회로 구성

FET 소자 동작 특성은 반도체 특징을 보여주는데 가장 기본적인 소자 특성이다. FET를 이용해 집적회로(IC)를 구성하여 인가전압에 따른 논리 회로 구성은 반도체 응용 분야 (인버터, NAND, SRAM 등) 적용에 필수적인 요소이다.

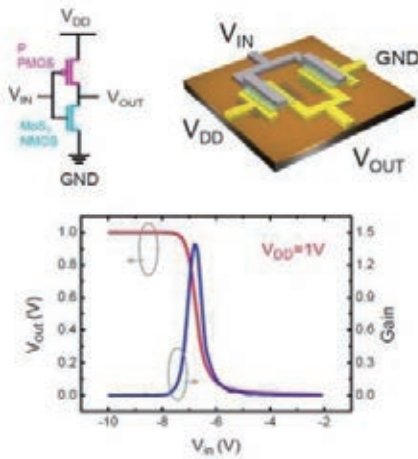
이러한 점에서 MoS₂를 이용한 집적회로의 연구는 산업계 적용에 있어 필수 요소이다. 2011년 Andras Kis 연구진은 단일 막 MoS₂를 이용한 Inverter, NOR 논리 회로



<그림 15> PSG를 이용한 열, 빛을 이용한 MoS₂ 도핑소자 특성 변화^[12]



〈그림 16〉 단일막 MoS₂을 이용한 논리 회로 구성(위 : 모식도, 아래 : NOR 회로)^[13]



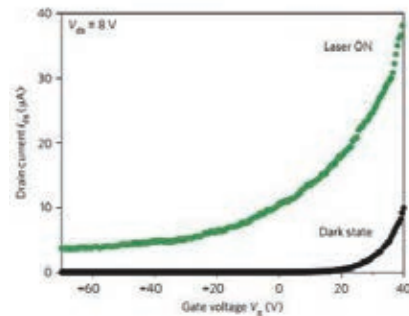
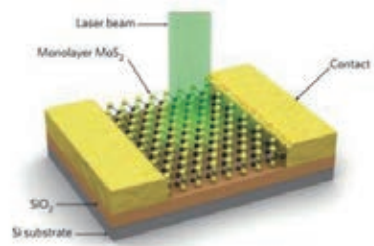
〈그림 17〉 MoS₂와 BP를 이용한 Inverter 모식도(위)와 동작 특성(아래)^[14]

구성에 성공했다. 4에 이르는 전압이득, 전극 구동범위 [-4, +4]에서 >10⁶ On/Off 비를 나타냈으며 이론적으로는 10¹⁰에 이르는 값 까지 가능한 것을 보여주었으며 〈그림 16〉, Peide D. Ye 연구진은 n-type 5 nm MoS₂과 p-type 5 nm 두께의 BP를 이용하여 만든 CMOS 구조에서 또한 전압 이득 1.4 V, 전극 구동범위 [-10 V, 2 V]를 보여 주어 2차원 물질을 채널로 사용하여 논리 회로 구성이 가능하다는 것을 보여주었다.〈그림 17〉

(5) 광전자 소자

2차원 단일 원자 층은 직접 천이 성질을 이용한 광전자 소자 채널로도 사용 할 수 있다.〈그림 18〉

일반적인 광전자 소자와는 달리 단일 물질을 바로 채널

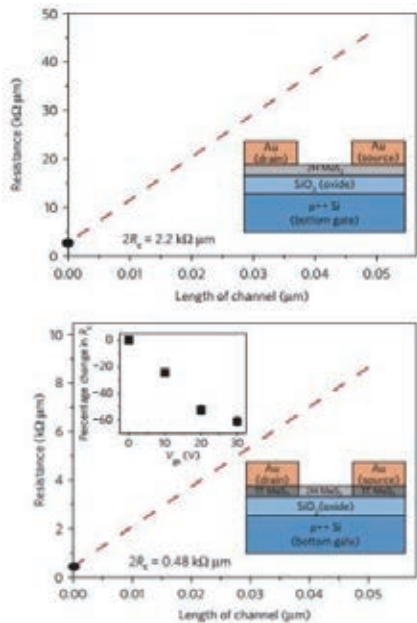


〈그림 18〉 MoS₂ 단일 층 광전자 소자^[25]

로 사용해 구조가 간단하며, 물질의 밴드 갭 이상의 파장의 빛이 들어오게 되면 들어온 빛의 에너지는 직접 천이에 따라 전하를 들뜨게 만들게 되고 이는 전자-홀쌍을 만들게 된다. 전극에서 인가 전압으로 인하여 나타나는 전하 장벽이 전자-홀쌍이 가지는 에너지 보다 낮게 되면 전류가 흐르게 되고 이 전기적 신호를 인지하여 인가하는 광 신호를 전기적 신호로 바꾸어주는 광전자 소자로 활용할 수 있다.

(6) 구조에 따른 물질 특성 차이를 이용한 접촉 저항 감소

2차원 물질을 이용해 채널로 사용 시 접촉하는 전극과의 접합면의 작용이 중요하게 작용한다. 동일 물질의 구조차이에 따른 성질 변화를 이용하여 전극과의 접촉 부분으로 사용하면 금속과의 직접 접촉 보다 접촉 저항이 작아지는 효과가 있다. n-부틸 리튬을 이용하여 일부 MoS₂를 금속 성질을 가지는 1T 구조로 변환시키는 리튬 치환 반응을 이용하여 전극과의 접촉 부분으로 사용하여 기존 접촉저항 대비(0.7 kΩ μm-10 kΩ μm) 낮은 저항 (200 Ω μm~300 Ω μm)결과를 얻었다.〈그림 19〉



〈그림 19〉 전극 접촉 물질 구조에 따른 접촉 저항 변화^[16]

V. 향후 연구 및 결론

지금까지 현재 연구 되고 있는 2차원 물질을 이용한 채널 소자 기술에 대하여 살펴보았다. 2차원 물질이 가지는 특징을 이용한 채널 소자에 대한 연구는 이제 단일 물질에 대한 연구에서 벗어나 서로 다른 2차원 물질 이중 접합간의 상호 작용, 단일 또는 이중 접합을 조합해 만든 논리 회로구현, 유연기판에 적용하여 투명성과 유연성을 모두 가진 소자로의 연구로 확장해 나가고 있다.

참고 문헌

[1] Manish Chhowalla, Hyeon Suk Shin, Goki Eda, Lain-Jong Li, Kian Ping Loh and Hua Zhang, "The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets" Nature Chem, 2013, 5, 263–275.

[2] Qing Hua Wang, Kourosh Kalantar-Zadeh, Andras Kis, Jonathan N. Coleman and Michael S. Strano, "Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides", Nature Nanotech, 2012, 7, 699–712.

[3] Han Liu, Yuchen Du, Yexin Deng and Peide D. Ye, "Semiconducting black phosphorus: synthesis, transport

properties and electronic applications", Chem Soc Rev, 2014.

[4] Andres Castellanos-Gomez, Leonardo Vicarelli, Elsa Prada, Joshua O Island, K L Narasimha-Acharya, Sofya I Blanter, Dirk J Groenendijk, Michele Buscema, Gary A Steele, J V Alvarez, Henny W Zandbergen, J J Palacios and Herre S J van der Zant, "Isolation and characterization of few-layer black phosphorus", IOP 2D materials 2014, 1, 1–19.

[5] Valeria Nicolosi, Manish Chhowalla, Mercurio G. Kanatzidis, Michael S. Strano and Jonathan N. Coleman, "Liquid Exfoliation of Layered Materials", Science, 2013, 340, 1226419.

[6] Lee Kheng Tan, Bo Liu, Jing Hua Teng, Shifeng Guo, Hong Yee Low and Kian Ping Loh, "Atomic layer deposition of a MoS₂ film", Nanoscale, 2014, 6, 10584–10588.

[7] Jeong-Gyu Song, Jusang Park, Wonseon Lee, Taejin Choi, Hanearl Jung, Chang Wan Lee, Sung-Hwan Hwang, Jae Min Myoung, Jae-Hoon Jung, Soo-Hyun Kim, Clement Lansalot-Matras and Hyungjun Kim, "Layer-Controlled, Wafer-Scale, and Conformal Synthesis of Tungsten Disulfide Nanosheets Using Atomic Layer Deposition", ACS Nano, 2013, 7, 11333–11340.

[8] Yumeng Shi, Henan Li and Lain-Jong Li, "Recent advances in controlled synthesis of twodimensional transition metal dichalcogenides via vapour deposition techniques", a Chem Soc Rev, 2014.

[9] Jaeho Jeon, Sung Kyu Jang, Su Min Jeon, Gwangwe Yoo, Yun Hee Jang, Jin-Hong Park and Sungjoo Lee, "Layer-controlled CVD growth of large-area two-dimensional MoS₂ films", Nanoscale, 2015, 7, 1688–1695.

[10] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti and A. Kis, "Single-layer MoS₂ transistors", Nature Nanotech, 2011, 6, 147–150.

[11] Likai Li, Yijun Yu, GuoJunYe, Qingqin Ge, Xuedong Ou, HuaWu, DonglaiFeng, Xian Hui Chen and Yuanbo Zhang, "Black phosphorus field-effect transistors", Nature Nanotech, 2014, 9, 372–377.

[12] Hyung-Youl Park, Myung-Hoon Lim, Jaeho Jeon, Gwangwe Yoo, Dong-Ho Kang, Sung Kyu Jang, Min Hwan Jeon,

Youngbin Lee, Jeong Ho Cho, Geun Young Yeom, Woo-Shik Jung, Jaeho Lee, Seongjun Park, Sungjoo Lee and Jin-Hong Park, "Wide-Range Controllable n-Doping of Molybdenum Disulfide (MoS₂) through Thermal and Optical Activation", ACS Nano, 2015, 3, 2368–2376.

[13] Branimir Radisavljevic, Michael Brian Whitwick, and Andras Kis, "Integrated Circuits and Logic Operations Based on Single-Layer MoS₂", ACS Nano, 2011, 12, 9934–9938.

[14] Han Liu, Adam T. Neal, Zhen Zhu, Zhe Luo, Xianfan Xu, David Toma 'nek and Peide D. Ye, "Phosphorene: An Unexplored 2D Semiconductor with a High Hole Mobility", ACS Nano, 2014, 4, 4033–4041.

[15] Oriol Lopez-Sanchez, DominikLembke, MetinKayci, Aleksandra Radenovic and Andras Kis, "Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂", Nature Nanotech 2013, 8, 497–501.

[16] Rajesh Koppera, Damien Voiry, Sibel Ebru Yalcin, Brittany Branch, Gautam Gupta, Aditya D. Mohite and Manish Chhowalla, "Phase-engineered low-resistance contacts for ultrathin MoS₂ transistors", Nature materials, 2014, 13, 1128–1134.

[17] Min Yi and Zhigang Shen, "A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene", Journal of Materials Chemistry, 2015, 3, 11700–11715.



최 승 혁

- 2015년 2월 한양대학교 응용물리학과 학사
- 2015년 3월~현재 성균관대학교 성균나노과학기술원 (SKKU) 나노과학기술학과 석박사 통합과정

〈관심분야〉
TMD 물질 합성, 화학 기상 증착 (CVD), 2차원 채널 소자 제작 및 연구



전 재 호

- 2013년 2월 한양대학교 응용물리학과 학사
- 2013년 3월~현재 성균관대학교 성균나노과학기술원 (SAINT) 나노과학기술학 석박사통합과정

〈관심분야〉
Transition Metal Dichalcogenides (TMD), 화학 기상 증착 (CVD), 2차원 소재 합성, 2차원 채널 소자



이 성 주

- 1989년 2월 서울대학교 공학사 (전자공학)
- 2012년 5월 University of Texas at Austin 공학박사 (전자공학)
- 1989년 3월~1998년 6월 삼성전기 종합연구소 선임연구원
- 2012년 3월~2013년 3월 일본 AIST 전임연구원
- 2013년 3월~2011년 8월 싱가포르 국립대학교 교수 (전자공학)
- 2011년 9월~현재 성균관대학교 교수 (성균나노과학기술원)

〈관심분야〉
저차원 나노 소재 및 소자, 저전력 전자소자, 신기능 전자소자