

# KENTECH 7월 과제

“2D 소재의 혁신: 그래핀, TMD, h-BN의 특성 및 응용 탐구”

전북과학고등학교

3109 이성훈

3111 전지호

3307 이송규

Q1. 그래핀, TMD, h-BN 소재 중 1가지 2D 소재를 선정하고 특성, 가격, 활용도 등의 측면에서 선정한 이유를 밝혀보자.

본 연구팀은 세 소재 중 TMD를 선정하기로 하였으며, 이에 대한 이유를 특성, 가격, 활용도의 측면에서 아래 설명하도록 하겠다. 그리고 본 연구팀은 반도체 소자에서 3가지 소재 중 어떠한 소재를 선택할지에 대해 연구하였다.

## 1. 세가지 소재에 대한 특성비교

### 그래핀

- 구조: 육각형의 탄소 원자로 이루어진 단일층 구조로 매우 높은 기계적 강도와 전기 전도성을 가짐.
- 전기적 특성: 전자가 자유롭게 이동할 수 있어 높은 전기 전도성을 가짐. 밴드갭이 없어 반도체 응용에는 제한적임.
- 광학적 특성: 투명하며, 광 흡수는 제한적임.
- 응용 분야: 고성능 트랜지스터, 배터리 전극, 투명 전극.

### h-BN(Hexagonal Boron Nitride)

- 구조: 그래핀과 유사한 육각형 구조이나, 붕소와 질소 원자들로 구성됨.

- 전기적 특성: 높은 절연성 (밴드갭 약 5.97 eV)으로 인해 전기적 신호를 전달하지 않음.
- 광학적 특성: 자외선 차단 특성.
- 응용 분야: 절연층, 배리어층, 항암 약물 운반체 .

## TMD

- 구조: 전이금속과 칼코겐 원소로 이루어진 2차원 구조.
- 전기적 특성: 적당한 밴드갭을 가져 반도체로서 매우 유용함. 전하 이동성이 우수하여 고성능 전자소자 제작에 적합.
- 광학적 특성: 가시광선 및 근적외선 영역에서 높은 광 흡수율을 가짐.
- 응용 분야: 트랜지스터, 센서, 광학 장치, 태양전지, 광검출기

이때, 본 연구팀이 TMD를 선택한 이유는 다음과 같다.

반도체 소자는 반도체의 전기 전도 특성을 이용한 전자 회로나 비슷한 장치에 주로 쓰이는 부품을 말한다.

이러한 반도체 소자들은 현재 이의 기능의 향상과 원가절감을 위해 소자의 크기 자체가 미세해지는 추세에 있다.

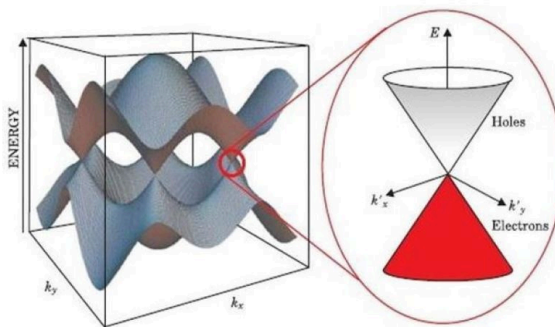
$$I_{dsat} = \frac{W}{2mL} C_{ox} \mu_{ns} (V_{gs} - V_t)^2$$

〈MOSFET 소자의 Saturation Current 방정식〉

MOSFET 소재의 drain current 방정식은 위와 같다. channel length(L)이 줄어들수록 on current가 증가하게 된다. 이렇게 전류값이 증가하게 되면, 소자의 속도가 향상되고 동일한 전류 특성을 구동시키기 위한 gate 전력( $V_{gh}$ )이 작아지기 때문에 전력 소모를 줄일 수 있으며 등 channel length가 줄어들 때 MOSFET은 여러가지 장점을 지닌다.

그러나 이러한 미세화 단계에서 Si 기반 반도체의 경우 채널의 길이가 짧아지면서 DIBL, GIDL, HCI, Punch through 등의 여러가지 문제가 나타났는데, 이를 SCE(Short Channel Effect)라고 한다.

따라서, 현재 반도체의 미세화에 따라 Si를 대신할 수 있는 여러가지 2D 반도체가 고려되고 있으며, 본 프로젝트에서 제시된 그래핀, h-BN, TMD 모두 이 과정에서 연구되고 있는 소재들이다.

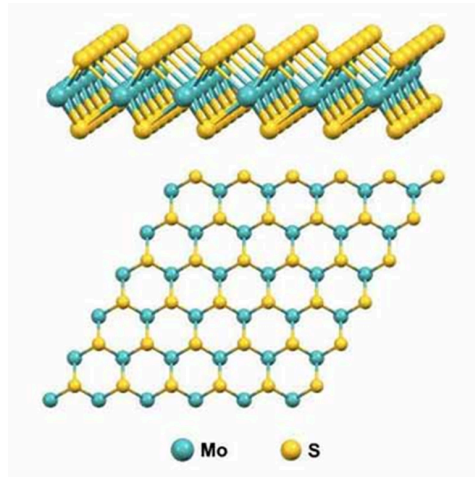


<그래핀의 밴드갭>

(출처 : K. Kumar, B.C. Yadav, An Overview on the Importance of Chemical Vapour Deposition Technique for Graphene Synthesis, Advanced Sci. Eng. Med., 10, 2018, pp.1-4.)

이차원 물질을 이용한 반도체(2D 반도체)의 경우, 초기에는 그래핀에 관한 연구가 진행되었으나 이의 경우 아래 그림과 같이 balance band와 conduction band가 밴드갭을 가지고 떨어져 있는 것이 아닌 맞닿아 있는 화학적 특성을 가지고 있기 때문에 MOSFET의 제작이 어렵다는 단점을 가지고 있었다. 이에 따라 TMD는 새로운 반도체 소자 대체제로 주목받고 있다. 최근 2차원 나노물질은 기존 반도체 소자의 Short channel effect 문제점을 해결하는 반도체 소자 제작 가능성을 가진 물질로 대두되고 있다. 그중에서도 전이금속칼코겐화합물(Transition Metal Dichalcogenides: TMDCs)물질은 우수한 전기적 특성을 가진 물질로 차세대 소자 제작에 있어 두드러지고 있는 물질이다. 전이 금속 칼코젠 화합물은 반데르발스 결합으로 약하게 결합하여 있으며 2차원 반도체의 구조를 지닌다. 또한 TMDC는 다양한 두께로 제작할 수 있으며, 얇은 박막 두께와 높은 이동도(수십~수백  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ), 스위칭 역할을 잘할 수 있는 on/off 비를 가지고 있다는 장점이 있다. TMDC의 대표 물질로는 MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub> 등이

존재한다. 최근에는 여러 층의 두께를 지닌 얇은 박막 형태의 MoSe<sub>2</sub> 물질과 더불어 다른 TMDCs를 채널 물질로 사용하여 제작한 전자소자의 특성이 약 10<sup>7</sup>의 높은 on/off ratio와 50 cm<sup>2</sup>/V·s 이상의 높은 전하 이동도를 갖는 것으로 밝혀졌다.



〈TMDCs 중 하나인 MoS<sub>2</sub>〉

이때, h-BN의 경우 현재의 h-BN 합성법은 벌크 형태의 h-BN 결정으로부터 기계적 박리(micromechanical cleavage)법을 이용하기 때문에 실질적 응용에 한계가 있다는 단점이 있다.

이에 반해 TMD의 경우 화학 기상 증착법등의 방법으로 물질 자체를 합성할 때 원하는 영역에서 선택적으로 물질을 바로 증착할 수 있기 때문에, 반도체 산업의 관점에서 h-BN보다 공정 과정에서의 이점이 뛰어나다고 볼 수 있을 것이다.

본 연구팀은, 이러한 TMD의 장점을 긍정적으로 평가하고, 반도체 소자에서 3가지 소재중 TMD를 사용하는것이 가장 적절할 것으로 생각하였다.

## Q2. 선정된 소재의 특성에 기반하여 활용할 수 있는 분야는?

TMD의 특성은 다음과 같다.

### 1. 구조적 특성

전이금속 칼코겐화합물(TMD)은 일반적으로  $MX_2$  형태로 표현되며, 여기서 'M'은 전이금속 원소(예: Mo, W)이고, 'X'는 칼코겐 원소(예: S, Se, Te)이다. 이러한 구조는 고유한 전자적, 광학적, 그리고 화학적 특성을 부여한다. TMD는 그래핀처럼 단일 원자층으로 구성되어 있지만, TMD는 그래핀과 달리 직접 밴드갭을 가지고 있어 반도체 성질을 나타낸다.

### 2. 전기적 및 광학적 특성

TMD는 뛰어난 반도체 특성을 가지고 있으며, 전하 이동도와 전자 및 홀 이동도가 높다. 특히  $MoS_2$  와 같은 일부 TMD는 약 1.8 eV의 직접 밴드갭을 가지고 있어 광전자 소자로서의 활용 가능성이 큰 장점이 있다.

### 3. 기계적 특성

TMD는 높은 기계적 강도를 가지고 있으며, 유연한 전자기기와 같은 응용 분야에 적합하다. 또한, TMD는 그래핀과 마찬가지로 매우 얇지만 내구성이 뛰어나며, 변형에도 강한 특성을 나타낸다.

본 연구팀은 이러한 TMD 소재의 특성 중에서 전기적 및 광학적 특성에 집중하여 탐구하였다. 지금까지의 반도체 소자는 Si 기반인 반도체이다. 이러한 기존의 반도체는 위의 내용에서 기술했듯이 소자 자체의 크기가 줄어들면서 SCE등에 해당하는 여러가지 문제점이 존재하게 된다. 따라서 2D 소재 중 전기적 특성이 뛰어난 TMD를 이용한다면 short channel effect 등을 해결함으로써 소자 미세화에 기여, 반도체 분야에서의 발전을 이룰 수 있을 것이라 생각한다.

**Q3. 선택한 소재가 해당 분야의 발전에 어떻게 기여할 수 있는지 설명해보자. 이 소재를 도입함으로써 어떤 문제를 해결하거나 기술의 발전을 이끌 수 있는지 생각해보고 선택한 소재의 특성이 어떻게 해당 분야에서의 기술 혁신을 촉진할 수 있는지 고려해보자.**

TMD를 반도체 소자 channel의 재료로 채택하게 될 경우, 이후 다수의 연구가 필연적이겠지만 현재 Si 기반 반도체의 한계로 나타나는 SCE를 효과적으로 극복하여 반도체 소자 미세화에 기여할 것으로 보인다.

또한 TMD의 경우 h-BN 보다는 좋은 생산성을 가지고 있고, 그래핀과는 달리 적절한 밴드갭을 가지고 있어 반도체 소자로 사용하기에 좋은 특성들을 다수 가지고 있기 때문에, 해당 분야에서 결과적으로 우리 생활과 직접적으로 연관된 컴퓨터의 연산속도 등을 향상시킬 수 있을 것이다. 이러한 발전과 혁신은 단순히 반도체 분야에 한정된 것이 아닌 사회 전반의 발전을 이룰 수 있을 것이라 감히 예상하여 본다.