

반데르발스 2차원 반도체소자의 응용과 이슈

<https://doi.org/10.5757/vacmac.5.2.18>

임성일

Trend and Issues of van der Waals 2D Semiconductor Devices

Seongil Im

Two dimensional (2D) van der Waals (vdW) nanosheet semiconductors have recently attracted much attention from researchers because of their potentials as active device materials toward future nano-electronics and -optoelectronics. This review mainly focuses on the features and applications of state-of-the-art vdW 2D material devices which use transition metal dichalcogenides, graphene, hexagonal boron nitride (h-BN), and black phosphorous: field effect transistors (FETs), complementary metal oxide semiconductor (CMOS) inverters, Schottky diode, and PN diode. In a closing remark, important remaining issues of 2D vdW devices are also introduced as requests for future electronics and photonics applications.

서론: 2차원 반도체 소자의 중요성

2차원 반데르발스 반도체 연구는 2차원 원자층에서만 존재하는 심오하고 복잡한 물리현상의 연구뿐만 아니라 전자소자와 재료공학의 입장에서라도 매우 중요한 연구이다. 왜냐하면 그간의 전통적인 반도체의 특성에 버금가는 혹은 압도할 수 있는 새로운 물리적 특성을 보여주기

때문이며 소자제작의 측면에서도 새롭기 때문이다. 즉, 기존의 대표적인 반도체인 Si, GaAs, 외의 epitaxial 화합물 반도체와는 달리 한 개의 원자층으로도 반도체의 특성을 나타내며 표면은 dangling bond를 갖지 않아서 2차원 원자층 한 개로도 고성능 전자소자를 제작할 수 있다. 뿐만아니라 두꺼운 물질은 반데르발스 층상 결합으로 되어있어 층마다 분리될 수 있으며 film의 두께가 달라질 때 마다 밴드갭이 작아지는 특성이 있다. 서로 다른 2차원 반도체 물질을 층별로 결합한다면 새로운 물질을 합성하는 셈이되어 신 반도체물질의 물리적 합성이 이론적으로 가능하다. 이와같은 이론적 배경을 가지고 연구자들은 Si, GaAs, 혹은 여러 epitaxy 층을 갖는 기존의 3차원 반도체 물질의 대체 가능성을 연구하고 있는 데 또 다른 이유는 기존의 반도체공정이 고비용 고진공을 요구하는 것에 비하여 2차원반도체의 경우, 저가의 공정이 요구되기 때문이다. 한편, 2차원 반도체는 실질적으로 밴드갭을 갖지 않는 그래핀, 뚜렷한 밴드갭을 갖는 전이금속 다이 칼코지나이드 (Transition metal dichalcogenide: TMDC) 혹은 흑린 (Black Phosphorous: BP), 부도체와 같이 큰 밴드갭을 갖는 hexagonal boron nitride (h-BN)으로 나누어 볼 수도 있다. 그림1은 이와같은 2차원 반데르발스 물질을 나타내고 있다.



<저자 약력>

임성일 교수는 1984년 연세대 공대 금속공학과에서 공학학사를, 86년 공학석사를 취득하였고, 1994년 미국 UC Berkeley 재료공학과에서 공학박사를 취득하였다. 그후 Caltech 응용물리학/전기공학과 에서 2년간 Postdoc을 하였으며 1997년 3월 연세대 공대 신소재 공학과로 부임하였고 1999년 8월부터는 본교 물리학과에 재직 중이며 2017년 이후 현재 연구재단 선도연구센터 (SRC)인 반데르발스 물질연구센터의 센터장직을 수행하고 있다.(semicon@yonsei.ac.kr)

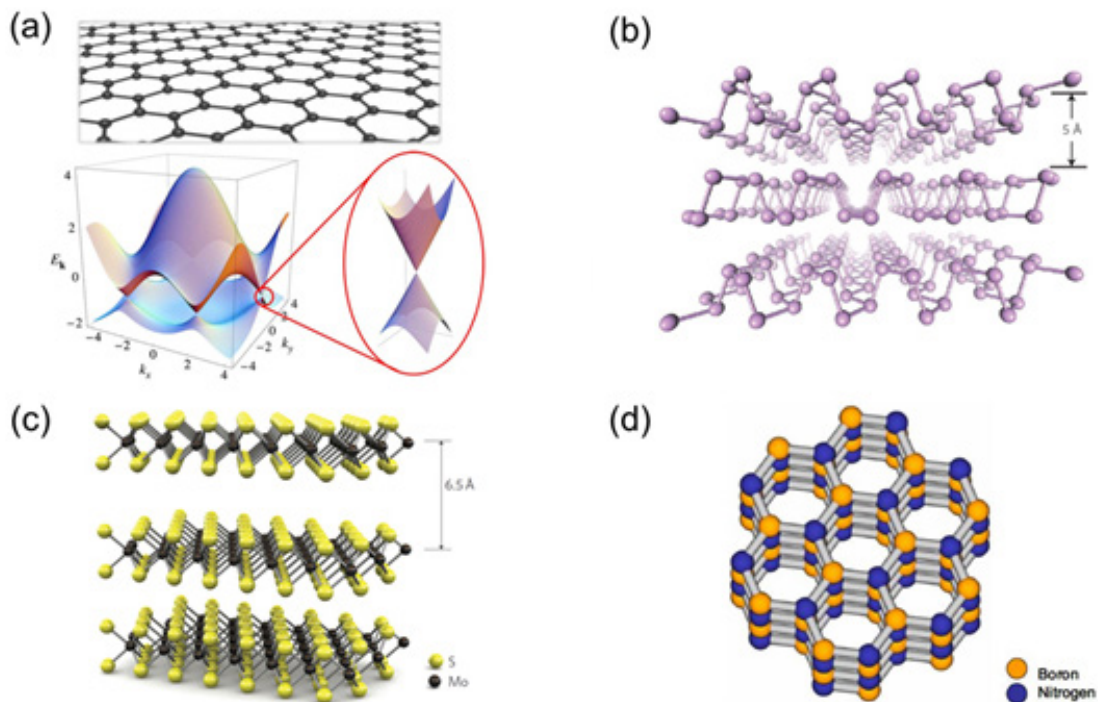
본론: 각종 2차원 반도체 소자 및 연구 동향

이와 같은 각종 반데르발스 2차원 물질을 적용한 소자들을 살펴본다면 크게는 전자소자와 광소자로 대 별할 수 있을 것이다. 따라서 다음에서는 반데르발스 물질을 적용한 전자소자와 광소자, 그리고 신개념의 전자/광소자들에 대하여 살펴보기로 하겠다. 그리고 소자제작에서의 미세결 이슈들에 대하여서도 살펴보려고 한다.

1. 반데르발스 2차원 물질을 적용한 나노전자 소자 및 나노 광소자 구현

반데르발스 접합으로 이루어진 2차원 나노물질들은 전기 및 광학적으로 다양한 물리적인 현상과 더불어 신소자 활성층으로의 잠재력을 가지고 있어 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 최신 경향을 반영한 2차원 반도체 물질인 MoS_2 , WSe_2 , MoTe_2 , 흑린 등을 통해 다양한 물질 특성이 이미 발표되었으며 대표적인 전자소자로는 metal insulator semiconductor field effect transistor (MISFET)의 발표가 가장 주류를 이루고 있으며, 강유전

비활성 메모리 MISFET, 쇼트키 다이오드, PN 다이오드, CMOS 인버터, 태양광 나노전지 등의 응용소자들도 발표되어왔다. 이러한 2차원 나노반도체 소자들은 3차원 실리콘 반도체소자와는 달리 이론적으로는 표면/계면결함이 없으며 대체로 고이동도를 보여주고 있어 실리콘 반도체의 단점을 보충할 수 있는 미래 전자소자로서 큰 역할이 기대된다. 다만, 금속 전극과의 접촉저항이 크고 P, N 도핑이슈가 해결되지 않아 많은 연구가 필요한 단계에 있다. 본 연구실에서는 이러한 이슈들을 해결하는 방향의 연구와 더불어 각종 소자연구를 수행하고 있어, 그 결과로 흑린을 이용한 이중게이트 트랜지스터 및 논리회로 [5], 불소중합체 표면층을 이용한 표면 홀 도핑된 WSe_2 트랜지스터 [6], p- MoTe_2 , n- MoS_2 를 이용한 CMOS 인버터 소자 [6] 및 이중접합 PN 다이오드 [7], 선택적 ALD 도핑법을 이용한 동종 2차원 MoTe_2 PN 다이오드 및 CMOS [8] 인버터 구현의 연구들을 발표해왔다. 또한 앞서 다가올 미래를 대비하는 응용소자의 방향을 제시하여 4차 산업혁명과 IoT (Internet of things) 시대에 걸맞은 소자에 사용될 수 있는 2차원 소자기술을 현재의 기술적 이슈와 함께 리뷰논문을 통해 논의 하였다. 그림 2는 리



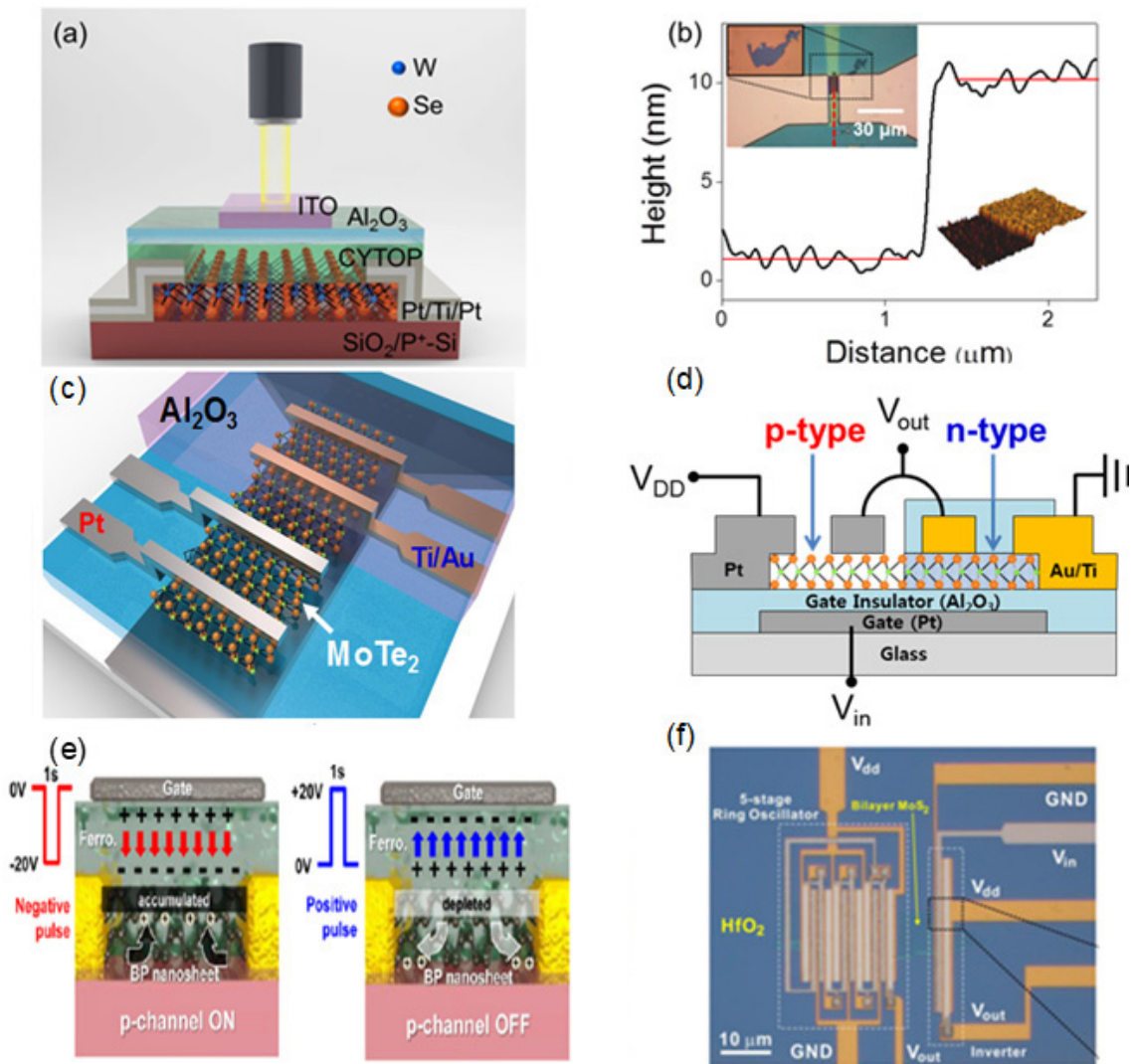
[Fig. 1] (a) 그래핀 및 디랙포인트 밴드구조 [1] (b) 흑린의 층상구조, [2] (c) TMDC MoS₂의 층상구조 [3] (d) h-BN의 층상구조. [4]

뷰논문에 소개된 여러가지의 응용 소자들을 보여주고 있다. [9,10,11]

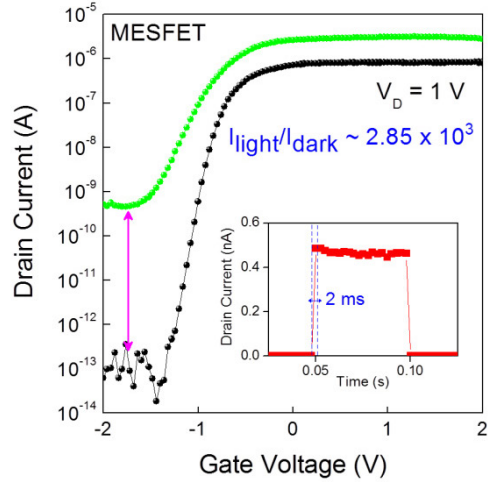
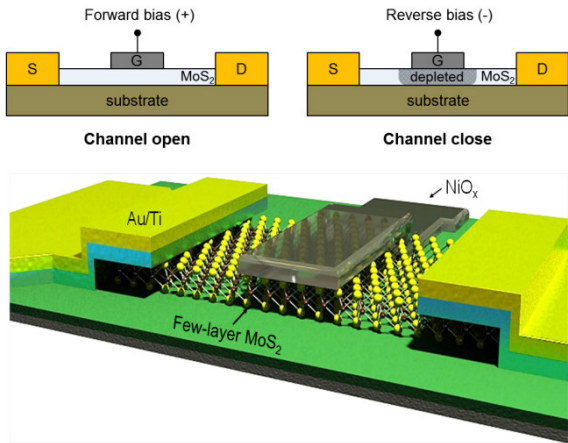
2. 반데르발스 2차원 물질을 적용한 신개념 나노 전자소자의 구현

2차원 소자에서는 2차원 물질의 독특한 특성과 구조에 기인하여 기존의 소자방식을 넘어서는 신개념 소자의 연구가 적극적으로 수행될 필요가 있다. 기존의 2차원 전계효과 트랜지스터인 유전체 적용 FET (MISFET) 소자

는 불안정한 절연층 계면 및 동작 전압, 큰 이력현상 및 음의 문턱전압 등의 문제들을 가지고 있어서 다양한 응용소자로 활용되기에는 좋지 않은 여러 가지 요소들을 가지고 있다. 이를 해결하기 위한 한가지 방편으로 기존 MISFET 구조가 아닌 금속산화물 전도체 NiOx와 MoS2 쇼트키 접합 특성을 이용하는 Metal Semiconductor Field Effect Transistor (MESFET)가 시도되었고 마침내 구현되었다. 그림3은 소자의 모식도와 특성을 보여준다. MESFET 소자의 경우 NiOx와 MoS2는 계면에 반데르발스 접합을 이루며 절연층이 존재 하지 않아 계면에



[Fig. 2] 2차원 나노반도체 층을 이용한 응용소자들, (a) 상부 gate 패턴된 WSe₂ 2차원 물질 FET소자/광트랜지스터 소자로 WSe₂ 채널위에 투명게이트 전극사용, (b) WSe₂ 소자의 현미경 사진 및 atomic force microscopy를 적용한 채널두께 측정 (c) MoTe₂ CMOS 인버터 및 (d) PN junction 다이오드; p-type 채널부분은 Pt전극을 ALD로 수소도핑된 n-type부분은 Ti/Au 전극을 소스와 드레인으로 사용함, (e) 유기물 강유전 유기막을 흑린 채널위에 적용하여 제작된 강유전 비휘성 Memory FET 소자의 메모리 특성. (f) Bilayer 원자층 MoS₂를 적용한 Ring Oscillator 소자[10]



[Fig. 3] MESFET 소자의 3차원 모식도 및 구동 원리와 녹색광 반응에 따른 전류-전압 특성 곡선

결함이 매우 적다. 이러한 효과로 MESFET 소자는 이동도가 약 500–1200 cm²/Vs, 점멸비는 10⁶ 정도로 고성능 소자특성을 보였고 1 V 정도의 낮은 구동 전압 및 -1~2 V의 낮은 문턱전압을 보여주었다. 계면 trap 결함밀도가 낮기 때문에 가시광 반응은 기존 전계효과 트랜지스터인 MISFET 보다 100배나 빠른 2 ms 정도로 보고되었다.[12]

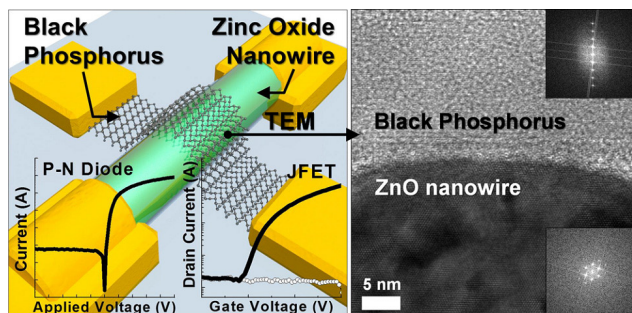
또한 MESFET 구조와 비슷한 Junction 트랜지스터 (JFET) 또한 시도되었다. P형 반도체인 흑린 나노막과 N형 산화아연 나노선의 반데르발스 계면접합으로 한 기관에 PN 다이오드 겸용의 JFET을 제작하여 흑린 나노막의 활용범위를 넓히고, 이중접합 흑린/ZnO PN 다이오드, 흑린 게이트 용 JFET 각각의 소자에 대한 전기적 특성에 대하여 알아보았다. 또한 간단한 회로를 꾸며 PN 다이오드의 정류작용을 확인하였고, 또 흑린/산화아연 나노선 JFET에 저항을 연결하여 인버터 소자를 구현하고 소자

의 정적/동적 거동을 연구하였다.[13] 그림4는 JFET 소자의 모식도와 개략적 특성 및 흑린/나노선 계면에 대한 투과전자 현미경 결과를 보여준다.

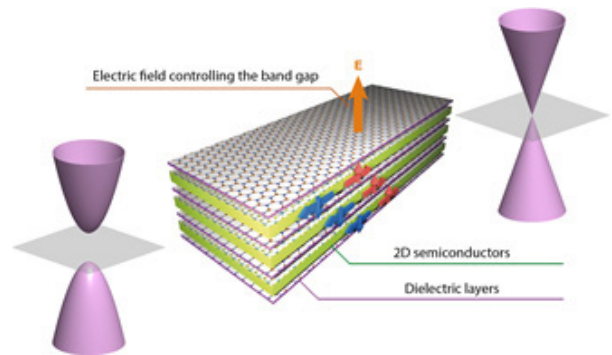
이외에도 본 연구실에서는 터널링 FET 및 2차원 BJT, 2차원 적층 FET등의 신개념 소자들을 연구하고 있으며 이같은 연구들은 물리학적으로 또한 응용 학문적으로 실제적이면서도 깊은 고찰을 요할 것으로 사료된다. 예를 들어 그림5는 흑린 나노막을 적용한 신개념 양자소자의 개념도로써 전계효과에 반응하는 에너지갭 변화현상을 이용하는 밴드갭 양자소자가 될 전망이나 아직은 구현되지 않았다.[14]

3. 2차원 반도체 소자의 미해결 이슈들

앞서 발표된 2차원 반도체 전자소자들은 차세대 반도체로서 물질과 구조의 측면에서 매력적인 면이 많으나 현



[Fig. 4] 흑린 나노막과 산화아연의 접합부에서의 모식도 및 주사투과전자 현미경 사진



[Fig. 5] 반데르발스 물질 흑린 나노막을 적용한 신개념 양자소자의 개념도

재로써는 다음과 같이 해결되지 않은 이슈들을 가지고 있다.

첫째, FET소자들의 접촉저항 문제이다. 소스 드레인 접촉저항은 그래핀을 사용하지 않는 이상 상당히 큰 값을 보여주고 있어 스위칭 소자의 RC delay에 영향을 준다. 전세계적으로 접촉저항을 낮추려는 연구가 계속되고 있다.

둘째, PN doping의 문제가 있다. 2차원 반도체들은 물론 게이트 전압에 의하여 P에서 N형으로 채널 type이 변화받을 수 있지만, 첨가원소에 의한 PN doping이 정량적으로 가능하여야 PN 다이오드 등의 전자소자와 광전자소자 제작이 용이하다. 이러한 이슈 역시 연구가 계속되고 있다.

셋째로, 현재까지 보고 된 P채널이나 N채널 MISFET 소자들은 대체로 FET의 문턱전압이 너무 크고 문턱전압이 소자제작시 같은 값을 보여주지 못하여 재현성이 없다는 점을 들 수 있다. 이 문제는 게이트 절연막과 2차원 반도체 채널계면에 존재하는 charge trap에 의한 것으로 아직도 계면 트랩 극소화 연구가 진행중이다.

마지막 이슈는 소자의 대면적화에 관한 것으로써 CVD 방법에 의한 2차원 막의 대면적화는 많은 발표와 더불어 그 FET소자들의 전하 이동도가 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이상으로 큰 발전을 이루었지만 이동도의 지역적 균질화등 미해결된 이슈가 존재한다. 이 외에도 소자표면의 봉지화를 통한 이력곡선 제어등 여러 가지 다른 문제들이 존재하고 있는 상황이다.

맺는말

위에서 살펴본 바와 같이 2차원반도체 소자는 원자층 만으로도 FET 및 PN다이오드 소자를 제작할 수 있다는 점에서 또한 층수에 따라 물리적 특성이 변화하고 여러 가지 다른 2차원 물질층을 적층하여 신물질 특성을 낼 수 있다는 점에서 전 세계의 순수과학자와 응용과학자들의 많은 관심을 이끌어왔다. 또한 국내에서도 선도연구센터 (SRC)인 반데르발스 물질연구센터 (vdWMRC) 를 중심으로 방향성 있는 소자 및 물질연구가 진행되고 있다. 학자들의 관심 주제들은, 기존 반데르발스 반도체 소자의 문제점 해결, 2차원 PN 접합등 여러 가지 각종 이중 접합 반데르발스 계면 에서 관찰되는 현상 연구, 실제 소

자적용 응용물리학 전개, 터널링을 비롯한 양자물리 현상연구, 각종 2차원 양자소자 구현 및 1차원 2차원 3차원의 복합차원 소자 구현등 신개념 2차원 반데르발스 반도체 소자 연구등으로 나열되며 앞으로 적어도 10년 이상은 이와 같은 연구들이 산업계에 적용될 것을 목표로 진행될 것으로 예상된다.

References

- [1] A. H. C. Neto, et al. Rev. Mod. Phys. 81, 109 (2009).
- [2] L. Li, et al. Nat. Nanotechnol. 9, 372 (2014).
- [3] B. Radisavljevic et al. Nat. Nanotechnol. 6, 147 (2011).
- [4] C. R. Dean et al. Nat. Nanotechnol. 5, 722 (2010).
- [5] J. S. Kim et al. Nano Lett. 15, 5778 (2015).
- [6] S. H. H. Shokouh et al. Advanced Fuctional Materials 25, 7208 (2015).
- [7] A. Pezeshki et al. ACS Nano 10, 118 (2016).
- [8] A. Pezeshki et al. Advanced Materials 28, 3216 (2016).
- [9] J. Y. Lim et al. Advanced Materials 29, 1701798 (2017).
- [10] H. Wang et al. Nano Lett. 12 (2012) 4674-4680.
- [11] K. Choi et al. Nano Today, 11, 626 (2016).
- [12] H. S. Lee et al. ACS Nano 6, 8312 (2015).
- [13] P. J. Jeon et al. Nano Lett. 16, 1293 (2016).
- [14] K. S. Kim et al. Science 349, 6249 (2015).